

REPUBLIQUE DU SENEGAL
MINISTERE DE L'AGRICULTURE
DE L'HYDRAULIQUE RURALE ET DE
LA SECURITE ALIMENTAIRE

=====



Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
Centre National de Recherches Agronomiques

***IMPACT DU SYSTEME D'UTILISATION DES TERRES DU
BASSIN FLUVIO-MARIN DU SALOUM SUR L'EVOLUTION DE
LEUR FERTILITE***

MEMOIRE DE CONFIRMATION

Présenté et soutenu publiquement au Centre National de la Recherche Agronomique de
Bambey le 29 Novembre 2006

Par

Dr Cheikh Tidiane DIOP

Commission d'examen

Président : Dr Ousmane NDOYE

Chef du Centre National de la Recherche Agronomique de Bambey (ISRA)

Membres :

Dr. Jean Pierre NDIAYE, Directeur de Recherches, CT1 Directeur Général/ ISRA

Dr. Modou SENE, Directeur de Recherches, CERAAS/ISRA, Maître de Stage

Dr. Mateugue DIACK, Maître Assistant, UGB

Dr. François MATTY, Maître Assistant, UCAD

Novembre 2006

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS

RESUME

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

Chapitre I - Introduction.....	1
Chapitre II - Système d'utilisation des sols.....	4
II.1 Présentation du bassin fluvio-marin du Saloum	4
II.1.1 Localisation	4
II.1.2 Le cadre biophysique.....	4
II.1.2.1 Les données climatiques	4
II.1.3 La végétation et les unités morphopédologiques.....	5
II.1.3.1 Le domaine estuarien.....	5
II.1.3.2 Le domaine des tannes.....	5
II.2 Dégradation de la biodiversité du Bassin du Sine Saloum.....	6
II.3 Le système d'utilisation des terres.....	7
II.3.1 Zone exondée.....	8
II.3.1.1 Système de culture.....	8
II.3.1.1.1 Les systèmes de culture manuels à faible intensification	8
II.3.1.1.2 Les systèmes de culture manuels intensifiés	9
II.3.1.1.3 Les systèmes de culture mécanisés à traction animale	9
II.3.1.2 Système d'élevage	10
II.3.2 Zone fluvio-marine	11
II.3.2.1 Système de culture.....	11
II.3.2.2 Système d'élevage	11
II.4 Types de sols	12
II.4.1 Les types de sols en zone exondée	12
II.4.2 Les types de sols en zone fluvio-marine.....	13
II.4.2.1 La morphogenèse.....	13
II.4.2.2 La pédogenèse	14
II.4.2.3 Les types de sols salés	15
II.4.2.4 Les caractéristiques principales de ces sols.....	15
II.4.2.4.1. Sols salés sulfatés	15
II.4.2.4.2 Sols sulfatés acides salés	16
II.4.2.4.3 Sols sulfatés acides hydromorphes salés	16
II.5 Causes de dégradation des sols et les pratiques culturelles	17
II.5.1 Les causes et les types de dégradation possibles des sols	17
II.5.1.1 Cas des sols exondés en culture pluviale non soumis à la salinité	17

II.5.1.1.1 Acidification	17
II.5.1.1.2 Erosion	19
II.5.1.1.2.1 Erosion éolienne	20
II.5.1.1.2.2 Erosion hydrique.....	20
II.5.1.2 Cas des sols traditionnellement rizicultivés et soumis à la salinité	23
II.5.1.2.1 Salinisation	23
II.5.1.2.2 Alcalinisation.....	24
II.5.1.3 Cas des sols fluvio-marins	24
II.5.1.3.1 Sursalure et acidification du domaine	24
II.5.1.3.2 Conséquences sur l'environnement	25
II.5.1.4 Conclusions sur la dégradation des sols	26
II.6 Différentes approches de bonification des sols salés et sulfatés acides	27
Chapitre III : Synthèse des principaux résultats du Projet de restauration agronomique des sols salés (PRASS)	
	29
III.1 Introduction	29
III.2 Matériels et méthodes.....	30
III.2.1 Dispositif et conduite de l'essai	31
III.2.1.1 Dispositif expérimental	31
III.2.1.2 Disposition des piézomètres et traitements	32
III.2.2 Volet Hydro-pédologique.....	34
III.2.2.1 Caractérisation du site expérimental: nappe et sol	34
III.2.2.2 Suivi des paramètres du sol et de la nappe	34
III.2.3 Volet Ecologie-Agroforesterie	34
III.3 Les principaux résultats acquis.....	34
III.3.1 Caractérisation du site	34
III.3.2 Evolution des caractéristiques de la nappe et du sol	36
III.3.2.1 La nappe	36
III.3.2.2 Le sol	37
Chapitre IV-Effet du traitement biomécanique sur quelques paramètres chimiques du sol déterminés deux ans après la fin du PRASS	
	38
IV.1 Introduction	38
IV.2 Matériels et Méthodes	38
IV.2.1 Paramètres essentiels et leur signification	38
IV.2.2 Conduite de l'essai et prélèvements des échantillons de sol.....	39
IV.3 Analyses de laboratoire des échantillons de sols prélevés	39
IV.3.1 Préparation des échantillons.....	39
IV.3.2 Les analyses chimiques	40
IV.3.2.1 Le pH.....	40
IV.3.2.2 La conductivité électrique (C.E)	40
IV.3.2.3 Le Carbone	41
IV.3.2.4 Le complexe adsorbant et la capacité d'échange cationique	41
IV.4 Analyse statistique des données	42
IV.4.1 Analyse en composantes principales (ACP)	42
IV.4.2 Analyse de la variance multivariée	42

IV.4.3 Analyse canonique discriminante	43
Chapitre V - Résultats	45
V.1 Résultats des analyses chimiques	45
V.1.1 Le pHeau	45
V.1.2 Le pHkcl	47
V.1.3 Les pHeau moyen et pHkcl moyen	48
V.1.4 La conductivité électrique (C.E)	49
V.1.5 Le Carbone	51
V.1.6 Les bases échangeables	54
V.2 Les analyses multivariées	56
V.2.1 Analyse en composantes principales (ACP) et les résultats	56
V.2.2 Analyse de la variance multivariée	62
V.2.3 Analyse canonique discriminante	63
Chapitre VI - Discussions	66
VI.1 Discussions des analyses chimiques	66
VI.1.1 Le pHeau	66
VI.1.2 Le pHkcl	67
VI.1.3 Les pHeau moyen et pHkcl moyen	67
VI.1.4 La conductivité électrique (C.E)	67
VI.1.5 Le Carbone	68
VI.1.6 Les bases échangeables	68
VI.2 Discussions des données statistiques	69
VI.2.1 Analyse en composantes principales (ACP)	69
VI.2.2 Analyses et interprétations des résultats	70
Chapitre VII - Conclusion et perspective	71
VII.1 Identification et sélection des paramètres chimiques fiables	72
VII.2 Analyse comparée des résultats obtenus: fiabilité des paramètres et leur interprétation	72
Références Bibliographiques	74

REMERCIEMENTS

A mes parents

*Je dédie ce travail à mon Papa Samba Cor DIOP et à ma Maman Adjaratou Magatte FALL,
"paix à leur âme"*

Ce travail a été réalisé dans le cadre de mon mémoire de confirmation de Chargé de recherches et financé par les recettes propres du Laboratoire Central d'Analyses (sols, eaux et plantes) du CNRA de Bambey.

Au terme de ce travail, dont le sujet a été défini par Dr. Modou SENE et dont j'ai pu comprendre la véritable dimension, je remercie Dr. Papa Abdoulaye SECK, Directeur Général de l'ISRA pour m'avoir recruté et mis à la disposition de son Directeur Scientifique, Dr. Taib DIOUF qui n'a ménagé aucun effort en vue de mon insertion dans le personnel scientifique en complément effectif. Qu'il en soit vivement remercié.

Mes remerciements vont également à :

- Dr. Modou SENE, Directeur de Recherche, d'avoir accepté de suivre ce travail d'amont en aval, malgré ses occupations multiples;
- Dr. Ousmane NDOYE, Maître de Recherche et Chef du Centre National de la Recherche Agronomique de Bambey, pour sa collaboration dans mon installation comme Responsable du Laboratoire Central;
- L'ensemble des membres du jury qui ont eu l'amabilité d'accepter d'évaluer cette modeste contribution scientifique;
- Dr. Jean Pierre NDIAYE, Directeur de Recherche et Conseiller Technique N° 1 du Directeur Général de l'ISRA, pour ses observations et suggestions apportées.
- Dr. Abdou NDIAYE, Maître de Recherche et Chargé de Mission auprès du Directeur Scientifique pour ses conseils à tous les niveaux, ainsi que sa famille;
- Dr. Ibrahima DIEDHIOU, Chercheur au CNRA, pour avoir critiqué et corrigé ce travail;
- Dr. Tanor N'DAO, Chercheur au CNRA, pour les discussions enrichissantes et l'orientation du traitement statistique des données;

- Dr. Cheikh Bassirou MBacké, Professeur à l'ENSA pour ses conseils prodigués;
 - L'équipe de travail du laboratoire: Messieurs Seydou BA, Moussa NDOYE, Mame Khémesse THIAW, Papa Madické LO, Papa Serigne SARR, qui ont facilité la réalisation pratique de ce travail.
 - Mr. Mamadou LO, Chercheur au CNRA pour ses conseils;
 - Mme Rosalie DIOUF, Responsable du Service de la documentation du CNRA, pour sa promptitude et sa disponibilité.
 - La Direction, le personnel administratif et comptable, ainsi que le personnel d'appui de la gestation de station, le centre d'accueil du CNRA de Bambey.
 - Un grand merci à ma famille, particulièrement à Mr. Aynina DIOP, Directeur d'école élémentaire à Dakar, qui m'a toujours mis sous son aile protectrice, ainsi que sa famille,
 - A mon grand- frère et ami Ingénieur Nouhoum DIOP, expert portuaire au Port autonome de Dakar et sa famille;
 - A ma tante Yacine GUEYE, demeurant une maman sans commune mesure et sa famille;
 - A mon épouse et à notre enfant, je demande pardon pour mon absence.
- Enfin à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

RESUME

Le bassin arachidier représente à côté des autres systèmes agro-écologiques une des zones de prédilection dans le domaine de la recherche sur la thématique de dégradation de ses écosystèmes. Une revue des différents types de dégradation de ses sols en rapport avec la pluviométrie et les pratiques culturales sous ses aspects les plus diversifiés (acidification, alcalinisation, érosion éolienne et /ou hydrique, salinisation) nous a permis d'approcher de façon holistique la question.

Dans un contexte de pression foncière aiguë, la régénération biologique des sols salés de cette superficie de terre extrêmement utile, demeure indispensable. Des mesures d'urgence s'imposent au niveau des terres du domaine fluviomaritime du Saloum pour chercher à lever deux contraintes majeures: la salinité et l'acidification, pour leur mise en valeur forestière à court terme et agricole à long terme.

Faisant la synthèse de l'état des connaissances, en s'appuyant particulièrement sur les acquis du projet PRASS sous ses différents volets (mais surtout hydro-pédologie et de l'écologie-agroforesterie avec des espèces halophytes notamment *Tamarix aphylla*, *Atriplex lentiformis* et *Distichlis spicata*), nous avons cherché à caractériser avec des paramètres chimiques l'état de fertilité du sol. Le paramètre d'intérêt est suivi par horizon (0-5 cm, 15-25 cm, et 50- 65 cm pour le traitement par rapport au témoin) dans le dispositif expérimental.

Dans la recherche des solutions pour le dessalement des terres, le réseau de diguettes dans un système mixte arbres/herbacées fourragères tolérants à la salinité peut nous servir désormais comme cadre fiable de recherche.

Les résultats indiquent d'une part l'hétérogénéité spatiale (profondeur) et d'autre part l'interdépendance entre les composantes principales du site de N'Diaffate après traitement statistique des données. Deux années après le suivi post projet, l'effet traitement sur horizon n'est pas encore perceptible, du moins avec le nombre de paramètres chimiques sélectionnés.

Mots clés : bassin arachidier; dispositif expérimental; dégradation; caractérisation; paramètre; *Tamarix aphylla*.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AFRICARE : Organisation Non Gouvernementale Internationale Afrique Attention.

BE : Base Echangeable.

C : Carbone.

C.E : Conductivité Electrique.

DRS : Défense et Restauration des Sols.

Fig. : Figure.

GDRN: Gestion Durable des Ressources Naturelles.

GF: Groupe Familial.

IPALAC: International Program for Arid Land and Crop.

ISE : Institut des Sciences de l'Environnement.

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles.

PAGERNA : Projet d'Autopromotion et de Gestion des Ressources Naturelles au Sine Saloum.

PRASS : Programme de Récupération Agronomique des Sols Salés du Sine Saloum.

PRECOBA : Programme de Reboisement Communautaire du Bassin Arachidier.

PSI : Pôle régional de recherche sur les Systèmes Irrigués

SA : Système Agraire.

SC : Système de Culture.

SE : Système d'Elevage.

SODEFITEX : Société nationale de Développement des Fibres Textiles.

SP : Systèmes de Production.

SPA : Systèmes de Production Agricole.

SUT: Système d'Utilisation des Terres.

UCAD : Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

UNEP : Programme de l'Environnement des Nations Unies.

Chapitre I - Introduction

En Afrique tropicale sèche, l'agriculture représente 36% du PNB, 3% des recettes d'exportation, et emploie 70 à 75% de la population active (FAO, 1992). Au cours des trois à quatre dernières décennies, tous les indicateurs de performance de ce secteur névralgique ont fortement chuté. En effet durant cette période, le taux de croissance de la population a augmenté de 2,7% à 3,1%, soit paradoxalement le même ordre de grandeur que le taux de diminution de la production agricole par habitant (IFPRI, 1995). Le gap alimentaire continue d'augmenter, malgré l'extension des superficies emblavées incluant les forêts, les bas-fonds, les marécages, les vallées et les savanes. Parmi les multiples causes pour expliquer ces faibles performances de l'agriculture, de nombreux auteurs évoquent la dégradation généralisée des écosystèmes et des sols en particulier (Tricart, 1953 à 1970; Piéri, 1976; Bèye, 1977; Sarr, 1981).

Dans le Sahel à partir de 1960, l'augmentation rapide de la population combinée à la disparition ou à l'abandon du système traditionnel de gestion des terres a fait que la production céréalière par habitant a baissé de 40% (Matlon, 1990). De façon alarmante, les rendements des cultures ont continuellement baissé durant cette période (Agnew and Anderson, 1992), contrairement aux tendances enregistrées dans d'autres régions du monde (Rockstrom and Tilander, 1998). Cela résulte d'une baisse de la fertilité des sols (Mokwunye, 1991), de la sévère dégradation des terres (Agnew and Anderson, 1992), mais aussi de la sécheresse (Sivakumar *et al.*, 1993).

Au Sénégal, les terres cultivables représentent 3,8 millions d'hectares (soit 19% de la superficie totale), dont 2,5 millions sont effectivement cultivées. L'agriculture pluviale concerne plus de 90% des surfaces cultivées (USAID, 1990; SAED, 1994). Dès le début des années 60, la rotation arachide/mil a fini par s'imposer en tant que système de culture dans le bassin arachidier. La prédominance de ce système d'utilisation des terres a progressivement eu pour conséquence la marginalisation des pratiques conservatrices du milieu telles que la jachère ou une meilleure intégration de l'agriculture et de l'élevage (Benoit-Cattin, 1986).

Par ailleurs, pour le sud Bassin Arachidier (régions de Kaolack et de Fatick), si l'importance de l'agriculture pluviale n'est plus à démontrer, il faut cependant souligner la particularité de son environnement marqué par l'influence fluviomarine dans la basse vallée du Saloum. L'importance de la biodiversité (faune et flore) qui jadis caractérisait cette zone a

fortement régressé du fait des effets combinés de l'homme et de la sécheresse persistante des années 70 (MEPN, 1998). La dégradation de cet écosystème est essentiellement le fait de la salinisation/acidification des terres dont l'évolution a donné lieu à ce qui est communément appelé les tannes (Marius, 1975). Parallèlement à la dégradation de la flore, on assiste aujourd'hui dans le bassin du Sine Saloum à une riziculture limitée aux dépressions et aux cuvettes contrairement à jadis (Massibot *et al.*, 1946; Bonfils et Charreau, 1963; Bonfils et Faure, 1965). Quant à la faune aquatique, les activités de pêche qui constituent la principale préoccupation des populations des îles et des bordures ont fortement diminué à cause de la disparition des poissons à la suite de la sursalure des cours d'eau dont les conductivités électriques sont 2 à 4 fois supérieures à celle de l'eau de mer (46 mS/cm) (Sadio, 1991).

L'extension de ces tannes s'est faite aux dépens des terres de culture, de la mangrove et de la végétation naturelle. Dans le bassin du Sine Saloum, la sursalure et l'acidification des sols ont entraîné la disparition totale de la mangrove dans le cours supérieur du Saloum et du Sine et dans leurs affluents, mais aussi l'abandon de la riziculture. Plus de 70% des forêts d'*Acacia seyal* et environ 30-40% des forêts de *Combretum glutinosum* ont totalement disparu (Sadio, 1991).

Ainsi, pour le sud Bassin Arachidier du Sénégal, à l'instar des autres zones agroécologiques du Sahel, les nombreux travaux mettent en évidence l'état de dégradation avancé des ressources naturelles, notamment les terres de culture. Toutefois, une stratification sommaire permet de faire la distinction entre la zone sous influence fluvio-marine du bas Saloum de celle non influencée par le fleuve. Si pour la première zone, la dégradation se fait principalement selon un processus chimique, à savoir la salinisation et/ou l'acidification (Bèye, 1972 ; Bèye *et al.*, 1975; Sadio, 1986), pour la seconde zone, elle est due à la combinaison de processus chimique, l'acidification, et physique très marqué par l'érosion hydrique (Albergel, 1989, Sène et Pérez, 1994; Diatta, 1994; Pérez, 1994). En plus de l'effet de la sécheresse, de nombreux travaux ont mis en évidence l'effet anthropique et notamment des systèmes d'utilisation de terres mis en œuvre par les populations (techniques aratoires superficielles; piochage pour ameublissement, nettoyage du terrain et enfouissement de la semence; riziculture sur billons des niominkas (Diop, 2002) etc.).

Sur le plan pluviométrique, en dépit de la diminution de la hauteur annuelle caractérisant le phénomène de sécheresse en cours depuis 1969, aucune réduction de l'intensité et de la hauteur des pluies de fréquence décennale n'est observable (Dacosta, 1992; Perez, 1994). En ce qui concerne les systèmes de production en culture exondée, l'évolution constatée met en évidence une surexploitation du milieu. Le développement de la culture de

l'arachide a favorisé la mécanisation (Cattin, 1986). Cela a entraîné, l'accroissement démographique aidant, l'extension progressive suivant un gradient Nord-Sud des surfaces cultivées au détriment des zones de parcours et des forêts.

L'objectif général de ce mémoire est de faire en fonction de processus identifiés, la synthèse des acquis de recherche portant sur la dégradation des sols du bassin arachidier. De façon spécifique et pratique, la problématique de la dégradation des terres par la salinisation et/ou l'acidification sera abordée pour évaluer l'impact des combinaisons techniques et biologiques sur la régénération des sols salés.

Dans cette perspective, on s'est appuyé sur le dispositif expérimental de NDiaffate mis en place depuis 1999 dans le cadre du projet de régénération des sols salés (PRASS) pour étudier l'impact des techniques biomécaniques sur la restauration des sols salés. Après une présentation de la synthèse des acquis de ce projet de quatre ans, l'on a identifié et suivi quelques paramètres chimiques représentatifs de l'état des sols de tannes, pour analyser les valeurs de ces paramètres en fonction de la profondeur du sol soumis à différents traitements.

Chapitre II - Système d'utilisation des sols

II.1 Présentation du bassin fluvio-marin du Saloum

II.1.1 Localisation

Le bassin fluvio-marin du Saloum est compris entre les latitudes 13°35 (mer) et 14°30 (nord de Diakhao) Nord et les longitudes 16° (est de Kaolack) et 16°50 (secteur de Fadhiout) Ouest. Il englobe une superficie totale de 250 000 ha environ, répartie entre les régions de Kaolack et de Fatick. Il comprend le domaine estuarien (110 000 ha), caractérisé par la présence de nombreuses ramifications des chenaux de marées et des vasières à mangroves et le domaine des tannes (140 000 ha environ), marqué par l'existence de tannes très étendus. Ces deux domaines se distinguent par le climat, le régime hydrologique et l'importance des tannes.

II.1.2 Le cadre biophysique

La diversité et la complexité des facteurs biophysiques (climat, sols, végétation, hydrographie) résultent de la position géographique du bassin et d'un environnement physiographique en particulier.

II.1.2.1 Les données climatiques

Il appartient au domaine sahélo-sénégalais (Leroux, 1980; cité par Sadio 1991) qui est une variante du domaine soudano-sahélien (Auberville, 1950). L'année se subdivise en deux (2) saisons :

- une saison sèche allant de novembre à juin avec une période relativement fraîche qui va de décembre à février ;
- une saison humide et chaude qui couvre la période de juillet à octobre.

Les précipitations moyennes annuelles tournent autour de 600 à 900 mm/an avec une diminution du sud vers le nord du bassin.

En 2005, où le cumul annuel de la pluviométrie est de 844,1 mm répartis en 43 jours s'étalant de la mi-juin jusqu'en mi-octobre, les précipitations ont été relativement bonnes. Si l'on se réfère aux années 2003 et 2004, les valeurs enregistrées sont nettement inférieures, respectivement 506,7 mm et 538,6 mm. Cette pluviométrie aura surtout une incidence par lixiviation sur la qualité chimique du sol.

Les températures sont caractérisées par un maximum thermique qui se situe au mois de mai (31°1) et un minimum en janvier (25°4'); avec une accentuation vers l'intérieur du

bassin (domaines des tannes). Le régime thermique est nettement tropical avec une amplitude annuelle faible ($5^{\circ}7'$), alors que l'écart diurne reste élevé ($15^{\circ}1'$). Ces valeurs sont assez indicatrices des processus d'évaporation au cours de l'année.

L'évaporation présente un maximum au mois de mars (318,8 mm), le minimum se situant au mois de septembre (66,6 mm).

Les grandes masses d'air rencontrées dans le bassin sont l'alizé maritime (zones côtières), la mousson (pendant la saison des pluies) et l'harmattan (principal agent d'érosion éolienne, donc de salinisation). Ce vent d'Est chaud et sec prédomine pendant 3 à 4 mois (mars-juin) avec des vitesses de 2 à 5 m/s (Sadio, 1989 cité par Fall, 2002).

II.1.3 La végétation et les unités morphopédologiques

La végétation et les unités morphopédologiques nous permettent de distinguer le domaine estuarien et le domaine des tannes.

II.1.3.1 Le domaine estuarien

Il se caractérise par la présence de nombreuses îles formées par de nombreuses ramifications, des chenaux de marées et par des vasières à mangroves qui sont des dépôts plus ou moins sableux. La végétation est constituée de *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora mangle*, *Avicennia africana*. Sur les cordons littoraux, les sols sont de type minéraux bruts, la végétation est composée de *Scaevola plumieri*, *Ipomea pescaprea*, *Cyperus maritimus*. Les tannes vasières sont de types sulfatés acides à jarosite salé sur les horizons peu profonds; la végétation est herbacée et constituée de *Philoxerus vermicularis* et *Sesuvium portulacastrum*. (Diop, 1978).

Le fonctionnement actuel du cours inférieur du Saloum fait que ce domaine ne répond plus à la définition de vrai delta (Chamley, 1988, cité par Sadio, 1991), car depuis l'installation de la sécheresse, les apports fluviaux sont devenus très faibles par rapport à l'influence marine. La pénétration profonde de la marée dynamique (eaux salées et douces poussées par le flot), nous amène à utiliser le terme d'"estuaire" pour désigner le domaine. La multitude de chenaux de marée et sa végétation le différencient des estuaires de la Casamance et de la Gambie.

II.1.3.2 Le domaine des tannes

Il s'étend plus vers le nord de Fatick, dans les zones de Diakhao et Gossas où les sols sont seulement salés. Ce domaine est caractérisé principalement par la présence de tannes très

étendus, ce qui lui vaut cette appellation de "domaine des tannes". Les vasières sont peu représentées et sont localisées le long des fleuves et affluents.

Il diffère de l'estuaire par l'extension des tannes et par son fonctionnement nettement plus influencé par les apports (sédiments, eaux) du plateau continental. Ce domaine fait plus des 2/3 de la superficie totale du bassin, regroupant les tannes vasières, les terrasses basses inondables, les terrasses moyennes: *Spermacoce verticillata* y est souvent associée à *Andropogon gayanus*, *Ctenium elegans* et *Eragrostis sp.* (tannes à végétation herbacée, tannes à végétation herbacée localement arbustive, tannes localement couverts, tannes nus), terrasse hautes, glacis de raccordement, dépressions et dunes.

II.2 Dégradation de la biodiversité du Bassin du Sine Saloum

Ces milieux affectés par la salinité et l'acidité appelés communément tannes (toute surface nue ou couverte de végétation, soumise à une salinité qui ne permet pas son utilisation agricole) sont colonisés par une végétation herbacée et arbustive qui varie selon la région.

Les principales régions sont le Fleuve Sénégal, la Petite côte, les Bassins des fleuves Gambie et Casamance et le Bassin du Sine Saloum (Fig.1).

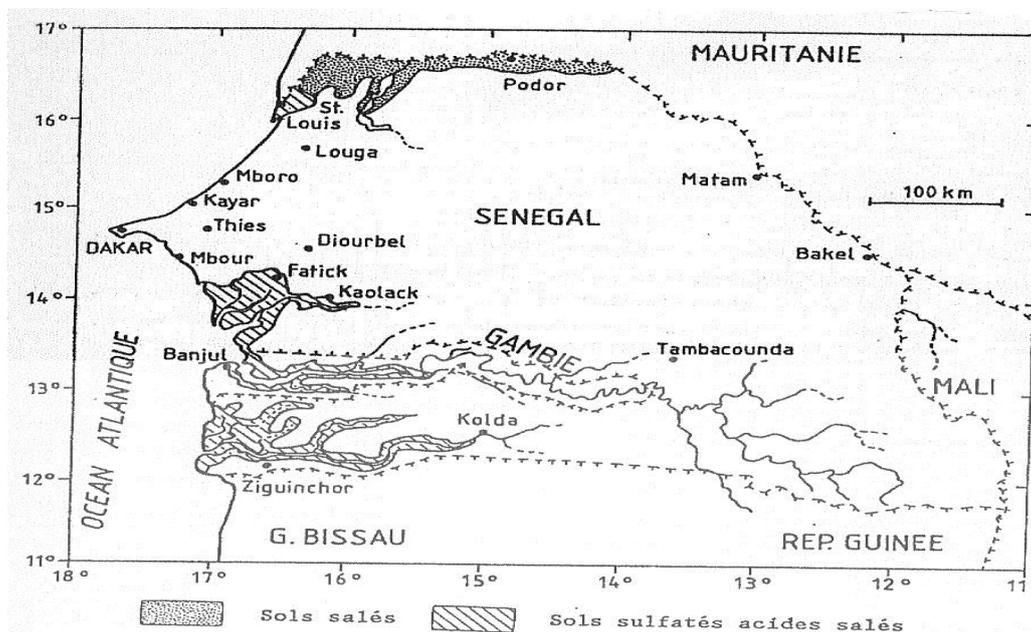


Fig.1: Carte de localisation des sols salés et sulfatés acides salés au Sénégal et en Gambie (Sadio, 1991).

Dans le Bassin du Saloum, les espèces répertoriées au niveau des tannes et de l'estuaire ont été identifiées Sadio (1991).

1. domaine des tannes: *Spermacoce verticillata*, *Tamarix senegalensis*, *Combretum glutinosum*, *Conocarpus erectus*, *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora mangle* et *Avicennia africana* ;
2. domaine estuarien: *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora mangle* et *Avicennia africana*, *Sesuvium portulacastrum*, *Phyloxererus vermicularis*, *Paspalum vaginatum*, *Heleocharis caribea*, *Heleocharis mutata*, *Scirpus maritimus* et *Sporobolus robustus*.

L'extension de ces tannes s'est faite aux dépens des terres de cultures, de la mangrove et de la végétation naturelle suite à la dégradation de l'environnement.

II.3 Le système d'utilisation des terres

La revue bibliographique nous a permis de :

- cerner en zone exondée et en zone fluvio-marine les caractéristiques des différents systèmes de production (SP), des systèmes de culture (SC), des systèmes d'utilisation des terres (SUT);
- d'établir une relation entre SUT et types de sols;
- identifier les causes de dégradation des sols (acidification, salinisation, érosion éolienne ou hydrique ect., ceci en rapport avec la pluviométrie et les pratiques culturelles).

C'est à partir de cette analyse, seulement que l'on pourra considérer le cas particulier des sols dont les causes de dégradation par salinisation (Tannes), pour appliquer la méthode de suivi de l'évolution.

Nous distinguerons le système de culture et le système d'élevage en zone exondée et ensuite en zone fluvio-marine.

Le système de culture: "ensemble de parcelles cultivées de façon homogène et en particulier soumises à la succession culturelle".

Un système de culture (S.C), correspond à une combinaison donnée dans l'espace et dans le temps de cultures et de jachère. Il représente un mode d'exploitation et de mise en culture d'un milieu.

La caractérisation d'un système de culture nécessite l'identification:

- des cultures pratiquées (espèces et variétés);
- des successions de cultures dans le temps et de leurs éventuelles associations dans l'espace;
- des caractéristiques principales des itinéraires techniques adoptées pour conduire les cultures. L'itinéraire technique n'étant que la suite logique et ordonnée de techniques appliquées à une culture. Autrement dit c'est l'ensemble de techniques combinées pour

conduire une culture, y compris le choix de la variété, en vue d'obtenir des objectifs divers, accompagnées de raisons qui justifient ces choix (ICRA, 2000).

Le système d'élevage:" ensemble de techniques et de pratiques mises en œuvre par un ou des éleveurs pour exploiter, dans un espace donné, des ressources végétales par des animaux, dans des conditions compatibles avec leurs objectifs et les contraintes du milieu".

II.3.1 Zone exondée

II.3.1.1 Système de culture

Pour faire le point de la situation, nous nous appuyons sur les études de Piéri (1989). Partant de la situation originelle, pour suivre le processus d'intensification appliquée dans le bassin arachidier, l'on peut distinguer:

- les systèmes de culture manuels à faible intensification,
- les systèmes de culture manuels intensifiés,
- les systèmes de culture mécanisés à traction animale.

II.3.1.1.1 Les systèmes de culture manuels à faible intensification

Si nous considérons l'essai de Darou, dans la région du Sine Saloum, il a été implanté sur une terre en jachère et conduit pendant 22 ans (1952-1973), en culture manuelle.

Il porte sur la durée des jachères (2,3 et 6 ans) et leurs traitements (laissée sur place et brûlée juste avant la culture, brûlée chaque année, fauchée et compostée chaque année, fauchée et laissée sur place en « mulch » chaque année) dans le cadre d'une succession triennale arachide-sorgho ou arachide-mil.

Le compost est ramené chaque année, avant culture ou sur jachère « sèche », sur chaque parcelle dont il est issu. Les engrais ont été appliqués (sur une demi parcelle, l'autre restant sans fertilisation) de façon suivante:

- sur arachide (1^{ère} année): 8 kg/ha N et 30 kg/ha P₂O₅, sous forme de sulfate d'ammoniaque et de phosphate bicalcique;
- sur céréale et arachide (3^{ième} année): 8 kg/ha N et 15 kg/ha P₂O₅ et 12 kg/ha K₂O sous la forme chlorurée.

Sur l'évolution des rendements en arachide (valeurs annuelles, moyennes glissantes sur cinq ans) à Darou pour les systèmes à deux et six années de jachère, le dernier système est supposé être à priori le plus protecteur de la productivité des terres.

Mais les résultats de la recherche conduisent selon Piéri (1989) à conclure que les systèmes ne permettent pas le maintien de la productivité des terres, malgré leur faible intensité culturale,

quels que soient les traitements et la durée de la jachère. Les résultats de Darou confirment que les fluctuations pluviométriques ne sont pas explicatives de la décroissance régulière des rendements.

II.3.1.1.2 Les systèmes de culture manuels intensifiés

Ces systèmes correspondent au premier stade du passage d'une agriculture itinérante à une agriculture fixée. Ils se caractérisent par:

- une rotation des cultures sans jachère, selon un ordre respecté;
- une fertilisation minérale plus forte (supérieure à 200 kg/ha) à base d'engrais concentrés (urée, phosphate d'ammoniaque, chlorure de potassium), apportée non seulement à la culture de rente mais progressivement aux autres cultures;
- un meilleur contrôle des déprédateurs, maladies et mauvaises herbes, qui nuisent à la culture de rente;
- le maintien des modes transitionnels de préparation du sol et d'utilisation des résidus de récolte exportés ou brûlés en culture manuelle.

Dans ce type de système, trois essais ont été conduits (Piéri, 1989).

II.3.1.1.3 Les systèmes de culture mécanisés à traction animale

Les systèmes techniques visant à l'intégration de l'agriculture et de l'élevage ont fait l'objet de nombreuses recherches expérimentales dans une zone où les deux traditions de production agricole se sont côtoyées plutôt qu'associées.

Compte tenu de la faible productivité du travail manuel, l'intégration de l'animal dans l'exploitation agricole est toujours apparue comme très souhaitable aux agronomes. On pouvait ainsi espérer une meilleure valorisation des autres productions liées à l'élevage bovin (viande, lait, fumier, etc...)

Dans ces systèmes, qui ont toutes les caractéristiques de ceux précédemment décrits (systèmes manuels intensifiés), la préparation des terres y est effectuée mécaniquement grâce à la traction animale. On utilise la houe attelée (ouverture du sol et émiettement de surface), la charrue (retournement de la couche superficielle labourée). La culture attelée ne bénéficie qu'au labour et au semis. Les autres travaux culturels, notamment les chantiers de désherbage ou de récolte, sont toujours conduits manuellement. Cela a considérablement limité les possibilités réelles d'augmentation de la productivité d'ensemble des agriculteurs ayant accès à la traction animale, mais ne possédant pas de main d'œuvre de substitution supplémentaire.

L'autre caractéristique distinctive de ces systèmes est la pratique de la fumure organique, en complément ou non à la fertilisation minérale. Elle est basée sur le recours au fumier ou, comme cette production n'est pas toujours aussi disponible qu'on le pensait il y'a une vingtaine d'années à la terre de parc. L'apport et l'enfouissement de produits organiques autres que le fumier, tels que les résidus de récolte, théoriquement plus disponibles dans toutes les exploitations agricoles de la zone, ont également été expérimentés.

Pour accroître notablement la productivité du travail, on a aussi introduit la motorisation. Malgré la diversité des expérimentations, l'objectif majeur est d'évaluer les effets propres ou associés de la fumure minérale et organique, en système mécanisé et pour différentes successions culturales, sur les rendements et certains caractères des sols.

Retenons le cas de Bambey « potasse et paille » d'après Piéri, 1982, Thilmakha « Technique culturales » d'après Cissé (1986) et Siband *et al.*(1987).

Quant à l'évolution des caractéristiques des sols dans ce système de cultures mécanisées, c'est le pH, le taux de matière organique et la CEC. Les expérimentations de référence confirment de façon quasi unanime que l'acidification des terres cultivées ne recevant qu'une fumure minérale est un processus généralisé et perceptible à l'analyse.

Sur l'évolution des rendements, il revient à considérer qu'une agriculture pluviale continue et productive est techniquement réalisable, selon les méthodes culturales proches de celles existantes, permettant aux terres de conserver leur « force »

II.3.1.2 Système d'élevage

L'élevage des bovins sous forme de troupeaux, réservés à quelques chefs de foyer aisés, mais à qui les autres peuvent confier leurs bêtes. Les animaux sont regroupés en troupeaux et s'alimentent sur les parcelles laissées en vaine pâture en saison sèche et sur les zones incultes ou non cultivées, pâturées quotidiennement en hivernage. Les bovins de trait restent à proximité des habitations la plus grande partie de l'année et sont alimentés en saison sèche par des résidus de récolte (Sène, 1985).

L'élevage domestique des ovins et caprins est confié aux femmes, tirant profit de la vaine pâture de saison sèche et des jachères d'hivernage.

Les chevaux sont de plus en plus nombreux dans la région; ils sont employés pour les transports et les travaux agricoles. Ils sont largement alimentés avec de la fane d'arachide.

La culture attelée associe dans la région la traction bovine et la traction équine. La traction asine a quasiment disparue (Sène, 1985).

II.3.2 Zone fluvio-marine

II.3.2.1 Système de culture

L'agriculture est très développée dans la zone, même si son extension se heurte aujourd'hui au phénomène de rareté des terres arables. La salinisation et l'acidification des sols dans l'ensemble du bassin ont entraîné des changements importants dans les stratégies de mise en valeur agricole. Le rétrécissement des espaces cultivables occasionne une forte concentration des agriculteurs dans les zones où la dégradation reste encore mineure. C'est ainsi que l'agriculture est surtout pratiquée sur les terres du glacis de raccordement, les bordures des terrasses moyennes et le plateau situé à l'intérieur de la zone.

Les principales cultures pratiquées sont l'arachide et le mil sur le plateau. Le sorgho et le riz, anciennement cultivés dans les terrasses argileuses et les dépressions sont en net recul devant la progression des tannes (Sadio, 1991).

Dans certaines vallées telles que Gandiaye, Keur Alfa et Tattaguine, les cultures maraîchères (melons, pastèques et courgettes) sont possibles, grâce à l'eau douce de forage hydraulique (nappe aquifère) de Gandiaye et Tattaguine.

Depuis 1980, le reboisement a pris de l'importance dans la zone, limitée aux terres du plateau continental, à la suite de la dégradation des formations végétales. Sur les tannes du glacis de raccordement et de certaines terrasses moyennes, un vaste programme de reboisement d'environ 100 ha/an est exécuté par le PRECOBA (Projet de Reboisement Centre Ouest Bassin Arachidier).

II.3.2.2 Système d'élevage

Dans le bassin fluvio-marin du Saloum, l'intégration de l'agriculture à l'élevage est maintenant effective. Les populations (particulièrement les Sérères) associent le bétail aux cultures en vue d'un échange de la fumure animale (pour enrichir les sols) contre les résidus de récoltes (pour la nourriture du bétail).

L'élevage constitue de ce fait une des activités les plus importantes dans le domaine des tannes. Il concerne le gros bétail (bovins) et les petits ruminants (ovins et caprins) (Daffé *et al.*, 1988).

Néanmoins le reboisement, la pêche et l'exploitation du sel restent des activités économiques secondaires de l'économie.

II.4 Types de sols

Joffe (1936) définit le sol comme : un milieu différencié en horizons, à constituants minéraux et organiques généralement meubles, d'épaisseur variable, se particularisant de la roche mère géologique, par des caractères morphologiques, par la constitution et des propriétés physiques ainsi que chimiques et biologiques.

C'est un milieu dynamique, en perpétuelle évolution. Cette évolution peut être:

- linéaire: les facteurs pédogénétiques restent constants à l'état d'équilibre;
- en ligne brisée, l'un ou l'autre facteur génétique, pédogénétique se modifie qualitativement ou quantitativement en cours de route;
- cyclique, certains facteurs suivent un rythme régulier, les autres restant constants.

Une définition *plus agronomique* considère le sol comme un *réservoir d'éléments nutritifs*.

II.4.1 Les types de sols en zone exondée

Les sols du Sénégal sont assez bien connus. Néanmoins, les types de sols sont assez variés, sur l'étendue du territoire. Mais du point de vue agricole, la production provient essentiellement des sols ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés et appelés localement Dior, des sols ferrugineux tropicaux lessivés sans tâches ou à tâches et concrétions et des sols faiblement ferrallitiques. Les vertisols, sols bruns calcaires, les sols alluviaux et de mangroves, malgré leur potentiel de fertilité sont encore relativement peu cultivés (Bèye, 1977). Dans la classification française, ces sols peuvent être, pour simplifier répartis en treize catégories (Khouma, 2000):

- les sols minéraux bruts sur dune littorale (0,2%) ;
- les sols minéraux bruts de cuirasse sur schiste (2,4%);
- les sols minéraux bruts de cuirasse sur grès argileux (8,1%);
- les sols gravillonnaires sur cuirasse (11,6%);
- les sols bruns rouge subarides sur sable (14,2%) ;
- les sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés sur sable (dior, 19,9%), qui englobent les sols dek, hydromorphes, en position dépressionnaire;
- les sols ferrugineux tropicaux lessivés sur grès sablo-argileux (17,2%);
- les sols ferrugineux tropicaux lessivés cuirassés sur schiste (12,4%);
- les sols ferrallitiques faiblement désaturés sur grès sablo-argileux (6,2%);
- les sols halomorphes sur alluvions argileuses (1,9%);
- les sols hydromorphes sur argile de décantation (0,2%);

- les sols hydromorphes sur argile (3,3%);
- les sols sulfatés acides sur sable (2,5%).

En résumé les sols cultivables représentent 69,9%, allant des sols bruns rouges subarides sur sable aux sols ferrallitiques faiblement désaturés sur grès sablo-argileux. Si les sols sulfatés acides représentent les 2,5%, la part des sols non cultivables fait 25,19% (Fig.2).

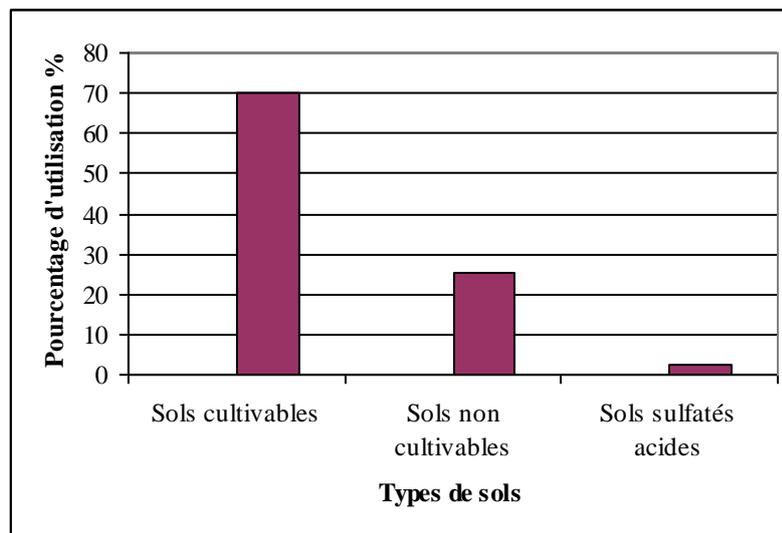


Fig.2: Pourcentage d'utilisation des sols au Sénégal (Khouma, 2000)

II.4.2 Les types de sols en zone fluvio-marine

II.4.2.1 La morphogenèse

L'histoire géomorphologique de la côte Atlantique du Sénégal est jalonnée de séries de transgressions et régressions marines qui ont profondément façonné les milieux.

Selon Michel (1973), la mise en place du réseau du Sine Saloum se situerait pendant la période humide post-ogolienne (1300-8000 ans B.P.). Au cours de cette période, l'estuaire actuel, alors zone déprimée, aurait reçu les épandages des fleuves du Sine, du Saloum et de Khombole (Diop, 1978).

Mais le plus grand façonnement de l'ancien delta et du domaine des tannes reste attribuable à la transgression nouakchottienne (Flandrien), période humide la plus longue dont le maximum se situerait vers 5500 ans B.P. (Michel, 1973). Ce haut niveau semble avoir joué un rôle essentiel dans la formation et l'extension des tannes en amont du Sine Saloum (Thiam, 1986). En effet cette période voit la mer pénétrer dans la région du Sine Saloum jusqu'en amont de Kaolack (à 120 km de l'embouchure, vers Birkelane) et remonter vers les basses vallées (aujourd'hui fossiles) du Sine en avant de Fatick. C'est au maximum de la

transgression (qui a atteint la côte + 3 mètres) qu'il y'a eu la formation d'un vaste golfe marin largement ouvert sur la mer. Ce relèvement progressif du niveau de la mer s'est traduit par une importante sédimentation marine. Durant cette transgression marine, il n'y a pas eu de colmatage qui n'a commencé à se produire qu'à partir de la régression post nouatchottienne vers 4000 ans B.P., c'est à dire en concomitance avec l'édification des cordons sableux discontinus qui datent de la fermeture du golfe à l'action de la houle du Nord-ouest qui entraîne une dérive littorale Nord-Sud (Sokhna, 1995). Pendant la même période, il s'est produit une sédimentation lagunaire avec le comblement de l'ancien delta et des fleuves par des apports de sables fins et de limons arrachés du bas plateau continental. Ces matériaux constitueraient les terrasses actuelles.

Ces différents épisodes climatiques ont abouti à la formation d'unités géomorphologiques très distinctes qui s'intègrent dans les deux grands ensembles que sont le domaine estuarien et le domaine des tannes (Sadio, 1991).

II.4.2.2 La pédogenèse

La pédogenèse des sols sulfatés acides salés du bassin du Sine Saloum est orientée par l'action différentielle de différents facteurs agissant simultanément (Sadio, 1991).

Il s'agit d'abord du climat et notamment de l'aridité considérée comme le principal facteur de pédogenèse. Viennent en plus s'ajouter les déficits pluviométriques successifs enregistrés dans le bassin suite à la sécheresse des années 1970, conjugués aux fortes températures. Plusieurs auteurs ont mis en évidence cette incidence de l'aridité sur la salinisation des sols. On peut évoquer les travaux de Raheja (1966), Agarwal *et al.* (1979), Gupta *et al.* (1987) en Inde; Richards (1954), Miller *et al.* (1981), Bresler *et al.* (1982) aux Etats-Unis; mais aussi ceux de Hillman (1981) en Australie, cité par Sadio (1991) entre autres (Fall, 2002).

Le second facteur de salinisation des sols demeure le réseau hydrographique. Ce dernier, par sa densité et la forte salinité de ses eaux, exerce une grande influence sur le comportement hydrochimique et physique des sols (Sadio, 1991). Aussi, la saturation en eau du milieu dans les zones fréquemment inondées empêche-t-elle la maturation physique des sols.

La topographie est également un facteur important de pédogenèse, quelle que soit la faiblesse des dénivellations entre les différentes unités géomorphologiques qui composent le milieu (Sadio, 1991). Elle agit sur les comportements hydriques et physico-chimiques des sols.

La présence de sels solubles et du soufre influence considérablement la pédogenèse dans certains cas. *Ce dernier, en discriminant nettement les types de sols, constitue le facteur le*

plus déterminant des principaux processus pédogénétiques, comme l'ont montré les nombreux travaux menés dans divers pays (Beers, 1962 ; Pons, 1964,1966 ; Breemen, 1976 ; Vieillefon, 1977; Dent, 1986) ;

Enfin, les matériaux parentaux, malgré le fait qu'ils ne discriminent pas de façon significative les types de sols, leur influence sur la pédogenèse est assez importante dans la mesure où leurs comportements physiques et chimiques en dépendent (conductivité électrique, rétention en eau) (Sadio, 1991).

II.4.2.3 Les types de sols salés

Les sols du domaine fluvio-marin du Sine Saloum sont assez mal connus, compte tenu du nombre limité des études qui leur ont été consacrées. La plupart des travaux portent sur des études géomorphologiques (Sall *et al.*, 1975; Diop, 1978 et 1988; Thiam, 1986 cité par Sadio 1991). Seules quelques études portent sur les sols sulfatés acides salés (Marius, 1979 et 1985). Les sols se différencient principalement par la morphologie et les propriétés chimiques. Les sols sont tous affectés, à des degrés divers à la fois par la salinité et l'acidité. On distingue trois types de sols: sols salés sulfatés, sols sulfatés acides salés et sols sulfatés acides hydromorphes salés.

II.4.2.4 Les caractéristiques principales de ces sols

II.4.2.4.1. Sols salés sulfatés

Les sols salés sulfatés se rencontrent dans les zones de terrasses hautes et moyennes engorgées d'eau de pluie pendant l'hivernage. Dans certains endroits, ils sont inondés pendant les hautes marées par des eaux salées du fleuve et de ses affluents.

Ils sont dits sulfatés à cause de leur teneur élevée en sulfates, supérieures à celle des sols salés normaux, comme ceux de la vallée du fleuve Sénégal (Sadio, 1991). *La présence des sulfates ne se traduit pas par une acidité*, celle-ci étant totalement neutralisée par les bases échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺).

Leurs caractéristiques morphologiques et chimiques sont dominées par la présence de sels solubles qui se manifestent en surface soit par une accumulation sous forme de croûtes, pellicules et efflorescences ou de poudres, soit seulement par la présence de végétation halophile.

Selon le niveau de salinité, ils constituent soit des tannes localement ou totalement couverts par une végétation halophile herbacée ou arbustive (tannes à végétation). On distingue :

-Les sols peu salés dont la $C.E_5$ est comprise entre 0.5 et 2 mS/cm pour les sols sableux et entre 1 et 3 mS/cm pour les sols argileux.

-Les sols moyennement salés caractérisés par une salinité élevée dont la $C.E_5$ est comprise entre 2 et 4 mS/cm, pour les sols sableux et entre 3 et 6 mS/cm pour les sols à texture fine.

-Les sols sursalés caractérisés par une $C.E_5$ supérieure à 4 mS/cm pour les sols sableux et supérieures à 6 mS/cm pour les sols à texture fine.

II.4.2.4.2 Sols sulfatés acides salés

Les sols sulfatés acides sont caractérisés par la *présence de soufre*. Selon la nature de celui-ci, on distingue des sols potentiellement sulfatés acides et des sols sulfatés acides salés. Ils sont tous affectés, à des degrés variables, par la salinité.

-Les sols potentiellement sulfatés acides caractérisés par la présence de soufre sous forme essentiellement de pyrite. Le profil est peu différencié et présente des horizons à matériaux tourbeux, fibreux ou à traînées noires

-Les sols sulfatés acides salés à jarosite. Ce sont des sols dont le profil est fortement marqué par l'oxydation du soufre qui se traduit par la présence de taches de jarosites de couleurs variées situées dans un fond jaune. En fonction de la couleur de taches jaunes, on distingue:

Des sols à jarosite jeune, caractérisés par des taches de couleur jaune pâle et des sols à jarosite évoluée, caractérisés par la présence de taches de couleurs variées jaunâtre, ocre-rougeâtres et rouge ou d'oxydes de fer rouge. (Sadio, 1991).

II.4.2.4 .3 Sols sulfatés acides hydromorphes salés

Ce sont des sols dont la pédogenèse est dominée par des processus d'oxydo-réduction du fer en milieu sulfaté acide et salé, dus à un engorgement temporaire occasionné par la présence d'une nappe phréatique temporaire et par l'accumulation des eaux de pluie. La salinité est soit due à une nappe phréatique peu profonde à fort battement, soit héritée des périodes de transgression marine. On les trouve dans les zones à topographie plane, inondée pendant l'hivernage par les eaux de pluies et sur les micro-dunes.

Ils sont caractérisés par la présence dans leur profil de taches d'oxydation de fer de couleur ocre, jaunâtre et ocre-rougeâtre provenant de l'hydrolyse totale de la jarosite. On les rencontre dans les dépressions et zones planes des glacis de raccordement, les terrasses

moyennes et terrasses hautes enclavées par les chenaux de marées. La nappe phréatique est peu profonde, acide et salée (Sadio, 1991).

II.5 Causes de dégradation des sols et les pratiques culturales

La notion générale de *fertilité* d'un milieu peut être assimilée à un jugement porté sur le fonctionnement d'un système biologique dont les composantes interactives (le sol, le climat et la plante) sont soumises à des déterminants techniques, économiques, sociaux et historiques (Boiffin et Sébillotte; 1982). Plus spécifiquement, la fertilité d'un sol telle que définie dans Mémento de l'Agronome (1993), exprime l'aptitude de ce dernier à produire des récoltes en fonction de ses qualités intrinsèques utilisées.

II.5.1 Les causes et les types de dégradation possibles des sols

II.5.1.1 Cas des sols exondés en culture pluviale non soumis à la salinité

Le sol constitue la base de production végétale à l'exception des cultures hydroponiques. Que le sol vienne à se dégrader ou même parfois à disparaître, il en résulte immédiatement de profondes modifications de toutes les autres composantes de l'écosystème, pouvant même aller jusqu'à leur disparition. La dégradation est un processus graduel dont les conséquences sont rarement subies par leurs auteurs. Elle touche surtout des générations à venir, d'où la moindre importance accordée à cet aspect par les paysans confrontés à des problèmes de survie (Khouma *et al.* 2006).

La dégradation du sol traduit la diminution de sa capacité de production. La dégradation du sol est d'une conception plus large. Elle inclut la pollution, l'acidification, la salinisation, l'érosion etc. La dégradation du sol est souvent une première étape avant que l'érosion ne se manifeste de façon évidente, car il n'est pas nécessaire que le sol soit enlevé pour que sa productivité baisse. Une exploitation excessive par exemple, peut détruire sa structure et en conséquence sa capacité de rétention de l'eau. Notons néanmoins que la dégradation et l'érosion sont des processus qui vont souvent ensemble (Agromisa, 2001).

II.5.1.1.1 Acidification

Depuis longtemps au Sénégal on s'est préoccupé de l'*acidification des terres de culture*. Selon Piéri (1976) ce processus, en effet, traduit généralement une dégradation du potentiel de fertilité initial des sols, due notamment à :

- une *désaturation* et une *pauvreté chimique* des sols;
- un *accroissement* de *solubilité* de certains *éléments minéraux*, dont certains sont *toxiques* pour les plantes: Al^{3+} , Mn^{2+} ;
- une *diminution* de l'*assimilabilité* d'autres éléments, tels le molybdène, le phosphore, etc.;
- une *perturbation* de l'*activité microbiologique* tellurique;

Il a été possible pour chaque région agricole de ce pays:

- de mettre en évidence les *causes* principales de l'*acidification* des sols cultivés;
- de faire une *approximation* raisonnée de l'*extension* des sols nécessitant une *correction de pH*, exprimée en % des surfaces actuellement cultivées.

Les *causes* principales de l'acidification des sols sont communes à l'ensemble du territoire, mais ont une importance relative suivant les zones écologiques étudiées. Le *lessivage* naturel, la *mise en culture*, et l'*insuffisance* des *restitutions minérales*, ainsi que les *engrais minéraux*, favorisent eux aussi le processus d'acidification.

Une importance particulière doit être portée au *pouvoir tampon* des sols, et à leur *statut organique*, notamment dans les zones d'intensification prioritaire telles que le Sine Saloum.

L'acidification résulte pour une bonne part de la décalcification du complexe absorbant. Elle peut induire dans les sols exondés une toxicité aluminique, un inventaire mené en 1974 donnait une estimation des superficies atteintes par l'acidité (Piéri, 1974 ; Bèye, 1977):

- 25% de la surface cultivée dans les régions de Thiès et Diourbel;
- 15% de la surface cultivée dans le Sine Saloum;
- 50% de la surface cultivée en Casamance continentale;
- 6% de la surface cultivée dans le Sénégal Oriental.

Soit environ 430 000 ha ou 21,50 % du total des terres cultivées.

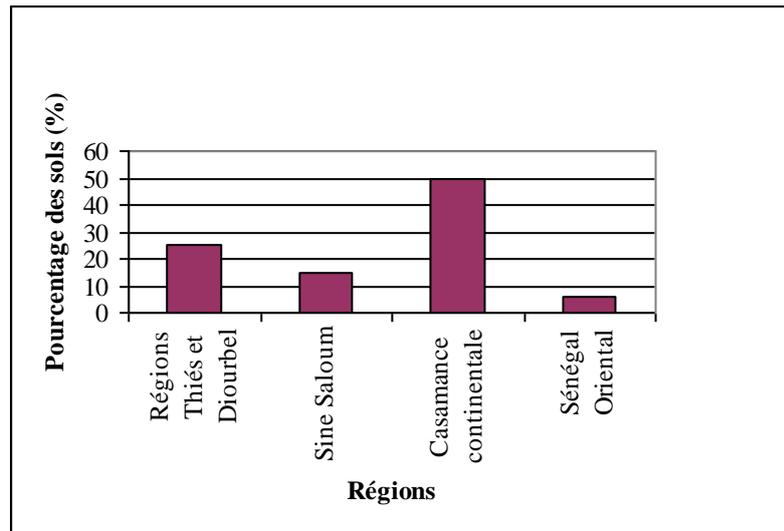


Fig.3: Pourcentage des sols cultivables exondés acides

II.5.1.1.2 Erosion

L'érosion est un phénomène naturel et complexe (Fall, 1998). Elle débute dès qu'une terre émerge de l'océan: elle tend à raboter toute dénivellation et à réduire le paysage à l'état de pénéplaine (Tricart, 1953 à 1970). Elle comprend trois (3) phases: arrachement, transport et sédimentation, qui peuvent se développer simultanément, mais avec des intensités différentes, selon les sites d'un paysage (Biro, 1981).

Il existe un bon nombre de définitions de l'érosion, mais signalons en fait qu'il y' en a deux sortes. Notamment, l'érosion naturelle ou géologique et l'érosion accélérée ou anthropique.

L'érosion géologique se déroule continuellement. C'est elle qui a conduit à la formation du paysage actuel dans son ensemble. C'est une érosion continue mais très lente. La quantité de terre qui est enlevée par l'érosion géologique sur 1 ha de terre est en moyenne de 1 à 2 tonnes par année (Agromisa, 2001). Mais ce déplacement de terre est le plus souvent en équilibre avec la quantité de sols formée chaque année, par altération.

L'érosion anthropique, lorsque que l'homme détruit la végétation naturelle pour cultiver le sol sur les pentes (par défrichements de forêts, feu, etc.), l'érosion des sols se déclencha. Par cette érosion, 50 tonnes de sol environ par hectare et par année sont enlevées aux sols, ce qui est égal à plus ou moins à 400 mm d'épaisseur de sol par siècle (Agromisa, 2001). Nous nous référons très souvent à ce type d'érosion déclenchée par l'homme.

II.5.1.1.2.1 Erosion éolienne

L'érosion éolienne affecte toute la moitié nord du pays avec une forte intensité dans la partie nord-ouest. On observe un enlèvement de la partie superficielle des terres arables, avec le recouvrement de champs, de bâtiments, de clôtures et de routes par des masses de terres indésirables (Bèye, 1977). Cette manifestation par le transport des éléments fins du sol est certainement très ancienne au Sénégal, elle y est omniprésente et son action est favorisée par les facteurs suivants: régime des vents, texture grossière des sols, végétation nulle ou clairsemée, sécheresse endémique, techniques agropastorales archaïques.

Les sols de types brun subaride et ferrugineux tropicaux non lessivés sur sables dunaires avec une texture sableuse à 90 à 95% sont soumis à des vents violents, alizés et harmattan; ce dernier chaud et très sec balaie la zone surtout en saison sèche et peut avoir des effets catastrophiques.

Du fait d'une pluviométrie erratique et d'une longue saison sèche de huit mois, le sol reste dénudé avec un peuplement végétal clairsemé sous forme d'épineux, dont l'action sur la rugosité du sol est pratiquement nulle.

Une agriculture extensive avec une rotation arachide-mil sans travail du sol, ni restitution organique, avec vaine pâture en saison sèche et surpâturage de courtes jachères pendant la saison des pluies, renforce l'action néfaste du vent dans cette zone. La sécheresse que le Sahel a connue les années précédentes n'a fait qu'accentuer l'ampleur du phénomène.

Aucune étude systématique du phénomène n'a été effectuée. Les programmes de recherches commencent seulement à s'intéresser au phénomène. Cependant les techniques préconisées par la recherche, comme un meilleur aménagement de l'espace rural par la mise en œuvre de techniques de productions plus intensives et économes en eau et intégrant l'arbre à l'agriculture (brise vent, plantation), un labour en humide sont susceptibles de lutter efficacement contre l'érosion éolienne.

De ce point de vue, l'idée de l'UNEP (Programme de l'Environnement des Nations Unies) de la création d'une ceinture verte au Sud du Sahara, englobant la zone Nord du Sénégal, paraît intéressante à condition que les objectifs soient sérieusement étudiés.

II.5.1.1.2.2 Erosion hydrique

L'érosion hydrique est toutefois plus fréquente en Afrique où elle s'exerce sur toutes les terres dès que la pluviométrie annuelle dépasse 300 à 400 mm. L'eau de pluie tombant en grosses averses arrache des particules de terre et les entraîne par gravité. Cette érosion peut être diffuse ou linéaire, les deux (2) étant souvent associées dans le même paysage. Tout sol se

trouve soumis au moment des pluies à une action mécanique qui se traduit par un tassement du sol, délitage des mottes, rejaillissement de ces particules et entraînement des plus fines vers le bas.

Les mécanismes et effets de l'érosion pluviale ont été particulièrement bien étudiés au Sénégal pendant 15 ans par Fauck (1955), Charreau (1968), Roose (1965) et Pieri (1966).

L'intensité des pluies, leur énergie cinétique et l'index de pluie de Wischmeier ont été pris comme facteurs d'appréciation de l'érosivité des pluies au Sénégal et leur effet sur les sols dans deux stations: Bambey au centre, dans la zone typique des sols Dior et Séfa au Sud sur sols ferrugineux tropicaux lessivés à tâches et concrétion, dits sols beiges et sur sols faiblement ferrallitiques. Ces sols de Séfa seraient classés parmi les plus *stables*. Ils sont caractérisés par un K allant de 0,04 à 0,17, qui est le coefficient de susceptibilité des sols à l'érosion dans l'équation universelle des pertes en sols de Wischmeier, dans l'échelle américaine qui compte de 0,10 à 0,50. Reprenant Bèye (1977), les résultats du travail des sols nous fournissent selon Charreau (1968):

-la comparaison sol nu non labouré et sol nu labouré et biné, montre que les binages n'ont pas une influence importante sur le ruissellement et l'érosion;

-le labour par contre, influence de très forte manière ces deux phénomènes: il améliore de 44% l'infiltration de l'eau dans le sol et abaisse de 36% la turbidité spécifique de la nappe ravinante. *L'érosion est presque 3 fois moins forte sur sol nu labouré que sur sol nu témoin.*

Contrairement à ce que pensent beaucoup d'agronomes tropicaux, le travail profond du sol, loin d'être un facteur systématique de dégradation, peut se révéler au contraire comme un des éléments importants de conservation du sol. Ceci est encore plus important quand son action se combine avec celle d'une culture. On a vu que l'agressivité des pluies est presque aussi forte à Bambey qu'à Séfa où la pluviométrie est deux fois plus élevée, donc même dans les zones relativement sèches, cette agressivité sévit d'une manière permanente et contribue à la dégradation des sols.

Les recherches menées dans les Unités expérimentales du Sine Saloum au Centre Sud du Sénégal ont montré la gravité du phénomène au niveau du terroir et la nécessité d'une nouvelle stratégie pour lutter contre lui. Dans cette opération menée en milieu paysan dans le but d'étudier l'introduction des systèmes de productions agricoles intensifs, l'ISRA a effectué un test de remembrement pour lever une contrainte foncière liée à la dispersion et au morcellement des parcelles au sein d'une exploitation. Au moment de la phase d'exécution, il a fallu définir des critères d'échange de parcelles avec le concours des paysans et ceux-ci ont introduit parmi les critères choisis l'existence d'érosion.

L'étude des photographies aériennes et les prospections de terrain selon Niang (1976) ont permis de retenir 5 types de processus ainsi classés en ordre de gravité croissante:

- le ruissellement diffus avec érosion en filets;
- le ruissellement avec épandage de sable;
- le ruissellement avec décapage de l'horizon de surface;
- le ruissellement concentré avec creusement de ravineaux (moins de 25 cm de profondeur).

Les résultats de ce travail conduisent aux deux conclusions:

-les techniques de conservation du sol à utiliser, pour être efficaces devront tenir compte de la diversité des processus et de leur association dans l'espace.

-celles-ci devront comprendre aussi bien des actions au niveau de la parcelle, que de l'aménagement de réseaux anti-érosifs tenant compte du relief. En un mot la lutte contre l'érosion hydrique pour être efficace, doit se concevoir désormais à la fois au niveau de l'unité de paysage et de la parcelle.

En résumé l'ampleur de l'érosion hydrique dépend de l'intensité des pluies, de la couverture des sols, du modelé et des propriétés du sol. Elle se manifeste surtout dans la moitié sud du pays et le long de la vallée du fleuve Sénégal (Khouma *et al.* 2006).

Outre les effets du ravinement, il y'a aussi d'autres effets, moins visibles, mais très fâcheux (Agromisa, 2001). Nous considérons deux de ces derniers effets très importants pour l'agriculture et nous allons les discuter dans ce qui suit:

- La diminution de la capacité de rétention de l'eau.

Par érosion, la capacité d'infiltration et de rétention de l'eau diminue. Par conséquent la disponibilité en eau pour les plantes est réduite et les plantes subissent leur régime hydrique. La saison de croissance est ainsi raccourcie et les cultures qui ont un cycle végétatif relativement long, souffrent à cause de la sécheresse. Certaines d'entre elles, vont donner des récoltes déficientes et d'autres, plus sensibles, ne vont pas survivre. Ainsi dans ces conditions, le paysan ou l'agriculteur sera-t-il obligé de cultiver seulement des plantes résistantes à la sécheresse ou avec un court cycle végétatif, ce qui signifie une réduction importante dans la gamme des cultures à choisir.

- La perte d'éléments nutritifs.

Dans les régions à forte pluviométrie, la diminution de la capacité de rétention de l'eau peut avoir comme conséquence le lessivage d'éléments nutritifs. Etant donné qu'une partie de l'eau infiltrée dans le sol percole, elle s'écoule vers la profondeur dans la nappe aquifère. En même temps avec la solution du sol, des éléments nutritifs dissous dans l'eau du sol sont

entraînés et deviennent ainsi inaccessibles aux racines des plantes. Tout cela va conduire évidemment à la perte de la récolte.

Les plantes à système racinaire profond bénéficient d'une situation privilégiée et surtout les arbres qui peuvent profiter de la présence de ces éléments nutritifs dans les couches profondes. Ainsi le circuit d'éléments nutritifs est fermé. Une bonne rotation des cultures (assolement) peut limiter aussi le lessivage d'éléments nutritifs. Premièrement parce que les différentes plantes ont des systèmes d'enracinement différents et deuxièmement parce que les diverses plantes ont des exigences différentes vis-à-vis des éléments nutritifs présents dans le sol, qu'elles absorbent sélectivement.

II.5.1.2 Cas des sols traditionnellement rizicultivés et soumis à la salinité

L'accent est mis sur les sols de vallées du Saloum, et dans une moindre mesure du Sine où la formation des tannes due à la sécheresse est une contrainte majeure. Ceci est d'autant plus vrai que la riziculture qui a été longtemps pratiquée a dû être abandonnée.

II.5.1.2.1 Salinisation

Pour rappel au Sénégal, la salinisation est surtout d'origine marine, ancienne ou actuelle, et se caractérise par des intrusions de la mer dans une nappe phréatique littorale qui est douce au départ. La contamination fait suite à une remontée du niveau de la nappe phréatique (zone de Niayes).

La salinisation marine ancienne est liée à la dernière transgression marine, qui a laissé des surfaces d'eaux piégées, qui sont devenues de véritables lagunes (delta du fleuve Sénégal). Des sédiments marins (sources de remontées salées) ont été également déposés lors de cette transgression. La présence de vases marines imprégnées de salant marin le long de certaines côtes et estuaires (deltas du Sénégal et du Saloum, Casamance) donne naissance aux sols salés spéciaux appelés sols sulfatés acides. Il y'a aussi salinisation par remontée capillaire et par transport et accumulation de particules fines salées (vent). Une salinisation secondaire d'origine anthropique liée à l'utilisation d'une eau d'irrigation peu chargée en sels sur des sols à mauvais drainage est assez fréquente dans les périmètres irrigués. Dans ce cas, l'intensité du pouvoir évaporant est telle qu'il se produit par moment des remontées capillaires entraînant les sels vers les couches superficielles du sol.

II.5.1.2.2 Alcalinisation

L'alcalinisation résulte surtout d'un processus secondaire lié à l'irrigation dans le delta et la vallée du fleuve Sénégal. Les eaux du fleuve possèdent une alcalinité résiduelle calcite importante. Les conséquences sont une élévation du pH, une alcalinisation et une augmentation du sodium échangeable, préjudiciable au maintien d'une bonne structure du sol. L'alcalinisation est un phénomène potentiellement dangereux, mais qui n'a pas encore atteint des proportions alarmantes dans la vallée du fleuve Sénégal selon les investigations menées dans le cadre du Pôle régional de recherche sur les systèmes irrigués soudano-sahéliens (PSI) (Khouma *et al.* 2006).

II.5.1.3 Cas des sols fluvio-marins

II.5.1.3.1 Sursalure et acidification du domaine

Les déficits pluviométriques ont déclenché et amplifié la sursalure et l'acidification des sols sur l'ensemble du domaine.

La sursalure, peu répandue avant les années 1971, a vite atteint les sols, depuis les terrasses basses jusqu'au glacis de raccordement. Elle se produit par trois processus essentiels selon Sadio, (1989):

- 1) la migration verticale des sels par remontée capillaire de la solution du sol ou de la nappe phréatique peu profonde, sous l'action des phénomènes d'évaporation intense due aux températures très élevées (25 à 40° C) et qui maintiennent pendant 8 à 9 mois un profil salin ascendant;
- 2) les inondations par les eaux sursalées des cours d'eau, 2 à 3 fois plus salées que l'eau de mer (46 mS/cm) ;
- 3) l'accumulation des limons salés transportés par les vents, au niveau des zones couvertes de végétation.

A cause de ces processus les sols restent sursaturés pendant presque toute l'année. Néanmoins, on observe pendant l'hivernage, un dessalement des sols sableux des glacis de raccordement des levées sableuses, et des sols limoneux des terrasses hautes à topographie plane grâce aux eaux de pluies.

L'acidification de ces sols peu connue avant les années 1971, s'est très vite développée et propagée sur l'ensemble du bassin. Elle résulte de l'oxydation de la pyrite contenue dans les sédiments, provoquée par le drainage très marqué et le dessèchement prolongé des sols sous les effets conjugués de l'abaissement des nappes phréatiques et de l'évaporation. L'oxydation s'est révélée le processus le plus important qui oriente la

pédogénèse. Son importance dépend de la richesse en pyrite des sédiments, des conditions du milieu réactionnel (richesse en bases ou en sels) et de la situation topographique.

Ainsi dans les sols sulfatés acides à jarosite jeune des terrasses basses plus ou moins inondables, l'oxydation est incomplète et bloquée au stade de jarosite de couleur jaune pâle, alors que dans les terrasses moyennes et les glacis de raccordement, le bon drainage conduit à une oxydation complète de la pyrite en jarosite qui à son tour est hydrolysée en goethite (tâches jaunâtres et ocre-rougeâtres) puis en hématite. Cette évolution progressive que l'on peut qualifier de *maturation chimique*, paraît un phénomène extrêmement rapide. Cependant dans les sols associés aux coquilles d'huîtres dont la dissolution entraîne la libération de calcium, l'oxydation de la pyrite ne conduit pas à l'acidification, l'acidité produite étant neutralisée par les carbonates.

II.5.1.3.2 Conséquences sur l'environnement

A l'instar des autres écosystèmes naturels du pays, les domaines fluvio-marins ont été sévèrement endommagés par les déficits hydriques successifs engendrés au cours de ces dernières décennies par la sécheresse endémique qui règne dans la zone sahélienne depuis les années 1971 (Sadio, 1982). Cette sécheresse trouve sa particularité dans sa sévérité et sa durée plus longue que celles qui ont jalonné l'histoire climatique de la sous région depuis les années 1888 (Le Borgne, 1988). Partout les conséquences ont été sévères tant sur le plan environnement écologique que sur le plan de la productivité agricole des sols.

En effet, dans tous les bassins versants, particulièrement ceux du Sine Saloum et de la Casamance, la dégradation a été sans précédent, avec une disparition partielle ou totale de la mangrove dans les cours supérieurs des fleuves et de leurs affluents, à cause d'une sursalure et d'une hyperacidification des sols. Ces deux phénomènes ont entraîné l'extension des tannes au-delà de leurs limites habituelles et la dégradation des propriétés chimiques des sols.

L'existence des tannes dans ces zones remonte très loin, dans le passé, signalés par des études antérieures (Massibot *et al.*, 1946; Emerit, 1960; Charreau, 1963), mais jamais leur dégradation et extension n'ont été aussi importantes.

Alors que dans la plupart des pays les sols sulfatés acides résultent de l'intervention de l'homme, *au Sénégal il s'agit essentiellement d'une conséquence de la dégradation climatique caractérisée par une succession d'années sèches.*

Jamais dans la littérature une dégradation d'une telle importance, due à la fois à une salinité excessive et une hyperacidité n'a été signalée nulle part dans le monde (Sadio, 1991).

Du coup les schémas classiques de pédogenèse reconnus dans les sols salés et sulfatés acides se trouvent compliqués par la présence simultanée de ces deux paramètres.

Au niveau agricole la sursalure et l'hyperacidité constituent des contraintes majeures de la mise en valeur de ces sols. Elles ont eu des conséquences très lourdes dont les plus visibles sont une baisse de la productivité des sols, un recul des cultures traditionnelles au-delà de leurs zones habituelles et un délaissement des terres des terrasses basses argileuses transformées en véritables saumures. Dans le seul bassin du Sine Saloum environ, 230 000 ha sont ainsi endommagés par ces deux facteurs, avec plus de 140 000 ha dans le domaine des tannes. La gravité de la situation fait que les premières tentatives de récupération initiées vers les années 1965 (Bèye, 1972; Bèye *et al.*, 1975; Sadio, 1985 et 1986) et les grands projets d'aménagement agricoles se sont soldés par des échecs entre 1970 et 1980.

A l'état actuel du niveau de péjoration du climat et de dégradation des terres, les seules possibilités de récupération agricole envisageables à court terme de ces tannes sont essentiellement le reboisement et l'aménagement pastoral. La mise en culture à grande échelle ne peut être envisageable qu'à moyen et long terme après une maîtrise des eaux de surface et un dessalement important de ces sols.

II.5.1.4 Conclusions sur la dégradation des sols

Au terme de cette revue bibliographique, disons avec Bèye (1977), les phénomènes de dégradation des sols au Sénégal, constituent une menace. En effet toutes les formes de dégradation existent et quelque fois avec une ampleur pouvant être catastrophique sur le plan de la production nationale si des mesures conservatoires urgentes ne sont pas prises.

Cependant la voie d'intensification agricole, appréhendée dans sa dimension globale et dans une démarche de type système, appliquant l'intégralité des techniques de production intensive, sans diffusion sélective est capable non seulement d'accroître et de régulariser la production, mais aussi de préserver au mieux le capital foncier. C'est celle que propose la Recherche Agronomique Sénégalaise.

Malgré leur forte dégradation, la récupération de ces tannes s'avère aujourd'hui plus que nécessaire pour satisfaire les besoins en produits alimentaires et en bois de feu d'une population plus nombreuse. En effet, actuellement les importations de riz, principale denrée alimentaire de la population citadine sont énormes. La consommation journalière en bois de feu croit de façon exponentielle.

II.6 Différentes approches de bonification des sols salés et sulfatés acides

Selon Bèye (1972), la mise en valeur des sols salés a fait l'objet de très nombreuses études de par le monde. La première action qui s'impose pour la culture de ces sols est le lessivage de l'excès de sels solubles. Pour cela, les recettes abondent dans la littérature.

Les plus courantes sont le drainage profond par un réseau de collecteurs, l'irrigation avec de l'eau douce pour lessiver les sels, l'application d'amendements chimiques et organiques, le labour profond, l'utilisation de variétés résistantes, les techniques spéciales de culture (Viets, 1960, citée par Bèye, 2002).

Ces méthodes impliquent pour la plupart des investissements élevés:

-l'approche mécanique en barrant l'eau et l'obligeant à emprunter des itinéraires pour l'empêcher d'occasionner des effets non voulus et de déclencher, ou mieux de favoriser l'acidification et la salinisation a toujours été vaine. Le développement de la riziculture a nécessité la construction de digues anti-sel afin de favoriser le lessivage des sols. Cette méthode qualifiée de mécanique s'est heurtée à des problèmes d'entretien des ouvrages par des populations non initiées aux techniques d'endiguement qui n'ont de ce fait pas connu le succès escompté (Fall 2002). Suite à une méthode soit préventive, soit curative cet échec a poussé à la recherche des stratégies plus performantes pour juguler le processus de salinisation des terres du bassin;

-l'approche biologique selon Sadio (1991) en utilisant les techniques de reboisement avec les essences forestières telles que *Melaleuca spp.*, *Prosopis spp.* et *Eucalyptus* permettent de résoudre ainsi la pénurie en bois de feu que connaît la population. Les essences doivent être choisies en fonction de leurs exigences écologiques et de la qualité de la nappe phréatique, les aptitudes des terres et les besoins des populations. Les résultats obtenus avec les différentes espèces dans les essais de reboisement à N'Gan et Fatick malgré la jeunesse des plantations, ont été satisfaisants;

-l'approche chimique, dans les essais de riziculture de Dubos *et al.* (1994) s'est appuyée sur les méthodes traditionnelles en y adjoignant des techniques plus performantes, en particulier en matière de drainage, afin de provoquer un meilleur dessalement du sol. Cette expérience réalisée durant la période 1963-1975, s'est malheureusement soldée par un échec à cause de la méconnaissance des processus d'acidification de ces sols (Ilaco, 1967).

La paille et la matière organique décomposée protègent le sol, en saison sèche, contre l'assèchement profond qui accentue le processus d'acidification. En créant une couche perméable en surface, elles favorisent, en début de saison des pluies, le dessalement superficiel et l'enracinement des semis.

- l'originalité du PRASS est d'utiliser une approche holistique de la question et de lever les limites imposées par chaque méthode prise séparément et de les corriger. La composante mécanique du système biomécanique suivant (Fall, 2002) constitue le moteur du dispositif expérimental de N'Diaffate. Il consiste en des diguettes d'une longueur totale de 8590 m (dont 1420 m pour la partie périphérique) larges de 40 cm et hautes de 50 cm. Leur rôle est de canaliser l'eau de pluie afin qu'elle ne se perde pas dans les cours d'eau salée et de stopper l'avancée de la langue salée provenant de l'estuaire lors des marées hautes. Ce faisant l'eau de pluie canalisée permet le lessivage ou la lixiviation des sels et *par conséquent le dessalement et la désacidification du profil.*

Chapitre III : Synthèse des principaux résultats du Projet de restauration agronomique des sols salés (PRASS)

III.1 Introduction

Notre domaine d'investigation est principalement axé sur ce système fluvio-marin en s'appuyant sur les acquis des projets PRASS I et PRASS II exécutés durant une période de cinq ans (de 1997 en 2002) en vue de dégager les perspectives d'après projet. Fondamentalement, il s'agit de valoriser ces tannes purs en atténuant leur salinité, en vue de les rendre propices pour la riziculture. Pour ce faire, on utilise des moyens mécaniques couplés à la réimplantation d'espèces halophytes.

NDiaffate est un site géo référencé c'est-à-dire ayant toutes les coordonnées géodésiques remplissant beaucoup de conditions pour en être un des écotypes. Il illustre une collaboration entre partenaires (ISRA, ISE/UCAD, IPALAC et AFRICARE) dans le domaine d'études de ces tannes. Une série de mesures techniques a été mise en route, selon les principes de l'agroforesterie, de la restauration des sols (DRS), de la gestion durable des ressources naturelles (GDRN) et de l'approche participative. C'est dans les terroirs de N'Diaffate, Ngane et Khalambasse situés dans le département de Kaolack et le territoire de Keur Omar, situé dans le département de Foundiougne (Diop, 2002).

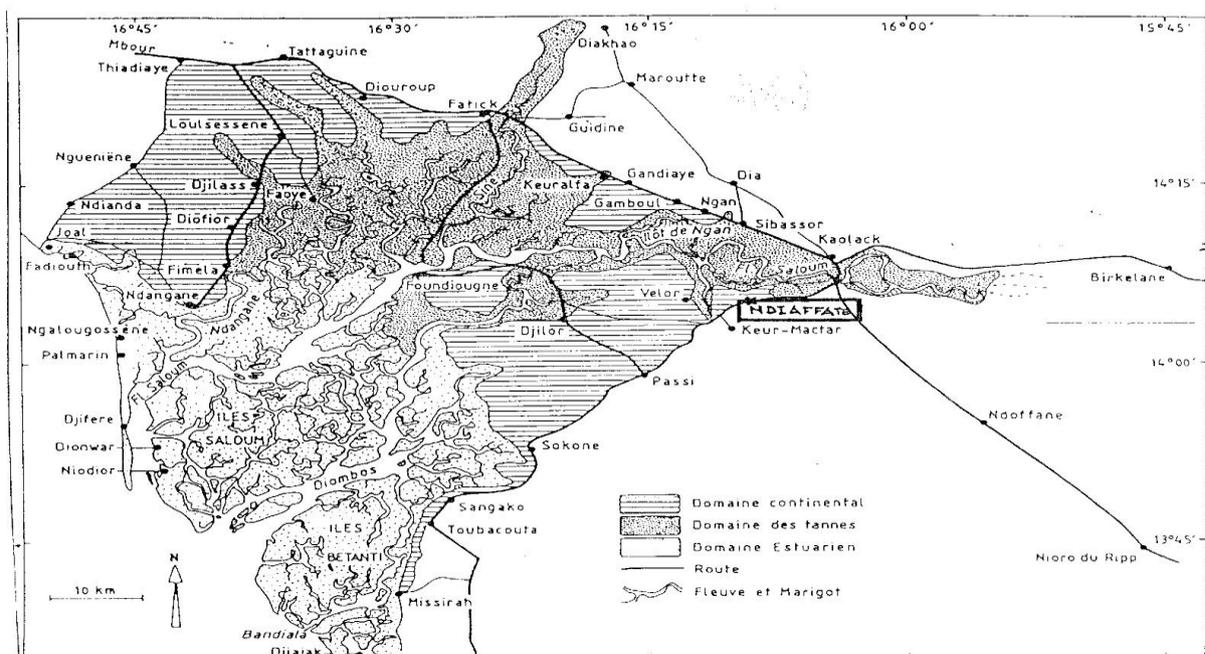


Fig.4 : Carte du domaine fluvio-marin du bassin du fleuve Saloum (Sadio, 1991)

Des études évoquent la problématique suscitée par l'avancée de la salinisation, ensuite caractérisent le milieu biophysique, avant de mettre en relief des expériences de récupération des terres entreprises par AFRICARE et PAGERNA.

L'objectif des projets PRASS est de conduire des recherches visant à contribuer à la récupération des sols salés de la côte ouest du Sénégal pour les rendre aptes à soutenir durablement des activités de production agricole et d'élevage en utilisant un système mixte diguettes en terre, arbre/ herbacée fourragère tolérants à la salinité (Sène, 2000).

La présente étude est une contribution au suivi post projet PRASS; et a comme objectif spécifique de caractériser l'influence d'un système d'utilisation des terres sur la qualité du sol.

III.2 Matériels et méthodes

L'intérêt d'un tel projet pour le Sénégal est évident, lorsqu'on considère l'extension des superficies abandonnées de terres arables pour cause de salinisation.

En abordant les acquis du PRASS, on met l'accent sur le volet hydro-pédologique, sur l'écologie et l'agroforesterie.

L'utilisation des arbres pour récupérer les terres inondées est une pratique ancienne; l'usage des herbacées halophytes pour favoriser le lessivage des sels est également connu. Mais l'utilisation du système mixte arbre/ herbacée, pour récupérer les terres salées et stimuler la production des cultures, est une approche nouvelle au Sénégal (Diop, 2002).

En faisant le point sur l'état actuel des connaissances sur la question, l'utilisation d'espèces très résistantes au sel (halophytes) ayant une valeur économique, pourrait constituer une solution alternative à ce processus de salinisation et de récupération des terres salées. Si des arbres appropriés sont plantés sur une large superficie, *ils abaisseraient la nappe phréatique par transpiration*, ce qui produirait dans le sol les effets positifs suivants:

- l'eau de pluie va remplacer le volume d'eau évacuée du sol et lessiver la couche superficielle du sol des sels toxiques;
- l'aération du sol sera améliorée;
- le processus de salinisation de la couche superficielle s'arrêtera (Diop, 2002).

Le choix des espèces est basé sur l'étude menée en Israël à l'Université Ben-Gurion, Beer-Sheva pendant 10 ans sur 150 plantes halophytes testées pour leur résistance au sel

(Pasternak, communication orale) et pour leur valeur économique (Redouan *et al.*, 1995). Les espèces proposées dans le cadre du PRASS sont ci-dessous décrites:

- ✓ l'espèce arborée, *Tamarix aphylla var erectus* est un arbre à croissance rapide, très résistant au sel et à l'inondation. Il peut atteindre une hauteur de 15 à 20 m et il produit un excellent bois d'œuvre. C'est aussi la première fois que l'utilisation du *Tamarix aphylla var erectus* pour récupérer les terres salées et acides, est tentée au Sénégal;
- ✓ l'espèce fourragère est l'herbacée halophyte (*Distichlis spicata*), native du continent américain et qui est une espèce avec d'exceptionnelles caractéristiques. Elle tolère des salinités assez élevées, l'inondation, les conditions du climat sec et chaud, des pH bas ou élevés. C'est une herbacée en C4, étalant des rhizomes et qui a des potentialités productives très bonnes.

La présente recherche se propose d'analyser les essais menés au niveau de N'Diaffate sur les sols sulfatés acides salés. En particulier, il s'agira d'identifier et de suivre quelques paramètres chimiques représentatifs de l'état des sols de tannes, pour analyser l'évolution des valeurs prises par ces paramètres en fonction de la profondeur du sol. Au terme de ce travail seront caractérisés ces sols en vue de leur revalorisation. C'est l'objectif spécifique de l'étude.

III.2.1 Dispositif et conduite de l'essai

Il s'agit d'un dispositif en blocs aléatoires complets randomisés à 4 traitements et 5 répétitions.

III.2.1.1 Dispositif expérimental

Le dispositif qui découle des différents traitements étudiés est présenté à la figure 5.

La superficie totale du dispositif est de 8 ha répartis en 5 blocs de 1,6 ha. Chaque bloc comprend 4 parcelles (ou traitements) de 0,4 ha (80 m x 50 m) dont 1 parcelle- témoin (sans arbres). Les écartements ou densités de plantations sont au nombre de 3 (écartement 1 = 3 m x 4 m; écartement 2 = 4 m x 4 m et écartement 3 = 4 m x 5 m).

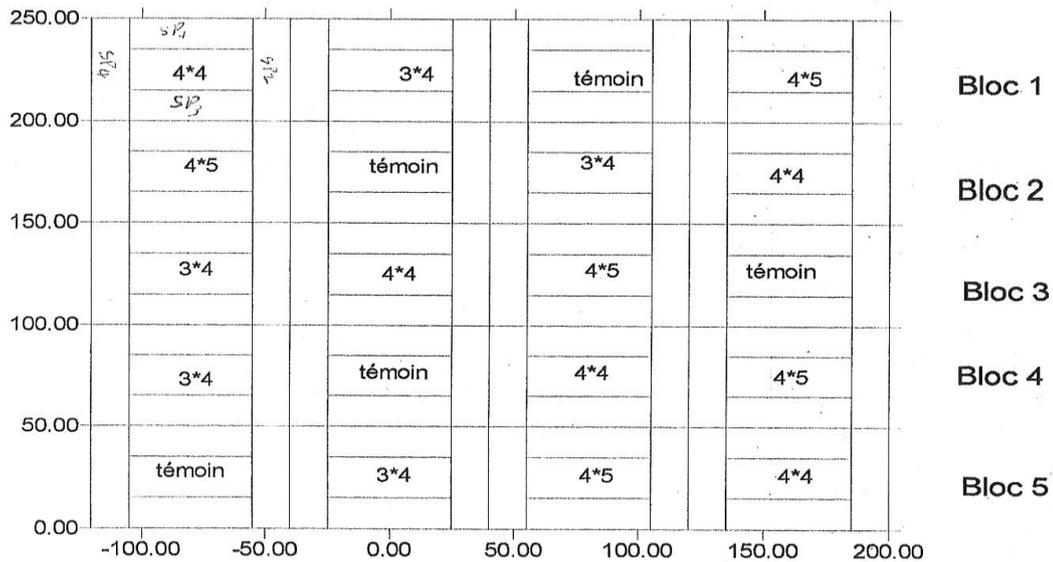


Fig.5: Localisation des parcelles d'essai en 5 blocs aléatoires complets le long des 4 transects suivant la toposéquence (source Projet PRASS. Rapport annuel 1999).

Le dispositif compte ainsi 20 parcelles dont 5 témoins. La surface plantée de *Tamarix aphylla* (3 000 m²/parcelle) entoure une aire centrale de 1 000m² plantée avec une herbacée fourragère halophyte (*Distichlis spicata*).

Ces parcelles sont entourées par des diguettes de 50cm de haut sur 40cm de large sur lesquelles est plantée la troisième espèce (*Atriplex lentiformis*) pour les fixer et leur assurer une protection contre les intempéries.

Le dispositif expérimental est entouré sur les quatre cotés par une zone tampon de *Tamarix aphylla* (50 m de large du côté de l'estuaire et 30 m sur les autres côtés). C'est ainsi que la surface totale du site d'expérimentation incluant les bordures est de 9.9 ha (Fig.6).

III.2.1.2 Disposition des piézomètres et traitements

Le suivi de l'effet des traitements expérimentaux sur l'évolution de la nappe doit s'appuyer sur un nombre approprié de piézomètres à installer au centre des parcelles expérimentales. D'autres piézomètres sont installés en dehors de l'essai.

Traitements: Trois écartements de plantations de *Tamarix aphylla* (3 m x 4m, 4 m x 4m, 4mx 5 m) et un témoin non planté.

Ainsi le nombre total de piézomètres est de 42, répartis sur 6 transects dont les 4 passent au milieu des parcelles perpendiculairement aux blocs, les 2 autres sont en dehors de l'essai.

Chaque piézomètre est installé au milieu de la parcelle centrale (soit 20 piézomètres dans l'essai) les 22 autres sont en dehors (Fig.6).

La disposition ainsi obtenue permet une analyse géostatistique des données. En fait on définit une placette de mesures centrée autour du piézomètre de dimension 20 m x 20 m. C'est au niveau de cette placette de 400 m² que se fait l'essentiel des suivis: sol (hydrologie, chimie, physique). L'état de cette placette (nappe, profil salin, etc.) pourrait être mis en relation avec l'effet combiné de la diguette et du traitement.

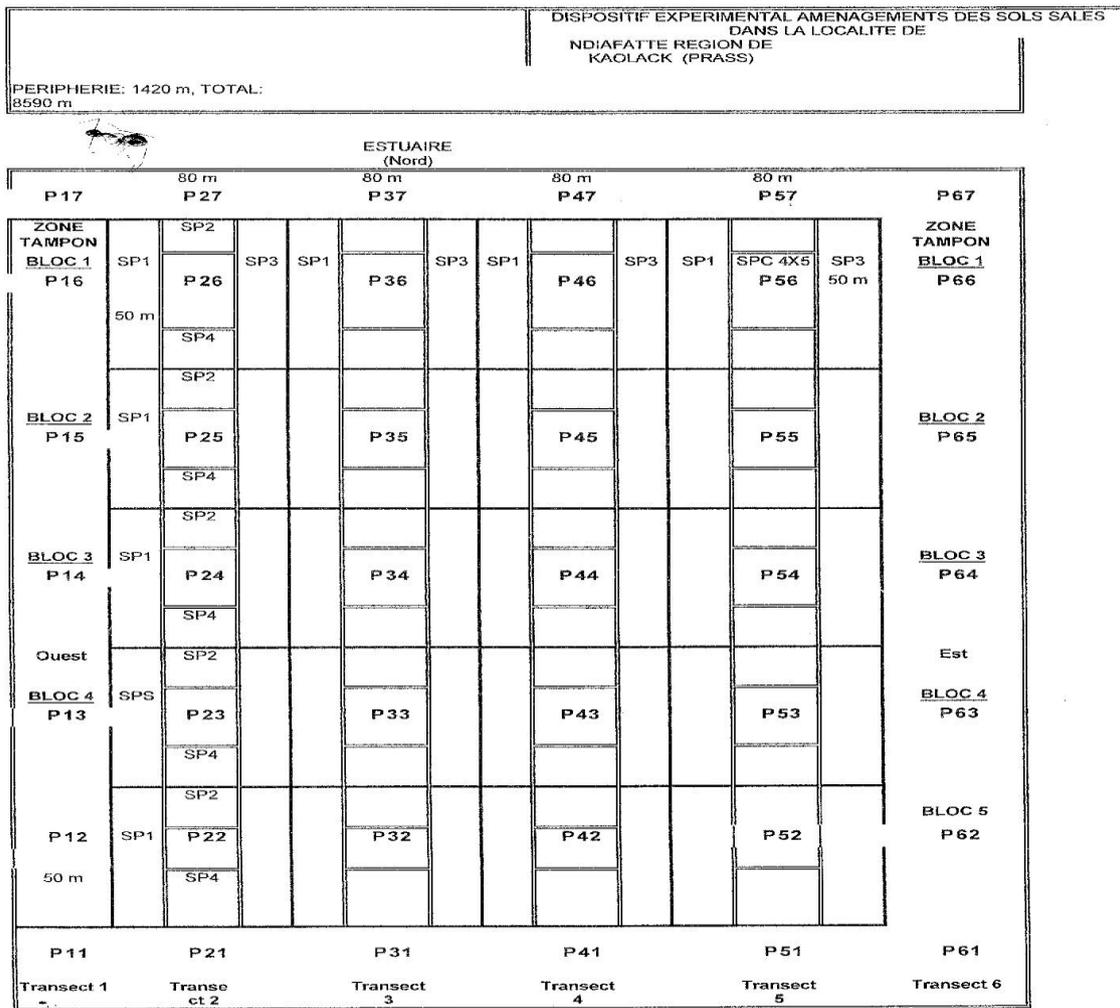


Fig.6: Dispositif expérimental de N'Diaffate avec la localisation des 42 piézomètres, (source Projet PRASS. Rapport annuel 1999).

III.2.2 Volet Hydro-pédologique

Les tâches assignées à ce volet concernent la caractérisation physique du milieu et le suivi de l'évolution des paramètres physico-chimiques et hydriques des sols.

III.2.2.1 Caractérisation du site expérimental: nappe et sol

Elle porte sur l'analyse des états de surface du sol (cartographie), la caractérisation initiale du sol (cartographie morpho-pédologique du site), l'installation d'une station météorologique pour le suivi climatique, l'installation d'un réseau de piézomètres (dynamique de la nappe phréatique) suivi de la caractérisation de l'eau de surface.

III.2.2.2 Suivi des paramètres du sol et de la nappe

Ce suivi concerne les aspects liés aux caractéristiques physico-chimiques (C.E, pH, MO, BE, P, N_{tot.} et NO₃) à l'analyse de la solution du sol (bilan ionique), au profil salin (distribution des sels dans le profil hydrique (teneur et pression de l'eau, infiltration), l'analyse de la composition chimique du matériel végétal frais, de la litière et de la dynamique de la décomposition de la matière organique.

III.2.3 Volet Ecologie-Agroforesterie

Un inventaire de la végétation spontanée a été réalisé suivant l'approche phytosociologique. Le taux de survie, critère d'appréciation du degré d'adaptation d'une espèce aux conditions stationnelles est utilisé.

III.3 Les principaux résultats acquis

III.3.1 Caractérisation du site

Les travaux de terrain portant sur la réalisation de la carte d'occupation des sols ont été entièrement effectués et les données obtenues sont en cours de traitement. Pour suivre la fluctuation de la nappe phréatique 42 piézomètres ont été installés pour l'ensemble de l'expérimentation.

La caractérisation morpho pédologique a donné les unités suivantes :

- bordure du lit mineur du cours d'eau

Sol vaseux potentiellement sulfaté acide, argileux, à concrétions ferrugineuses à coquilles.

- terrasse basse

Sol salé, sulfaté acide jeune (jarosite moins profonde), argileux sableux;

Sol salé, sulfaté acide mature, argileux-sableux, à gley, à concrétions calcaires.

D'une manière générale, ces sols ont été mis en place dans un environnement très perturbé par le phénomène d'alternance de la crue et la décrue du bras du fleuve Saloum. Ce qui leur confère un aspect de sols faiblement développés. Ils sont argileux dans l'ensemble et asphyxiants (phénomène de gley en profondeur).

Les contraintes à la production forestière et agricole relevées au niveau de ces différents sols de terrasse basse sont l'acidité, la salinité et la compacité du matériau en cas du déficit d'eau. Ces sols présentent de bonnes aptitudes à la riziculture.

- terrasse moyenne

L'environnement physique au niveau de cette unité géomorphologique est caractérisé par une micro-topographie plane à drainage latéral moyen (pente entre 1 à 2%).

Les sols rencontrés sont dans l'ensemble lourds et profonds. Ils sont marqués par une épaisse couche bariolée rougeâtre qui, quand elle affleure confère aux sols en place une couleur rouge sang. Cette couche semble être le résultat d'une fluctuation de la nappe phréatique probablement riche en fer. D'autre part, cette couche rougeâtre desséchée accentue la compacité du sol à une certaine profondeur dressant ainsi une barrière physique difficile à pénétrer par les plantes.

Les principales contraintes relevées sur ces sols de terrasse moyenne sont la compacité du matériau en saison sèche et la salinité. Ces sols présentent entre autres une aptitude à la riziculture, au pâturage et au reboisement avec des espèces appropriées.

- terrasse haute

L'environnement physique de cette terrasse haute est marqué par une micro-topographie mamelonnées, découpée par endroit par de petits chenaux d'écoulement anastomosés.

La présence d'un chenal d'écoulement à ce niveau topographique surélevé a permis d'ailleurs la mise par endroits d'un sol hydromorphe minéral argileux. Néanmoins, les sols dominants sont de type peu évolués d'apport hydromorphe, argilo-sableux à sableux. Ils sont relativement plus profonds.

Les contraintes à la production agricole et forestière de ces sols sont le drainage légèrement excessif (posant une faible disponibilité en eau pour les plantes).

Les sols de cette unité géomorphologique ont une aptitude au pâturage et au reboisement.

Conclusion : Les types de sols ainsi inventoriés dans le cadre de la caractérisation morpho-pédologique du site expérimental de N'Diaffate présentent des caractéristiques physiques et chimiques peu favorables au développement des arbres à enracinement pivotant. Les contraintes principales relevées sont la compacité, la salinité et l'acidité extrêmes du matériau mis en place.

III.3.2 Evolution des caractéristiques de la nappe et du sol

III.3.2.1 La nappe

Sur la base des périodes caractéristiques de l'année (saison des pluies, début et fin de saison sèche), l'évolution de la profondeur est étroitement liée à celle du pH et de la CE.

- La remontée rapide de la nappe de juin à août à une vitesse pouvant atteindre $2,5 \text{ cm j}^{-1}$ est compensée par une descente assez rapide de septembre à janvier ($0,7 \text{ cm j}^{-1}$) suivie d'une autre phase de descente lente entre février et juin ($0,25 \text{ cm j}^{-1}$).
- A l'échelle de l'année, juin 2000 – juin 2001, on note plutôt une remontée nette de la profondeur de la nappe de l'ordre de $0,15 \text{ cm j}^{-1}$
- Indépendamment du sens considéré (perpendiculairement ou parallèlement à la pente), la remontée de la nappe correspond à une augmentation du pH et une diminution de la CE, et inversement.

Comportement de *Tamarix aphylla*. L'espèce introduite *Tamarix aphylla var erectus*, semble bien s'accommoder aux conditions de salinité de ce type de milieu. Cette espèce a un taux de survie général qui peut être jugé satisfaisant (50% à 80%). Elle a atteint au bout de six mois de plantation une hauteur moyenne générale de $80 \text{ cm} \pm 3$. Ce qui suggère une croissance rapide illustrée par un taux de croissance relatif mensuel qui varie entre 37% et 22%.

Concernant les traitements (densité de plantation), il semble ne pas y avoir à ce stade de développement des arbres, une influence de ce paramètre, sur le comportement de cette espèce sur ce type de milieu.

Les résultats de cette caractérisation physico-chimique et hydrique du site d'étude de N'Diaffate permettent de mieux expliquer la contre performance de *Tamarix aphylla* au niveau des unités de terrasse basses et moyenne (Blocs 1 et 2). En effet, les résultats relatifs à la reprise de *Tamarix aphylla* et ceux portant sur la dynamique de revégétalisation des blocs ont été relativement médiocres.

Au terme de 5 années du projet, le meilleur taux moyen de survie de *T. aphylla* a été obtenu avec l'écartement 4mx5m. Toutefois, ce taux de survie de même que le niveau de croissance de *T. aphylla* déterminé par la taille et le diamètre à hauteur de poitrine dans le temps ont été relativement faibles. En conséquence, l'impact de *T. aphylla* sur le fonctionnement hydrique du sol n'est pas encore perceptible.

En fait, il est possible d'affirmer que seules les diguettes mises en place depuis le début de l'expérimentation et régulièrement entretenues *ont pu influencer* sur la nappe et le sol au cours de la période du projet 1999 à 2002.

Les principaux résultats de suivi de la nappe et du sol sont de sorte que:

Si cette tendance se maintient, cela vaudrait dire qu'avec le temps, l'aménagement en diguette seule permet d'améliorer les caractéristiques chimiques de la nappe, pouvant se traduire par une *amélioration du profil cultural*.

III.3.2.2 Le sol

- Quel que soit le transect considéré, soit dans le sens de la pente, l'humidité du sol tout le long du profil augmente d'amont en aval. Il existe une forte variation de la teneur en eau, notamment en surface. Celle-ci atteint 14% sur tous les transects, à l'exception de T₄ et T₅. Elle s'explique principalement par la texture du sol.
- Sur le carbone du sol en surface et le long de la toposéquence, l'aménagement constitué par les diguettes et les plantations a eu un effet plutôt mitigé. Une explication plausible à cela pourrait être la durée encore courte des aménagements, mais aussi la minéralisation rapide de la matière organique dans l'environnement du site expérimental.

Cependant, il importe de noter qu'il y'a eu un effet remarquable des aménagements sur la régénération de la végétation spontanée. Il convient de rappeler que d'autres études sont en cours de réalisation (suivi de la nappe, qualité de la nappe, croissance de l'espèce en relation avec cette nappe, caractérisation physique et chimique des sols).

Notre contribution porte sur la caractérisation chimique des sols.

Conclusion

Au vu des résultats obtenus et évoqués précédemment, d'autres études de suivi ont été menées. C'est ainsi qu'un planning de travail a été élaboré pour pouvoir servir de base de démarrage d'une activité de recherche à des fins de comparaisons de données pour suivre l'évolution de la fertilité de ces sols salés.

Chapitre IV-Effet du traitement biomécanique sur quelques paramètres chimiques du sol déterminés deux ans après la fin du PRASS

IV.1 Introduction

L'idée de suivi d'évolution des paramètres antérieurement étudiés dans le PRASS a orienté notre étude. Mais néanmoins sur le plan de l'aménagement, aussi bien de la plantation des espèces végétales, on n'a pas pu tester l'idée de pompe biologique.

Nous avons fait des prélèvements en novembre 2005 sur le sol. Le caractère saisonnier de la variation des caractéristiques telles que le pH, la C.E et le Carbone du sol a fait que les prélèvements de novembre ne correspondent point aux périodes pour lesquelles les résultats acquis ont été présentés antérieurement. Par conséquent, nous n'avons pas pu faire la comparaison des résultats obtenus dans notre étude avec. L'objectif est de voir l'effet de l'écartement du traitement (plantation), sur quelques paramètres chimiques du sol.

IV.2 Matériels et Méthodes

IV.2.1 Paramètres essentiels et leur signification

Dans des cas les plus évidents de tels paramètres pourraient être utilisés pour des stratégies de caractérisation du sol.

Un paramètre *idéal* du sol devrait posséder les attributs suivants:

- être facilement mesurable;
- être sensible au phénomène pour lequel il vient d'être choisi;
- être stable en l'absence du phénomène qui le détermine (par conséquent être peu sensible à d'autres variables et être relativement constant dans le temps);
- être peu variable d'un type de sol à un autre;
- être spécifique d'un certain type de sol;
- être prédisposé à un certain type d'évolution (tanne à végétation nue, tanne à végétation herbeuse et tanne à végétation arbustive) (Diop, 1998).

Evidemment, en pratique, il est difficile de trouver des paramètres essentiels qui satisfassent à tous ces attributs énumérés ci-dessus. Quoique, une analyse attentive des données de la littérature nous permet pour le moins d'indiquer quelques paramètres avec des caractéristiques acceptables. Certains paramètres ont été identifiés et testés au laboratoire central d'analyses

sur des échantillons de plantes, d'eau et de sols au CNRA de Bambey et ont donné des résultats satisfaisants suivant les règles de bonnes pratiques de laboratoire. Il s'agit de:

- l'azote, du phosphore, des chlorures etc.;
- la matière organique;
- pH et de la conductivité électrique (salinité);
- bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), Fe^{3+} et les oligo-éléments;
- la granulométrie.

Ceux qui sont jusqu'à maintenant amplement et communément étudiés sont les suivants: pHeau, pH kcl, C.E, BET, MO, P total, pour ne citer que ceux là.

IV.2.2 Conduite de l'essai et prélèvements des échantillons de sol

Les échantillons de sols d'un poids maximum de 1 kg sont prélevés sur des placettes (400 m²), à raison de trois prises individuelles par parcelle suivant un triangle et mélangés, à l'aide d'une tarière aux horizons 0-5 cm, 15-25 cm et 50-65 cm.

IV.3 Analyses de laboratoire des échantillons de sols prélevés

Les 126 échantillons de sol (= 42 X 3; 42 et 3: représentant successivement les 42 piézomètres et les trois horizons d'étude) sont prélevés autour de chaque piézomètre, les 8 et 9 novembre 2005 sur le site de N'Diaffate, juste après la fin de la saison des pluies. Ils sont collectés, ensachés, numérotés et stockés. Chaque échantillon reçoit un numéro d'identification SR/Solab, inscrit sur le cahier de demande d'analyse en individualisant de façon précise et simple chaque échantillon en vue d'être analysé au Laboratoire Central du CNRA/ISRA de Bambey.

IV.3.1 Préparation des échantillons

Avant de procéder aux différentes analyses, les échantillons de sol prélevés subissent un conditionnement. Ce dernier permet d'avoir la terre fine ayant servi aux déterminations physico-chimiques. Le conditionnement comprend:

- un séchage à l'air libre des échantillons suivi de leur tamisage avec un tamis à maille de deux millimètres (2mm);
- un premier passage de la terre fine ainsi recueillie au partiteur (appareil de quartage du sol), afin de réduire la quantité de l'échantillon à 500g;

- un second passage au partiteur sépare l'échantillon en deux fractions: l'une destinée aux analyses physiques; l'autre est passée au broyeur planétaire pendant 10 minutes et sert à effectuer des analyses chimiques (Oliver, 1978).

IV.3.2 Les analyses chimiques

IV.3.2.1 Le pH

Le pH d'un sol exprime la concentration en ions hydronium libres qui existent dans la solution du sol. La méthode potentiométrique utilisée permet de mesurer deux types de pH.

-le pHeau (pH H₂O) qui donne la valeur de l'acidité réelle ou active, c'est-à-dire une idée de la concentration des ions acides se trouvant en contact avec les racines et autres organismes du sol.

-le pH_{KCl} qui exprime la quantité d'ions H⁺ échangeables fixés sur le complexe absorbant et qui constituent une réserve actuellement non disponible.

Le procédé utilisé est le suivant:

Dans un bécher de 100 ml de forme basse, peser 20 g de sol tamisé à 2 mm. Ajouter 50 ml d'eau distillée et un barreau magnétique (rapport 1/2,5). Homogénéiser avec un agitateur magnétique pendant une minute puis laisser reposer 15 minutes, agiter à nouveau pendant 1 minute puis tremper l'électrode du pH-mètre dans la suspension et mesurer le pH.

Dans le cas où le pH_{KCl} est demandé, ajouter à la suspension précédente 3,75 g de KCL RP, agiter et laisser reposer à nouveau 15 minutes, agiter une dernière fois et mesurer le pH. La valeur trouvée est en général inférieure de 1 unité pH à la précédente et elle mesure l'acidité d'échange du sol (Oliver, 1978).

IV.3.2.2 La conductivité électrique (C.E)

La conductivité d'une solution est par définition la conductivité d'une colonne de solution comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface et distantes de 1cm. Elle est fonction de la température.

La conductivité électrique d'un sol (exprimée en dS/m ou mS/cm) renseigne sur son degré de salinité. Elle est obtenue par mesure de la quantité de sels solubles existant dans une suspension dans un ratio sol/eau bien défini. Dans le cas des sols étudiés, le ratio 1/5 a été utilisé: C.E₅

La conductivité dépend largement de la température qui doit être mesurée exactement. La conductivité des échantillons d'eau est donnée par convention à 20° (norme française) ou

25°C (norme USA, utilisée à Bambey). Une table permet la correction des valeurs lues à une température différente.

Enfin la conductivité est aux fortes concentrations, une concentration non linéaire de la concentration saline du milieu, on devra donc, dans la mesure du possible, utiliser des étalons dont la conductivité est proche de celle des échantillons à analyser. Exemple: conductivité de KCL = F[KCL] (Oliver, 1978).

IV.3.2.3 Le Carbone

Une grande proportion de carbone existant dans la pédosphère se trouve stocké à l'état de carbone organique dans le sol. Son dosage, par colorimétrie permet de déterminer la matière organique du sol en multipliant la valeur de carbone obtenue par 1,72.

Le principe général de la méthode est obtenu par modification de la méthode de Wakley Black. Le carbone organique subit une oxydation par le bichromate de potassium à froid (en présence d'acide sulfurique, utilisé comme catalyseur) suivi d'une réduction de l'excès de bichromate par du chlorure de baryum. La prise d'essai est de 0,5 ou 1,0 g de sol selon la teneur présumée en carbone. Le dosage s'effectue par colorimétrie au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 600 μm .

IV.3.2.4 Le complexe adsorbant et la capacité d'échange cationique

Le complexe adsorbant d'un sol est défini comme étant l'ensemble des colloïdes, dotés de charges négatives, susceptibles de retenir les cations sous la forme dite échangeable. Ces cations échangés et fixés sur le site d'échange jouent un rôle important car ils déterminent la *fertilité du sol*. Le complexe adsorbant se caractérise par sa capacité d'échange cationique (CEC) et sa teneur en cations métalliques échangeables. Ces derniers sont extraits par la méthode de trichlorure de Cobalthexamine. Après leur dilution avec une solution de Lanthane, ils sont dosés par absorption atomique pour les cations métalliques (Ca et Mg) et les cations sodique et potassique (Na^+ et K^+). Quant à la CEC, elle est déterminée par la méthode au cobalt (Oliver, 1978).

Entre ces différents paramètres, nous retiendrons ceux chimiques pour des raisons de contrainte de temps et d'efficacité dont nous suivrons particulièrement le pHeau, le pHkcl, la C.E (la Conductivité Electrique), C (le Carbone) et les BE (Bases Echangeables).

IV.4 Analyse statistique des données

Nous nous servons des méthodes de la statistique descriptive pour les distributions observées. L'usage du paramètre de position qu'est la moyenne et sa caractérisation par l'écart type sera utilisé, pour représenter la dispersion des différentes valeurs obtenues pour toutes les variables étudiées. Quant à la représentation graphique de ces valeurs, l'histogramme sera utilisé, vu qu'il s'agit de variable continue.

Il est fait recours également en inférence statistique aux différents tests utilisés (voir plus loin), pour analyser les données obtenues afin de mieux comprendre les interactions entre les différentes variables étudiées.

L'usage du logiciel SAS est un outil de travail à propos. Il nous permet de faire:

- l'analyse en composantes principales (ACP);
- l'analyse de la variance multivariée;
- l'analyse canonique discriminante.

IV.4.1 Analyse en composantes principales (ACP)

Afin d'étudier l'effet des traitements sur l'évolution des paramètres chimiques du sol ainsi que leurs interactions, nous avons utilisé la méthode des ACP. Cette méthode permet:

- d'intégrer plusieurs variables à la fois;
- d'étudier les liaisons entre les variables;
- de mettre en évidence les variables les plus discriminantes;
- d'obtenir une image simplifiée sur des plans discriminant au maximum des facteurs.

Pour mettre en évidence les facteurs discriminants, l'analyse a porté sur huit (8) variables (pHeau, pHkcl, Conductivité (CE), Carbone (C), Calcium (Ca), Magnésium (Mg), Sodium (Na), Potassium (K) dans l'ensemble des traitements.

IV.4.2 Analyse de la variance multivariée

Pour rappel, notre analyse s'effectue sur des traitements. Chaque traitement (écartement ou densité de plantation) représente une plantation de l'espèce étudiée *Tamarix aphylla*, dont l'écartement est variable d'un traitement à un autre.

L'analyse de variance multivariée est une extension de l'analyse univariée, au cas où plusieurs variables ont été observées simultanément. Elle permet de voir les *différences liées aux facteurs étudiés*, mais en plus elle offre l'avantage de *la prise en compte des corrélations*

qui existent souvent entre variables étudiées. Pour cela, on part du principe de l'équation fondamentale de l'analyse de la variance à un critère qui s'écrit:

$$T = H + E$$

T, H et E étant les matrices des sommes de carrés d'écart et de sommes de produits d'écart

T est la matrice totale, H est la matrice factorielle, E est la matrice résiduelle.

Lorsque les conditions d'application sont remplies, différents critères permettent de tester l'hypothèse nulle d'égalité des vecteurs, moyennes de traitement à partir des matrices H et E.

Parmi ces critères, nous avons:

1) Le test de WIKLS qui est égal à:

$$\Lambda_{\text{obs}} = |E| / |H+E|,$$

Lorsque les conditions d'application sont vérifiées, on rejettera l'hypothèse nulle, lorsque

$\Lambda_{\text{obs}} < \Lambda_{\alpha}$, α étant le niveau de signification du test.

En pratique, le test de WILKS conduit à une valeur de Λ_{obs} qui est transformée en une valeur de F_{obs} , comparée à $F_{1-\alpha}$.

2) Le test de Pillai ou de Bartlett PILAI, utilise comme critère la trace de la matrice

$H(H+E)^{-1}$, c'est-à-dire la somme des valeurs propres de cette matrice. Une transformation de cette trace possède approximativement une distribution F, lorsque l'hypothèse est vraie.

3) Le test de HOTELING-LAWLEY est basé sur la somme des valeurs propres $E^{-1}H$. Elle s'approche également à une distribution de F, lorsque l'hypothèse nulle est vraie.

4) Le test de ROY ne prend en compte que la première valeur propre, il est l'analogue à une analyse de la variance univariée, réalisée sur la première variable canonique.

IV.4.3 Analyse canonique discriminante

Pour décrire les différences entre les traitements étudiés (s'il existe), nous avons procédé à une analyse canonique discriminante à l'aide du logiciel SAS. Le principe consiste à calculer les nouvelles variables à partir des variables initiales. Ces nouvelles variables sont des combinaisons des variables initiales réduites. *Elles sont non corrélées et d'importance décroissante.*

La première variable canonique est telle que le rapport de la variance entre les traitements à la variance dans les traitements soit maximum.

La seconde variable non corrélée avec la première vise à maximiser ce rapport et ainsi de suite.

Le calcul de ces variables canoniques repose sur la décomposition des sommes des carrés et des produits des écarts totaux en deux parties, l'une liée aux différences entre les traitements, l'autre liée aux différences dans les traitements. Ce qui correspond également à l'équation de l'analyse de la variance à un critère: $T = H + E$.

Les coefficients des variables canoniques représentent les points des variables initiales dont les combinaisons linéaires sont des vecteurs propres associés aux valeurs propres de la matrice $E^{-1}H$.

Exprimés en pour cents de leur somme; les valeurs propres de $E^{-1}H$ donnent une idée de la qualité de la représentation sur les axes.

Géométriquement, les valeurs des variables canoniques correspondent aux projections des points individus sur une série d'axes qui représentent les directions dans lesquelles des différences entre les traitements

Chapitre V - Résultats

V.1 Résultats des analyses chimiques

V.1.1 Le pHeau

Les mesures des pHeau des sols dans les différents horizons pour les six (6) transects sont données par les figures (7, 8, 9).

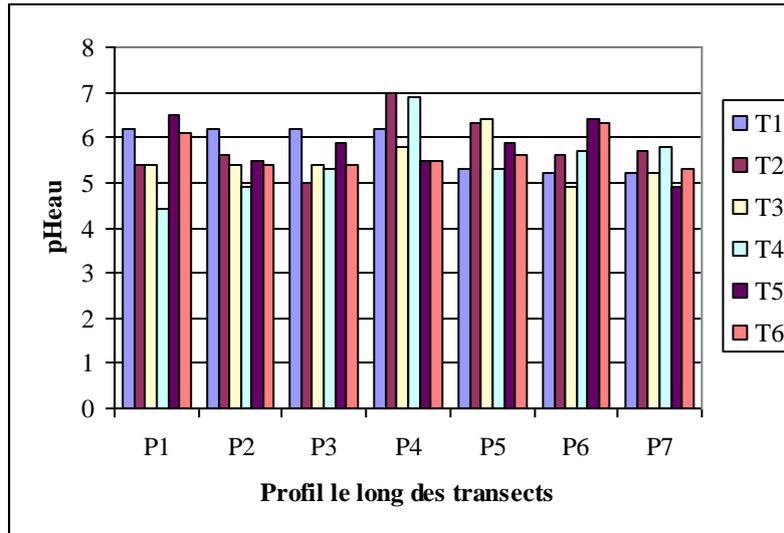


Fig.7: Evolution du pHeau des sols en fonction des transects, horizon 0-5cm.

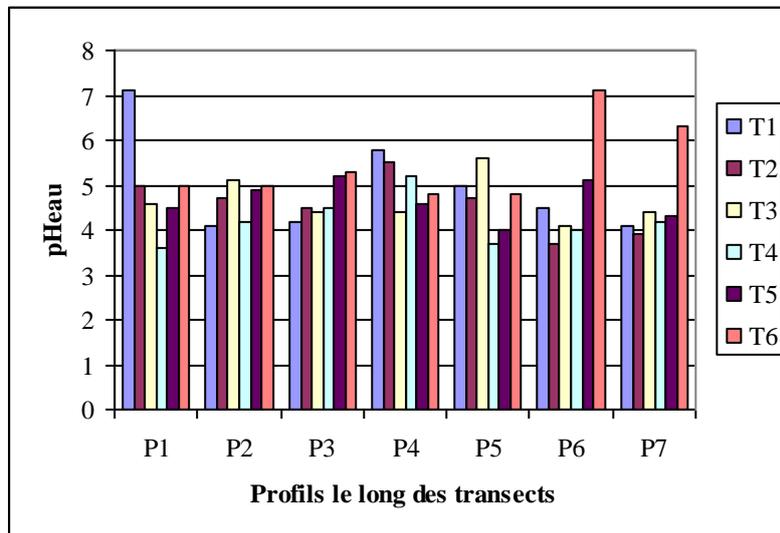


Fig.8: Evolution du pHeau des sols en fonction des transects, horizon 15-25cm.

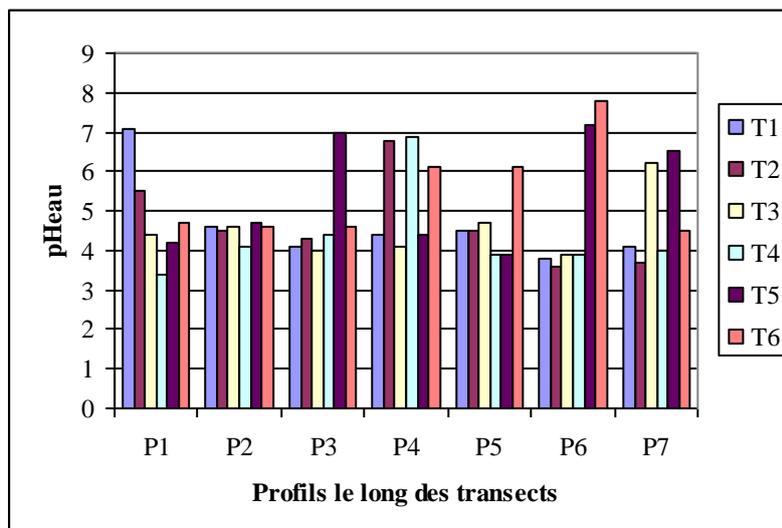


Fig.9: Evolution du pHeau des sols en fonction des transects, horizon 50-65cm.

Les graphiques présentent une allure générale en dents de scie avec des moyennes respectives par transect de:

- pour l'horizon 0-5cm [5,41; 5,8; 5,5; 5,4; 5,8; 5,66] et pour des écarts types correspondants de [0,49; 0,60; 0,44; 0,73; 0,51; 0,36];
- pour l'horizon 15-25cm [4,97; 4,57; 4,66; 4,20; 4,66; 5,47] et des écarts types correspondants de [1,04; 0,57; 0,48; 0,50; 0,40; 0,82];
- pour l'horizon 50-65cm [4,66; 4,70; 4,56; 4,37; 5,41; 5,49] et des écarts types correspondants de [1,03; 1,03; 0,73; 1,07; 1,32; 1,15].

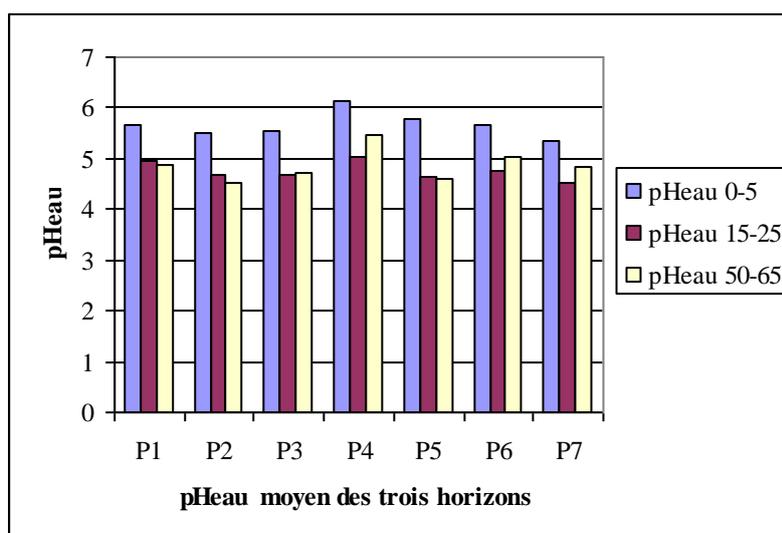


Fig.10: Evolution du pHeau moyen des sols selon les transects.

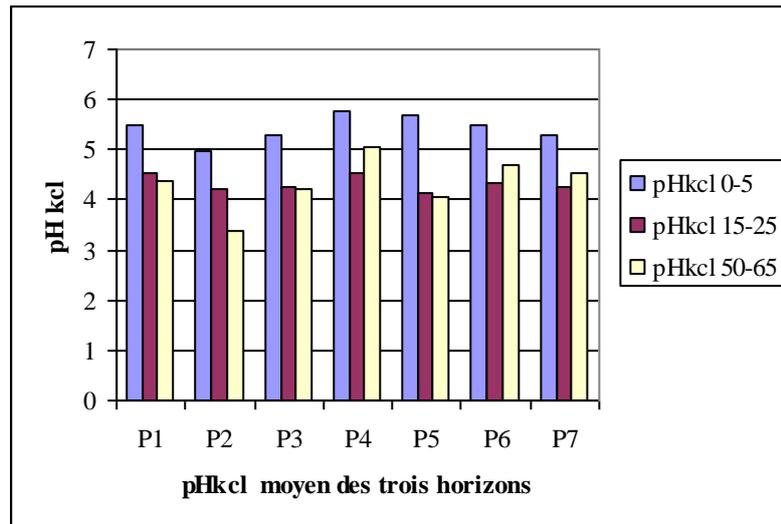


Fig.11: Evolution du pHkcl moyen des sols selon les transects.

V.1.2 Le pHkcl

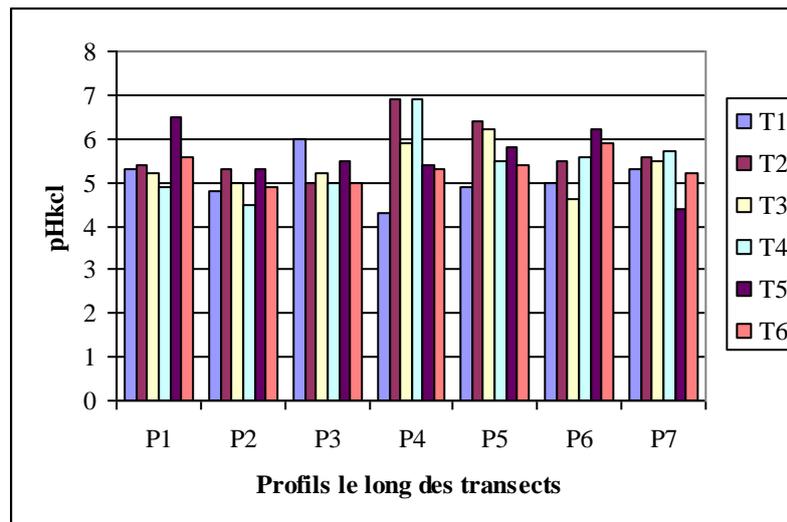


Fig.12: Evolution du pHkcl des sols, horizon 0-5cm.

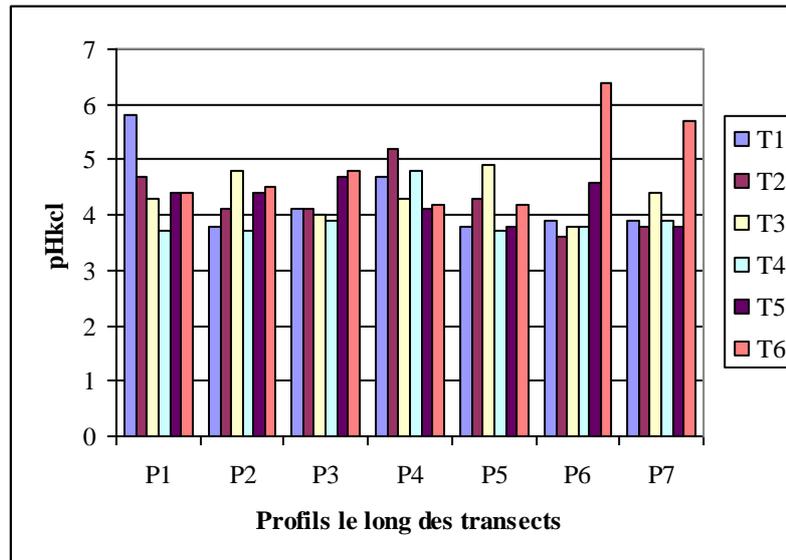


Fig13: Evolution du pHkcl des sols, horizon 15-25cm.

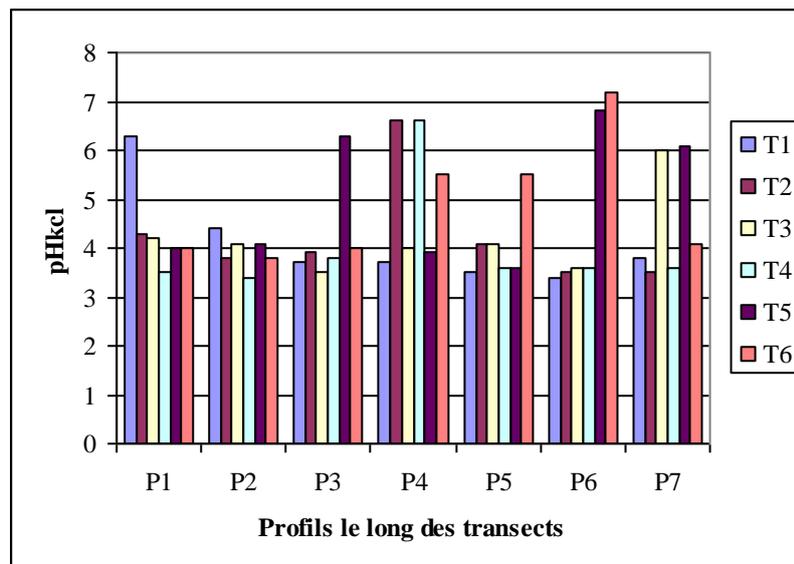


Fig.14: Evolution du pHkcl des sols, horizon 50-65cm.

Les représentations graphiques données par les figures (12,13 et 14) montrent une évolution quasi identique à celles du pH_{eau} avec une allure en dents de sci.

V.1.3 Les pH_{eau} moyen et pH_{kcl} moyen

Les courbes des pH_{eau} moyen et des pH_{kcl} moyen ont la même allure en dents de sci.

Pour les différents horizons, les tendances se confirment avec une légère différence.

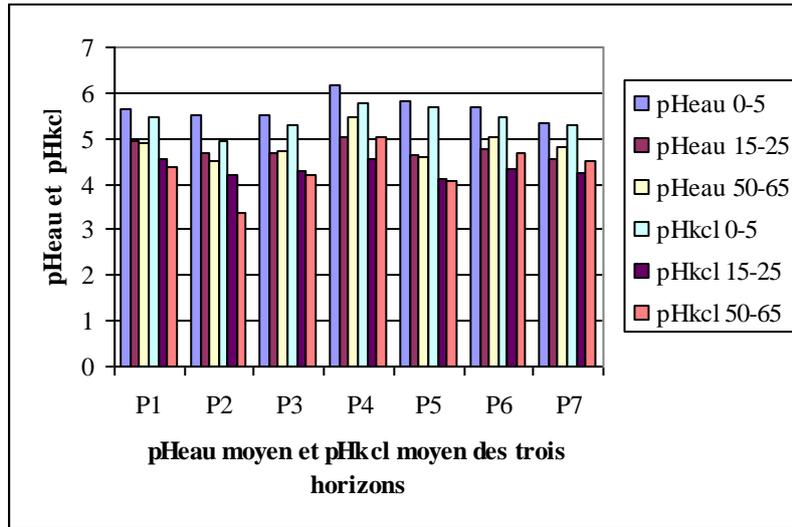


Fig.15: Evolution du pHeau moyen et pHkcl moyen selon les transects.

V.1.4 La conductivité électrique (C.E)

Les mesures de conductivité dans les différents horizons pour les six (6) transects sont présentées par les figures (16, 17 et 18).

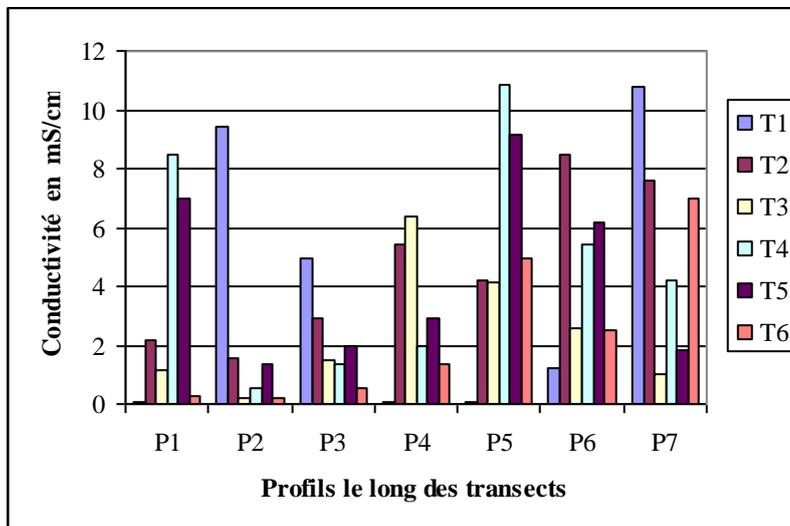


Fig.16 : Conductivité électrique des sols, horizon 0-5cm

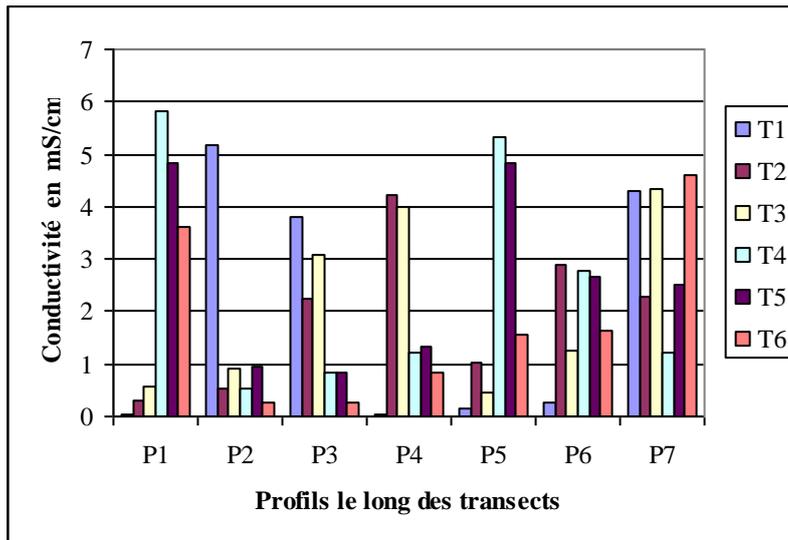


Fig.17: Conductivité électrique des sols, horizon 15-25cm.

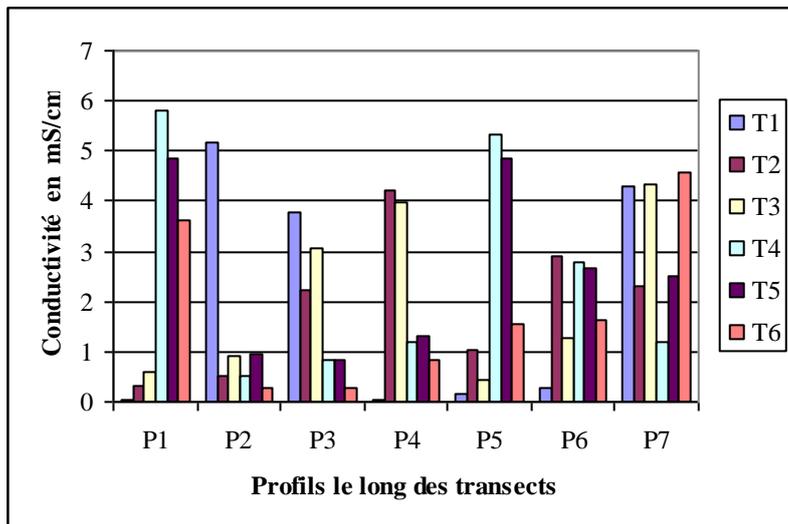


Fig.18: Conductivité électrique des sols, horizon 50-65cm.

Les figures sont structurées en dents de scie avec les valeurs en mS/cm par horizon, étalées entre:

- pour l'horizon 0-5 cm:

[0,037 - 10,77] pour T₁ ; [2,15 - 8,46] pour T₂ ; [0,17 - 6,41] pour T₃ ; [0,541-10,88] pour T₄;

[1,33 - 9,19] pour T₅ et [0,29 -7,0] pour T₆;

- pour l'horizon 15-25cm

-[0,026 -5,16] pour T₁ ; [0,31- 2,9] pour T₂; [0,45 - 4,35] pour T₃; [0,53 -5,8] pour T₄ ; [0,85-4,83] pour T₅; [0,28 - 4,59] pour T₆;

- pour l'horizon 50-65cm

-[0,16 - 3,40] pour T₁ ; [0,02- 4,11] pour T₂; [0,37- 4,48] pour T₃; [0,31- 4,96] pour T₄ ; [1,06 -5,08] pour T₅ et [0,7 - 3,50] pour T₆.

V.1.5 Le Carbone

Les teneurs en carbone des sols des différents horizons pour les transects sont données par les figures (19, 20, 21).

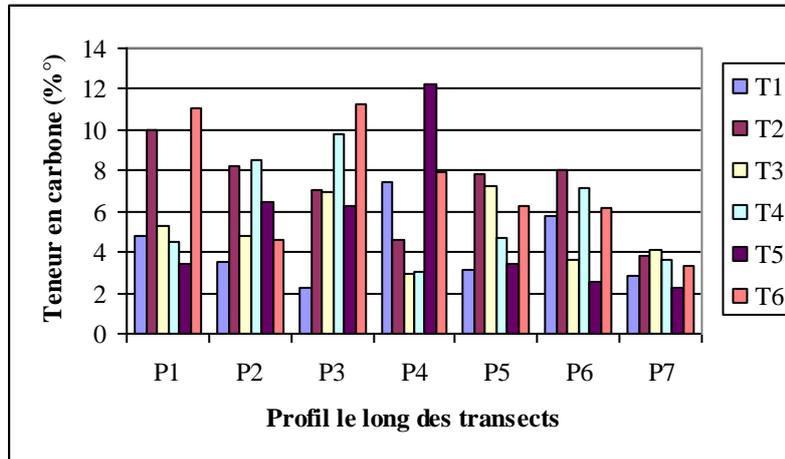


Fig.19: Evolution du taux de carbone d'amont en aval (P₁ à P₇) en fonction des transects (T₁ à T₆), horizon 0-5cm.

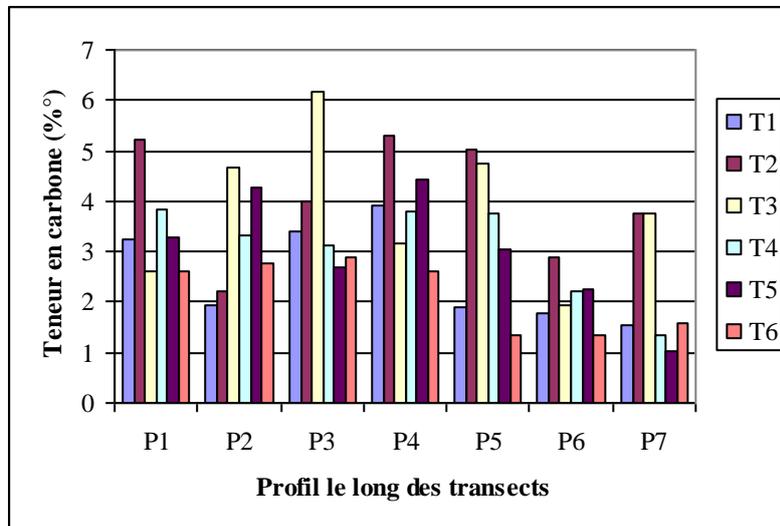


Fig.20: Evolution du taux de carbone d'amont en aval (P₁ à P₇) en fonction des transects (T₁ à T₆), horizon 15-25cm.

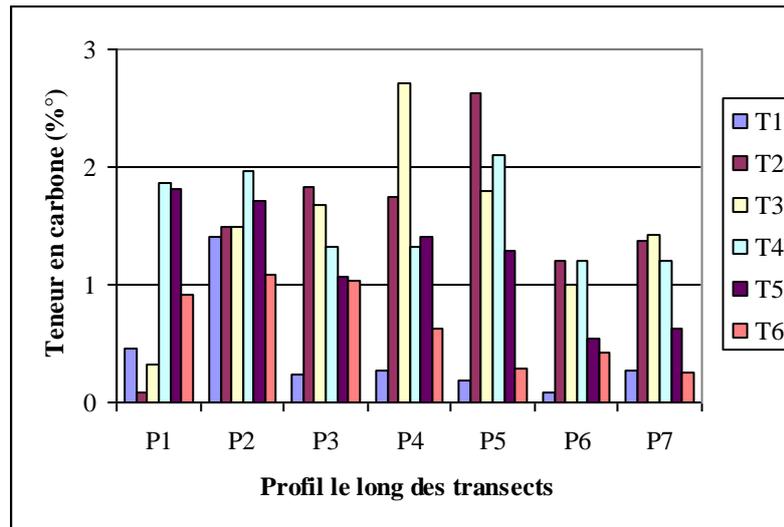


Fig.21: Evolution du taux de carbone d'amont en aval (P₁ à P₇) en fonction des transects (T₁ à T₆), horizon 50-65cm.

Si on suit l'évolution du taux de carbone d'amont en aval (P₁ à P₇), en fonction des transects (T₁ à T₆), la tendance est à la variabilité du taux de carbone figures (19, 20, 21). Cette variabilité est d'autant plus remarquable qu'on passe de l'horizon 0-5cm à l'horizon 15-25cm et à l'horizon 50-65cm, figures (22, 23, 24, 25,26,27).

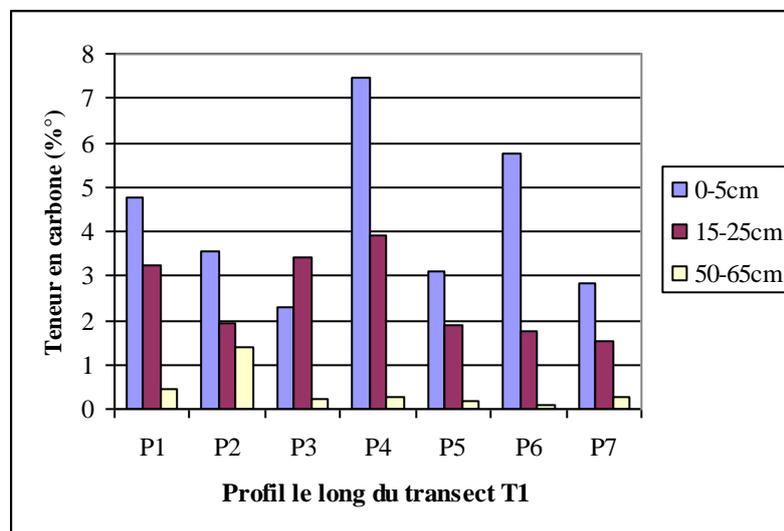


Fig.22: Evolution du taux de carbone en profondeur selon T₁.

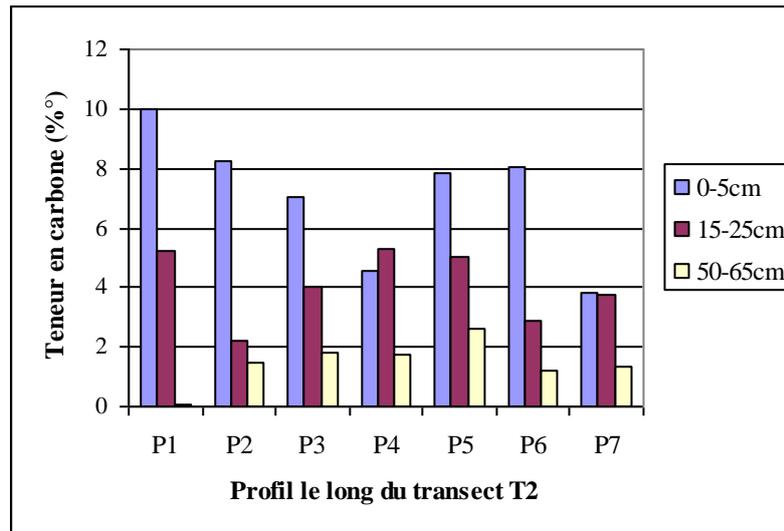


Fig.23: Evolution du taux de carbone en profondeur selon T₂.

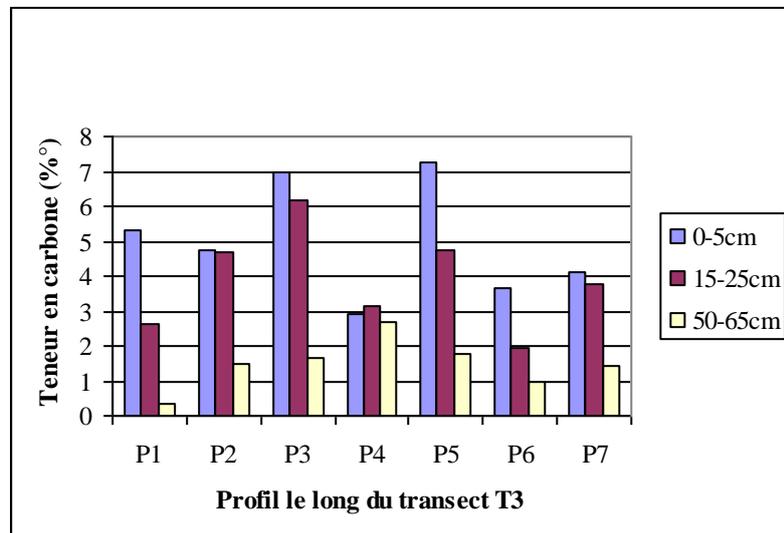


Fig.24: Evolution du taux de carbone en profondeur selon T₃.

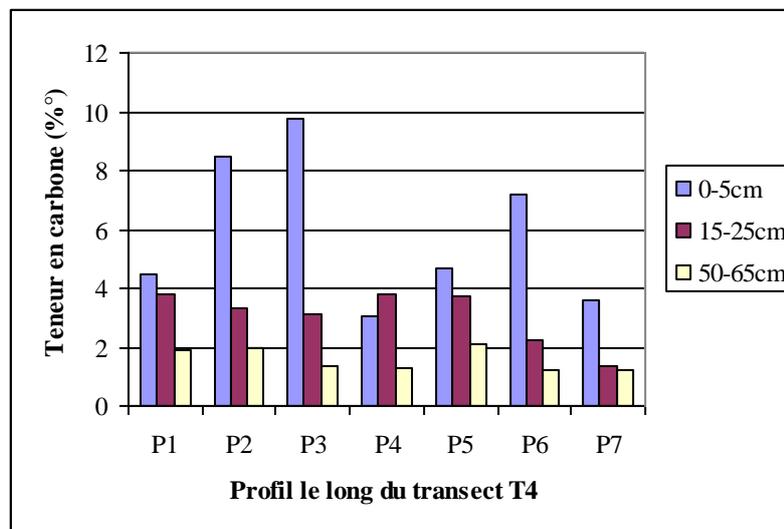


Fig.25: Evolution du taux de carbone en profondeur selon T₄.

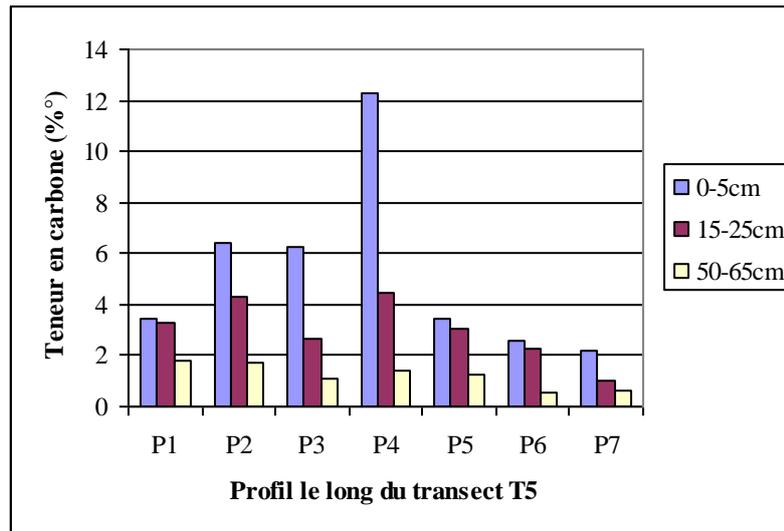


Fig.26: Evolution du taux de carbone en profondeur selon T5.

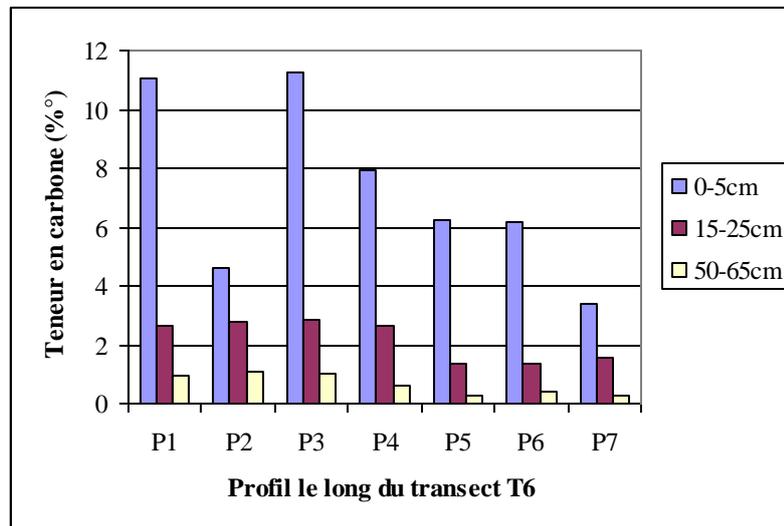


Fig.27: Evolution du taux de carbone en profondeur selon T6.

C'est au niveau des transects T₅ et T₆, qu'on obtienne les valeurs les plus élevées 12%, figures (26 et 27).

V.1.6 Les bases échangeables

En raison de la panne de l'Absorption atomique, nous nous sommes limités à la détermination des quatre (4) bases échangeables. Les valeurs moyennes obtenues pour les différents horizons ne concernent que les parcelles d'essais des transects T₂, T₃, T₄, et T₅. Ces valeurs sont présentées dans les tableaux 1, 2, et 3 suivants.

Tableau 1: Valeurs moyennes des B.E le long des quatre transects, horizon 0-5cm.

	Horizon:0-5cm		le long des 4	transects
	Ca (méq/100g)	Mg (méq/100g)	Na (méq/100g)	K (méq/100g)
P ₂	8,65	6,46	5,05	0,53
P ₃	7,33	5,90	3,62	0,39
P ₄	5,29	2,58	4,27	0,59
P ₅	7,30	2,58	1,90	0,40

Tableau 2: Valeurs moyennes des B.E le long des quatre transects, horizon 15-25cm.

	Horizon:15-25cm		le long des 4	transects
	Ca (méq/100g)	Mg (méq/100g)	Na (méq/100g)	K (méq/100g)
P ₂	4,98	3,75	3,3	0,32
P ₃	5,77	2,23	2,16	0,28
P ₄	3,8	2,99	3,31	0,46
P ₅	5,19	2,99	2,78	0,45

Tableau 3: Valeurs moyennes des B.E le long des quatre transects horizon 50-65cm.

	Horizon:50-65cm		le long des 4	transects
	Ca (méq/100g)	Mg (méq/100g)	Na (méq/100g)	K (méq/100g)
P ₂	4,51	4,61	4,35	0,4
P ₃	3,5	2,62	2,83	0,36
P ₄	2,97	2,1	3,09	0,4
P ₅	4,23	2,1	1,4	0,28

-Pour le Calcium (Ca), la valeur maximale de 12,15 méq /100 gr a été observée au P₂₆ (T₂), sur l'horizon 0-5cm, pour un minimum de 0,92 méq/100 gr. au P₄₄ (T₄), sur l'horizon 15-25cm.

-Pour le Magnésium (Mg), la valeur maximale de 20,83 méq /100 gr. a été observée au P₃₄ (T₃) sur l'horizon 0-5cm, pour un minimum de 0,29 méq/100 gr. au P₃₂ (T₃) sur l'horizon 0-5 cm.

-Pour le Sodium (Na), la valeur maximale de 6,96 méq /100 gr a été observée au P₄₆ (T₄) sur l'horizon 0-5cm, pour un minimum de 0,028 méq/100 gr au P₃₂ (T₃) sur l'horizon 0-5cm.

-Pour le Potassium (K), la valeur maximale de 1,15 méq /100 gr a été observée au P₂₆ (T₂), pour un minimum de 0,02 méq/100 gr au P₃₂ (T₃) sur l'horizon 0-5cm.

V.2 Les analyses multivariées

V.2.1 Analyse en composantes principales (ACP) et les résultats

L'analyse en composantes principales a été réalisée avec le logiciel SAS. Les tableaux (4,5,6) obtenus à partir de cette analyse reprennent la matrice de corrélation des variables, les informations relatives aux valeurs propres de la matrice de corrélation et les coefficients de corrélations des variables initiales avec les premières composantes principales.

Tableau 4 : Matrice de corrélation des variables.

	pHeau	pHkcl	C.E	C	Ca	Mg	Na	K
pHeau	1							
pHkcl	0,9734	1						
C.E	0,1977	0,3352	1					
C	0,2599	0,3204	0,0953	1				
Ca	0,3001	0,3344	0,3006	0,4340	1			
Mg	0,0244	0,0779	0,3552	-0,0902	0,4604	1		
Na	0,1155	0,2262	0,5878	-0,0117	0,1388	0,4772	1	
K	-0,0732	0,0172	0,4045	-0,0289	0,1584	0,4844	0,6497	1

-L'examen de la matrice de corrélation (Tab.4) montre que seules les variables pHeau et pHkcl du sol sont très bien corrélées. Le coefficient de corrélation est de **0,97**.

Certains couples de variables sont assez bien corrélés. C'est le cas des couples dont les coefficients de corrélation sont (Na, K): **0,65** ; (C.E, Na): **0,59**.

D'autres couples de variables sont quasi moyennement corrélés. Ce sont les couples ayant des coefficients de corrélation suivants : **0,48** ; **0,48** ; **0,46** ; **0,43**; **0,40**.

D'autres variables sont faiblement corrélées. Leur coefficient de corrélation est inférieur ou égal à 0,30.

Certaines variables sont négativement et très faiblement corrélées. C'est le cas des couples suivants avec les coefficients de corrélation (C, Na): -0,11 ; (C, Mg): -0,09 ; (pHeau, K):-0,07.

-Le tableau 5 suivant reprend: les valeurs propres de la matrice de corrélation, les différences entre les valeurs propres successives, les proportions et les proportions cumulées de la variance expliquée.

Tableau 5: Valeurs propres et pourcentage de proportion.

Facteurs/ou composantes	Valeurs propres	Différence	% Proportions	% Proportions cumulées
1	2,95	0,87	36,83	36,83
2	2,08	0,96	25,99	62,82
3	1,18	0,36	13,97	76,79
4	0,75	0,21	09,40	86,19
5	0,54	0,26	06,79	92,98
6	0,28	0,018	03,54	96,56
7	0,26	0,25	03,32	99,84
8	0,027		00,16	100,00

-Egalement, les coefficients de corrélation des variables initiales avec les trois premières composantes sont donnés et présentés dans le tableau (6) suivant:

Tableau 6: Corrélation des variables avec les composantes principales.

	1 ^{ère} composante	2 ^{ème} composante	3 ^{ème} composante
pHeau	0,57	0,70	-0,36
pHkcl	0,67	0,64	-0,34
C.E	0,72	0,21	-0,11
C	0,28	0,53	0,57
Ca	0,62	0,20	0,62
Mg	0,61	-0,45	0,26
Na	0,69	-0,49	-0,28
K	0,56	-0,60	0,005

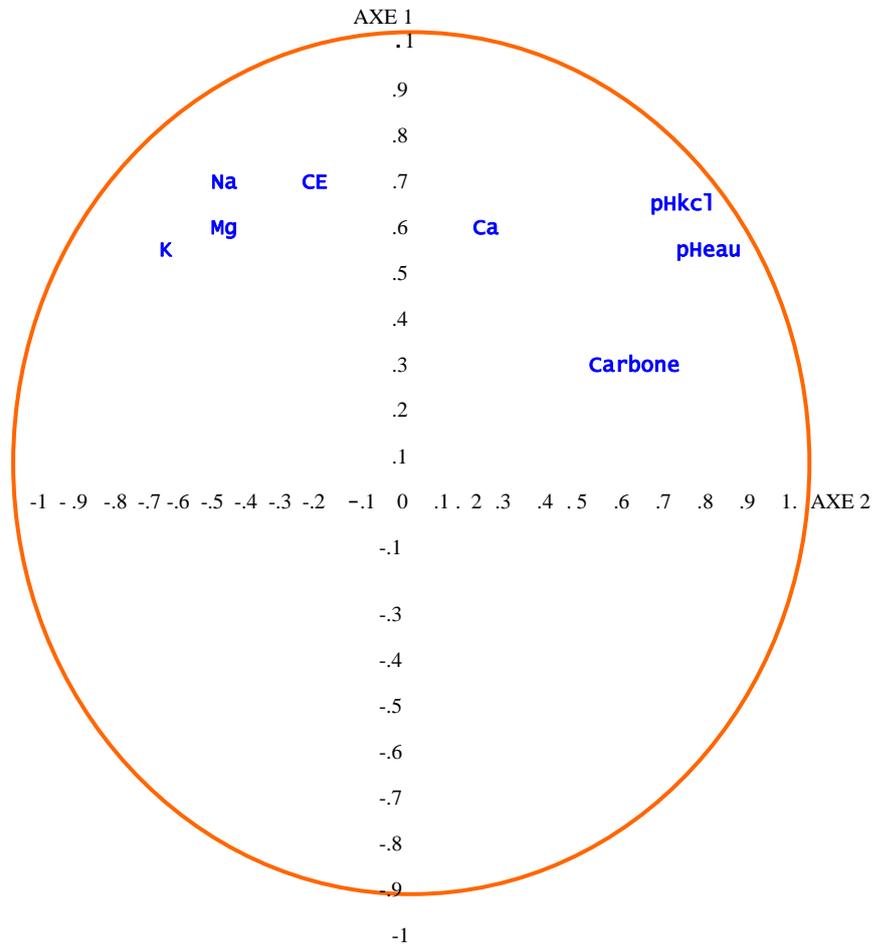


Fig.28: Cercle de corrélation dans le plan factoriel (P₁, P₂).

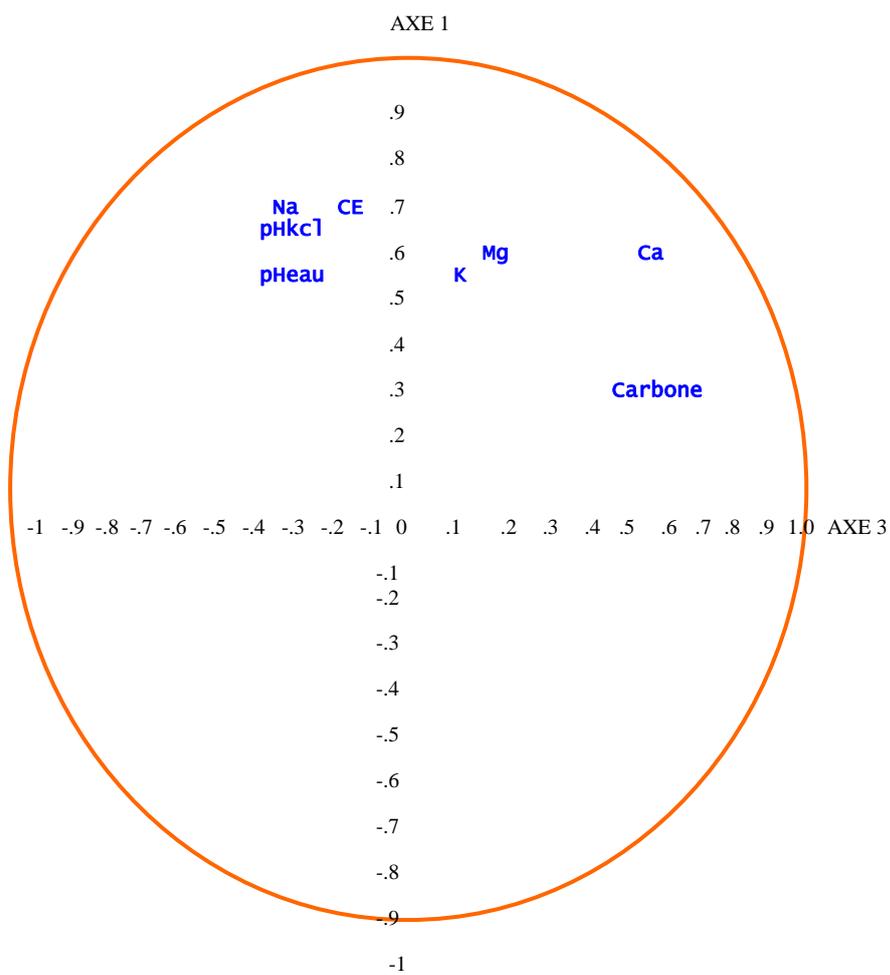


Fig.29: Cercle de corrélation dans le plan factoriel (P₁, P₃).

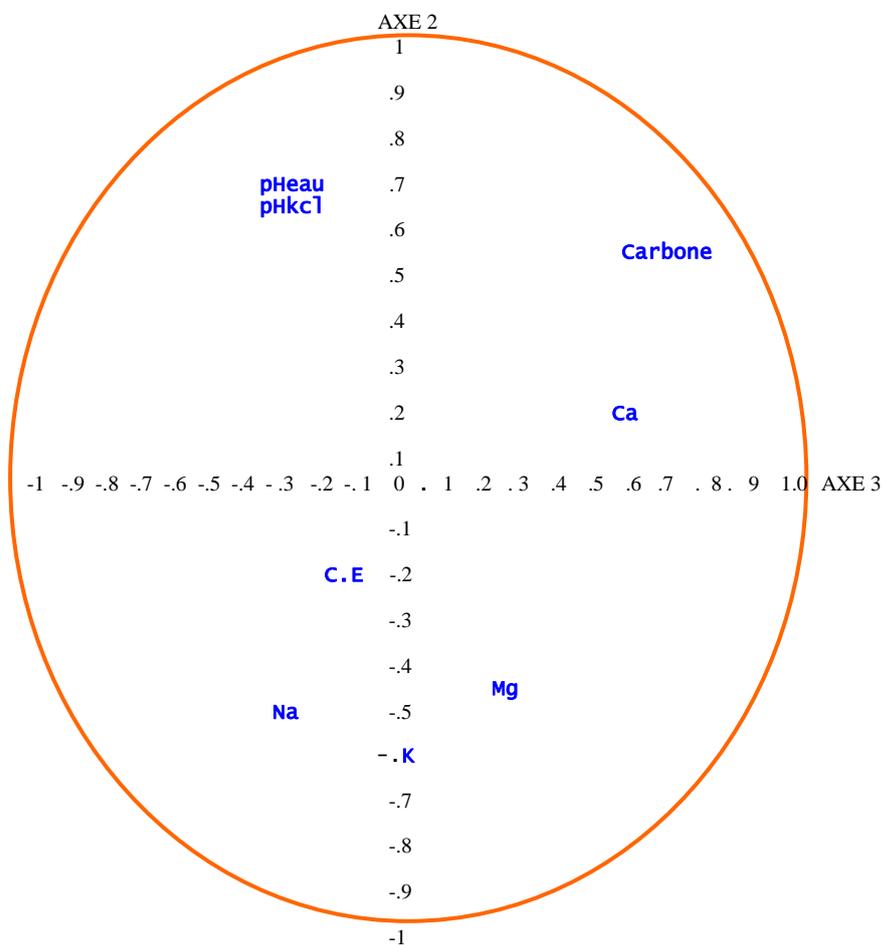


Fig.30: Cercle de corrélation dans le plan factoriel (P₂, P₃).

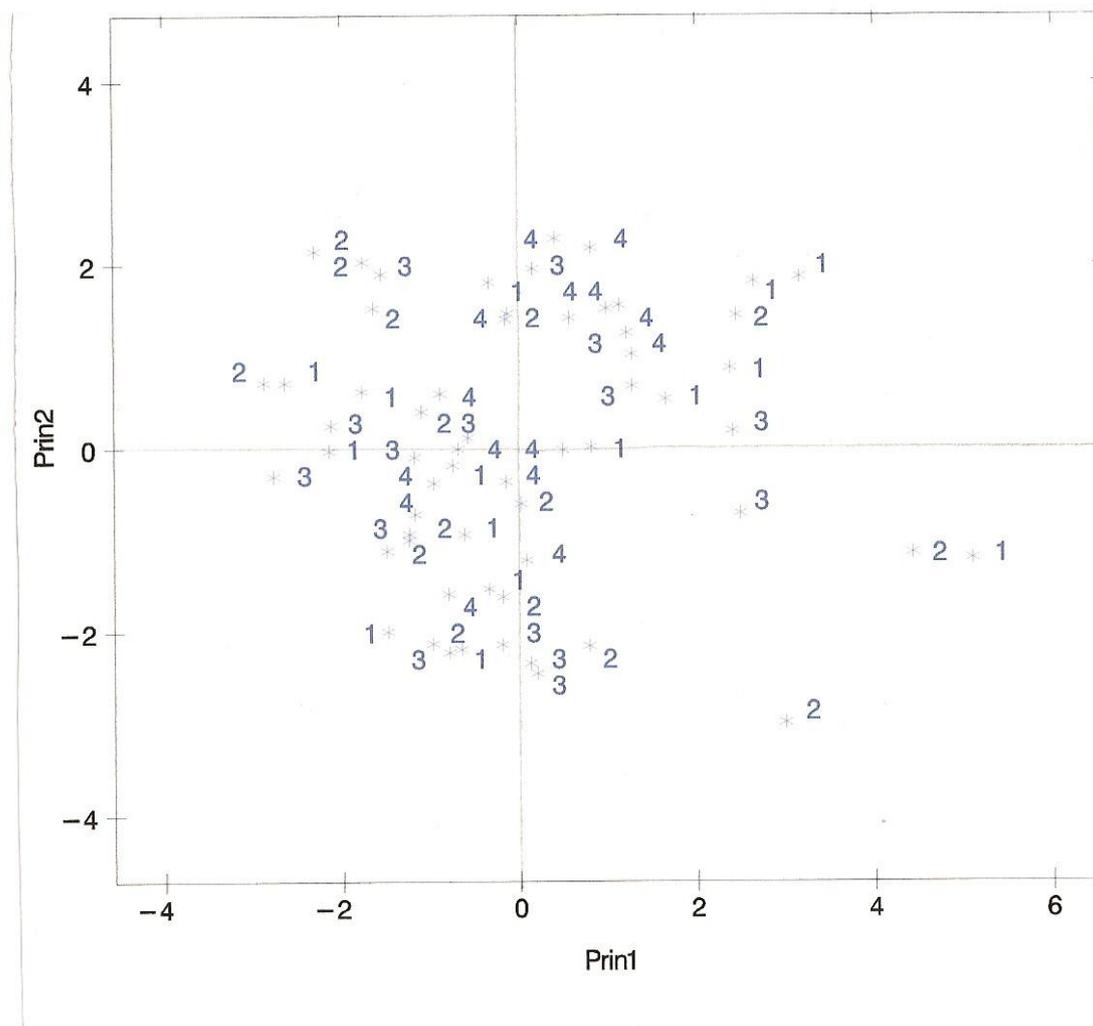


Fig.31: Représentation des traitements dans le plan factoriel (P₁, P₂).

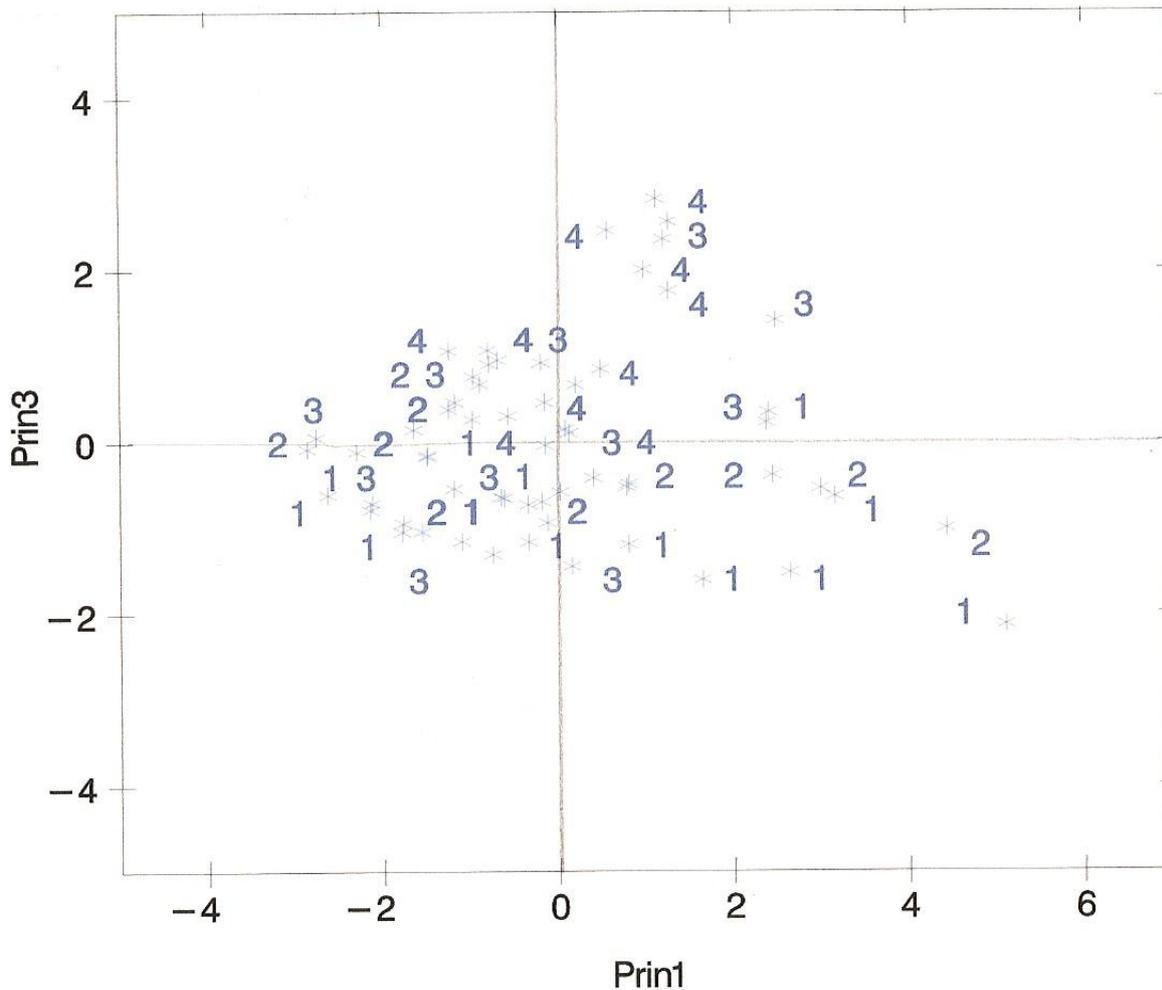


Fig.32: Représentation des traitements dans le plan factoriel (P_1, P_3).

V.2.2 Analyse de la variance multivariée

Tableau 7: Analyse de la variance multivariée et des valeurs de F.

	Value	F Value	Num DF	Den DF	Pr > F
Wilk's Lambda	0,57	1,27	24	142,72	0,1927
Pillai's Trace	0,50	1,27	24	153	0,1911
Hotelling-Lawley Trace	0,64	1,28	24	99,186	0,1997
Roy's Greatest Root	0,39	2,47	8	51	0,0241

Le tableau 7, reprend les différentes valeurs réellement observées avec les valeurs théoriques, ainsi que les probabilités associées aux valeurs de F de Snedecor.

V.2.3 Analyse canonique discriminante

Tableau 8: Indications relatives aux valeurs propres

	Eigen value	Différence	Proportion	Cumulative	Ratio
1	0,3875	0,2117	0,6060	0,6060	0,5696
2	0,1758	0,0996	0,2749	0,8809	0,7903
3	0,0762		0,1191	1,0000	0,9292

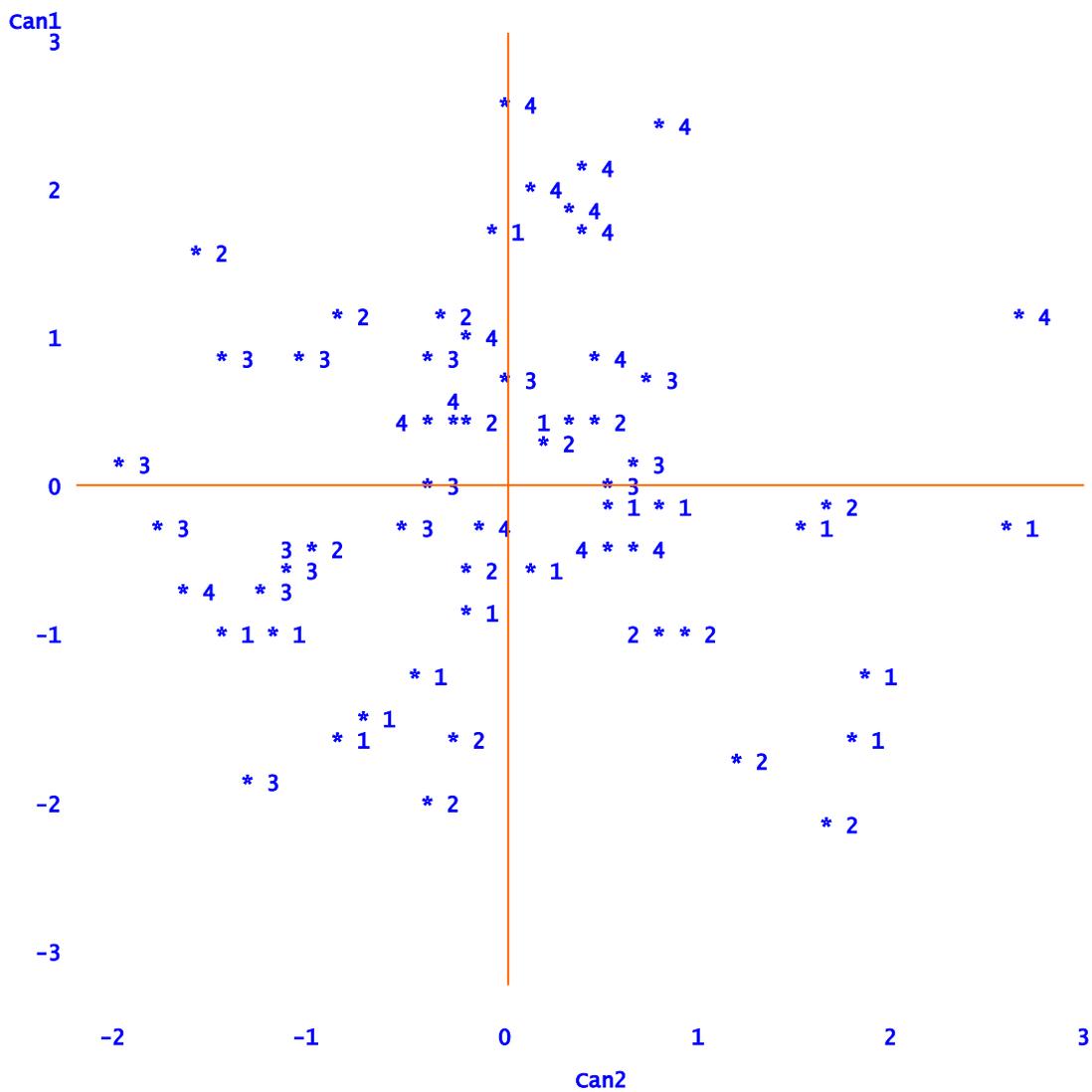


Fig.33: Diagramme de dispersion des quatre (4) traitements dans le plan canonique 1 et 2.

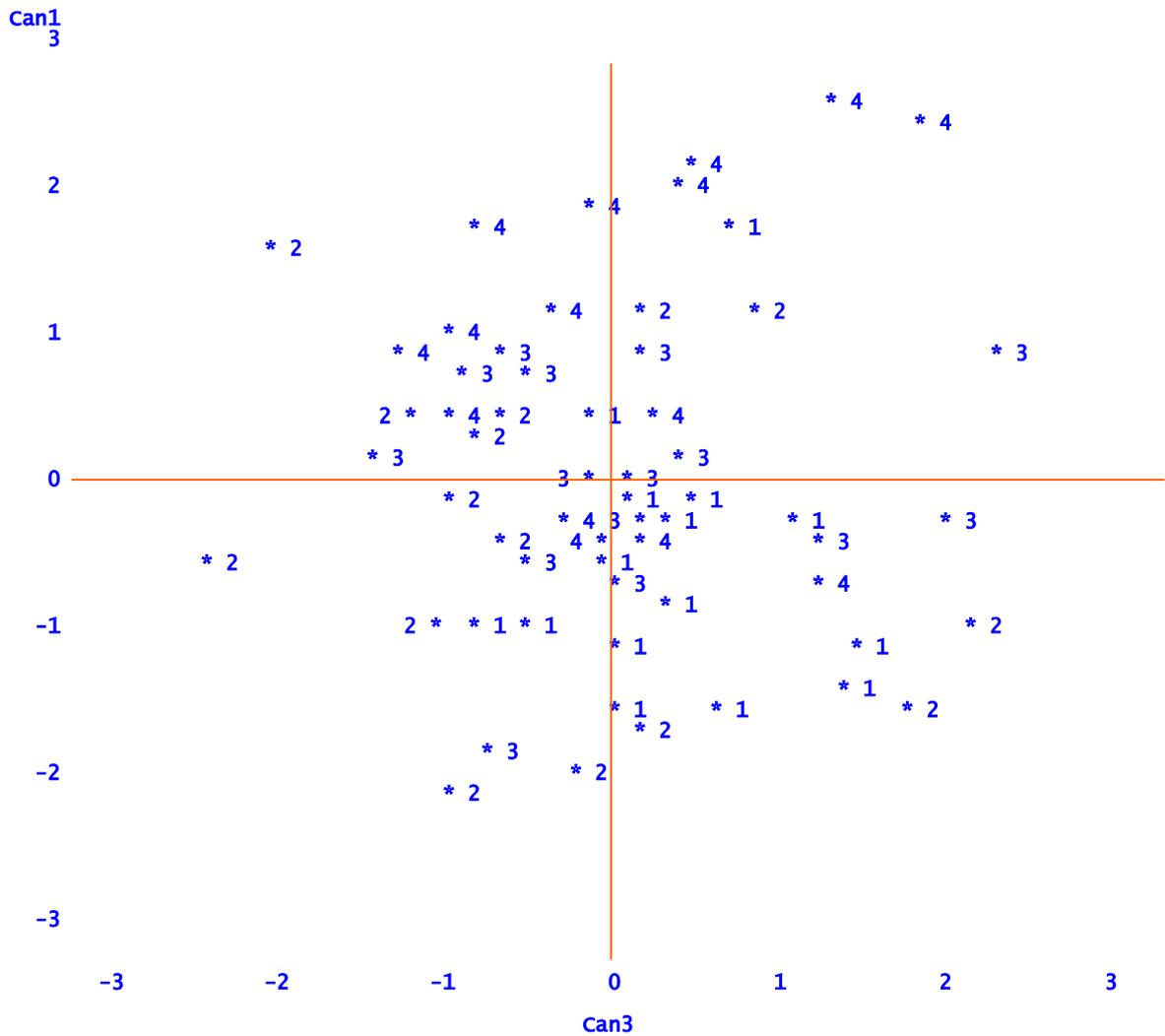


Fig.34: Diagramme de dispersion des quatre (4) traitements dans le plan canonique 1 et 3.

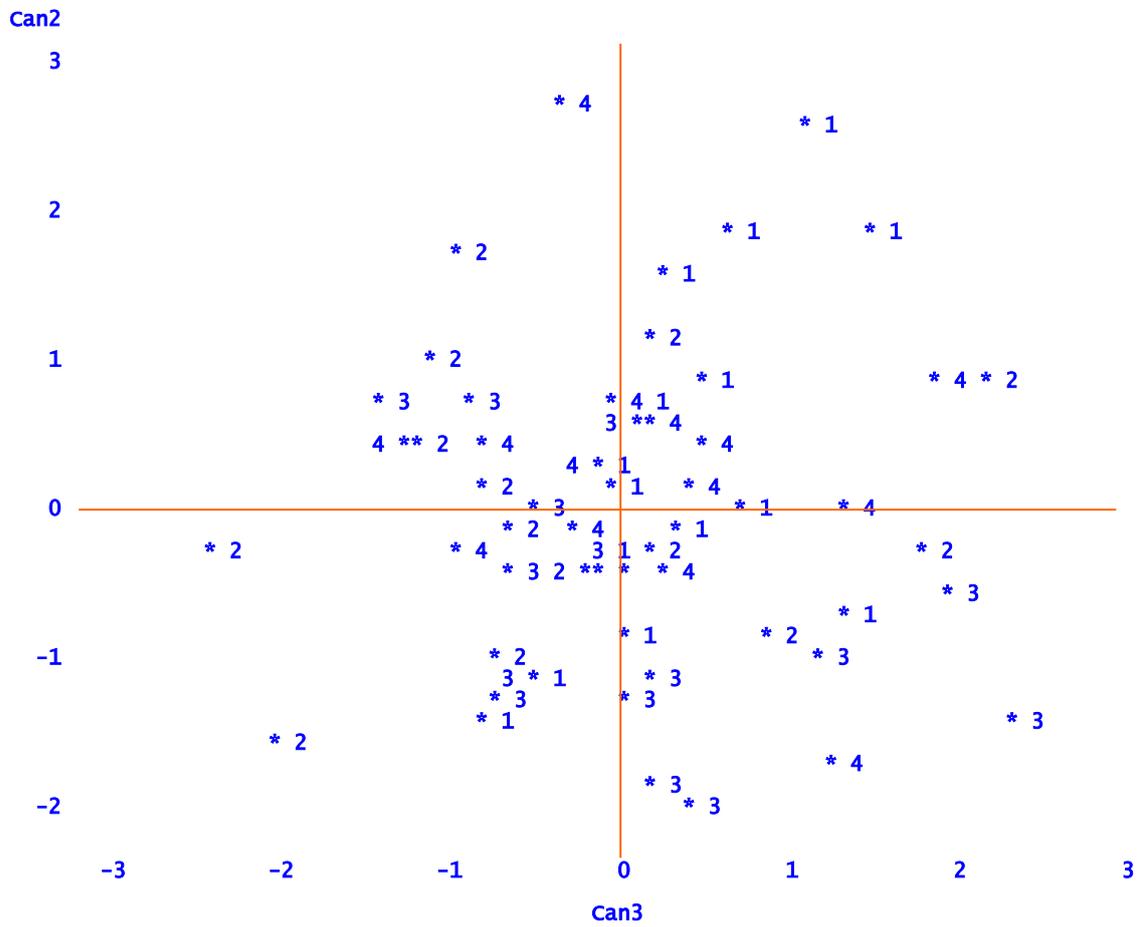


Fig.35: Diagramme de dispersion des quatre (4) traitements dans le plan canonique 2 et 3.

Chapitre VI - Discussions

Une fois sélectionnés, quelques paramètres d'un intérêt certain (dans notre cas de façon prépondérante le pHeau, le pH_{kl}, la C.E le C et les BE), nous suivons le comportement de ces échantillons de sols par rapport à des témoins, ensuite dans les traitements et entre traitements. Nous attachons une attention particulière à l'évolution spatiale (profondeur) du paramètre d'intérêt, le paramètre est suivi par horizon (0-5cm, 15-25cm jusqu'à une profondeur de 65cm pour le traitement). Il s'agit en pratique d'un premier screening pour évaluer la fiabilité et l'acceptabilité des paramètres sélectionnés.

-Aussi dans ce chapitre d'analyse, une attention particulière est accordée à l'évaluation comparée des différents paramètres liés à la profondeur du sol en relation avec l'état de salinité: C.E, l'acidité: le pH et les BE, la teneur en matière organique: C. Mis en évidence parmi différents autres paramètres de ceux qui sont capables de donner des informations significatives de l'évolution de l'état des sols de tannes, cohérents et reproductibles. Nous sommes amenés à chercher à corréliser tel type d'évolution de paramètre avec l'état d'évolution du sol relevant de leur système d'utilisation.

VI.1 Discussions des analyses chimiques

VI.1.1 Le pHeau

Les acidités réelles ou actives révèlent que les sols du dispositif aménagé sont toujours acides et les valeurs mesurées montrent qu'on a des points extrêmement acides (pH: 4,5), et des points faiblement acides $6,1 \leq \text{pHeau} \leq 6,5$. Cependant quelques rares profils sont autour de la neutralité, il s'agit du piézomètre (P₂₄) P₄, pour le transect T₂ de l'horizon 0-5cm, du piézomètre (P₁₁) P₁, pour le transect T₁ des horizons 15-25cm et 50-65cm et du piézomètre (P₆₆) P₆ de l'horizon 15-25cm.

Les moyennes par transect sont fortement acides à légèrement acides et les valeurs mesurées sont comprises entre [4,2 et 5,41]. Il en est de même pour les moyennes par horizon.

Si on compare les valeurs obtenues avec les conclusions des travaux de Marius (1985), Sadio (1986) et Fall (2002), on peut dire que les valeurs mesurées sont caractéristiques du bassin du Sine Saloum. Ces valeurs ont montré que les pH sont compris entre 4,0-8,9 pour les sols salés et 3,3-6,5, pour les sols sulfatés acides.

Par ailleurs, les tendances montrent que l'acidité du sol augmente avec la profondeur (Fig.10 et 11). Ce phénomène serait dû à la présence des ions Fe³⁺ lessivés en profondeur; ce dernier se combinant avec l'eau donne des ions H⁺ selon la formule:



VI.1.2 Le pH_{kcl}

Les représentations graphiques données par les figures (12,13 et 14) montrent une évolution quasi identique à celles du pHeau mais avec des valeurs légèrement inférieures. Ce qui est logiquement expliqué par les ions K⁺ qui prennent la place des ions H⁺, préalablement fixés sur le complexe adsorbant qui deviennent de ce fait libres. L'augmentation de l'acidité fait baisser par conséquent le pH.

VI.1.3 Les pHeau moyen et pH_{kcl} moyen

Pour chaque horizon considéré, la valeur moyenne du pH_{kcl} étant inférieure à celle du pHeau (Fig.15), avec des valeurs minimales et maximales qui confirment le caractère acide de ces sols sulfatés. La valeur moyenne tournant autour de 4,5, traduit une réserve assez importante d'ions H⁺ échangeables.

Dans la plupart des sols le milieu chimique est assez bien tamponné, caractérisé par des différences de pHeau et pH_{kcl} faibles, généralement inférieures à l'unité, sauf dans le cas des sols sableux à taches ocres rougeâtres où elles peuvent atteindre 1,5 unités pH (Sadio, 1991).

VI.1.4 La conductivité électrique (C.E)

Les moyennes par transect montrent le caractère toujours salé des sols du dispositif.

Selon Richard (1954) et Chapman (1966), cité par Sadio, un sol est dit salé lorsque la conductivité électrique sur pâte saturée est supérieure à 4 mS/cm. D'autres auteurs, Servant (1975, cité par Sadio), fixent la limite à 7 mS/cm à 25°C. Mais selon N'Diaye (1992), la détermination plus pratique E₅ nous donne une échelle de salure (1,2 mS/cm ≤ CE ≤ 2,4 mS), pour caractériser un sol effectivement salé.

Globalement, le degré de salinité est plus important dans l'horizon superficiel (0-5cm). Cette sursalure en surface pourrait s'expliquer par l'évaporation suivie des dépôts de sel en surface. La salinité dans les horizons profonds (niveau nappe) serait liée au dépôt de sels en provenance des alluvions marines et à la présence de la nappe phréatique.

Conclusion : La salinité est souvent liée à la texture. Les horizons argileux étant nettement plus salés que les horizons sableux (Marius, 1976-77). Les valeurs de C.E obtenues semblent correspondre à la texture du sol et de surcroît l'origine primaire de ces sels qui en sont responsables caractérise un tel écosystème. Dans les sols sulfatés acides salés du Sine Saloum

et du reste du Sénégal, les sels sont d'origine exclusivement marine, composés essentiellement de NaCl, et secondairement MgCl₂, Na₂SO₄, MgSO₄. Le CaSO₄ est moins présent que les autres. Ce sont des sels très solubles, mais la présence de NaCl, dans le milieu naturel peut diminuer leur solubilité spécifique, à l'opposé augmente celle de CaSO₄ (Argaval et al., 1979, cité par Sadio, 1991).

La lecture est qu'il s'agit effectivement d'un sol salé vu que la classification repose sur la conductivité électrique de l'horizon le plus salé dans les 80 premiers centimètres (Sadio, 1991). Cette salinité est supposée être la salinité minimale du sol, vu que les prélèvements des échantillons de sol ont été effectués en fin de saison de pluie. Les maxima de salinité sont en mai-juin.

VI.1.5 Le Carbone

Les valeurs sont comprises entre 0,09‰ P₆ (Piézomètre 16), horizon 50-65cm à 12,28‰, P₄ (Piézomètre 54) horizon 0-5cm.

Si on s'intéresse à la teneur en carbone suivant les profondeurs présentées par les figures (22, 23, 24, 25, 26, 27), on remarque que plus on va en profondeur, plus le taux de carbone diminue de façon notable.

C'est ainsi que nous avons les intervalles suivants:

-horizon 0-5 cm: $2,21 \text{ ‰} \leq C \leq 12,28 \text{ ‰}$

-horizon 15-25 cm: $1,04 \text{ ‰} \leq C \leq 6,17 \text{ ‰}$

-horizon 50-65 cm: $0,09 \text{ ‰} \leq C \leq 2,71 \text{ ‰}$.

L'horizon 0-5cm, correspond à la zone humifère, sa valeur se démarque de celle des deux autres horizons 15-25cm et 50-65cm.

La distribution du taux de carbone selon les transects fait ressortir des disparités entre les différents profils des horizons. Globalement les valeurs de carbone mesurées laissent penser à un taux important de matière végétale, mais l'absence de teneur en azote nous empêche de nous prononcer sur le niveau de minéralisation.

VI.1.6 Les bases échangeables

La présence du Na au niveau des sols sulfatés acides salés du dispositif expérimental de N'Diaffate n'est qu'une confirmation de l'état de dégradation du site par salinisation. La distribution du Na à travers le dispositif laisse apparaître une tendance générale qui s'est dégagée lors de l'étude de la conductivité électrique (C.E). Car c'est au niveau du transect le plus méridional de la parcelle d'essai du bloc I qu'on a observé la valeur maximale 6,96 méq

/100 gr (P₄₆) avant l'estuaire, et la valeur minimale de 0,028 au P₃₂, premier profil du transect en amont dans la parcelle d'essai du bloc V.

L'on note une hétérogénéité inter bloc des résultats en tenant compte des trois horizons au vu des différents tableaux durant l'expérimentation. Mais l'absence de données comparatives sur l'antériorité de ces blocs nous empêche d'avancer des explications qui serait à l'origine de cette variation au sein des blocs I et V. Au cas où il y'aurait hétérogénéité inter bloc avant expérimentation le découpage en blocs se justifie.

- Pour le Potassium (K) les valeurs assez faibles dans l'ensemble, dénotent d'une carence au niveau des sols.

Dans les sols acides, ces taux s'expliquent par la présence d'ions H⁺ et Al³⁺ qui se fixent sur les sites initialement occupés par les bases, surtout lors des phénomènes d'altération en milieu acide où les cations Ca²⁺ passent en solution. Ce phénomène a été caractérisé dans les bas fonds du bassin versant de Koutango (Sow, 1999).

Conclusion: L'étroite relation entre les concentrations en Na⁺ et Cl⁻ avec la C.E₅ d'une part, et entre Cl⁻ et Na⁺ d'autre part confirmerait le caractère chloruro-sodique de la salinité des sols et l'origine marine des sels. La connaissance du rapport Na⁺/T nous aurait davantage éclairé sur la fixation du Na⁺ sur le complexe d'échange du sol (T n'a pu être déterminé pour des raisons techniques).

VI.2 Discussions des données statistiques

VI.2.1 Analyse en composantes principales (ACP)

Une analyse détaillée des différents types de corrélation tableau 4, nous a permis de distinguer des coefficients de corrélation entre les différentes variables les regroupant en quatre classes en tenant compte leur intensité ainsi que de leur positivité ou de leur négativité. C'est ainsi qu'on peut dire en signe de conclusion partielle.

-L'examen des tableaux 5 et 6 montre:

- La première composante principale prend en compte 37% de la variabilité (tab.5); les deux autres composantes expliquent respectivement 26% et 14% de la variabilité. A partir de la quatrième composante, les composantes sont nettement moins utiles et correspondent à des *valeurs propres inférieures à l'unité*. Ce qui correspond suivant les pourcentages de proportion à des valeurs au dessus de 12.5 %. Nous limiterons notre analyse aux trois (3), qui ensemble pourraient expliquer 77% de la variabilité.

-L'examen des corrélations des variables avec la première composante montre que les variables sont corrélées positivement avec le premier axe. Sur les deux cercles de corrélation (fig. 28 et 29), tous les points variables sont situés sur le demi-cercle supérieur. Cet axe peut s'interpréter comme un axe de taille où toutes les variables sont positivement corrélées.

- La deuxième composante principale est positivement bien corrélée avec les pH, moyennement avec le C, dans une faible mesure avec le calcium et négativement avec la C.E, le Mg, le K et le Na.

Il peut s'interpréter comme étant un axe de pH (d'acidité).

- La troisième composante est moyennement corrélée avec le C et le Ca. On peut l'interpréter comme l'axe de restauration vers l'équilibre tampon, car la présence de calcium et de matière organique pourrait saturer le complexe et éventuellement faire augmenter le pH.

Une représentation des individus dans les plans factoriels donnée par les figures 31 et 32 montre:

Dans les plans factoriels (P₁, P₂) et (P₂, P₃), aucun des traitements ne s'est particularisé. Les individus sont uniformément répartis dans les plans. Ce qui veut dire qu'à travers les variables discriminantes, les traitements ne sont pas différents.

D'autres informations pourraient étayer ces conclusions en se servant de l'analyse de la variance multivariée et de l'analyse canonique discriminante.

VI.2.2 Analyses et interprétations des résultats

L'examen du Tableau (7), montre que les 4 tests conduisent tous à ***accepter l'hypothèse d'égalité des moyennes de nos 4 traitements.*** Toutes les probabilités associées aux valeurs de F sont élevées. Les vecteurs moyens de nos 4 traitements ne sont pas différents.

A cet effet, l'analyse canonique qui a pour effet de mettre en évidence les différences entre traitements ne s'est pas vérifiée. Néanmoins, nous l'avons effectué pour illustrer à travers les graphiques canoniques la similitude des traitements.

L'examen des informations relatives aux valeurs propres présentées dans le tableau (8) indique que la 1^{ère} valeur correspond à 61% de la variabilité, la 2^{ème} valeur à 27% et la 3^{ème} valeur à 12%. Ce qui signifie que les 4 traitements peuvent se représenter sur une série de graphiques à deux dimensions en combinant les variables canoniques 2 à 2 (fig.33, fig.34, fig.35).

Chapitre VII - Conclusion et perspective

Cette recherche nous a permis de:

-faire un bilan des connaissances sur l'environnement physique de la production agricole au Sénégal, notamment du bassin arachidier;

-de voir l'impact de la technologie biomécanique sur la restauration des sols salés;

-de dégager des perspectives pour améliorer les capacités d'analyse du laboratoire;

-l'analyse poussée des paramètres chimiques dont nous avons faits le suivi nous a permis d'établir en principe:

i) l'état de dégradation des sols salés et sulfato-acides;

ii) leur capacité de récupération biologique à court et moyen terme suivant une approche globale;

iii) l'évolution spatiale (profondeur) du paramètre d'intérêt, suivi par horizon (0-5cm, 15-25 cm jusqu'à une profondeur de 65cm pour le traitement);

iv) l'identification des systèmes chimiques fondamentaux de caractérisation des sols de tannes soumis à des facteurs environnementaux, particulièrement la salinité et l'acidité.

Nous avons cherché néanmoins à identifier et sélectionner des paramètres fiables qui seraient sensibles à la salinité et à l'acidité des tannes et que leur évolution aille dans un sens cohérent.

L'usage des méthodes statistiques nous a permis de tester l'effet traitement sur horizon.

Nous nous proposons d'étendre ce travail à d'autres paramètres tels que l'azote (N_2), le phosphore assimilable ($P_{ass.}$), la capacité d'échange cationique (CEC), la granulométrie.

L'étude des paramètres peut se faire aussi suivant l'axe Nord-Sud, pour voir leur évolution, comme cela a été déjà fait d'amont (plateau) en aval (estuaire).

L'on se propose ultérieurement de sélectionner un nombre limité de paramètres à bonne prédiction capables de nous procurer davantage d'informations sur l'état de ces sols en vue de leur meilleure bonification.

Des paramètres chimiques ont été étudiés, mais il demeure certain que ceux physiques et microbiologiques les complètent, mieux toute cette pédofaune a un rôle certain à y jouer si on se veut exhaustif dans ce genre de travail.

Force est de constater aujourd'hui que la mise en valeur agricole de ces sols sulfatés acides salés *doit reposer tout d'abord sur des connaissances scientifiques solides, sur une meilleure maîtrise du fonctionnement du milieu et sur une approche pluridisciplinaire.*

A l'état actuel du niveau de dégradation du climat et de dégradation des terres, les seules possibilités de récupération agricoles envisageables à court terme de ces terres sont essentiellement le reboisement et l'aménagement pastoral. La mise en culture à grande échelle ne peut être envisageable qu'à moyen et long terme après une maîtrise des eaux de surface et un dessalement important de ces sols.

VII.1 Identification et sélection des paramètres chimiques fiables

La première phase de la recherche s'est focalisée sur l'individualisation d'un certain nombre raisonnable de paramètres chimiques qui sont sensibles à l'état de salinité et d'acidité, et qui sont mesurables. Ils sont destinés à montrer des variations bien définies en relation avec l'entière de l'évolution du sol (potentialité en terme de pourvoyeur en éléments biogènes pour les espèces halophytes et ou acidophiles, ou pauvreté). Cette phase de la recherche est initialement fondée sur une recherche poussée des données de la littérature existant dans ce secteur. Il a été observé que les paramètres plus communément utilisés afin de définir une situation de salinité ou d'acidité préjudiciables pour les plantes ont été même localisés au *niveau biochimique*:

- concentration de quelques métabolites importants;
- un certain niveau de quelques activités enzymatiques;
- et l'expression de quelques gènes,

pouvant être l'objet d'études relevant de la tolérance à l'amélioration à la résistance à l'adaptation aux facteurs abiotiques (l'acidité, la salinité, l'ozone, la sécheresse, le froid, les pathogènes, etc.). Quoique la plante puisse développer des mécanismes de protection, eu égard à l'état de stress auquel elle se trouve soumise, faisant montre de scénario au cours duquel, elle survivra ou à défaut disparaît physiologiquement (intégrant la décomposition de la biomasse organique), selon (Diop, 1998).

VII.2 Analyse comparée des résultats obtenus: fiabilité des paramètres et leur interprétation

La dernière partie de cette recherche est consacrée aux applications possibles de nos études ainsi que la stratégie de récupération en vue d'une bonne restauration. De tels paramètres nous permettent de faire un suivi des sols caractérisés. En d'autres termes, nous voulons considérer si ces paramètres chimiques dont nous avons fait l'investigation peuvent être utilisés au

champ pour identifier des situations annonciatrices de dégradation de sol aboutissant à des tannes. Le tanne est un substrat impropre à l'utilisation par les plantes agricoles, du fait de la salinité et de l'acidité qui leur sont hostiles, à l'exception des espèces halophiles jusqu'à un certain seuil. Certaines plantes sensibles ou résistantes (*Tamarix aphylla var erectus*, *Distichlis spicata*, *Atriplex lentiformis*) au stress dû à la salinité et à l'acidité existent et ont été identifiées par les écologues, spécialistes de la biologie végétale qui étudient la physiologie végétale en champ. C'est un thème pouvant être poursuivi dans d'autres études. Mais notons néanmoins et actuellement au niveau expérimental qu'en stratégie de valorisation de ces tannes, ces paramètres chimiques des sols pourraient être corrélés à des biomarkers de ces plantes. Ce sont la superoxyde dismutase, les peroxydases et les catalases responsables des bases moléculaires pour la sensibilité et la résistance aux facteurs abiotiques de façon aspécifique.

La biorémediation, particulièrement la phytorémediation est une des alternatives de récupération des ces sols de tannes.

Références Bibliographiques.

- Albergel, J., Bernard A., Dacosta H., Pepin Y.. Rapport hydrologique, 1989: bassins versants de Thyse Kaymor: action de recherche "DRS-Economie de l'eau"Dakar (SEN): ORSTOM, 1990, 49 p. multigr.
- Agew, C.T. and Anderson, 1992. Water resources in the arid realm, Routledge, London.
- Aubréville, A., 1950. Flore forestière soudano-guinéenne. *AOF-CAMEROUN-AEF, Orstom Soc. Ed. Geogr. Mar. et col., Paris*, 523 p.
- Agarwal, R.R., J.S. Yadaw and R.N .Gupta, 1979. Saline and alkali soils of Indian Council of Agric. Resear., New Delhi, 186 p.
- Agromisa, 2001 Série-Agrodok No. La protection des sols contre l'érosion dans les tropiques 89 p ; BP.41, 6700 AA Wageningen, les Pays Bas.
- A. Dubois, F. Mankeur, J.P Montoroi (1994). Amélioration de la fertilité des rizières de Basse Casamance (Sénégal) en relation avec la gestion des eaux de ruissellement d'un bassin versant: premiers résultats et perspectives. P. 289-301. *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*. Ed. John Libbey Eurotext. Paris c.
- Niane A., B., Khouma M., Sène M., 2000. Gestion et Transformation de la matière organique. Synthèse des travaux de recherches menés au Sénégal depuis 1945. 131 pp.
- Badiane A.N., Khouma M., Sène M., 2000.Gestion et transformation de la matière de la matière organique: synthèse des travaux de recherche menés au Sénégal depuis 1945.
- Beers, W.F.J. van., 1962. Acid sulfate soils. *ILRI, Wageningen, Bull. no 3*, 31 p.
- Bèye G., 1977. Dégradation des sols au Sénégal, situation actuelle et perspective. ISRA, CNRA, Bambey, 21 p.
- Bèye G., Touré M. et Arial G., 1975. Acid sulfate soils of West Africa. Problems of their management agriculture use. *Rice Research conference. Los Baños, Philippines*, 10 p.
- Bèye, G., 1972. L'acidification des sols de mangrove de Basse Casamance après leur mise en polder, effet du type d'aménagement. *IRAT Casamance* 17 p.
- Boivin, P et Le Brusq, J.Y., 1984. Etude pédologique des Kaloumayes, Cartes des sols des vallées de Koubalan et Tapilaine. ORSTOM/Dakar, 70 p. + 4 cartes.
- Bonfils, P. J Faure, 1965. La salure des terres de la Région de Tattaguine-Dangane. An. CRA, Bambey, pp. 111-121.
- Breemen N.Van, 1976. Genesis and solution chemistry of Acid Sulfate soils in Thailand. Agric. Resp. Depts. No; 848, PUDOC, Wageningen.
- Bresler, E., B.L. McNeal and D.L. Carter, 1982. Saline and sodic soils. Principles-Dynamics-Modeling. *Springler-Verlag, Av. Series in Agri. Sci.* 10, 236 p.

- Chamley, H., 1988. Les milieux de sédimentation. Lavoisier, *TEC/DOC, France*, 173 p.
- Chapman, V.P., 1966. Vegetation and salinity. In: *Boyko (ed.): Salinity and Aridity. DR.W. Junk Pub. The Hague*, pp. 23-42.
- Charreau C. Tourte R, 1967. Le rôle des facteurs biologiques dans l'amélioration du profil cultural dans les systèmes d'agriculture traditionnelle de la zone tropicale sèche. In: *Colloque sur la fertilité des sols tropicaux IRAT, Tananarive*, p.1498-1517.
- Charreau C., Seguy L., 1968. Mesure de l'érosion et du ruissellement à Séfa en 1968. Rapport multi. IRAT/Sénégal
- Charreau, C 1963. Aperçu sur les alluviaux rencontrés au Sénégal et les problèmes de mise en valeur. *5^e Réunion CROACUS, Freetown (Sierra Leone)*, 15 p.
- Cissé L., 1986. Etude des effets d'apports de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du centre-nord du Sénégal. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 184 p.
- Dacosta, H.1992. Economie de l'eau et DRS sur les bassins versants de Thyse Kaymor. Synthèse hydrologique 1983-1988- ORSTOM, Dakar, Sénégal.
- Daffé, M., Sadio S., 1988. Etude pédologique. Régénération des sols salins du bassin du Sine Saloum. *Projet UNSO/SEN/83/XO2/ISRA/DRPF*, 78p.+ 90 p.
- De Blic P., 1996. Les structures du système sol-plante. Description et mesure. 3^{ème} Réunion du groupe thématique « Structure et Fertilité des sols tropicaux ». Montpellier, ORSTOM 1996, pp. 39-45.
- Dent, D., 1986. Acid Sulfate soil: a baseline for research and development. *ILRI pub.39*, 204 p.
- Diop E.S., 1978. L'estuaire du Saloum et ses bordures (Sénégal). Etude géomorphologique. Thèse de Doctorat de troisième cycle, Université de Strasbourg. 247 p., 4 pl.h.t.
- Diop, C.T., 1998. Rôle des enzymes détoxifiants dans la réponse des plantes à l'ozone et au paraquat. *Thèse de Doctorat de Rech. Sci. de l'Envir. Université de Florence/Italie. 100 p et annexes.*
- Diop, M., 2002. Analyse des propositions de valorisation agronomique des sols salés: cas du PRASS II et de PAGERMA. *Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ing. Des travaux.* Document ISRA.
- Emerit, M., 1960. Etude granulométrique de la mangrove de Joal (Sénégal). *Rap. Tech., UNESCO/Unité Rosa Breda, Dakar*, 175 p.
- Fall, A.C.A.L., 1998. Sensibilité écologique et problématique de la réhabilitation des terres agricoles de la zone de Nioro du Rip: lutte contre l'érosion hydrique dans les bassins versants

- de Diamaguene et Sonkorong. Mémoire de maîtrise, Université Gaston Bergé de St. Louis. 120 p.
- FAO , 1992. FAO Year book 1991. Production. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Volume 45.265 pp
- Fauck R., 1955. Etude pédologique de la région de Sédhiou. Agron. Trop. vol. X n° 6.
- Garin J.M., Faye A., Lericollais A., Sossokho M., 1990. Evolution du rôle du bétail dans la gestion de la fertilité des terroirs sereer du Sénégal. *Les cahiers de la Recherche Développement n°26, juin 1990, pp. 65-84.*
- Gastellu J.M., 1978. Mais où sont donc ces unités économiques que nos amis cherchent tant en Afrique? Note AMIRA, n°26.
- Gupta, S.K. and I.C Gupta., 1987. Management of saline Soils and Waters. Oxford & IBH Publishing Co., New Delhi, 339 p.
- Hanotiaux, G., Manil G. 1980. Cours de Pédologie 1^{ère} Ingénieur, *Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat à Gembloux, Belgique.*
- Hillmans, R.M., 1981. The influence of plant communities upon the hydrology of catchments. *In: Holmes et al., (eds): Land and stream salinity. Elsevier Scient. Publish. Company, Amsterdam, pp. 11-34.*
- IFPRI., 1995. A 2020 vision for food, agriculture and environment: the vision challenge and recommended action. Int. Food Policy Res. Inst. Washington, Ac.
- ILACO., 1967. Aménagements hydro-agricoles en Casamance. Rapport de gestion des casiers de Médina et Dieba (1965-1967). Rapport Orstom, Dakar.
- Jenny, H., 1941: Factors of soil formation. Mc. Graw-Hill Book Company, Inc. N.York and London.
- Joffe, J.S., 1936: Pedology. Ed. Rutgers University Press, New Brunswick, U.S.A.
- Khouma, M., 2000. Les grands types de sols du Sénégal. In : XIV^e réunion du sous comité ouest et centre africain de corrélation des sols à Cotonou, 9-13 octobre 2000. 21 p.
- Lavigne Delville P., 1966. Gérer la fertilité des terres dans les pays du Sahel. GRET Ministère de la Coopération CTA, collection « le point sur » 397 p.
- Le Borgne, J., 1988. La pluviométrie au Sénégal et en Gambie. *Université Cheikh Anta Diop., Dakar/Sénégal, 95 p*
- Leroux M., 1980. Le climat. In: Atlas du Sénégal, Ed. Jeune Afrique, pp 12-17.
- Malton P.J 1990. Improving production in sorghum and pearl millet in semi arid Africa. Food Research Institute Studies 22: 1- 43.

- Marius C., 1975. Evolution des sols dans deux chronoséquences de l'estuaire du Saloum (Sénégal). ORSTOM.
- Marius C., 1975-1977. ATP " Mangroves Vasières". Etudes pédologiques des carottages profonds dans les mangroves (Sénégal-Gambie). Mission 976-77.
- Massibot, J.A., Carles L., 1946. Mise en valeur des tannes rizicultivables du Sine (Sénégal). *Agronomie tropicale*, vol. 1, no. 9-10, pp.451-466.
- MEPN, 1998. Monographie national sur la biodiversité au Sénégal, Bldg. Administratif, Ministère de l'environnement et de la protection de la nature, Dakar 81 pp.
- Michel Benoit-Cattin., 1986. Les Unités expérimentales du Sénégal. *Recherche et développement agricole*, 500 p. DSA/CIRAD, Avenue du Val de Montferrand, B.P. 50532 Montpellier Cedex.
- Michel P., 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mémoire ORSTOM n° 63, Paris. 3 Tomes, 752 p.
- Miller M.R., Brown P.L., Donovan J.J., Bergatino R.N., Sonderegger J.L., Schmidt F.A. 1981. Saline seep development and control in the North America Great plains. Hydrological aspects. In: Holmes *et al.* (eds): Land and Stream Salinity. Elsevier, Amsterdam, pp. 141-151.
- Niang M., 1976. Etude de l'érosion du sol en relation avec l'aménagement de l'espace rural dans " l'Unité expérimentale" de Thyssé-Kaymor/Sokorong (Sine Saloum-Sénégal).
- Oliver R., 1978. Ingénieur IRAT-détaché à l'ISRA. Méthodes d'analyses des Sols-Eau-Plantes. 67p, en usage au CNRA de Bambey.
- N'Diaye J.P., 1992. Le rôle de l'analyse de sol dans la formulation du conseil de fumure minérale. Direction de recherches sur les cultures irriguées. ISRA. St. Louis.
- Pérez P., Boscher C., Sène M. 1996. Une meilleure gestion de l'eau pluviale par les techniques culturales (sud du Sine-Saloum). *Agriculture et développement*, 9:20-29.
- Piéri C., 1974. Premiers résultats expérimentaux sur la sensibilité de l'arachide à la toxicité aluminique. *Agron. Trop.* n° 6- 7 vol. XXIX .
- Piéri C., 1989. Fertilité des savanes: bilan de trente ans de recherches et de développement agricole au sud du Sahara. In : Savanes d'Afrique, terres fertiles? Actes des rencontres internationales. Ministère de la Coopération, CIRAD, Paris, p. 43-73.
- Piéri C., 1966. Etude de l'érosion et du ruissellement à Sefa au cours de l'année 1965. Coll. Sur la fertilité des sols Trop. Tananarive, 108, 1302-15.
- Piéri C., 1976. L'acidification des terres de cultures exondées au Sénégal. *L'Agronomie tropicale*, 31:339-368.

- Piéri C., 1982. La fertilisation potassique du mil *Pennissetum* et ses effets sur la fertilité d'un sol sableux du Sénégal. *Revue de la potasse*, **27**:12.
- Piéri C., 1991. Les bases agronomiques de l'amélioration et du maintien de la fertilité des terres de savanes au sud du Sahara. *In: Savanes d'Afrique, terres fertiles? Actes des rencontres internationales*. Ministère de la coopération CIRAD, Paris, p 43-73.
- Piéri. C., 1991. Les agronomiques de l'amélioration et du maintien de la fertilité des terres de savanes au sud du Sahara. *In: Savanes d'Afrique, terres fertiles? Actes des rencontres internationales*. Ministère de la Coopération, CIRAD, Paris, p.43-73.
- Pons, L.J 1966. Geogenesis and Pedogenesis in the young-holocene costal plain of the three Guiana's (South America). *In: Tijdschr. Kon. Ned. Aard. Gen.* 83, 153-172.
- Pons, L. J., 1964. Pyrite as a factor controlling chemical "ripening" and formation of "cat clay" with special reference to the costal plain of Surinam. *Agr. Exp. Station Paramarobo, Bull. no 82*, 141-161.
- Richards, L.A 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *USSLS/USDA, Agriculture Handbook no. 60*, 160 p.
- Rockstrom J. and Tilander Y.,1998. Option for sustainable agriculture in the Sahel: Landscape potential, human manipulations and livelihood security. In Berger A. Editor. *Twice Humanity- Implications for local and global resources use* pp. 117-137. The Nordic Africa Institute for Development Studies, Uppsala, Sweden.
- Roose E., 1965. Dix années de mesures de l'érosion et du ruissellement au Sénégal- (Station IRAT de Séfa, moyenne Casamance). *Rapport de mission*.
- Sadio, S., 1989: Pédogenèse et potentialités forestières des sols sulfatés acides salés des Tannes du Sine Saloum, Sénégal. Ph.D.
- Sadio, S., 1982. Altération expérimentale de phyllosilicates-tests sous végétations forestières acidifiantes. *Thèse de Docteur Ingénieur, Université Nancy I, Fac. Sci. Nat., 120 p.*
- Sadio, S., 1985. Recherches sur la tolérance aux sels des essences forestières. *Rap. d'activités, Mai 1984 à Mai 1985, ORSTOM/Dakar* 18 p.
- Sadio, S., 1986b. Tolérance aux sels des essences forestières, Etude expérimentale *ORSTOM/Dakar* 40 p.
- Sadio, S., 1986a Etude pédologique des facteurs de mortalités des essences forestières introduites en milieux salés au Sénégal *ORSTOM/Dakar* 66 p + 34 p. An.
- Sadio, S., 1991. Pédogenèse et potentialités forestières des sols sulfatés acides salés des tannes du Sine-Saloum (Sénégal). *Thèse de doctorat. Université de Nancy 1, France, 269 p.*
- SAED, 1994. Situation des aménagements dans la vallée du Fleuve Sénégal.

- Sall, M. et E.S Diop, 1975. Le Gandoul et les îles Betanti. Etude géomorphologique. Bull. Ass. Sénégal pour l'étude du quatern. Afric., Dakar, no. 44-45, pp. 47-55.
- Sène M., *et al.* 2000. Restauration Agronomique des sols salés. Rapport d'activités scientifiques. ISRA/ISE-UCAD/IPALAC avec la collaboration de AFRICARE « ONG » 24 p.
- Sène M., 1985. Le poids des contraintes du milieu physique sur les itinéraires techniques pratiqués par les paysans en culture arachidière dans les villages de Thyse et Sonkorong arrondissement de Médina Sabakh, région du Sine Saloum. Mémoire de Titularisation. ISRA. 112 p + annexes.
- Sène M., Khouma M., Guèye M., Ganry F., A. Badiane, NDiaye J. P.. in press, Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal, l'environnement: les sols 73-90.
- Sivakumar M.V.K., A. Maidoukia and R.D.Stern, 1993. Agroclimatology of West Africa: Niger (Second Edition) Information Bulletin N° 5, ICRISAT, Potanchem, Indian. 108 p.
- Sokhna M., 1995. Récupération et régénération des terres salées par la mise en défense: l'expérience du PRECOBA dans la communauté rurale de M'Bellacadio (département de Fatick). Mémoire maîtrise (géographie) Université Gaston Berger, Saint Louis; 127 p.
- Sow, K., 1999. Caractérisation pédologique du bassin versant de Koutango. Mémoire de Grade d'Ingénieur Géologue. Université Cheikh Anta Diop. IST : 81. 69p + annexes.
- Tourte R., 1971; Thèmes légers, thèmes lourds, systèmes intensifs: voies différentes ouvertes au développement agricole du Sénégal. L'Agronomie tropicale, **26**:632-671.
- Tricart J., 1956. Tentative de corrélation des périodes pluviales africaines et des périodes glacières.
- USAID, 1990. Analyse pour la gestion des ressources naturelles du Sénégal. Economics Group Louis Berger/IAD.
- Vieillefon J., 1977. Les sols des mangroves et des tannes de Basse-Casamance (Sénégal). Importance du comportement géochimique du soufre dans leur pédogenèse. Mémoire ORSTOM n° 83, 291 p.
- Viets F.G.Jr., Mulkel D.C., 1960. Reclamation of tidal soils. 4th Congress. Int. Irr. Drain, Madrid, q 11, 1-16.