

Les méthodes d'analyses multidimensionnelles pour l'évaluation des sols de Basse-Casamance (Sénégal)

Mamadou Talla Diagne, Michel Pierre Cescas

Les sols du domaine fluvio-marin de Basse-Casamance (sud-ouest du Sénégal) [1-3] sont caractérisés par leur acidité potentielle excessive, liée aux contenus élevés en matériaux pyriteux (sols sulfatés acides et potentiellement sulfatés acides). Du point de vue chimique, les analyses effectuées à ce jour portent sur les déterminations du pH *in situ*, du pH sec, du rapport C/N, du soufre total et de ses différentes formes, de la salinité (conductivité, ions dissous), des éléments totaux, du fer ferreux et du potentiel rédox. La nature et le comportement de ces variables ont été bien cernés et servent essentiellement à caractériser et à classer ces sols. Par ailleurs, quelques études [4, 5] ont porté sur la régénération de la fertilité de ces sols (amendements calciques et phosphatés, drainage, paillage, engrais verts, etc.). Dans ce contexte spécifique, le rôle de l'acidité et de la très forte salinité n'est pas clairement établi [6, 7] car elles subissent des variations importantes, fonction de la fréquence des marées et du rythme des saisons. La sécheresse qui sévit dans la région depuis un certain nombre d'années a profondément remis en cause les acquis réalisés et amène les agronomes sur place à reconsidérer les pratiques conventionnelles de récupération de ces sols. L'équilibre écologique de la région a été modifié et certaines

caractéristiques des sols ont été exacerbées, avec pour conséquence une augmentation spectaculaire des surfaces stériles de « tannes » vifs aux dépens des mangroves [8, 9]. Devant ces constats, il devient nécessaire d'identifier et de hiérarchiser les caractéristiques chimiques générales les plus importantes de ces sols. Cette étude présente l'utilisation combinée de la détermination chimique avec les analyses statistiques multidimensionnelles, pour la caractérisation des propriétés chimiques de fertilité (potentiel naturel du sol et facteurs limitant son expression) des sols de Basse-Casamance.

Matériels et méthodes

Milieu d'étude et transformations

La caractéristique essentielle de la région étudiée est sa situation estuarienne qui en fait un écosystème particulier, extrêmement marginal, dont le fonctionnement est fortement dépendant du climat tropical subguinéen (classé également par d'autres comme soudano-guinéen), avec alternance d'une saison humide et d'une saison sèche. La saison des pluies (hivernage) dure cinq mois (juin à novembre) ; elle est suivie d'une saison sèche, plus longue, au cours de laquelle il ne tombe aucune goutte d'eau. Depuis 1968, on assiste à une diminution généralisée de la

pluviométrie, dont la moyenne dans cette zone est passée de 1 500-2 000 mm à 1 300-1 500 mm [10]. Les précipitations d'hivernage ne permettent plus de dessaler les secteurs rizicoles anciennement exploités, la salure et l'acidité remontent vers les hauts de vallées et, latéralement, sur les terrasses par l'intermédiaire des nappes, menaçant ainsi les dernières parties du domaine fluvio-marin restées productives pour l'agriculture [6, 11]. Chronoséquence et toposéquence sont bien illustrées dans cette région confinée entre la mer et le fleuve (figure 1). Des berges du fleuve jusqu'aux rebords du plateau continental ou des terrasses sableuses, il existe une zonation caractéristique de la végétation, liée aux sols, à la topographie, à la fréquence et à la durée des submersions (soit par la mer, soit par les eaux de pluies [3]) qui peut être modifiée localement en fonction des conditions de l'environnement (topographie, profondeur de la nappe, altitude, etc.). On y rencontre : la mangrove à *Rhizophora* (palétuviers), correspondant au domaine des sols potentiellement sulfatés acides ; la mangrove à *Avicennia* qui correspond aux sols sulfatés acides ; les « tannes », sols hypersalés, nus ou à végétation herbacée avec des espèces comme *Paspalum* ou *Scirpus* ; les rizières profondes, constituées par les sols hydromorphes (salés ou non) des bas fonds ; les rizières de terrasses ; la palmeraie qu'on retrouve sur le plateau terminal et sur les terrasses supérieures (sols rouges, beiges et plus rarement gris) et, enfin, des sols minéraux bruts d'apports adossés à la frange océanique formant

M.T. Diagne, M.P. Cescas : Département des sols et de génie agro-alimentaire, Université Laval, Québec, Canada G1K 7P4.

Tirés à part : M.T. Diagne

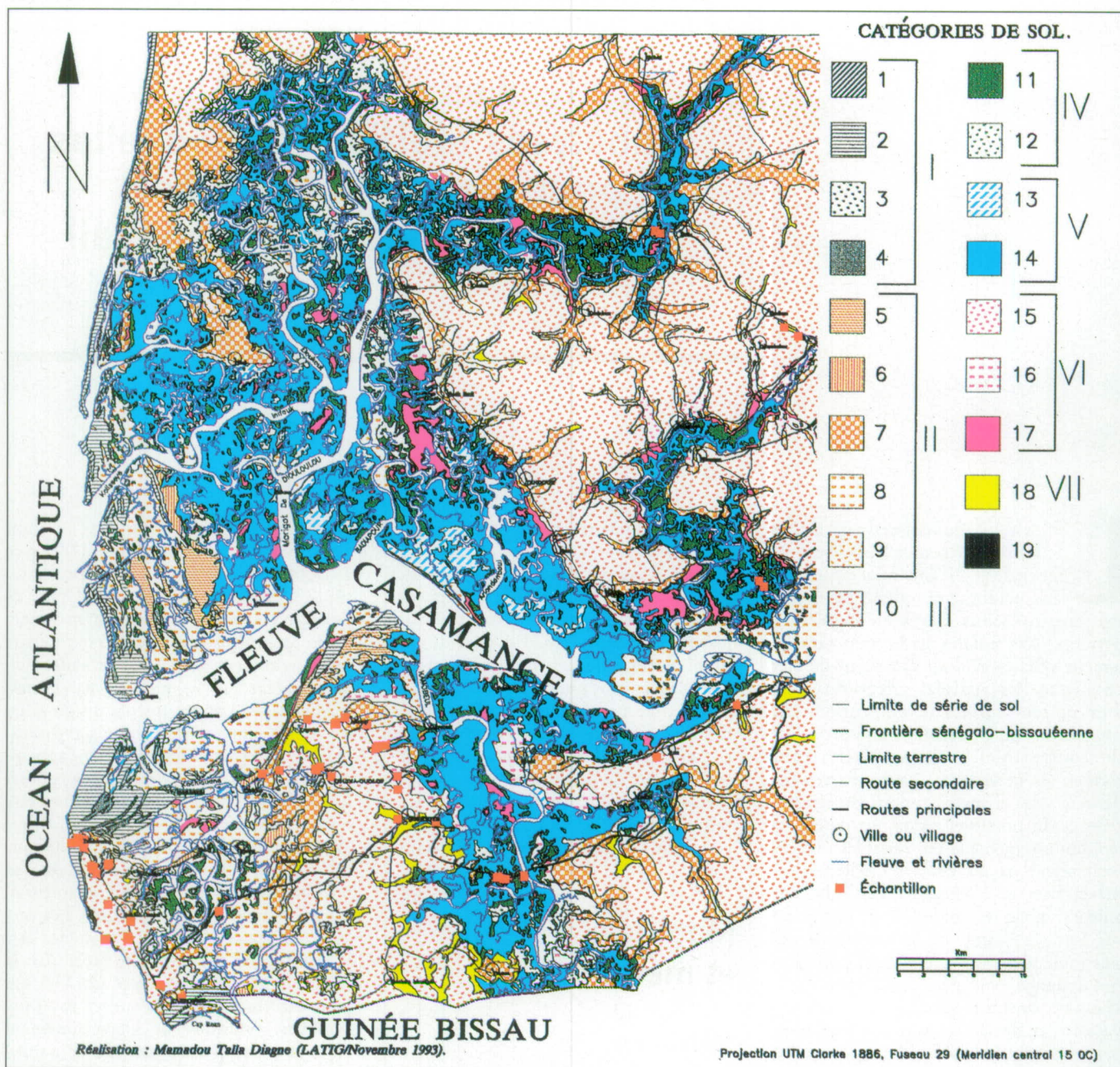


Figure 1. Carte pédologique de Basse-Casamance et sites d'échantillonnage.

Figure 1. Soil distributions and sampling sites in Basse-Casamance.

divers types de dunes, vives à évoluées, sur lesquelles on trouve des espèces volubiles.

Échantillonnage

L'échantillonnage a été dirigé; la vase luxuriante, d'accès difficile, n'a pas été échantillonnée. La stratégie adoptée porte sur la collecte de sols appartenant à

toutes les séries identifiées par les cartographies existantes, à petite échelle (1 : 100 000) pour l'ensemble de la région [12], et à grande échelle (1 : 10 000) pour une vallée spécifique, celle de Djignoum [13] (figure 2). L'échantillonnage est très hétérogène: il prend en compte les sols alluviaux et les sols de plateaux (deux milieux aux dynamiques de fonctionnement complètement différentes),

ainsi que les horizons inférieurs ou à croûtes superficielles d'un même profil. Un premier échantillonnage a collecté 56 échantillons sur la rive gauche du fleuve Casamance. Un deuxième a collecté 8 échantillons supplémentaires sur la rive droite, correspondant à des faciès plus argileux, ainsi que 10 échantillons argileux provenant de la vallée de Djignoum. Sur les 74 échantillons collectés,

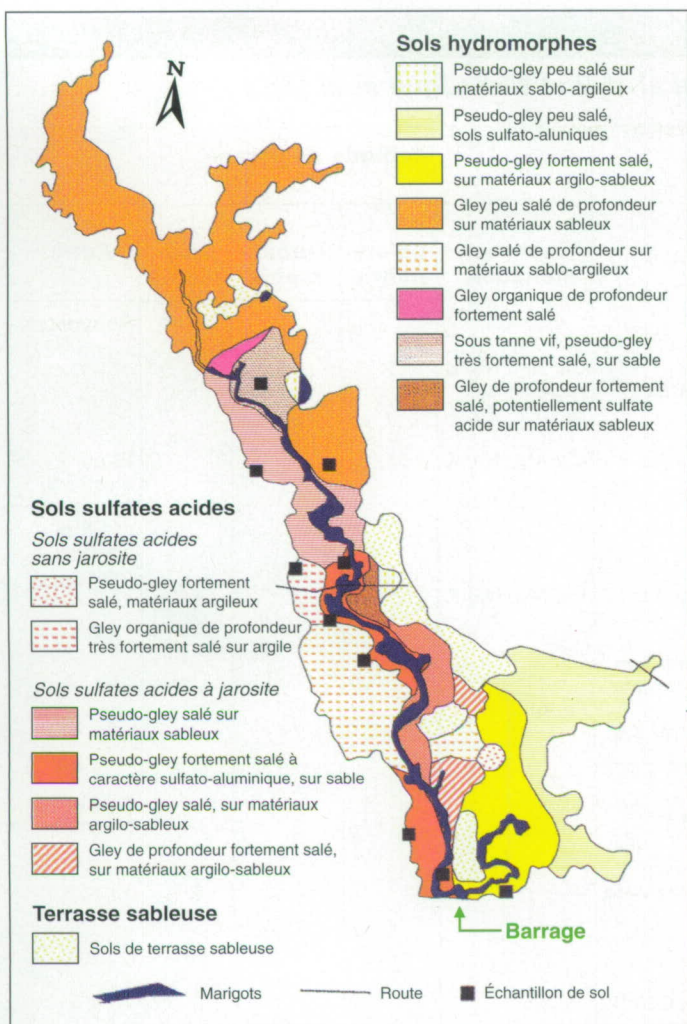


Figure 2. Carte pédologique de la vallée de Djignoum et sites d'échantillonnage.

Figure 2. Soil distributions and sampling sites in Djignoum Valley.

- analyse en composantes principales sur 33 descripteurs chimiques retenus après les traitements élémentaires précédents, suivie d'une rotation Varimax ;
- analyse de regroupement hiérarchique à lien complet pour la classification numérique des sols en sous-ensembles homogènes (ou d'égale fertilité) ;
- analyse discriminante de sélection de type étape par étape sur l'ensemble des descripteurs originaux (réduction des descripteurs), suivie d'une analyse discriminante progressive de classification sur les descripteurs retenus par l'analyse discriminante.

Ces analyses ont été effectuées à partir du progiciel statistique SAS [16].

Résultats et discussions

Vérification de la normalité, transformation et réduction des variables

Les descripteurs relatifs à la salinité étaient les plus difficiles à normaliser du fait de l'existence de deux sous-populations nettes (sols alluviaux et sols de plateaux). La plupart des descripteurs étudiés avaient une distribution lognormale ; la transformation Arcsinus a été utilisée pour les descripteurs relatifs à la granulométrie. Finalement, 33 descripteurs ont été retenus pour réaliser l'analyse en composantes principales après en avoir éliminé 12 qui étaient très fortement corrélés ($R \geq 0,91$) à d'autres.

Analyse en composantes principales (ACP)

Les résultats de l'ACP, après rotation Varimax, sont présentés dans le *tableau 2*. Le choix du nombre de composantes les plus importantes a été fixé à 5 en se basant sur le critère d'une valeur propre supérieure ou égale à 1. La part d'information (pourcentage d'inertie), associée aux 5 composantes principales (ou axes principaux) retenues, est de 82,4 % de la variance originale. La première composante, qui explique 31,2 % de la variance, est la plus importante pour la fertilité des sols étudiés et peut être nommée « salinité des sols ». Elle constitue le principal facteur limitant de ces sols et traduit la

37 sont de sols alluviaux et 37 de sols de plateaux. La couche prélevée était, le plus souvent, celle de 0-25 cm. Les cartes représentées dans les *figures 1 et 2*, obtenues par saisie numérique des supports cartographiques existants, décrivent la répartition des séries de sol ainsi que la localisation des points d'échantillonnage [12, 13].

Méthodes d'évaluation des descripteurs chimiques de fertilité

Les fortes concentrations en sels solubles des extraits de sol provenant des sols alluviaux et la gamme étendue de pH (d'extrêmement acide à très alcalin) hypothèquent la précision des mesures. Les fortes colorations de certains extraits se prêtent ainsi difficilement à l'analyse colorimétrique, tandis que des problèmes

de sensibilité et d'obturation du brûleur se posent lors de l'évaluation spectrophotométrique à la flamme.

Les échantillons de sol ont été séchés à 35 °C, préalablement aux analyses chimiques. Les 45 descripteurs étudiés peuvent être réunis en quelques méthodes d'analyses standard de laboratoire [14, 15] (*tableau 1*). Les résultats présentés sont des moyennes d'au moins deux répétitions par analyse.

Méthodes d'analyses statistiques

On a suivi la démarche suivante :

- analyse de la normalité, transformation des variables s'il y a lieu et standardisation par la suite ;
- analyse des matrices de corrélation totale et partielle, élimination des descripteurs fortement corrélés ($R \geq 0,91$) ;

Tableau 1

Descripteurs et méthodes d'analyses (d'après Page *et al.* [14] et McKeague *et al.* [15])

Analyses (unité)	Identifiant des descripteurs	Extractifs	Méthode de dosage					
			Absorption atomique	Colorimétrie	Turbidimétrie	Titrimétrie	Autre	
Granulométrie	Sable, limon, argile							Bouyoucos
Analyse élémentaire (%)	CaO, MgO, Na ₂ O, K ₂ O, SO ₃ , Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , P ₂ O ₅ , CuO, MnO, ZnO, TiO ₂	Acide nitrique-acide perchlorique concentrés	Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, S, P, Mn, Cu, Zn, Ti	P	S			
Extraits aqueux (mEq/l, sauf CE)	Ca-sol., Mg-sol., Na-sol., K-sol., Cl, SO ₄ ²⁻ CE	Eau	Ca, Mg, Na, K		S			Cl par électrode spécifique et CE par conductimétrie
CEC et bases solubles (mEq/100 g)	Ca-échg., Mg-échg., Na-échg., K-échg., CEC	Acétate d'ammonium à pH 7	Ca, Mg, Na, K				CEC	
Oxydes (mg/kg)	Fe-Ox, Al-Ox Fe-Dit, Al-Dit Fe-Pyros, Al-Pyros Fe-NH ₄ , Al-NH ₄	Oxalate acide d'ammonium Ditionite-citrate-bicarbonate Pyrophosphate Acétate-ammonium (pH 4,5)	Fe, Al					
pH	pH(1/1) pH(KCl) pH(H ₂ O ₂) pH(1/5)	Eau KCl Eau oxygénée (30 %) Eau						Lecture pH-mètre
Matière organique (%)	MO	Oxydation au bichromate de potassium en milieu sulfurique					C	
Melich-III (mg/kg)	P-MIII S-MIII Fe-MIII	Acide acétique 0,2 N + nitrate d'ammonium 0,25 N + Fluorure d'ammonium 0,015 N + acide nitrique 0,013 N + EDTA 0,001 M	Fe	P	S			
Bray2 (mg/kg)	P-Bray2 S-Bray2	Fluorure d'ammonium 0,03 N + acide chlorhydrique 0,1 N		P	S			

CE : conductivité électrique ; CEC : capacité d'échange cationique.

Descriptors and analytical methods

quantité de sels présents, essentiellement d'origine marine. La salinité discrimine clairement les sols de plateaux des sols alluviaux, sauf dans quelques rares sols de rizières d'anciennes mangroves où les sels ont été lessivés. Les descripteurs qui contribuent le plus à cette composante (axe) de la salinité (tableau 2) sont, dans l'ordre, le sodium total et le magnésium total, la conductivité électrique, le soufre extrait avec Bray2, le calcium soluble, les sulfates solubles, le potassium total, le soufre total et le potassium extrait à l'acétate d'ammonium. Ces éléments sont fortement reliés les uns aux autres, avec des coefficients de corrélation variant de 0,71

à 0,90 [17]. La deuxième composante, avec 23,3 % de la variance originale, est surtout représentée par l'aluminium. Toutes les formes d'aluminium (total et formes extraites par dissolution chimique spécifique) contribuent significativement à cette composante. Les autres descripteurs qui contribuent encore à cette composante sont l'argile, la matière organique, la conductivité électrique et le phosphore total. Cette composante peut être nommée « fertilité naturelle des sols ». La troisième composante (« acidité totale actuelle et potentielle ») explique 10,51 % de la variance ; elle comporte l'acidité actuelle totale (pH dans les rap-

ports eau/sol de 1/1 et de 1/5) et l'acidité potentielle totale (pH après oxydation à l'eau hydrogénée). La quatrième composante (« oxydes de fer libre ») explique 8,8 % de la variance et concerne le fer libre total (oxydes de fer peu ou mal organisés) et la teneur totale en fer. La cinquième composante (8,6 % de la variance), appelée « fer labile ou potentiel d'acidité », est constituée de formes organo-minérales à faible organisation cristalline correspondant aux fractions de fer extraites principalement par l'acétate d'ammonium à pH acide, le pyrophosphate, l'extractif Mehlich-III et, à un moindre degré, de l'oxalate. Cette com-

Tableau 2

Matrice de saturation après rotation Varimax des cinq premières composantes principales

Descripteurs	Composante 1	Composante 2	Composante 3	Composante 4	Composante 5	Communauté*
Na ₂ O	0,95	- 0,13	0,14	0,06	0,06	0,94
MgO	0,91	0,27	0,08	0,10	0,09	0,92
CE	0,90	0,09	- 0,06	0,13	0,17	0,87
S-Bray2	0,90	- 0,15	- 0,01	- 0,11	0,17	0,87
Ca-sol.	0,88	0,06	0,03	- 0,01	0,33	0,88
Sulfates	0,87	0,16	- 0,01	0,15	0,20	0,85
K ₂ O	0,86	0,23	- 0,07	0,29	0,09	0,89
SO ₃	0,83	0,16	- 0,13	0,28	0,19	0,85
K-échg.	0,75	0,12	0,07	0,27	0,13	0,67
CuO	0,67	0,34	- 0,16	0,10	- 0,03	0,59
TiO ₂	0,56	0,06	- 0,40	0,12	- 0,12	0,50
Al-Ox	0,00	0,89	- 0,12	0,19	0,12	0,86
Al-Pyros	- 0,09	0,86	- 0,34	0,16	0,09	0,90
Al-Dit	0,27	0,86	- 0,18	0,16	- 0,08	0,88
P ₂ O ₅	- 0,10	0,83	- 0,07	0,38	0,20	0,89
CEC	0,49	0,76	- 0,07	0,23	0,19	0,90
Matière organique	0,40	0,75	- 0,09	0,00	0,40	0,90
Al-NH ₄	0,10	0,74	- 0,46	- 0,07	0,27	0,84
Argile	0,62	0,67	- 0,04	0,26	- 0,06	0,91
ZnO	0,55	0,67	- 0,07	0,33	0,15	0,89
P-Bray2	- 0,04	0,59	0,13	- 0,15	0,53	0,66
Fe-Pyros	0,23	0,55	- 0,31	0,43	0,49	0,88
Limon	0,51	0,53	0,02	- 0,13	- 0,09	0,57
MnO	- 0,02	0,48	0,42	0,42	- 0,19	0,62
pH(1/5)	0,08	- 0,22	0,85	- 0,07	- 0,01	0,79
pH(1/1)	- 0,06	- 0,39	0,83	- 0,02	- 0,16	0,88
pH(H ₂ O ₂)	- 0,26	- 0,23	0,74	0,05	- 0,37	0,81
CaO	0,41	0,26	0,64	0,12	0,34	0,78
Fe-Dit	0,38	0,20	0,03	0,81	0,13	0,86
Fe-Ox	0,21	0,36	- 0,05	0,70	0,47	0,89
Fe ₂ O ₃	0,62	0,24	- 0,01	0,67	- 0,08	0,89
Fe-MIII	0,44	0,09	- 0,14	0,24	0,78	0,89
Fe-NH ₄	0,40	0,28	- 0,38	0,18	0,69	0,89
Variance totale	10,30	7,70	3,47	2,89	2,83	27,19
% de la variance originale	31,21	23,33	10,51	8,76	8,58	82,39

* Communauté : somme des carrés des saturations d'une variable expliquée par l'ensemble des composantes ou par un sous-ensemble des composantes. Le fait de retenir 5 composantes principales au lieu de 33 descripteurs correspond à une perte de variance se reflétant dans la communauté des descripteurs individuels qui n'est plus égale à 1. CE : conductivité électrique ; CEC : capacité d'échange cationique.

Varimax rotation results for the first five principal components

posante est un facteur limitant des sols et correspond au fer soluble retrouvé en grande partie dans la solution du sol lors de la submersion.

Analyse de regroupement hiérarchique par agglomération à liens complets

La délimitation des groupes est réalisée à l'aide d'une analyse de regroupement hiérarchique à liens complets. Le choix des sept groupes retenus a été prédéterminé par analyse de plusieurs scénarios,

variant de deux à dix groupes, au moyen de la procédure FASTCLUS [16]. Le choix du nombre de groupes est subjectif dans l'analyse de regroupement (*cluster*) : il varie selon le nombre de variables choisies et la méthode de regroupement utilisée [18]. Les notices explicatives des cartes pédologiques [12, 13], les notes de terrain et les connaissances accumulées sur les sols étudiés [2, 3] ont été mises à contribution en la matière. La projection des échantillons de sol étudiés dans l'espace des deux premières composantes principales (54,5 % de la variance originale) permet de délimiter sur le même espace les groupes identifiés par l'analyse de regroupement (*figure 3*) correspon-

dant à des ensembles homogènes de la toposéquence de la région. L'axe des ordonnées délimite deux grands ensembles qui correspondent sensiblement aux sols de plateaux (continental terminal) et aux sols alluviaux (domaine fluvio-marin ou mangroves). Dans le quadrant I (*figure 3*), on retrouve des échantillons de sols en provenance des alluvions argileux potentiellement sulfatés acides (groupe 3) ainsi que la majeure partie des sols sulfatés acides stricts ou parasulfatés acides (groupe 4). Ce dernier groupe est à cheval sur les quadrants I et IV : l'axe de la deuxième composante permet d'y séparer le sous-groupe d'échantillons en provenance de rizières

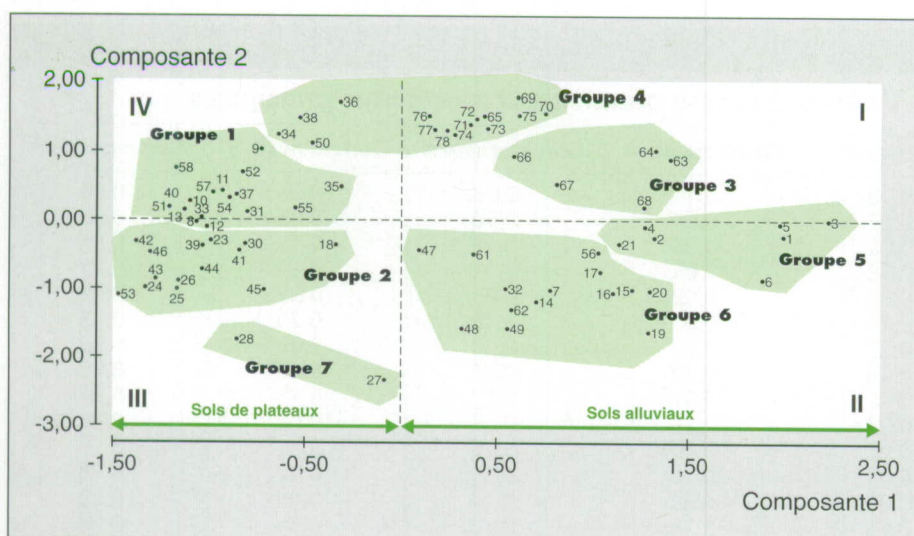


Figure 3. Répartition et regroupement des échantillons de sols dans le plan cartésien des deux premières composantes. Les contours expriment les résultats de l'analyse numérique (liaison complète). Groupe 1 (n = 17) : Sols ferrallitiques ; Groupe 2 (n = 14) : Terrasses sableuses ; Groupe 7 (n = 2) : Dunes et cordons ; Groupe 3 (n = 5) : Mangroves et « tannes » dégradés argileux ; Groupe 4 (n = 15) : sols sulfatés et parasulfatés acides ; Groupe 5 (n = 7) : crôutes et horizons superficiels ; Groupe 6 (n = 14) : mangroves et « tannes » sableux.

Figure 3. Scattergram for soil samples plotted on the planes of the first two principal components. Contours indicate the numerical analysis results (complete linkage).

actuelles de plateaux – sur terrasses argileuses à limono-argileuses, où la salinité est évacuée pratiquement dans tous les profils – (quadrant IV) et le sous-groupe des sols des rizières aménagées de Djignoum (quadrant I). Dans le quadrant II, on retrouve des échantillons de sols alluviaux sableux et salés (groupe 6) ainsi que des échantillons provenant

d'horizons superficiels très salés (groupe 5). Les échantillons de sols provenant des plateaux se retrouvent classés principalement dans le groupe 1 (quadrant IV), constitué de sols ferrallitiques sur matériau sablo-limoneux à argileux du « continental terminal » et dans le groupe 2 (quadrant III), où on retrouve les sols peu évolués sur terrasses sableuses. Dans le

groupe 7, on retrouve deux échantillons marginaux provenant des dunes de plage (quadrant III).

Analyse discriminante progressive

Réalisée en deux étapes, l'analyse discriminante visait à déterminer, parmi les 45 descripteurs du fichier original de données ajustés à leur meilleur critère de normalité, quelques descripteurs majeurs distinguant les sept groupes ainsi déterminés. Une analyse discriminante de sélection étape par étape (Procédure STEPDISC) a sélectionné 22 descripteurs aux pouvoirs discriminants les plus élevés. Une analyse discriminante progressive (Procédure DISCRIM) a été effectuée sur les descripteurs précédents, introduits un à un dans leur ordre d'importance déclarée par la sélection étape par étape, jusqu'à obtenir le meilleur taux de classification. Bien que les 13 descripteurs retenus soient hautement significatifs (tableau 3), leur nombre a été ramené à 8, les descripteurs MnO, TiO₂, Fe-Ox et Fe-Pyros, dont les R² sont faibles, n'ayant pas été pris en compte ; MnO et TiO₂ avaient des valeurs de communalité très faibles, tandis que Fe-Ox est un constituant de la quatrième composante et Fe-Pyros saturé principalement dans toutes les composantes (tableau 2). Le pourcentage de sable (descripteur proportionnel lié au limon et à l'argile) n'a pas été retenu.

Tableau 3

Principaux descripteurs chimiques discriminatoires des groupes de sols de Basse-Casamance

Variance Descripteurs	Variance totale	Variance intragroupe	Coefficient de intergroupe (R ²)	F de détermination	Snedecor	Pr > F*
Sable	0,39	0,15	0,39	0,86	71,05	0,0001
Na ₂ O	0,88	0,38	0,85	0,82	52,44	0,0001
MnO	0,32	0,25	0,24	0,46	9,52	0,0001
Al-NH ₄	0,50	0,28	0,45	0,72	28,67	0,0001
Na-échg	1,41	0,62	1,37	0,83	52,69	0,0001
S-MIII	0,71	0,33	0,69	0,80	45,17	0,0001
Al ₂ O ₃	0,46	0,24	0,42	0,75	34,02	0,0001
Sulfates	1,02	0,51	0,96	0,77	37,01	0,0001
TiO ₂	0,28	0,21	0,21	0,49	10,56	0,0001
Al-Ox	0,42	0,21	0,40	0,78	39,86	0,0001
P ₂ O ₅	0,57	0,27	0,54	0,80	44,07	0,0001
Fe-Ox	0,47	0,40	0,30	0,35	5,97	0,0001
Fe-Pyros	0,46	0,35	0,34	0,48	10,32	0,0001

Lambda de Wilks : 0,0002677 ; 0,0001. * Probabilité que les valeurs soient supérieures à celles des valeurs du F du tableau de Snedecor.

The best chemical descriptors of Basse-Casamance soil's group (discriminant analysis results)

Principales propriétés chimiques de diagnostic et différenciation des groupes de sols de Basse-Casamance

Les méthodes d'analyses multidimensionnelles ont permis de condenser l'information initiale contenue dans nos 45 descripteurs en deux composantes majeures et de réduire la vingtaine de séries de sols décrites antérieurement [12, 13] en sept groupes aux propriétés chimiques bien différenciées. Huit descripteurs sont proposés pour synthétiser les principales caractéristiques chimiques relatives au diagnostic et à la description de la fertilité des sols de Basse-Casamance. Ces descripteurs diagnostics sont respectivement Na_2O , Na-échg., S-MIII et, en second échelon, les sulfates pour la composante salinité et Al-NH_4 , Al_2O_3 , Al-Ox, P_2O_5 pour la composante fertilité.

Salinité des sols de Basse-Casamance

Bien que tous les descripteurs (tableau 2) liés à l'eau de mer soient en relation étroite avec la composante salinité, il semble que 4 d'entre eux semblent mieux décrire cette salinité (figure 4) ; à l'exception des sulfates, ils figurent dans le groupe 5. Le sodium total (Na_2O) et le sodium échangeable (Na-échg.) sont les plus caractéristiques (figures 4A et 4B) pour distinguer les sols de plateaux des sols alluviaux, pour lesquels la teneur en sulfates (figure 4C) ne permet pas de différencier le groupe 3 du groupe 5, ni les groupes 4 et 6 du groupe 7. Bien que les teneurs en sulfates des sols potentiellement sulfatés acides (groupe 3) soient très élevées, les quantités extraites par Mehlich-III (figure 4D) y demeurent faibles, ce qui suggère que, dans le groupe 5, la majeure partie du soufre se retrouve engagée dans des formes labiles, non extraites par l'eau.

Fertilité naturelle des sols de Basse-Casamance

La caractéristique principale de la composante fertilité (figure 5) est donnée par l'aluminium. L'aluminium total (figure 5A), fortement relié à l'argile, permet de distinguer les sols alluviaux argileux (groupe 3, 4 et 5) des autres groupes, sur-

Summary

Use of multivariate analysis to evaluate soils of Basse-Casamance (Senegal)

M.T. Diagne, M.P. Cescas

This study was aimed at obtaining further information on chemical aspects of soil fertility in the mangroves and high plains of Basse Casamance (Senegal). Seventy-four representative samples of different soils of this region (Figures 1, 2) were collected and analysed for 45 different descriptors by standard laboratory techniques (Table 1). Multivariate analyses were conducted to condense the collected data and determine the fertility status of these soils. After Varimax rotation, the principal components analysis (PCA) results (Table 2) highlighted two principal components which should be considered when assessing the fertility of these soils. The first component, accounting for 31.2% of the variance in the data, is related to soil salinity features, which are fully documented for these soils and considered as the main factors limiting soil productivity. The second component, referred to as "natural soil fertility", has never been documented, but here represents 23.3% of the variance. This component characterizes an "allophanization gradient", with high aluminium accumulation related to other soil colloids, mainly organic matter and/or mineral clay contents. A hierarchical cluster analysis with complete linkage classified the soils into seven different categories (Figure 3), with well differentiated soil chemical and fertility related properties. To evaluate the best descriptors responsible for within-group differences, a two-step discriminant analysis was performed: a step-by-step analysis to determine the variables, followed by a progressive analysis for classification (Table 3). These analyses highlighted eight different soil attributes (Figures 4, 5) that can be used as indicators for each of the seven soil groups. These indicators are economic choices, revealing the most useful chemical properties to be measured in the laboratory for fertility and taxonomic studies concerning soils of this region.

Cahiers Agricultures 1997 ; 6 : 45-53.

tout sableux. Sa teneur moyenne totale peut atteindre 14 % dans le groupe le plus argileux (groupe 3) plus de > 20 % dans certains sols (sulfatés acides évolués ou parasulfatés acides) des rizières aménagées de la vallée de Djignoum (quadrant I). Les plus faibles valeurs d'aluminium total sont retrouvées dans les sols ferrallitiques de plateaux (groupe 1) et dans les dunes (groupe 7) avec une teneur moyenne toujours inférieure à 2 %. Ce qui caractérise surtout les sols sulfatés acides et parasulfatés acides (groupe 4), ce sont les quantités élevées d'aluminium et de fer, principalement sous formes amorphes accumulées. Les formes amorphes d'aluminium, représentées par

les descripteurs diagnostics Al-NH_4 (figure 5B) et Al-Ox (figure 5C) reflètent le mieux cette accumulation, avec des teneurs moyennes respectives de 410 et 4 352 mg/kg. Des accumulations beaucoup plus faibles sont retrouvées dans les groupes 3 et 2. Le phosphore total (P_2O_5) distingue la fertilité ; il est peu représenté dans ces sols (figure 5D), sauf dans les groupes 3 et 4 où sa teneur moyenne peut atteindre 0,1 % de P_2O_5 . Les méthodes d'évaluation de la disponibilité en phosphore (Bray2 et Mehlich-III) ont donné des valeurs plus élevées dans les groupes 4 et 2 que dans le groupe 3 [17], dont les formes de phosphore seraient peu disponibles.

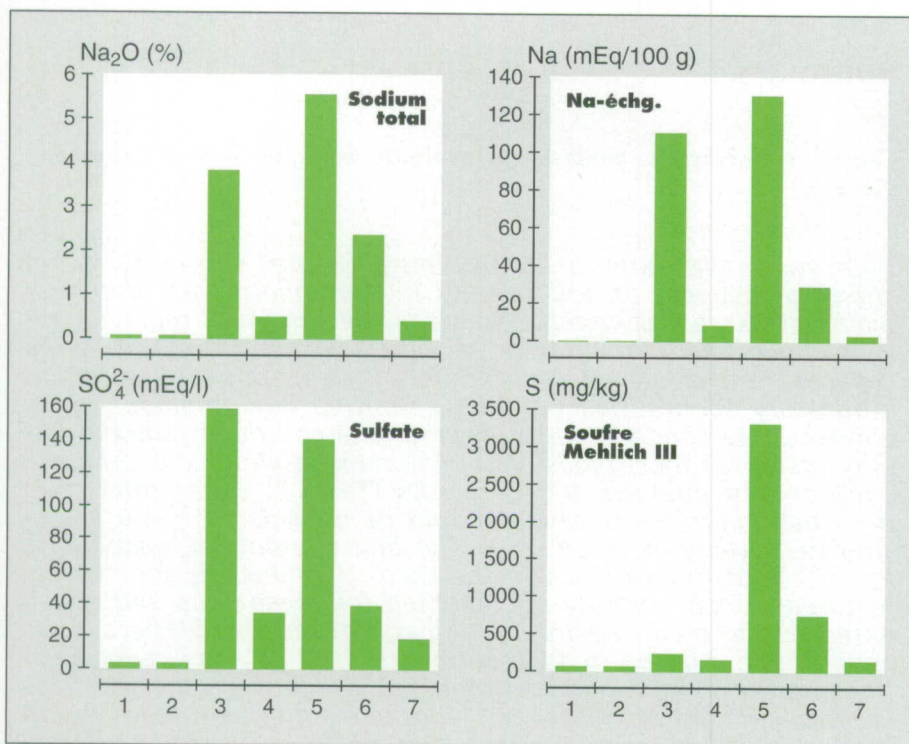


Figure 4. Descripteurs diagnostics de salinité et de différenciation des groupes de sols de Basse-Casamance.

Figure 4. Diagnostic descriptors of salinity and differentiation of the main soil groups of Basse-Casamance.

Apports à la connaissance des sols de Basse-Casamance

Les méthodes d'analyses multidimensionnelles sont beaucoup plus puissantes que les analyses de type expérimental portant sur quelques descripteurs (si importants soient-ils) pour déceler les relations complexes entre les composantes de la fertilité des sols. Celles-ci, complétées par l'étude comparative originale des oxydes de fer et d'aluminium, nous ont permis de révéler une nouvelle relation importante de fertilité des sols de Basse-Casamance, à savoir que, à l'évolution naturelle (tannification) des sols sulfatés acides conduisant à un sol parasulfaté acide [3, 6] correspond un gradient de fertilité caractérisé par une accumulation amorphe d'aluminium et de fer, prenant naissance dans les sols sulfatés acides stricts et argileux. Cette accumulation évolue par la suite sous des formes associées princi-

palement à la matière organique dans les sols parasulfatés acides et dans les terrasses ; l'aluminium est beaucoup plus représenté que le fer au cours de cette évolution. L'apparition des sols parasulfatés acides et la stabilisation de leur pouvoir tampon à des valeurs de 3,75 à 4,75 doivent être reliées au développement des formes d'aluminium (et secondairement de fer) associées à la matière organique. Les comportements comparables des terrasses de plateaux et des mangroves (argileuses) montrent que, en Basse-Casamance, seuls les sols jaunes à rouges doivent être considérés comme sols de plateaux. Nos résultats ne permettent pas, en revanche, de préciser la nature des composés responsables de ce pouvoir tampon, à cause de la non-spécificité des méthodes utilisées. Ces complexes peuvent être associés principalement à la matière organique, adsorbés à la surface des minéraux argileux ou encore être des composés de nature allophanique.

Conclusion et propositions

L'extrême variabilité des sols de Basse-Casamance, le nombre réduit d'échantillons ainsi que les limitations de certaines techniques utilisées (notamment l'analyse de regroupement *cluster analysis*) limitent l'application immédiate de nos résultats. Lorsqu'ils seront validés sur le terrain, ils permettront d'augmenter les surfaces cultivables en riz. La recommandation principale de gestion de ces sols, basée sur le maintien en permanence d'une lame d'eau, devrait être revue et amendée. L'accélération de l'expression de l'acidité potentielle connue jusqu'à ce jour, dans les sols argileux et tourbeux, constitue une voie pour réhabiliter les mangroves dégradées et les tannes et permet de lutter contre la perte de sols. Un drainage intense et profond aurait pour action d'accélérer l'expression de l'acidité liée aux composés sulfurés et conduirait, à terme, aux sols parasulfatés acides. Ces sols, bien qu'ayant une fertilité moyenne en raison de leur déficience en calcium et parfois en potassium, ont des teneurs très faibles en fer ($Fe_2O_3 < 2\%$) ; la presque totalité du fer ainsi qu'une partie de l'aluminium échangeable (apportée par la dégradation des argiles au cours de l'acidification) ont été évacuées de leurs profils. Ils sont moins sujets aux déficiences en phosphore et ne développeraient pas (sans intrusion) de toxicité ferrique, laquelle limite la production de riz dans les sols sulfatés acides. Ils peuvent être rendus facilement productifs par des apports, en fumure de fond, d'amendements organiques et minéraux. Pour objectiver la cartographie des fertilités de sols de Basse-Casamance et assurer leur gestion à long terme, l'inventaire devrait déboucher sur une gestion raisonnée de cet écosystème, fragile et mouvant, grâce à une approche systémique intégrant les ressources locales, les techniques d'analyses multidimensionnelles et les outils de la géomatique (SIG, GPS, base de données, géostatistique, etc.). L'identification de descripteurs indicateurs de la fertilité des sols de Basse-Casamance et leur répartition en groupes sont intéressantes pour la mise en place d'un système d'information et de gestion de ces sols sur une base des 8 descripteurs proposés en caractérisant le « gradient d'allophanisation » de ces sols en évolution (passage du sol de mangrove au sol sulfaté acide, puis parasulfaté acide) ■

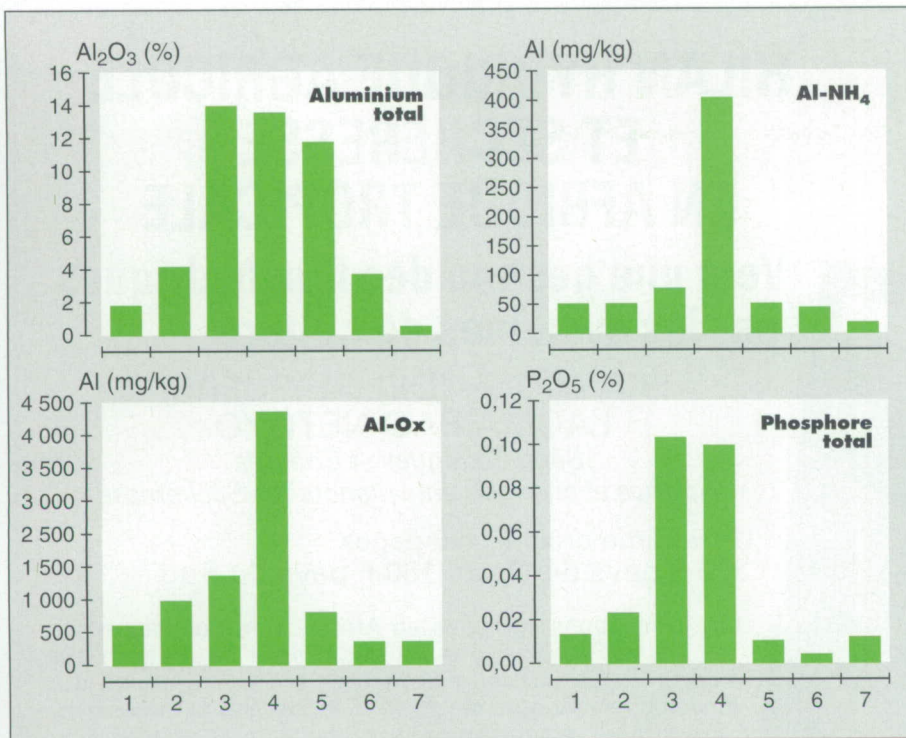


Figure 5. Descripteurs diagnostics de fertilité et de différenciation des groupes de sols de Basse-Casamance.

Figure 5. Diagnostic descriptors of fertility and differentiation of the main soil groups of Basse-Casamance.

Références

- Bèye G. Bilan de cinq années d'études du dessalement des sols du Polder de Médina (Basse-Casamance), Sénégal. *Agron Trop* 1975 ; 30 : 251-63.
- Vieillefon J. *Les sols des mangroves et des tannes de Basse-Casamance (Sénégal). Importance du comportement géochimique du soufre dans leur pédogenèse*. Paris : Mémoire ORSTOM, 1977 ; n° 83 ; 291 p.
- Marius C. *Mangroves du Sénégal et de la Gambie, écologie-pédologie-géochimie. Mise en valeur et aménagement*. Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles de l'Université Louis-Pasteur. Paris : ORSTOM, Collection Travaux et Documents n° 193, 1985 ; 357 p.
- Bèye G. Étude de l'action de doses croissantes d'azote en présence ou en absence de paille de riz enfouie sur le développement et les rendements du riz en Basse-Casamance. *Agron Trop* 1974a ; 27 : 41-50.
- Bèye G. Étude comparative de l'action de la potasse et de la paille enfouie sur le développement et le rendement du riz, sur sol argileux de la Basse-Casamance. *Agron Trop* 1974b ; 29 : 803-11.
- Le Brusq JY, Loyer JY, Mougenot B, Carn M. Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium, et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. *Sci Sol* 1987 ; 3-25 : 173-84.
- Le Brusq JY. *Remarques à propos du résumé de la thèse de C. Marius*. Paris : Cahiers ORSTOM, 1986, sér. Pédol. 22 : 439-40.

8. Boivin P. *Recommandations concernant l'aménagement du domaine fluvio-marin en Basse-Casamance. Cas de la vallée de Koubalan*. Dakar : ORSTOM, 1985.

9. Boivin P, Le Brusq JY. *Étude pédologique des Kalounayes. Vallées de Koubalan et Tapilane (Casamance)*. Convention ORSTOM-DER, 1984 ; 72 p.

10. Cormier-Salem MC. *Contribution à l'étude géographique des espaces aquatiques : la Casamance*. Thèse de doctorat (nouveau régime), Université Paris X-Nanterre, 1989.

11. Loyer JY, Boivin P, Le Brusq JY, Zante P. Les sols du domaine fluvio-marin de Casamance (Sénégal) : évolution récente et réévaluation des contraintes majeures pour leur mise en valeur. In : Dost H, éd. *Selected Papers of the Dakar Symposium on Acid Sulphate Soils*. Dakar (Sénégal), 1986.

12. Vieillefon J. *Notice explicative n° 57. Carte pédologique de la Basse-Casamance (domaine fluvio-marin à 1 : 100 000)*. ORSTOM éd., 1975 ; 59 p.

13. Brunet D. *Étude pédologique de la vallée de Djignoum (Basse-Casamance)*. Dakar : ORSTOM, 1988 ; 28 p + annexes.

14. Page AL, Miller RH, Keeney DR. *Methods of soil analysis. Part 2 : Chemical and microbiological properties*. Madison, WI : American Society of Agronomy, 2^e éd., 1982 ; 1 159 p.

15. McKeague JA. *Manuel de méthodes d'échantillonnages et d'analyses des sols*. *Soc Can Sci Sol*, 2^e éd. Ottawa, De Kimpe, 1978 ; 114-233.

16. SAS Institute INC. *SAS/STAT. User's guide, 1989. Version 6, Fourth Edition, Vol. 1 et 2 : 1686 p.*

17. Diagne MT. *Pouvoir tampon et chimie du phosphore dans les sols de la Basse-Casamance, Sénégal. Prototype de visualisation des caractères de fertilité*. Thèse de Doctorat (Sols). Faculté des Sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, 1994 ; 275 p.

18. Lamontagne L, Camiré C. *Soil analysis and numerical classification of the Lanoraie delta, Québec*. *Can J Soil Sci* 1994 ; 67 : 417-32.

Remerciements

Ce travail est extrait de la thèse de Doctorat de M.T. Diagne. Les auteurs remercient le Programme canadien de bourses de la Francophonie (PCBF) pour son soutien financier. Ils remercient également le Dr Claude Camiré et le Dr Marius Thériault, professeurs à l'Université Laval, respectivement à la Faculté de foresterie et de géomatique et au Département de géographie, pour leurs commentaires.

Résumé

Dans le but de contribuer à la connaissance des propriétés chimiques de fertilité des sols de mangroves et des plateaux de Basse-Casamance (Sénégal), 45 descripteurs de fertilité ont été évalués par les méthodes standard de laboratoire sur 74 échantillons représentatifs des différentes séries de sols de cette région. Des techniques statistiques d'analyses multidimensionnelles ont été utilisées afin de faire une synthèse de la fertilité de ces sols. Les résultats de l'analyse en composante principale révèlent l'existence de deux gradients : l'un est relatif à la salinité, l'autre, jusque-là méconnu (nommé « fertilité naturelle des sols »), caractérise un processus d'allophanisation avec des accumulations importantes d'aluminium lié aux colloïdes du sol, principalement la matière organique et/ou l'argile. D'autres techniques d'analyse multidimensionnelle ont permis de répartir les échantillons en sept groupes aux propriétés chimiques de fertilité bien différenciées et de retenir 8 descripteurs diagnostics pour l'étude de la fertilité et/ou de la cartographie des sols de cette région.