

# Évolution de l'acidité dans les sols du delta du fleuve Sénégal sous influence anthropogène

J. Deckers, D. Raes, J. Ceuppens, I. De Wachter, R. Merckx et A. Diallo

J. Deckers, Professeur, Université Catholique de Louvain (KULeuven), Institut pour la gestion des terres et des eaux (ILWM), Vital Decosterstraat, 102, 3000 Leuven  
 D. Raes, Professeur, KU Leuven, ILWM  
 J. Ceuppens, Projet Gestion de l'eau, Saint Louis, Sénégal  
 I. Dewachter, Chercheur, KU Leuven  
 R. Merckx, Professeur, Laboratoire de la Fertilité et de la Biologie du sol, Kardinaal Mercierlaan, 92, 3001, Heverlee  
 A. Diallo, Laboratoire Pédologique, Ross Béthio, NDiaye, Sénégal

## RÉSUMÉ

Cette communication porte sur une prospection pédologique effectuée dans le delta du fleuve Sénégal, dans le cadre du Projet Gestion de l'Eau, Coopération Scientifique KU Leuven - SAED, à Saint Louis, Sénégal. Il s'agit d'une recherche diagnostique sur le problème de l'acidité et son importance pour la riziculture sous irrigation. L'objectif de cette étude était d'étudier la dynamique de l'acidité dans les sols du delta depuis sa formation jusqu'à maintenant sous l'influence de l'homme. Cette évolution est caractérisée par l'analyse de trois cas tout à fait différents notamment, (i) le cas sans influence humaine, (ii) un site archéologique où est intervenue une influence humaine historique, facteur pédogénétique dominant et (iii) un périmètre irrigué depuis 1980. Chaque site est caractérisé par une topo-séquence représentative. L'étude a démontré qu'une quantité non négligeable d'acidité potentielle existe dans le Delta et ce, surtout dans les cuvettes de décantation. En d'autres endroits, l'acidité potentielle apparaît à grande profondeur ou bien n'a jamais existé, ou a été neutralisée par la présence de  $\text{CaCO}_3$  dans le profil (déchets de coquillages archéologiques). L'étude montre qu'en fin d'évolution, les conditions d'acidité sous riz irrigué seront favorables, c'est-à-dire qu'il existe une neutralisation nette due aux bases qui sont apportées par l'eau d'irrigation. De plus, l'acidité est diluée par les quantités énormes d'eau qui sont appliquées pour la riziculture dans le delta afin de contrôler la salinité.

## Mots clés

Pédogénèse, Sols acides sulfatés, Influence anthropique

## SUMMARY

### ÉVOLUTION OF SOIL ACIDITY IN THE SENEGAL RIVER DELTA RELATED TO ANTHROPOGENIC INFLUENCES

This contribution reports on a survey which has been conducted in the Senegal river delta, in the framework of the Water Management Project between the KU Leuven and The SAED, Saint Louis, Senegal. A diagnosticsurvey was conducted to assess the evolution of sub-soil acidity in the delta under human influence. Soil evolution is characterized by contrasting three totally different cases, namely (i) a natural soil sequence, (ii) an archeological site and (iii) an irrigated perimeter under wet rice since 1980. The soils at each site is characterized by a representative transect. The study revealed that a considerable quantity of sub-soil potential acidity still exists in the backswamps of the delta system. In other locations, potential acidity either occurs at great depth or has never been accumulated or has been neutralized in the presence of free  $\text{CaCO}_3$  in the soil profile. The study shows that the long term evolution of soil acidity under irrigated rice is favourable. This means that a clear neutralization takes place due to the large quantities of bases supplied with the

irrigation water. Furthermore, the acidity is diluted by the enormous quantities of water which are applied during rice cultivation in the delta to control soil salinity.

Key-words

Soil genesis, Acid sulphate soils, Anthropoc influence

RESUMEN

EVOLUCIÓN DEL ACIDEZ EN LOS SUELOS DEL DELTA DEL RÍO SENEGAL BAJO INFLUENCIA ANTROPOGENA

El presente trabajo, realizado bajo el convenio de cooperación sobre manejo de recursos hídricos entre la Universidad Católica de Lovaina (Belgica) y el Instituto SAED (Senegal), muestra los resultados de una investigación realizada para la importancia de los problemas de acidificación en los suelos del delta del río Senegal, cultivados en arroz bajo riego. Observaciones de campo, a lo largo de transectas representativas, han mostrado que todavía existe una cantidad considerable de subsuelo que potencialmente podría acidificarse en la zona del delta. En otros sectores, el peligro potencial de acidificación se presenta a una gran profundidad o nunca se acumularía o sería neutralizada por la presencia de carbonato de calcio libre en el perfil del suelo. El estudio muestra una favorable evolución, a largo plazo, de la acidez de los suelos cultivados en arroz bajo riego, es decir, una neutralización ocurre debido a las grandes cantidades de bases suministradas con el agua usada para riego. Además, la acidez es reducida por la gran cantidad de agua aplicada durante el periodo vegetativo del arroz con el objeto de controlar la salinidad del suelo.

Palabras claves

Génesis de suelos, Suelos ácidos sulfáticos, Influencia antropógenos

La genèse du delta s'est effectuée suite à une séquence de transgressions et de régressions de l'Océan Atlantique (Le Brusq, 1980 ; Van Lavieren et Van Wetten, 1988 ; Loyer, 1989) pendant l'Ogolien (30 000 à 10 000 av. J.C.), le Nouakchottien (10 000 à 5 000 av. J.C.) et le Flandrien (5 000 à 2 000 av. J.C.).

- Le delta proprement dit (figure 1) a commencé à se former pendant la transgression dunkerquienne (2000 av. J.C. à nos jours). Pendant cette période, le niveau de l'océan est monté de 1.5 à 2 m. Le delta est alors constitué d'un complexe de marigots et lagunes, qui sont séparés de la mer par la zone littorale. Le long du cours d'eau principal et des marigots, se sont formées des levées (localement appelé Fondé) près des rives. Ce sont des digues naturelles qui se forment par le dépôt de

matériaux grossiers transportés par l'eau à grande vitesse. Par contre, perpendiculairement à la rivière, se trouvent les cuvettes de décantation (localement, Hollaldé, photo 1). Elles sont formées de matériaux argilo-limoneux (60 à 70 % d'argile kaolinique) décantés par suite du peu de turbulences de l'eau dans ces zones. Les cuvettes couvrent à peu près le tiers de la superficie du delta soit environ 60,000 hectares. Pendant la crue du fleuve, les levées peuvent s'effondrer, entraînant la formation de deltas secondaires de rupture dont la texture est comparable à celle des levées. Pendant cette période, le delta était couvert d'une forêt dense de mangroves.

En résumé, le delta est constitué de bourrelets sableux et de lagunes argilo-limoneuses recouvrant des dépôts Nouakchottien. La profondeur de cette couche supérieure varie

Figure 1 - Géomorphologie du delta (d'après Gaucher, 1966)

Figure 1 - Geomorphology of the delta (after Gaucher, 1966)

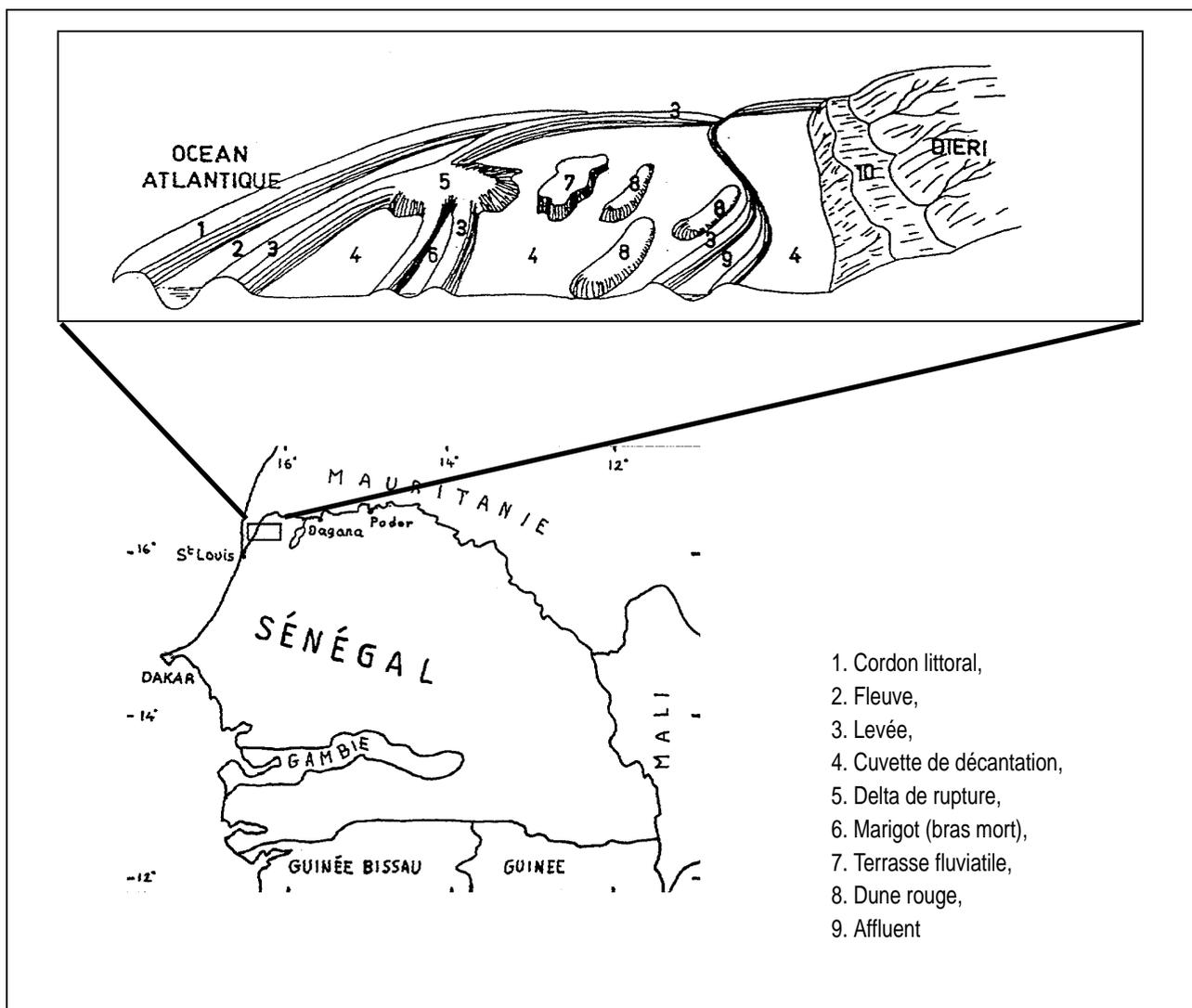


Tableau 1 - Relation entre la géomorphologie du delta du fleuve Sénégal et la répartition des sols.

Table 1 - Soils and geomorphology of the Senegal river delta.

Unité géomorphologique	Appellation vernaculaire	Texture	Unité pédologique (FAO, 1989)
Dunes et cordons littoraux	Diéri	Sableuse	ARÉNOSOLS cambiques
Terrasses marines et fluviales	-	Sablo-argileuse	CAMBISOLS eutriques
Levées et deltas de rupture	Fondé	Sableuse	FLUVISOLS eutriques
Cuvettes	Hollaldé	Argileuse	FLUVISOLS saliques

Source : Dewachter, 1993.

normalement de 3 à 4 mètres (OMVS/USAID, 1990). Au niveau des levées, elle est plus profonde que dans les cuvettes.

- Au Moyen Age, une nouvelle régression de l'Océan Atlantique provoque un nouveau changement du système hydrographique du fleuve. La Langue de Barbarie (zone littorale) s'accroît, dirigeant le fleuve vers le sud et formant un estuaire.

- Depuis lors, l'homme a progressivement modifié le cours du fleuve. En 1964, la Mission d'Aménagement du Sénégal (MAS) a entamé la construction d'une digue du côté sénégalais. Celle-ci limite les inondations lors de la crue du fleuve et de ses affluents. De plus, par la construction, en 1986, du barrage anti-sel de Diama située à 36 km de l'embouchure les intrusions marines sont maîtrisées.

## Conséquences pédologiques

La morphogenèse du delta décrite ci-dessus a des conséquences importantes sur l'évolution et la distribution des sols. En effet, la géographie des sols et la pédogenèse actuelle sont déterminées par la physiographie du delta et par le régime hydrique qui y règne (tableau 1).

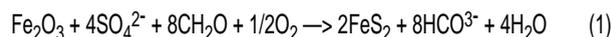
Il est évident que les grands changements du système hydrologique, engendrés par la construction des digues et du barrage anti-sel, ont influencé l'évolution des caractéristiques pédologiques.

La répartition des sols est essentiellement liée à la géomorphologie, comme le montre le tableau 1, qui fait la corrélation entre les différentes unités géomorphologiques et la distribution des sols dans le delta.

Dans le delta du fleuve Sénégal on se trouve dans le grand domaine des sols à horizon sulfurique ou acide sulfaté. La pyrite dans le sous-sol du delta s'est formée pendant la période de la transgression Dunkerquienne, période durant laquelle le delta était couvert d'une forêt dense de mangroves. Toutes les conditions étaient favorables à la fixation bactérienne de sulfure dans le sous-sol (Dent, 1986, Driessen and Dudal, 1991), notamment : (1) la présence de fer réductible sous forme d'oxyde ou d'hydroxyde dans les sédiments littoraux, (2) la présence de sulfate dans l'eau de mer, (3) des conditions anaérobies favorisant la réduction du sulfate et des oxydes de

fer, (4) l'abondance d'une activité bactérienne dans les sédiments, (5) une source d'énergie sous forme de matière organique (racines et feuilles de mangroves), (6) une activité tidale, lessivant l'alcalinité qui est formée par le processus de formation de la pyrite, et (7) une sédimentation lente. Dans de telles conditions, les microbes réduisent le fer ferrique ( $Fe^{3+}$ ) en fer ferreux ( $Fe^{2+}$ ) et le sulfate ( $SO_4^{2-}$ ) en sulfure ( $S^{2-}$ ). La matière organique est décomposée par ce processus, en formant des bicarbonates. Une composante potentiellement acide (la pyrite) et une composante alcaline (bicarbonates) sont simultanément formées dans un système neutre. Après le lessivage des bicarbonates des sédiments, il ne reste plus qu'un horizon caractérisé par une acidité potentielle.

En résumé, la pyrite est donc formée par un processus bactérien au cours duquel les sulfates, amenés par l'eau de mer, sont transformés en soufre. Les bactéries anaérobies responsables de cette réaction sont appelées *Desulfovibrio* et *Desulfatomaceum*. La réaction s'écrit comme suit :



Les conditions dans le delta étaient favorables à la formation de pyrite dans le sous-sol, et la vitesse d'accumulation était de plus ou moins un gramme de soufre par 100 g de sol par 100 années (Dent, 1986). Aussi, une végétation de mangroves pendant 75 années suffit-elle pour qu'une accumulation critique de 0.75 % de soufre dans le sous-sol soit atteinte. Cette valeur est la limite des FLUVISOLS thioniques dans la légende FAO (FAO, 1989).

En raison de la présence de mangroves dans le delta depuis 2000 av. JC, on peut s'attendre à des taux assez élevés de pyrite. Ceci est surtout le cas des cuvettes de décantation du delta puisque les mangroves y ont poussé pendant des centaines d'années.

En outre, le fait que le delta soit formé en milieu originellement marin plus ou moins confiné, a entraîné une incorporation de sels dans tous les paysages. On retrouve aujourd'hui des traces de sels jusqu'à 350 km de l'embouchure soit dans les sols, soit dans les nappes présentes partout à faible profondeur. Une pédogenèse hydrique et saline caractérise donc essentiellement l'évolution de ces matériaux (Loyer, 1989).

Actuellement, le facteur essentiel dans la pédogénèse du delta est la fréquence et la durée de l'inondation par les eaux douces du fleuve.

La construction des digues et du barrage anti-sel a augmenté les fluctuations de la nappe phréatique. Si celle-ci monte, à cause d'une irrigation, les sels des couches supérieures s'accumulent en surface suite aux remontées par capillarité. Dans les périmètres irrigués, ces sels peuvent être évacués par percolation verticale ou par lessivage latéral (salinisation - désalinisation). Si, par contre, la nappe phréatique descend trop bas dans le profil, suite à un drainage artificiel, les couches contenant de la pyrite peuvent être oxydées, provoquant une acidification des sols en profondeur.

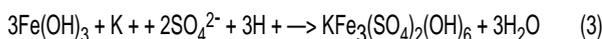
Dans certains points du delta, comme par exemple à Pont Gendarme, des quantités non négligeables d'acidité ont été trouvées. Le développement de l'acidité actuelle s'est accéléré après la construction, en 1964, de la digue de protection. En effet celle-ci a coupé le régime d'inondations annuelles qui conservait la pyrite intacte dans les sols. Le niveau de la nappe a donc baissé dans la zone d'accumulation de la pyrite et a provoqué une oxydation de la pyrite et une acidification sulfurique suivant la réaction globale (Driessen and Dudal, 1991) :



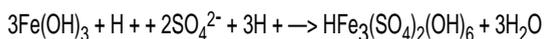
L'oxygène pénètre donc dans les sédiments et la pyrite est oxydée par action microbienne en formant de l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) et un hydroxyde de fer ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ). Les produits intermédiaires de ce processus sont le sulfate de fer soluble ( $\text{FeSO}_4$ ) et la jarosite ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) qui est métastable. La jarosite est formée à un pH inférieur à 4 en présence de K ou Na (natrojarosite) dans le sédiment. La couleur de la jarosite est jaune paille et typique des sols sulfatés acides.

Il est évident que l'acidité formée par la réaction décrite ci-dessus, réagit avec les minéraux du sol dans certaines zones du delta. La pédogénèse suit donc une évolution différente dans un milieu non carbonaté par rapport à un milieu carbonaté.

En l'absence de carbonates, l'hydrogène qui est produit par l'oxydation des pyrites n'est pas neutralisé. Il en résulte une forte baisse du pH qui descend en dessous de 3.7. En conséquence, l'hydroxyde de fer est transformé en jarosite suivant la réaction :



ou



La présence de H-jarosite indique une acidification.

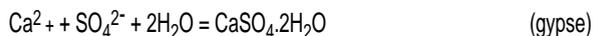
Finalement, après une longue période d'évolution, l'acidité qui s'est formée sera diluée par le lessivage artificiel du sol dans les périmètres irrigués. La jarosite sera hydrolysée en hydroxyde de fer, le pH de l'horizon augmente et la couleur

évolue du jaune au rouge brunâtre.

Là où il y a une abondance de carbonate de calcium sous forme de coquillages, l'acidité est neutralisée par la formation de gypse, souvent retrouvé dans le sous-sol, suivant la réaction



En milieu très calcaire ou sous conditions arides le gypse peut précipiter suivant la réaction



Dans certains endroits du delta, près des sites archéologiques, les coquillages sont trouvés en abondance. Ceux-ci ont été abandonnés par l'homme qui récoltait les huîtres dans les mangroves et jetait les restes (les coquillages). Ces sites archéologiques sont localisés sur les anciennes terrasses marines.

Une neutralisation analogue de l'acidité dans les sols sulfatés acides a été décrite sur les hautes terrasses marines dans le bassin du Sine Saloum au Sénégal (Sadio et van Mensvoort, 1993).

## MATÉRIAUX ET MÉTHODES

L'objectif de ce travail était d'étudier la distribution et l'évolution de l'acidité actuelle et potentielle dans quelques pédo-paysages types du delta.

Les sites d'échantillonnage ont été choisis sur la base de la géomorphologie du delta décrite par la figure 1. Trois toposéquences ont été choisies dans des sites où des sols acides actuels ou potentiels peuvent être observés. Les cas suivants ont été sélectionnés pour une étude approfondie de l'évolution de l'acidité sous différents scénarios pédogénétiques :

(i) FLUVISOL thionique peu évolué, topo-séquence de Khant. Cette toposéquence représente la situation la plus naturelle dans le delta,

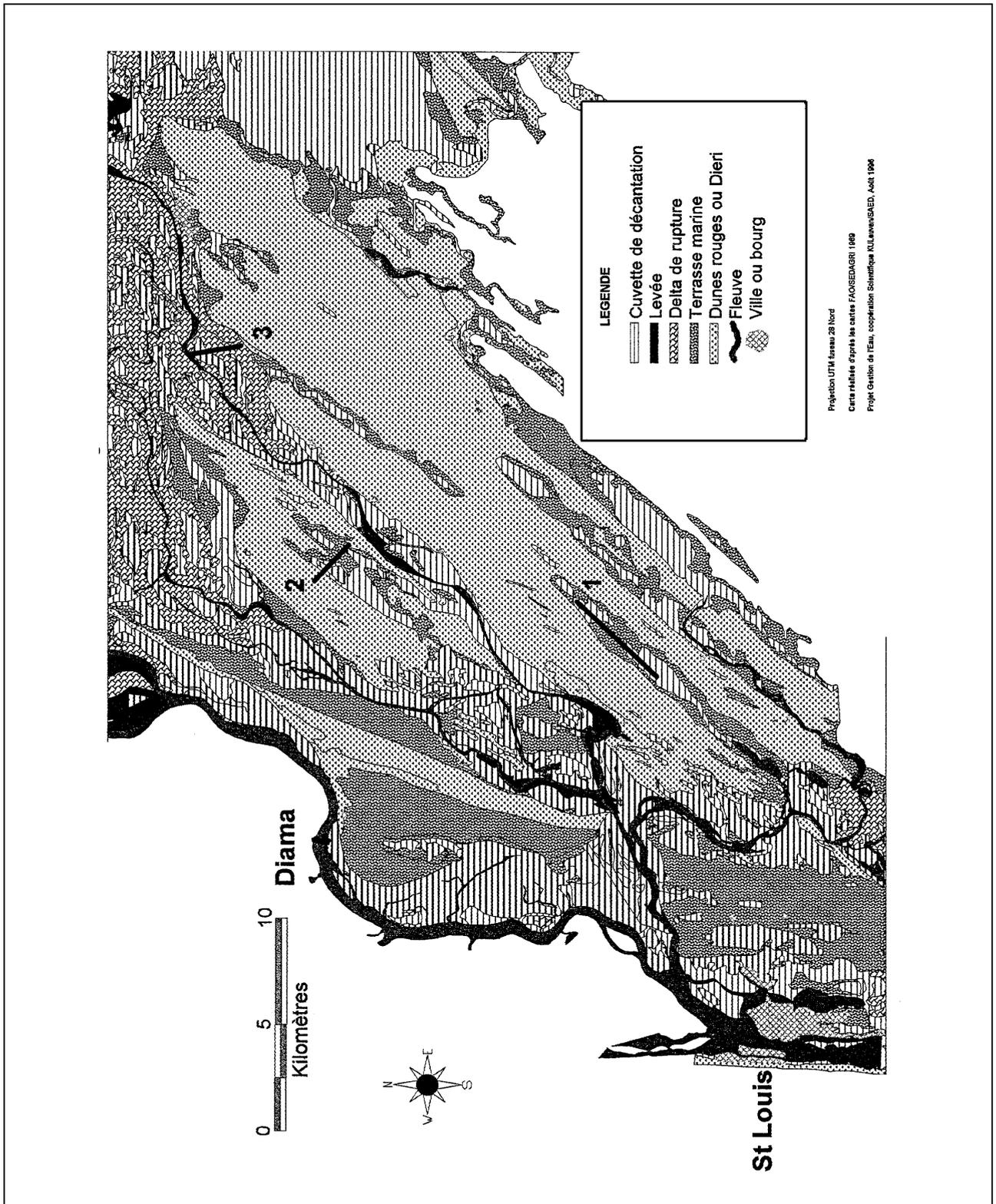
(ii) FLUVISOL thionique sous un site archéologique, toposéquence de Savoigne. Ce site représente une pédogénèse sous l'influence humaine historique dans le delta. Les sols sont plus ou moins fossilisés depuis que ce site a été abandonné.

(iii) FLUVISOL thionique sous irrigation, site de Pont Gendarme. Ce site illustre la pédogénèse actuelle pour les 23,000 ha de culture de riz irrigué dans le delta. Ce site a été choisi pour étudier l'influence de la double culture riz riz sur l'évolution de l'acidité dans les cuvettes de décantation.

En bref, ces trois sites représentent des situations types destinées à étudier l'évolution des sols dans le delta, avec comme premier stade le stade (i) pH neutre mais acidité potentielle élevée, puis le deuxième stade (ii) très acide et enfin le dernier stade (iii) profil quasi neutralisé.

Figure 2 - Geomorphologie du delta et sites d'échantillonnage

Figure 2 - Geomorphology of the delta and sampling sites (Région : 16 00'-16 30'N ; 16 30'-15 50'E)



La localisation des transects étudiés est donnée dans la figure 2.

Avant d'entamer la prospection systématique à la tarière, une prospection préliminaire a été exécutée afin d'établir les différents stades d'évolution des sols du delta (Raes et Deckers, 1993). Il résulte de cette étude que les sols dans les cuvettes de décantation dans le delta peuvent être groupés en quatre catégories (tableau 2).

Afin de faciliter la discussion, ces différents stades d'évolution seront examinés à l'aide de pictogrammes qui indiquent de

façon qualitative, la présence et l'intensité des différents produits de référence dans les sols, notamment les oxydes de fer, le gypse, la jarosite, le carbonate de calcium et la pyrite. Ceux-ci ont leur importance pour l'identification des types de sol. La légende des pictogrammes est donnée dans la figure 3.

La figure 3 décrit quatre stades d'évolution qui serviront de profils types dans la discussion des pédo-paysages du delta. Les caractéristiques se réfèrent à une profondeur inférieure à 120 cm. L'abondance relative d'oxydes de fer, de jarosite et de pyrite est donnée sur une échelle de 0 (= 0 %) à 1 (= 100 %),

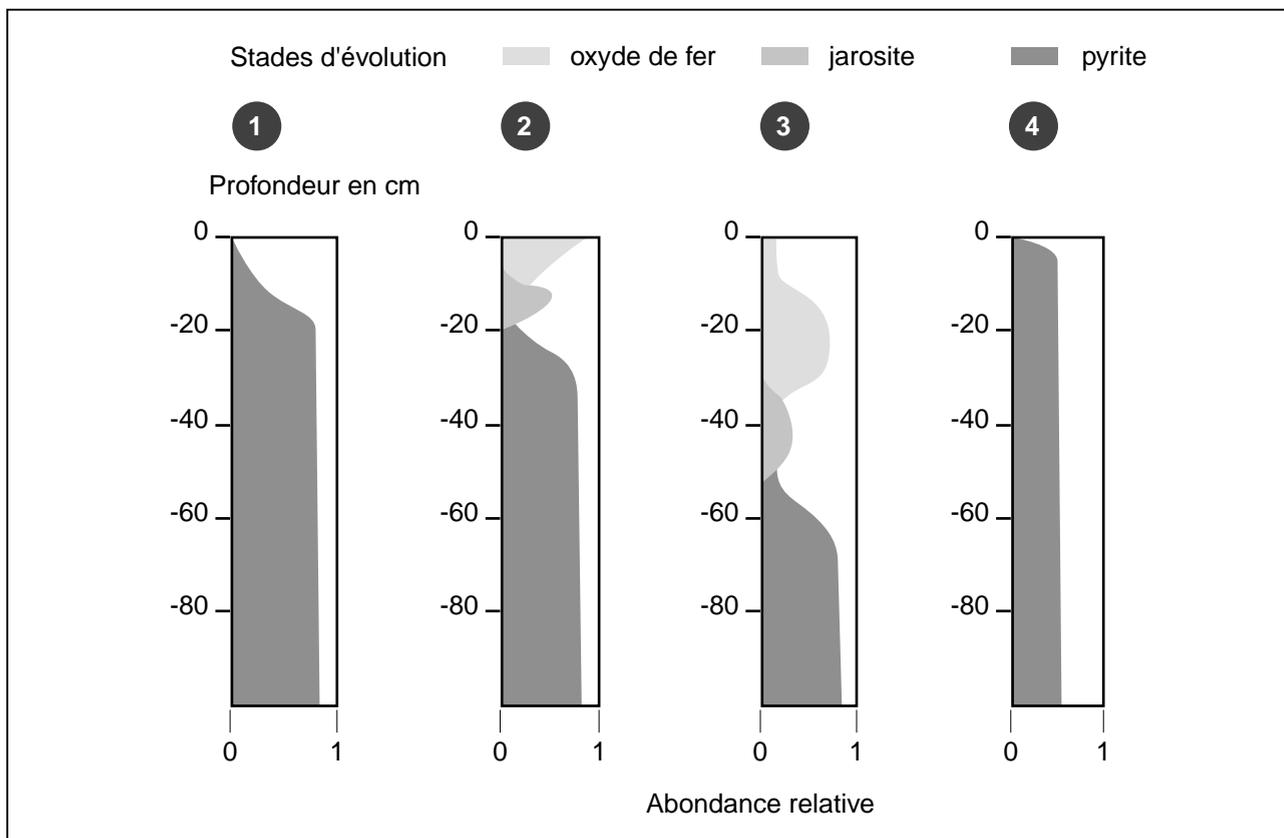
Tableau 2 - Stades d'évolution des sols du delta.

Table 2 - Evolution stages of delta soils.

Stade d'évolution	Type de sol	Acidité potentielle	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	% pyrite S
1	FLUVISOL thionique jeune	élevée	> 5.2	> =0.75
2	FLUVISOL thionique peu évolué	moyenne	< 5.2	0.30 - 0.75
3	FLUVISOL thionique évolué	basse	< 5.2	< = 0.30
4	FLUVISOL thionique neutralisé	basse	> 5.2	< 0.1

Figure 3 - Légende des pictogrammes et stades d'évolution des FLUVISOLS thioniques dans le delta

Figure 3 - Legend to the graphical displays and evolution stages of thionic FLUVISOLS in the delta



c'est à dire le volume de sol coloré par les oxydes de fer (rouge), la jarosite (jaune paille) et la pyrite (noire) et estimé aux parois du profil.

Les caractéristiques indiquant la présence d'une acidité potentielle ou actuelle ont été notées systématiquement pendant la prospection des toposéquences. Ces caractéristiques sont le pH au champ (à l'aide d'un réactif colorimétrique), les couleurs des différents horizons et la profondeur de la nappe phréatique. Puisque cette profondeur varie pendant l'année, les profondeurs extrêmes ont été prises, notamment, pendant la période pluvieuse et la saison sèche. En outre les paramètres indiquant une neutralisation de l'acidité, tels que la présence de cristaux de gypse, ainsi que la présence du carbonate de calcium ont été systématiquement relevés. Les observations et hypothèses de terrain ont été complétées par des données analytiques du laboratoire de pédologie de la SAED à Ross-Béthio au Sénégal et à l'Université Catholique de Leuven en Belgique. Ces analyses ont été faites sur des échantillons représentatifs, pris par horizon.

Détermination de l'acidité potentielle dans le sol

- **Méthode 1.** Oxydation de la pyrite par  $H_2O_2$  (0.1 N) et mesure de la baisse du pH, (Konsten et al., 1986). 20 grammes de sol frais sont mis en suspension dans 50 ml de NaCl 1M. Après une heure, le pH d'équilibre est mesuré dans la suspension.  $H_2O_2$  est rajouté jusqu'à ce qu'une oxydation complète soit obtenue. L'excès de  $H_2O_2$  est évaporé et le rapport eau-sol est rétabli par ajout d'eau ou par évaporation. Ensuite, le pH est déterminé.

- **Méthode 2.** Oxydation de la pyrite par  $H_2O_2$  et détermination de S soluble par chromatographie ionique.

Détermination de l'acidité actuelle dans le sol

- **Méthode 1.** Détermination directe du pH, dans une suspension 1/2.5 de NaCl 1M.

- **Méthode 2.** Détermination des sulfates par chromatographie ionique.

Pour faciliter la discussion, les résultats de la prospection pédologique sont regroupés par topo-séquence (figure 2). Chaque transect échantillonné est décrit par un croquis. Les profils sont représentés sous forme des pictogrammes (légende figure 3), suivi d'un tableau d'analyses. Dans une note explicative, l'évolution de chaque profil, en relation avec les facteurs pédogénétiques, est discutée.

## RÉSULTATS

Les résultats de cette étude concernent (i) les stades d'évolution des sols les plus importants du delta, notamment les FLUVISOLS thioniques jeunes (ii) les sols sous influence anthro-

Tableau 3 - Données analytiques dans le sous-sol de la topo-séquence de Khant (KH).

Table 3 - Analytical data in the sub-soil of the topo-sequence at Khant (KH).

Profil n°	KH1	KH2	
Profondeur (cm)	> 40	15 - 80 > 80	
pH actuel	3,3	3,2	3,1
pH potentiel	2,4	2,6	1,9
S-total (%)	0,86	0,76	0,81
S-soluble (%)	0,16	0,20	0,14
CaCO <sub>3</sub> (%)	-	-	-
Stade d'évolution	2	2	

Source : Dewachter, 1993.

pogène historique et (iii) l'évolution des sols acides sous irrigation.

## État des sols non irrigués dans le delta

FLUVISOL thionique jeune : toposéquence de Khant (KH)

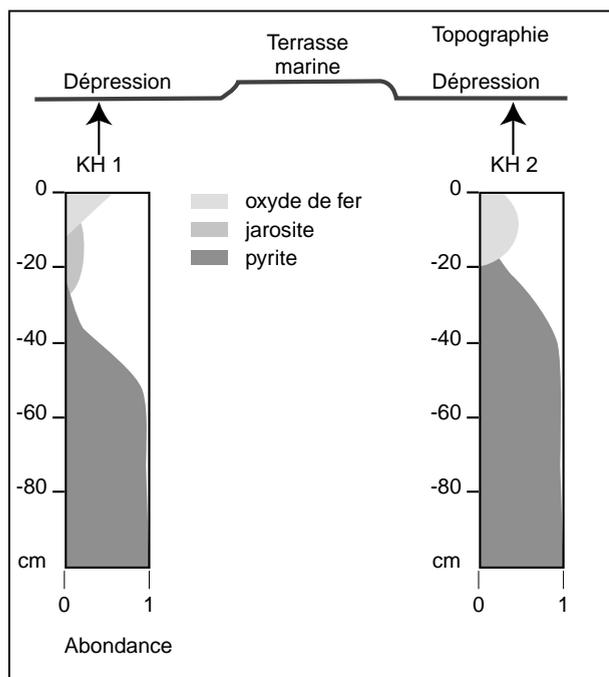
A Khant, le paysage est caractérisé par une dépression située près d'une terrasse marine (photo 1).

Les deux profils (KH1 et KH2) se trouvent dans une dépression tout près d'une terrasse marine. Les conditions ont été favorables à la formation de pyrite dans la dépression pendant plusieurs siècles (figure 4 et tableau 3). Les couches de jarosite et de pyrite ne se mélangent pratiquement pas, ce qui indique une nappe phréatique assez stable et peu profonde à Khant. La jarosite apparaît déjà à quelques centimètres de profondeur. La couche de pyrite se situe à faible profondeur (40 cm). Les pH se situent entre 3.1 et 3.3 et le taux de S total varie entre 0.76 et 0.86 %. Le fait que le pH chute en dessous de 2.5 après traitement de  $H_2O_2$ , indique une acidité potentielle considérable. Les deux profils (KH1 et KH2) de Khant sont donc indéniablement des FLUVISOLS thioniques peu évolués (jeunes) (photos 2 et 3). L'absence des coquillages indique une quasi absence d'influence humaine.

Évolution d'un FLUVISOL thionique jeune vers un FLUVISOL thionique évolué liée à une action humaine historique ; topo-séquence de Savoigne (SA)

A Savoigne, des racines de mangroves fossiles indiquent une accumulation historique d'acidité potentielle. Étant proche d'une terrasse marine (figure 5), des strates sableuses se sont déposées sous un régime de régression. Puis l'influence de

Figure 4 - Toposéquence de Khant  
Figure 4 - Toposequence of Khant



l'homme s'est manifestée dans la préhistoire, comme en témoignent les grands dépôts de coquillages et les artefacts archéologiques trouvés dans la terrasse marine auprès du site. Ce site est irrigué depuis une dizaine d'années.

- La zone de transition entre le Diéri et la dépression (SA1) est clairement constituée d'un dépôt de sable rouge d'origine éolienne qui a couvert une partie d'une cuvette de décantation (Van Lavieren et Van Wetten, 1988). L'acidité potentielle élevée à grande profondeur n'a aucune conséquence pour l'agriculture (tableau 4).

- Dans la dépression (SA2) se trouve un FLUVISOL thionique évolué (photo 4) qui contient beaucoup de jarosite et de pyrite. Le taux de S total entre 60 et 80 cm est de 0.55 % et le pH après traitement par H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> chute de 3.6 à 3.0... La situation près de la terrasse marine varie fortement d'une localisation à l'autre. Les profils SA3 et SA20 ne contiennent ni acidité actuelle, ni acidité potentielle. La réserve en coquillages est forte. Dans les autres profils (SA4 et SA16), la plus grande partie de l'acidité est déjà neutralisée (cristaux de gypse) et la réserve en coquillages est encore grande.

### Evolution de l'acidité sous irrigation

### Topo-séquence de Pont Gendarme

Figure 5 - Toposéquence de Savoigne

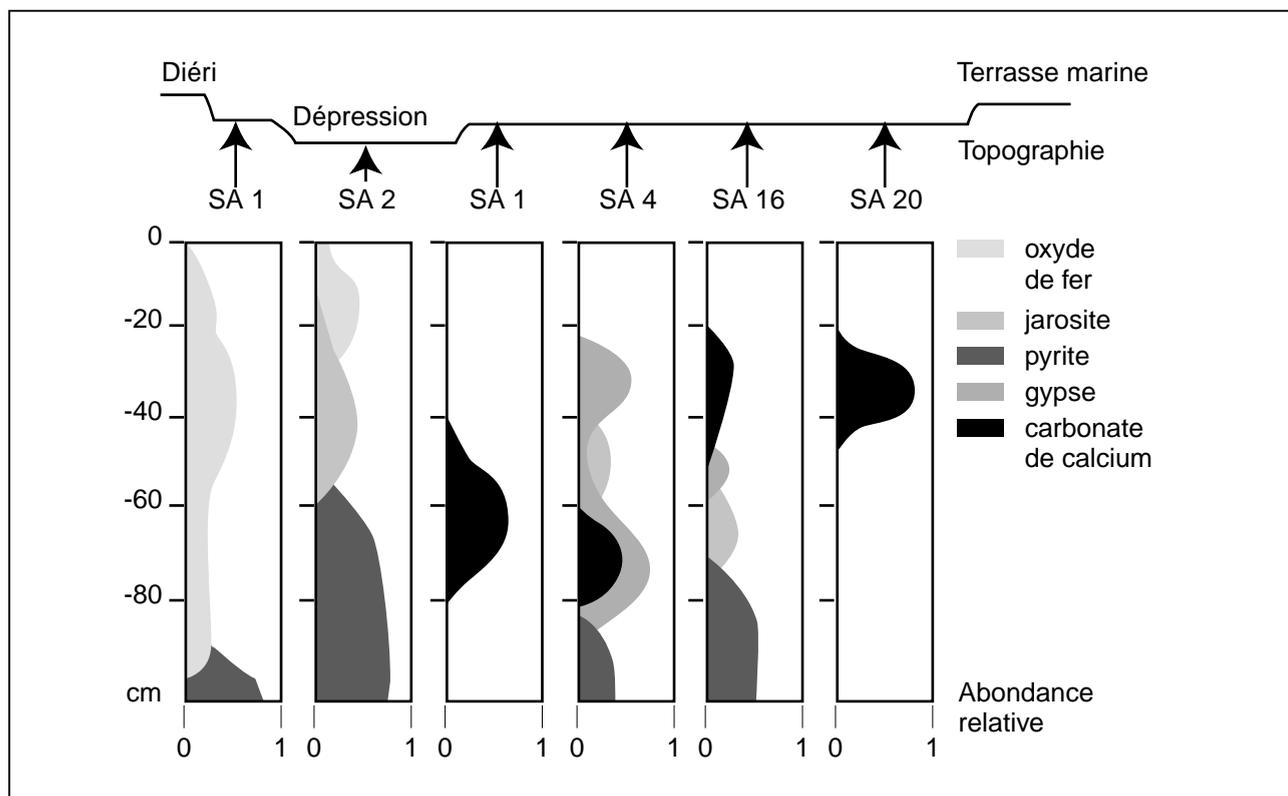


Tableau 4 - Données analytiques dans le sous-sol de la topo-séquence de Savoigne (SA).

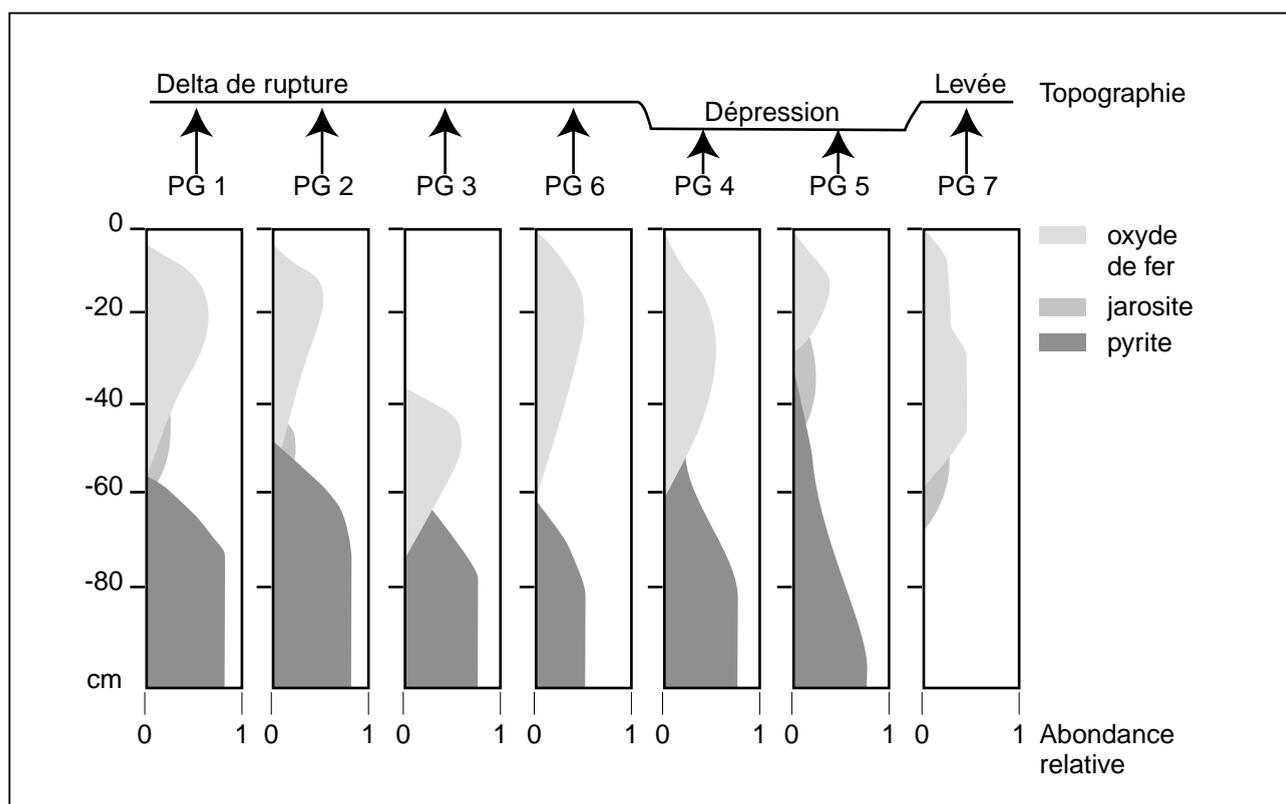
Table 4 - Analytical data of the sub-soil of the topo-sequence of Savoigne (SA).

Profil n°	SA1	SA2	SA3	SA4	SA16	SA20		
Profondeur (cm)	100-160	60-100	100-140	50-70	70 +120	> 120	> 120	> 50
pH actuel	4,1	3,6	7,2	4,7	6,4	7,0	4,0	6,1
pH potentiel	3,1	3,1	6,1	3,4	6,1	7,0	4,0	6,2
S-total (%)	0,15	0,55	0,13	2,72	0,77	4,72	0,49	0,10
S-soluble (%)	0,05	0,06	0,09	0,48	0,22	0,54	0,03	0,06
CaCO <sub>3</sub> (%)	-	-	6,28	1,73	2,64	5,00	-	-
Stade d'évolution	4	2	-	-	-	-	4	-

Source : Dewachter, 1993.

Figure 6 - Toposéquence de Pont Gendarme (PG)

Figure 6 - Toposequence of Pont Gendarme (PG)



Le périmètre de Pont-Gendarme permet d'étudier une topo-séquence typique du delta. On y trouve une levée, un delta de rupture et une cuvette de décantation (figure 6). Le fait que le site ait été irrigué pendant au moins une décade traduit une influence anthropique assez marquée (tableau 5).

- Les profils PG1, PG2, PG3 et PG6 (photo 5) se situent sur un delta de rupture. Les textures sont un peu plus légères et l'acidité se trouve à grande profondeur. Le fait que depuis 1980 tout le terrain soit irrigué a contribué à la neutralisation de l'acidité, surtout dans le profil de PG6 (pH 5.2).

- Il est un peu surprenant que dans la dépression (PG4 et PG5) le taux de S-total soit très bas (PG5 : 0.07 % à 50/90 cm). La raison est sans doute l'influence bénéfique de l'eau d'irrigation qui a eu un effet neutralisant... La levée (PG7) n'est pas sous culture. Une petite quantité d'acidité résiduelle se maintient encore à grande profondeur.

#### Évolution dans le temps de l'acidité dans le delta sous irrigation

L'évolution de l'acidité actuelle et potentielle a été caractérisée pour la première fois par Loyer et Diallo en 1979. Depuis lors Diallo a suivi la situation sans le cadre des activités du Laboratoire pédologique s'occupant du développement rizicole dans le delta. Afin de suivre l'évolution du sol sous riz irrigué, le périmètre de Pont Gendarme a été suivi. Il va de soi que la méthode d'échantillonnage et d'analyse en laboratoire n'a pas changé pendant ce suivi. La dernière campagne d'échantillonnage a été effectuée en 1990.

##### Acidité actuelle

La figure 7 montre l'évolution de l'acidité actuelle du profil dans une cuvette (Pont-Gendarme) irriguée depuis 1980.

Le pH dans la couche supérieure est monté de 5.2 en 1980 aux environs de 6. Depuis 1985 le pH s'est plus ou moins stabilisé à ce niveau. Dans le sous-sol, le pH est monté de 4.3 en 1980 à 5.2 en 1991. Cette évolution est due à un apport ininter-

rompu d'eau d'irrigation qui a provoqué un lessivage continu de l'acidité du profil.

##### Acidité potentielle

Le taux de soufre dans le sous-sol peut servir de mesure de l'acidité potentielle. La topo-séquence étudiée à Pont-Gendarme a aussi été analysée par Loyer et Diallo en 1979. La comparaison des deux études est donnée dans la figure 8.

La teneur en soufre a considérablement baissé sous l'influence de l'irrigation. La diminution de la teneur en soufre total est maximale dans les terres vierges en 1979 (PG1 et PG2) mais qui sont maintenant en exploitation.

## DISCUSSION ET CONCLUSIONS

L'étude a établi que bien que le delta du Sénégal soit stabilisé dans sa morphogénèse depuis longtemps, il existe toujours des quantités considérables de pyrite dans le sous-sol des cuvettes de décantation ; et l'acidité potentielle est liée à ce taux élevé de pyrite situé à faible profondeur dans le sous-sol d'un grand nombre de sols du delta. Cette couche d'acidité potentielle est localisée dans la zone peu aérée en dessous de la nappe phréatique. Une baisse artificielle de la nappe par un drainage souterrain devrait donc être évitée pour empêcher l'oxydation de la pyrite et la formation d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ). Dès que de grandes quantités d' $H_2SO_4$  sont formées, le pH baisse à un niveau tel (pH 2.5) que des quantités énormes de chaux seraient nécessaires pour remettre le sol en culture.

Il existe des sites archéologiques dans le delta (cas de Savoigne) où une grande partie de l'acidité a été neutralisée par la présence des déchets de coquillages. Ces sites sont localisés auprès des anciennes terrasses marines.

L'acidité actuelle se manifeste là où la nappe phréatique a baissé suite aux barrages qui ont été construits, empêchant les remontées marines.

Tableau 5 - Données analytiques dans le sous-sol de la topo-séquence de Pont-Gendarme (PG).

Table 5 - Analytical data of the sub-soil of the topo-sequence of Pont-Gendarme (PG).

Profil n°	PG1	PG2	PG3	PG6	PG4	PG5	PG7
Profondeur (cm)	> 100	> 100	> 130	70 - 90	70 - 100	50 - 90	90 - 110
pH actuel	3,58	3,72	3,50	5,21	3,58	3,42	4,38
pH potentiel	1,8	1,9	2,3	4,0	2,5	2,8	3,22
S-total (%)	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,15
S-soluble (%)	-	-	-	-	-	-	-
CaCO <sub>3</sub> (%)	-	-	-	-	-	-	-
Stade d'évolution	3	3	3	4	3	3	3

Source : Dewachter, 1993.

Figure 7 - Évolution du pH L e dans le sol à Pont Gendarme

Figure 7 - Evolution of the soil pH at Pont Gendarme

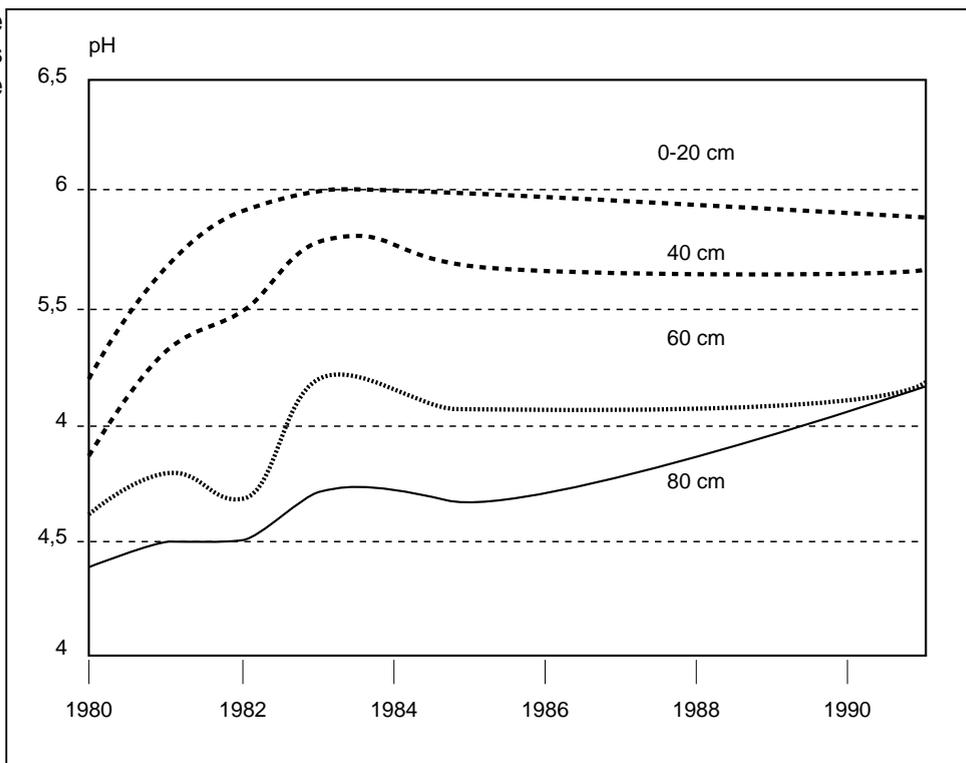
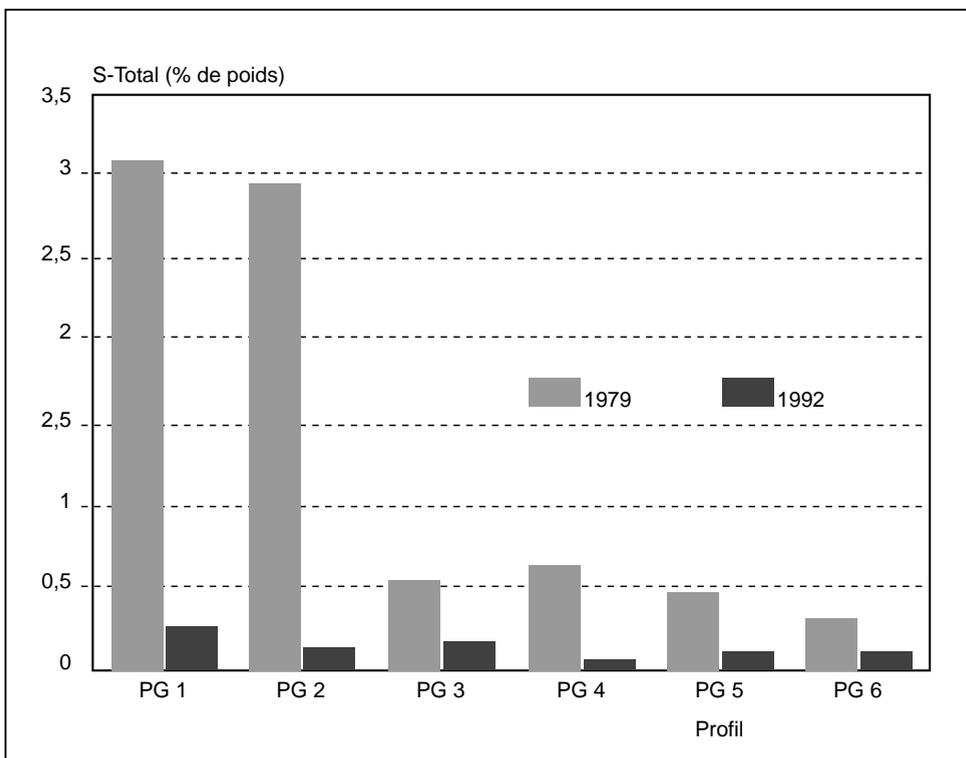


Figure 8 - Évolution de S total dans la toposéquence de Pont Gendarme

Figure 8 - Evolution of total S in the toposéquence of Pont Gendarme.



Pont Gendarme a montré l'influence bénéfique d'une application de grandes quantités (18 000 m<sup>3</sup>/ha) d'eau d'irrigation sur la neutralisation ou le lessivage de l'acidité dans le sous-sol. Cette évolution favorable est confirmée par les courbes qui illustrent l'évolution du pH et du soufre total dans le sous-sol à Pont Gendarme entre 1979 et 1992.

Cette étude montre donc que la riziculture irriguée est une mise en valeur appropriée pour remédier à l'acidité dans le sol.

Des critères pratiques ont été utilisés pour subdiviser les FLUVISOLS thioniques du delta sur la base du pH et du taux total de S abaissé par les sulfates solubles. Ainsi la distinction devient possible entre les quatre stades d'évolution, notamment (1) FLUVISOL thionique jeune, (2) FLUVISOL thionique peu évolué, (3) FLUVISOL thionique évolué et (4) FLUVISOL thionique neutralisé. Avec un peu d'expérience cette distinction peut se faire par une observation morphologique des profils sur le terrain. Le stade d'évolution numéro 3 coïncide avec les Sols Acides Sulfatés décrites pour les zones tropicales sèches par Diemont et al. (1993). Il va de soi que cette classification vise surtout la distinction des unités pédologiques du point de vue de l'aménagement.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Professeur Jean Lozet, (Institut Supérieur Industriel de Huy) pour son assistance à la rédaction en langue française de ce manuscrit.

## BIBLIOGRAPHIE

- Diemont W.H., L.J. Pons and D.L. Dent, 1993 - Standard profiles of Acid Sulphate Soils. Selected papers of the Ho Chi Minh City Symposium on Acid Sulphate Soils, ILRI publication 53, p. 51-60
- Dent D., 1986 - Acid Sulphate Soils : a baseline for research and development. ILRI, Wageningen, The Netherlands. 204 p.
- Dewachter I., 1993 - Zure sulfaatbodems in de Senegal delta. Eindverhandeling. KULeuven, Fac.Landbouwwetenschappen, Leuven, Belgie. 144 p.
- Driessen P.M. and R. Dudal, 1991 - The major soils of the world. Agricultural University Wageningen (The Netherlands) - Katholieke Universiteit Leuven (Belgium). 310 p.
- FAO, 1969 - Étude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal. Carte pédologique et géomorphologique de la vallée et du delta du Sénégal au 1/50,000. FAO, Rome, Italie.
- FAO 1989 - FAO-Unesco Carte mondiale des sols, Légende révisée. Rapport sur les ressources en sols du monde n° 60 FAO, Rome, Italie, 125 p.
- Gaucher G., 1966 - Étude pédologique de la vallée du Lampsar et de la basse vallée du Djeuss. Société Centrale pour l'Équipement du Territoire-Coopération (SCET-COOP), République Française. 87 p.
- Konsten C.J.M., W. Andriess and R. Brinkman, 1986 - A field laboratory method to determine total potential and actual acidity in Acid Sulphate Soils. In Dost H. : Selected papers of the Dakar symposium on Acid Sulphate Soils. ILRI, Wageningen, The Netherlands : pp 106 - 134.
- Le Brusq J.Y., 1980 - Étude pédologique des cuvettes de la vallée du Lampsar. ORSTOM, Dakar, Sénégal. 114 p.
- Loyer J.Y., 1989 - Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Éditions de l'ORSTOM. Collection Études et Thèses. Paris, France. 137 p.
- Loyer J.Y., et A.M. Diallo, 1979 - Note sur les nappes de la cuvette de NDelle-NDiaye. ORSTOM, Dakar, Sénégal. 18 p.
- Loyer J.Y., et A.M. Diallo, 1979 - La cuvette de Pont-Gendarme. Données sur les sols et les nappes. ORSTOM, Dakar, Sénégal. 44 p.
- OMVS/USAID, 1990 - Rapport de synthèse hydrogéologique du delta du fleuve Senegal (Projet 625-0958). Rapport Final, Volume II. International Science and Technology Institute, Washington, USA. 76 p.
- Raes D., J. Deckers., 1993, Les sols du Delta du fleuve Sénégal, propriétés physiques et chimiques, Bulletin Technique N° 8, Projet Gestion de l'eau, Coopération Scientifique KULeuven - SAED, 83 p.
- Sadio S. and M.E.F. van Mensvoort, 1993 - Saline Acid Sulphate Soils in Senegal. Selected papers of the Ho Chi Minh City Symposium on Acid Sulphate Soils, ILRI publication 53, p. 89-93
- Van Lavieren B., et J. Van Wetten, 1988 - Profil de l'environnement de la vallée du fleuve Sénégal. Direction Générale de la Coopération au Développement (DGIS), Pays-Bas. 159 p.