09368 09369

Projet Gestion de l'Eau
Coopération Scientifique KULeuven - SAED

Les sols du Delta du fleuve Sénégal

propriétés physiques et chimiques

Bulletin Technique n°8
Juillet 1993.
SAED - Centre de NDiaye
BP. 74, Saint-Louis, Sénégal

Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal (OMVS)
Haut Commissariat
Centre Régional de Documentation
Saint-Louis

Organisation pour la Mise en Valeur
du Fleuve Sénégal (OMVS)
Haut Commissariat
Centre Régional de Documentation
Saint-Louis

09369

Projet Gestion de l'Eau
Coopération Scientifique KULeuven - SAED

Les sols du Delta du fleuve Sénégal

propriétés physiques et chimiques

Bulletin Technique n°8.
Juillet 1993.
SAED - Centre de NDiaye
BP. 74, Saint-Louis, Sénégal

Les sols du Delta du fleuve Sénégal
- Propriétés Physiques et Chimiques.
Projet Gestion de l'Eau, Bulletin Technique n°8, 1993.
SAED-Centre de NDiaye, Saint-Louis, Sénégal.

Rédigé par Dirk RAES et Jozef DECKERS (éditeurs)

en collaboration avec
Ilse DEWACHTER (acidité),
Ali Mohamed DIALLO (promoteur thèse fin d'études),
Jan FEYEN (promoteur thèse fin d'études),
Kristel LAURYSSEN (salinité),
Yves LIBERLOO (caractères physiques),
Roel MERCKX (promoteur thèse fin d'études),
Suzy SERNEELS (salinité),
Boubacar SY (rédacteur),
Joost Vanden Berghe (caractères physiques), et
Johannes VERMEIRE (salinité).

Dédicace

Ce présent bulletin technique est dédicacé à feu Abdourahman Diarra, analyste au laboratoire de pédologie de Ross-Béthio, pour l'aide inestimable apportée au projet pendant trois années.

Remerciements

Le projet Gestion de l'Eau remercie vivement les membres des trois laboratoires où toutes les analyses ont été effectuées pendant les trois années d'étude :

- MM. Abdourahman Diarra et Daniel Boucal du laboratoire de pédologie de la SAED à Ross-Béthio (A.M. DIALLO),
- Le personnel du laboratoire de la fertilité de sol et de la biologie du sol de la KULeuven (Prof.R.MERCKX),
- Mr. François SERNEELS de l'Institut de la Gestion des Terres et de l'Eau de la KULeuven (Prof.J. FEYEN).

Le projet apprécie à sa juste valeur toute l'aide qu'ils n'ont cessé de nous apporter pour la réalisation de cette étude.

Nos remerciements vont aussi aux cadres de l'ADRAO (Programme Riz Irrigué Sahel) en particulier au Dr. Michael DINGKUHN, pour leur appui et suggestions pertinentes.

Table des matières

	page
Remerciements	i
But de l'étude	v
Facteurs de conversion	v
1. Le développement du Delta	1
1.1 Développement	1
1.2 Conséquences pédologiques	3
1.3 Milieu aquifère	6
2. Propriétés physiques	8
2.1 Propriétés	8
Texture	8
Courbe de rétention de l'eau	9
Densité apparente	9
Conductivité hydraulique	9
2.2 Echantillonnage et analyse	10
Sites d'échantillonnage	10
Prélèvement des échantillons	11
2.3 Résultats	13
Gorom (10 cm)	13
Gorom (70 cm)	14
Debi (10 cm)	15
NDiaye (10 et 30 cm)	16
Makhana (10 cm)	17
Ross-Béthio (10 et 30 cm)	18
Tamach (60 cm)	19
Savoigne (10 et 30 cm)	20
Pont-Gendarme (20 et 50 cm)	21
MBane (15 et 30 cm)	22
2.4 Conséquences pratiques	23
Résalinisation des sols argileux	23
Irrigation de sols sableux	27
3. L'acidité	31
3.1 Développement	31
Acidité potentielle	31
Acidité actuelle	32
Thionic Fluvisols	33
3.2 Echantillonnage et analyse	36
Sites d'échantillonnage	36
Observations en place	38
Analyses au laboratoire	38
3.3 Résultats	39
NDioll (NO)	40
Tamach (TAM)	41
Savoigne (SA)	42
NDelle - NDiaye (NDND)	43
Khant (KH)	44
NGuine (NG)	45
NDiaell (ND)	46
Pont-Gendarme (PG)	47

3.4 Evolution..... 48
Acidité actuelle..... 48
Acidité potentielle..... 48
Conclusion..... 49
3.5 Conséquences pratiques..... 50
Acidité actuelle..... 50
Acidité potentielle..... 50
Aptitude des sols..... 50

4. La salinité..... 53
4.1 Problématique..... 53
4.2 Qualité de l'eau..... 53
4.3 Echantillonnage et analyse..... 55
Sites d'échantillonnage..... 55
Analyses effectuées..... 57
4.4 Résultats et Discussions..... 57
Evolution de la salinité dans le sol..... 57
Evolution des équilibres ioniques dans le sol..... 59
Qualité de l'eau d'irrigation..... 62
Salinité de la lame d'eau..... 63
Salinité dans les drains..... 67
4.5 Conséquences pratiques..... 68
Bilan de sel..... 68
Recyclage des eaux d'exhaure..... 72

5. Conclusions Générales..... 73
Références..... 75

ANNEXES
A. Relations h-θ, K-θ..... 78
Horizon supérieur - Fondé (levée)..... 79
Horizon supérieur - Hollaldé (cuvette)..... 80
Horizon supérieur - Dépôt lagunaire (cuvette)... 81
Horizon supérieur - Sol sableux..... 82
Sous-sol - Limon sablo-argileux..... 83
Sous-sol - Sable Nouakchottien..... 84

But de l'étude

Pendant les hivernages de 1990, 1991 et 1992, le projet Gestion de l'Eau a procédé à des études sur des sols du delta du fleuve Sénégal avec l'aide d'étudiants-stagiaires de la Faculté Agronomique de la KULeuven de Belgique. Ces études ont porté sur les problèmes liés à la salinité (Serneels et Van Passel, 1991; Vermeire, 1992; Lauryssen, 1993) et à l'acidité (Dewachter, 1993). Certains aspects liés à la physique du sol ont été aussi développés (Liberloo, 1992; Vanden Berghe, 1993).

Ce présent Bulletin Technique synthétise les résultats de ces recherches dans trois chapitres :
- Propriétés physiques,
- L'acidité, et
- La salinité.

A la fin de chaque chapitre, les conséquences pratiques pour l'irrigation sont formulées.

Ce travail ne prétend pas être une étude globale et exhaustive pour tous les types de sol rencontrés dans la zone du Delta. Cette recherche, bien que limitée dans le temps et l'espace, a tenté par son choix judicieux d'études de cas de montrer des tendances générales sur les sols irrigués du Delta.

Facteurs de conversion

L'unité de Système International (SI) pour la conductivité électrique est Siemens (symbolisé par S) par mètre. L'unité équivalente dans l'ancien système est mho et 1 mho = 1 Siemens. Alors :

1 mmho/cm = 1 dS/m
1 dS/m = 1000 µS/cm
1 mmho/cm = 1000 µmho/cm
1 µmho/cm = 1 µS/cm

Pour passer de dS/m en mg/l on a utilisé la conversion suivante (Abrol et al., 1988) :

1dS/m = 640 mg/l

Chapitre 1
Le développement du Delta

1.1 Développement

La genèse du delta s'est effectuée par une séquence de transgressions et de régressions de l'océan Atlantique (Le Brusq, 1980; Van Lavieren et Van Wetten, 1988; Loyer, 1989).

Pendant la première régression, l'Ogolien (30,000 à 10,000 av. J.C.), se sont formées, sous un climat aride, les dunes rouges longitudinales suivant la direction NNE - SSO. La couleur rouge est causée par la haute teneur en oxides de fer. L'accès à la mer se ferme progressivement et met la vallée à un régime endoréique (Loyer, 1989).

Le Nouakchottien (10,000 à 5,000 av. J.C.) est une période humide. Le fleuve traverse les dunes jusqu'à la mer, permettant à la mer de noyer la vallée fluviale jusqu'à 300 km de l'embouchure actuelle. Pendant cette époque, des terrasses marines se sont développées en bordure du delta et entre les cordons littoraux. De cette époque datent aussi les mouvements tectoniques qui ont causé un rehaussement du delta au nord et une baisse de la partie sud. Par conséquent, le fleuve a dévié de son cours vers le sud-ouest, formant l'embouchure actuelle (Van Lavieren et Van Wetten, 1988). Les dépôts Nouakchottien, une séquence des couches surtout sableuses, saturés de sels solubles, ont couvert le delta entier. L'épaisseur varie entre 0 et 12 m.

Pendant le Flandrien (5,000 à 2,000 av. J.C.) l'océan s'est retiré (régression). Par l'action éolienne du sable des plages, les dunes jaunâtres-grises se sont formées à l'intérieur du Delta. Entre les cordons littoraux se trouvaient des lagunes où des couches de texture fine (argile) ou organique (taupe) ont été déposées. Ces dépôts lagunaires se situent surtout dans la zone occidentale, au nord de Saint Louis.

Le delta proprement dit (Figure 1) a commencé à se former pendant la transgression Duinkerke (2,000 av.J.C. à nos jours). Pendant cette époque le niveau de l'océan était monté de 1.5 à 2 m. Le delta est constitué d'un complexe de marigots et lagunes, qui sont séparés de la mer par la zone littorale. Le long de la rivière principale et les marigots se sont formées des levées (Fondé) auprès des rives. Ce sont des digues naturelles qui se forment par la déposition des matériaux grossiers transportés par

l'eau à grande vitesse. Par contre plus loin de la rivière se trouvent les cuvettes de décantation (Hollaldé) où des matières argilo-limoneuses (60 à 70 % argile kaolinitique) sont décantées dans une zone peu turbulente. Les cuvettes couvrent à peu près un tiers du delta.

Pendant la crue du fleuve, les levées peuvent s'écrouler. Par conséquent des deltas de rupture se sont formés dont la texture est comparable à celle des levées.

En bref, le delta consiste en des bourrelets sableux et des lagunes argilo-limoneuses au dessus des dépôts Nouakchottien. La profondeur de cette couche supérieure varie normalement entre 3 à 4 mètres (OMVS/USAID, 1990). Au niveau des levées elle est plus profonde que dans les cuvettes.

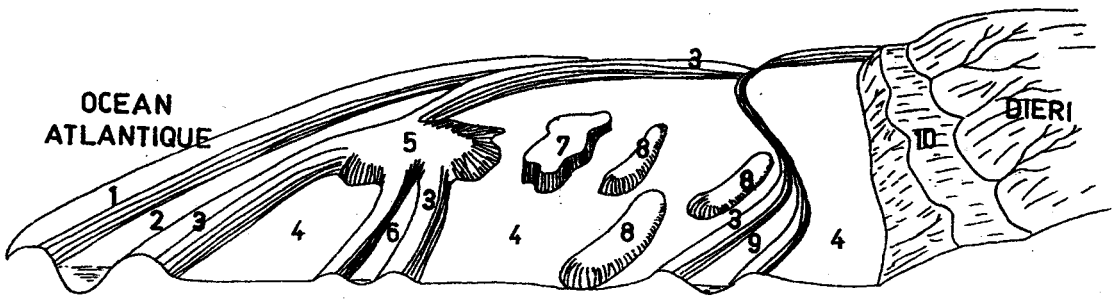


Figure 1.
Schéma des pédo-paysages du Delta (après Gaucher, 1966).
1. Cordon littoral, 2. Fleuve, 3. Levée,
4. Cuvette de décantation, 5. Delta de rupture,
6. Marigot (bras mort), 7. Terrasse fluviale,
8. Dune rouge, 9. Défluent, 10. Terrasse marine.

Au Moyen Age une nouvelle régression de l'océan Atlantique annonce un nouveau changement au système hydraulique du fleuve. La Langue Barbarie (zone littorale) s'accroit, forçant le fleuve vers le Sud et un estuaire s'est formé.

Depuis lors, l'homme a progressivement modifié le rythme du fleuve. En 1964 la Mission d'Aménagement du Sénégal (MAS), a commencé avec la construction d'une digue du côté Sénégalais. Le résultat est que l'inondation à la suite de la crue du fleuve et de ses défluents devient limitée. La maîtrise des intrusions salines à travers l'embouchure du fleuve est effectuée par la création de la digue anti-sel de Diama à 36 km de l'embouchure en 1986.

1.2. Conséquences pédologiques

La morphogenèse du delta décrite ci-dessus a des conséquences profondes sur l'évolution des sols. En effet la géographie des sols et la pédogenèse actuelle sont fortement déterminées par la physiographie du delta et par le régime hydrique qui y régne. Il est évident que les grands changements du système hydrologique engendrés par la construction des digues et le barrage anti-sel ont démarré de nouvelles pistes évolutives dans les caractéristiques des profils pédologiques.

Dans le Tableau 1, les différents pédo-paysages qu'on peut distinguer dans le delta sont présentés. La répartition de ces séquences est liée au relief, comme montre la Figure 2.

Tableau 1.
Les pédo-paysages du delta du fleuve Sénégal

Paysage	Physiographie	Texture	Unité pédologique
▪ Dunes, et cordons littoraux	Diéri	sable	Cambic Arénosols
▪ Terrasses marines, et fluviales	-	sablo-argileux	Eutric Cambisols
▪ Levées et deltas de rupture	Fondé	argilo-sableux	Eutric Fluvisols
▪ Cuvettes	Hollaldé	argile	Salic Fluvisols

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 sel jusqu'à 350 km de l'embouchure soit dans les sols, soit dans les nappes partout présentes en profondeur. Une pédogenèse hydrique et une pédogenèse saline caractérisent donc essentiellement l'évolution de ces matériaux. (Loyer, 1989). Le facteur essentiel dans la formation des sols du delta était la fréquence et la durée de l'inondation.

Après la construction des digues et le barrage anti-sel, le facteur pédogénétique principal est la fluctuation de la nappe phréatique causée par l'infiltration de la pluie et l'eau d'irrigation.

▪ Si la nappe phréatique monte, les sels des couches supérieures s'accumulent à la surface par des forces capillaires. Dans les périmètres irrigues, ces sels peuvent être evacués par une percolation de l'eau d'irri-

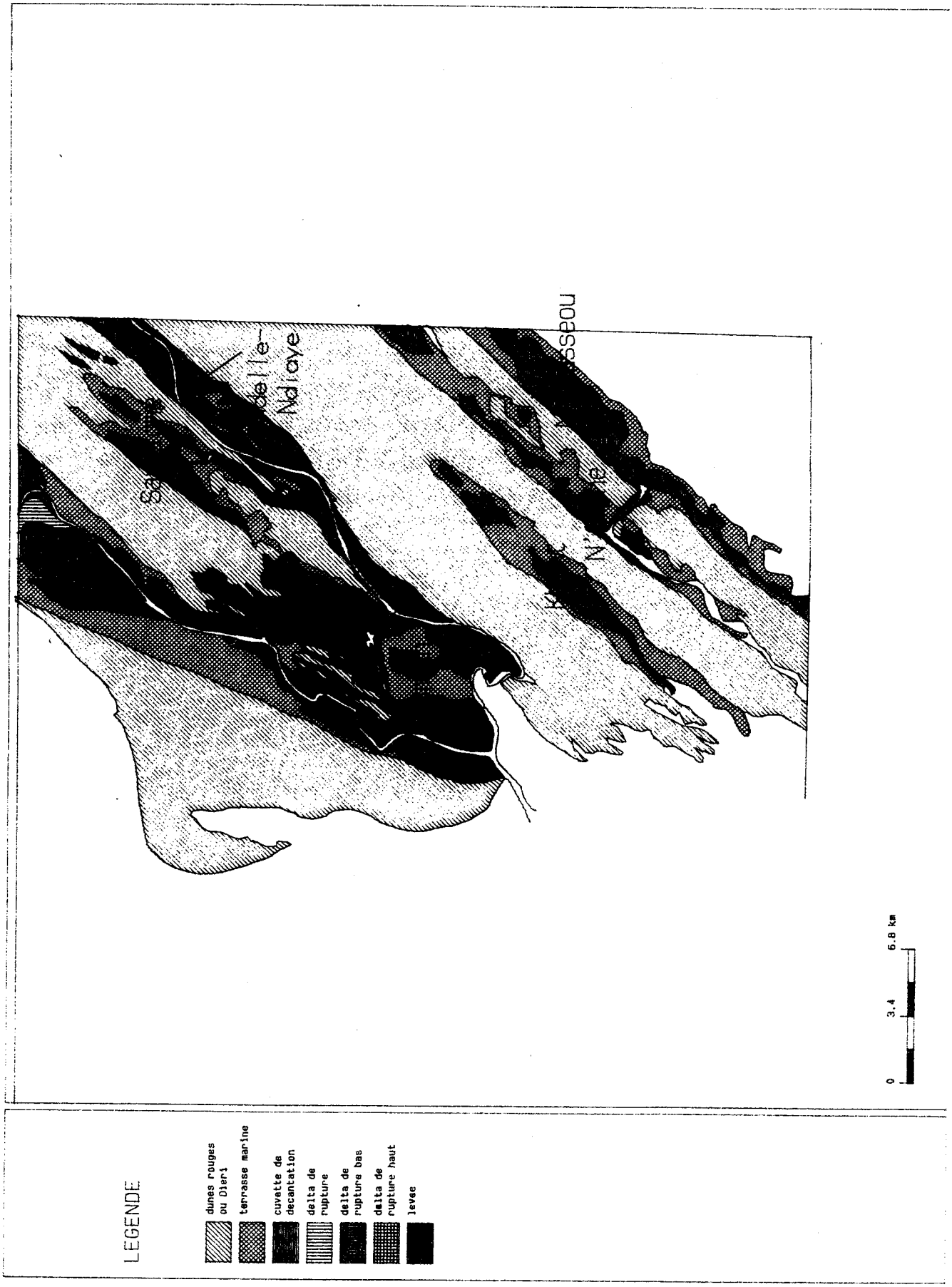


Figure 2a.
Pédo-paysages du delta.

Figure 2b.
Pédo-paysages du delta.

gation et/ou par un lessivage de surface (salinisation - désalinisation).
- Si la nappe phréatique descend trop bas dans le profil, des couches contenant de la pyrite peuvent être exposées à l'oxygène (acidification).

1.3 Milieu aquifère

Le milieu aquifère du delta a été le sujet d'une étude par le projet OMVS/USAID (1990). Ce projet a réalisé six essais de pompage dans des couches non consolidées. La conclusion est que les sites de pompage testés présentent une grande similitude dans la géométrie de leur réservoir aquifère. Les différentes couches des dépôts sont :

- La couche n°1 (de 0 m à 4..5 m) qui est formée d'un ensemble de strates horizontales constituées de limon et d'argile, rarement de sable fin. Il s'agit des sédiments récents, Post-Nouakchottien. L'épaisseur modale est de 2 m. La perméabilité est de l'ordre de 0.5 à 2 mm par jour.
- La couche n°2 (de 4..5 m à 15..18 m) est relativement homogène. La texture est constituée de sable fin. C'est le compartiment supérieur du réservoir aquifère. La plupart des dépôts date de la période Nouakchottien. L'épaisseur de cette couche varie de 0 à 12 mètres.
- La couche n°3 (de 15..18 m à 19..30 m) est constituée d'un ensemble de strates limoneuses ou argileuses dont la plupart date du début du Nouakchottien. L'épaisseur médiane est de l'ordre de 3 mètres.
- La couche n°4 (de 19..30 m à 40..50 m) est sableuse avec une fraction limoneuse significative. C'est le compartiment inférieur du réservoir aquifère. Ce compartiment est a peu près deux fois plus perméable que le compartiment supérieur. Il est très probable qu'une communication existe entre les deux réservoirs aquifères.

Les couches révèlent donc l'existence d'un aquifère unique, compartimenté en deux réservoirs juxtaposés: supérieur (couche n°2) et inférieur (couche n°4).

La nappe est en communication hydraulique avec le fleuve Sénégal. Dans le delta, les cours d'eau alimentent la nappe. La contribution de cette alimentation est quand-même modeste et ne se fait sentir que sur une largeur de quelques centaines de mètres.

Les eaux de la nappe phréatique du delta sont fortement salées et compte tenu de leur coefficient d'absorption de sodium (SAR) élevé, elles sont inaptes à l'usage agricole. Le taux de la salinisation diminue du centre du delta (> 16 dS/m) vers la périphérie (du 0.2 à 16 dS/m).

La nappe se trouve à une faible profondeur. Le niveau piézométrique moyen, mesuré par le projet OMVS/USAID dans la saison sèche de 1989, se situait à 0.33 m sous la cote IGN (niveau de la mer) dans les périmètres hydroagricoles et à 0.71 m sous cette cote à l'extérieur des limites de ces périmètres. Pendant la saison des pluies la montée de la nappe est induite par l'infiltration pluviale et par l'irrigation. En saison sèche le niveau de la nappe baisse sous l'influence des pertes d'eau par évaporation et par évapotranspiration. Les fluctuations moyennes intersaisonnières de la nappe se situent entre 0.6 à 0.8 m dans les zones irrigués et 0.3 m dans les zones non irriguées.

Chapitre 2
Propriétés physiques

2.1. Propriétés

Texture

La texture du sol renseigne sur la taille prédominante ou la gamme de tailles des particules de sol. Elle peut être déterminée par la touche ou au laboratoire en mesurant la proportion des fractions sable (0.05-2 mm), limon (0.002-0.05 mm) et argile (< 0.002 mm) et en déterminant la classe de texture au moyen d'un triangle textural (Figure 3).

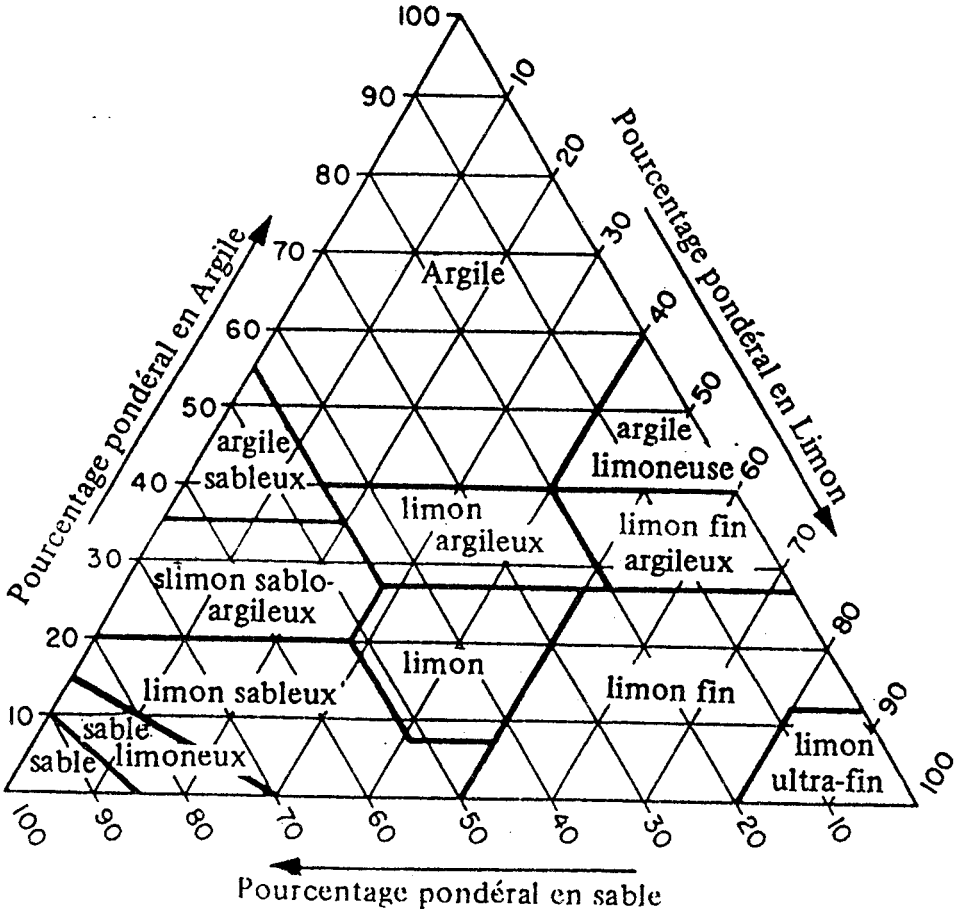


Figure 3.
Triangle textural (Hillel, 1974).

Courbe de rétention de l'eau

La courbe de rétention de l'eau donne le rapport entre la quantité d'eau (θ) demeurant dans le sol à différentes succions (potentiels) matricielles (h). Ce rapport (h-θ) est mesuré expérimentalement au laboratoire et est repréenté graphiquement par une courbe. La forme de la courbe de rétention est fortement influencée par la texture, la structure et le taux et la nature de la matière organique.

Densité apparente

La densité apparente donne la relation entre le poids d'un sol non-remanié et son volume.

Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique (K) renseigne sur la vitesse avec laquelle l'eau est transmise dans le sol. Le transert de l'eau se fait à travers les pores. La conductivité hydraulique changera en fonction de la teneur en eau dans le sol (θ). Si le sol est saturé tous les pores sont pleins et la conductivité sera maximale (Ksat). Quand le sol draine, des pores se vident et de moins en moins de pores peuvent encore conduire l'eau. En conséquence la conductivité diminuera. Parce que ce sont les pores les plus grands et aussi les plus conducteurs qui se vident les premiers, la diminution de la conductivité est plus ou moins exponentielle en fonction de la désaturation du sol. Plusieurs équations ont été proposées pour calculer la relation entre la conductivité hydraulique (K) et la teneur en eau (θ). Dans cette étude la formule de Kunze et Jackson (Kunze et al.,1968; Jackson, 1972) est utilisée our décrire la relation K-θ. La méthode est basée sur la subdivision de la courbe de rétention de l'eau en n segments. La conductivité hydraulique correspondant avec une certaine quantité d'eau θ_i est donné par l'équation :

$$K(\theta_i) = [m\ (\theta_i/n^2)] \sum_{j=i}^{n} [(2j+1-2i)/h^2 j] \qquad i = 1...n$$

où m est un facteur de raccordement.

2.2. Echantillonnage et Analyse

Sites d'échantillonnage

Les différents pédo-paysages ont été considérés dans l'étude des caractéristiques physiques des sols (Tableau 2, Figure 4).

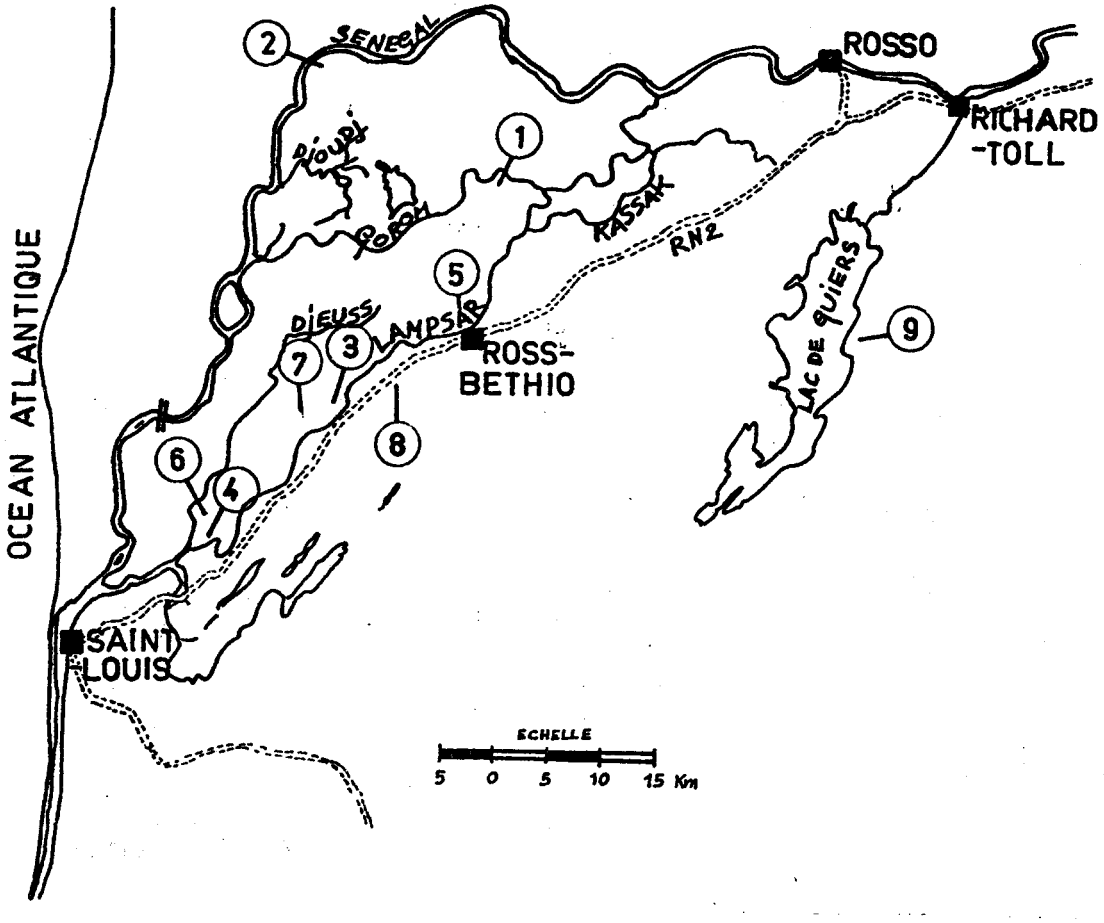


Figure 4.
Sites d'échantillonnage.
1. Gorom, 2. Debi, 3. NDiaye, 4. Makhana,
5. Ross-Béthio, 6. Tamach, 7. Savoigne,
8. Pont-Gendarme, 9. MBane.

Prélèvement des échantillons

▪ Echantillons non-remaniés

Des échantillons dans des anneaux Copecky de 100 cm^3 ont étés prélevés en huit répétitions par horizon. Sur ces 8 échantillons les déterminations suivantes ont été faites:

- Les points de la courbe de rétention entre pF 0 et 3.48, et la densité apparente (4 répétitions).
- La conductivité hydraulique saturée des sols argileux (4 répétitions).

Tableau 2.
Sites d'échantillonnage (Caractérisation physiques).

	Site	Profondeur de prélèvement (cm)	Texture	Physiographie
▪	**Levée**			
1	Gorom	10	limon sablo-argileux	Fondé
		70	limon sablo-argileux	
▪	**Cuvettes**			
2	Débi	10	argile	Hollaldé
3	NDiaye	10	argile	Hollaldé
		30	argile	Hollaldé
4	Makhana	10	argile	Hollaldé
5	Ross-Béthio	10	argile	Hollaldé
		30	argile	Hollaldé
▪	**Sable Nouakchottien**			
6	Tamach	60	sable	
▪	**Dune jaunâtre-grise**			
7	Savoigne	10	sable	
		30	sable	
▪	**Sols dior**			
8	Pont-Gendarme	20	sable	Diéri
		50	sable	Diéri
9	MBane	15	sable	Diéri
		30	sable	Diéri

▪ Echantillons remaniés

Des échantillons remaniés ont été collectés par horizon pour la détermination des points de la courbe de rétention entre pF 3.48 et 7 et pour la détermination de la texture.

▪ Conductivité Hydraulique

La conductivité hydraulique saturée des sols sableux est déterminée en milieu naturel dans un trou. En présence d'une nappe phréatique les mesures ont été faites par la méthode à la tarière. Par contre en absence d'une nappe,

la méthode Porchet (méthode du trou à la tarière inverse) a été suivie.

▪ Observations

Un problème de compactage s'est posé lors du prélèvement des anneaux Copecky. Ceci était inévitable avec la méthode de prélèvement.

Parce que le volume du sol est très limité à la détermination de la conductivité hydraulique à l'aide des anneaux Copecky, les valeurs mesurées peuvent fortement varier d'un échantillon à l'autre. Les résultats présentés donnent la moyenne des observations, en excluant les valeurs hors proportion de plusieurs ordres de magnitudes. Les résultats correspondent avec le niveau de percolation dans les rizières, mesurée avec des règles graduées (Raes et Sy, 1993).

2.3. Résultats

▪ Gorom (10 cm)

Densité apparente ..1.58 gr/cm^3
Conductivité hydraulique de sol saturé
(Echantillons avec des anneaux Copecky) ..5.3 mm/jour

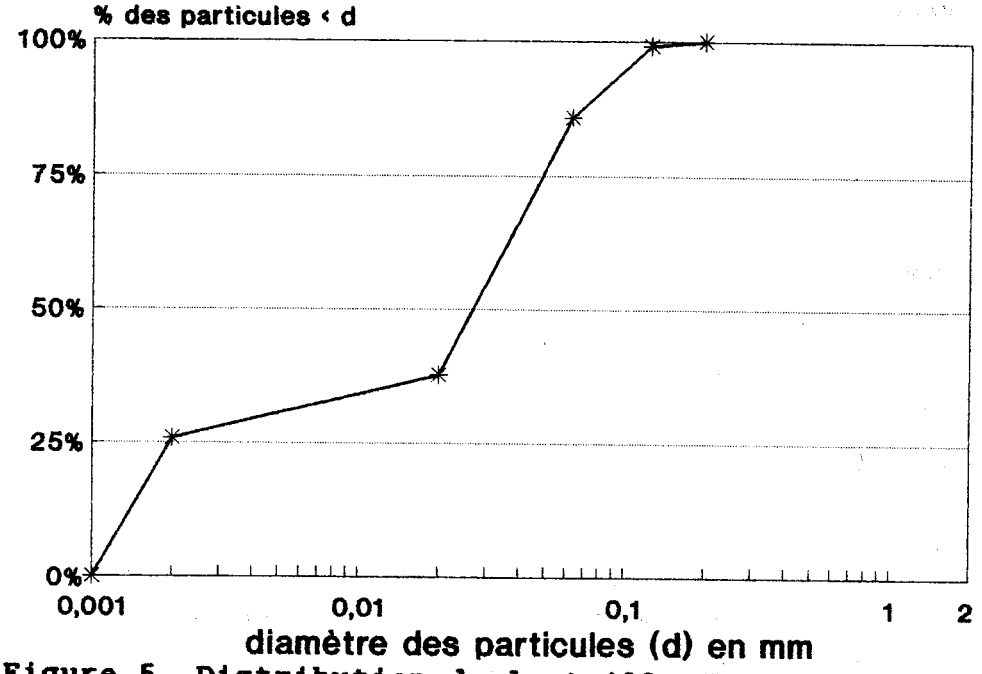


Figure 5. Distribution de la taille des particules.

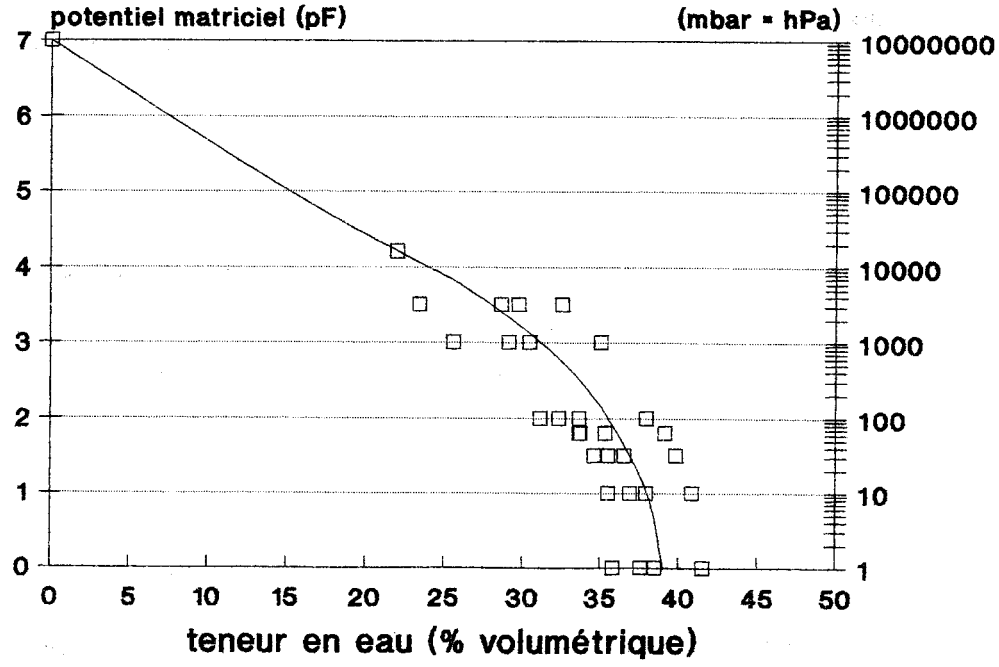


Figure 6. Courbe caractéristique de l'humidité du sol.

■ Gorom (70 cm)

Densité apparente ..1.50 gr/cm^3
Conductivité hydraulique de sol saturé ..1300 mm/jour
(Méthode du trou à la tarière)

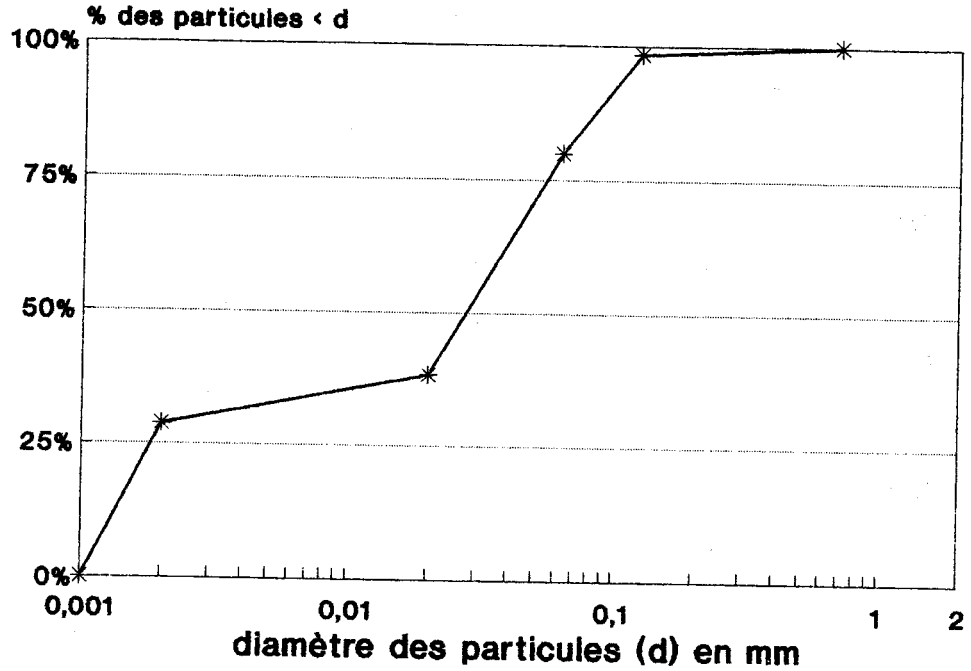


Figure 7. Distribution de la taille des particules.

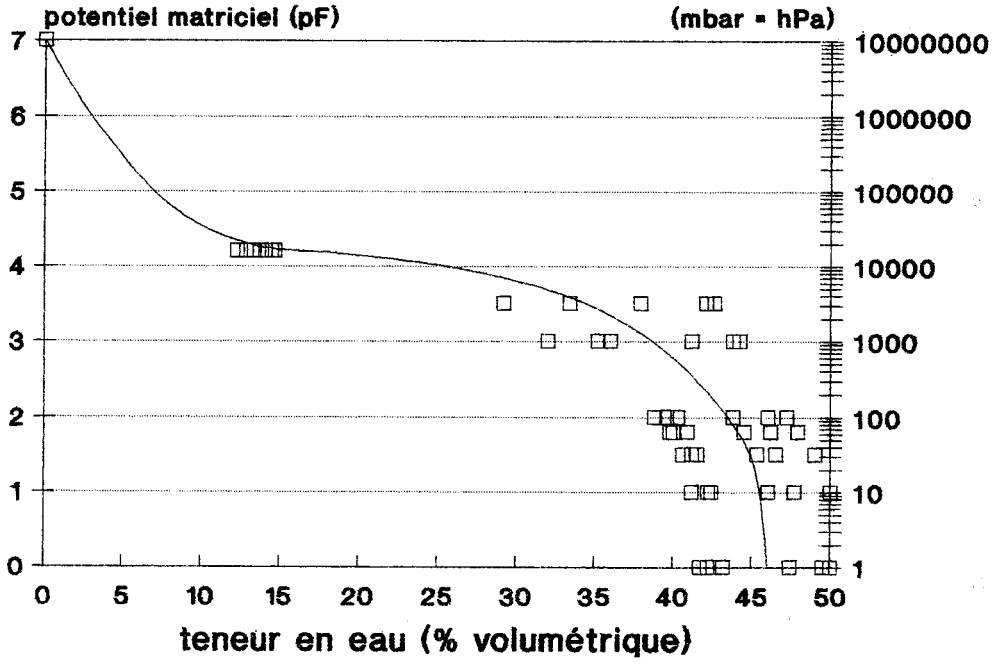


Figure 8. Courbe caractéristique de l'humidité du sol.

▪ Debi (10 cm)

Densité apparente ..1.28 gr/cm^3

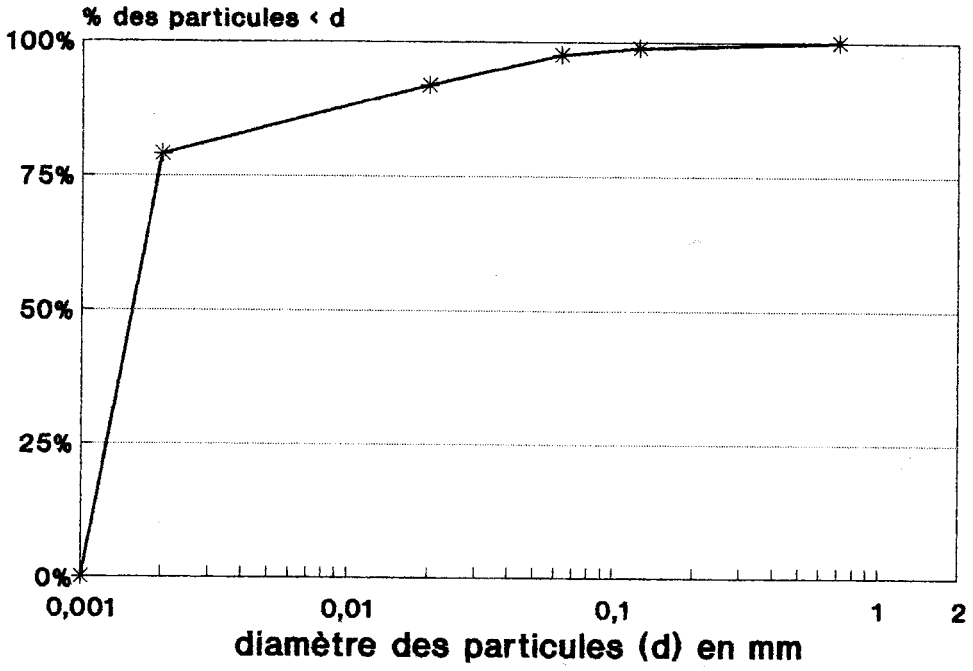


Figure 9. Distribution de la taille des particules.

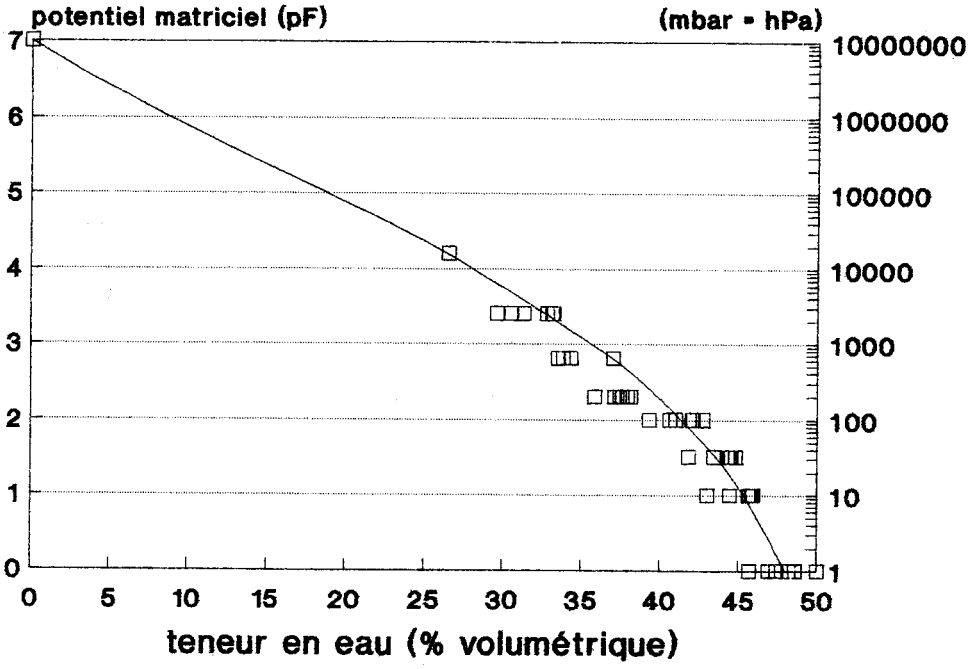


Figure 10. Courbe caractéristique de l'humidité du sol.

▪ NDiaye (10 et 30 cm)

Densité apparente ..1.52 gr/cm^3
Conductivité hydraulique de sol saturé
(Echantillons avec des anneaux Copecky) ..2.4 mm/jour

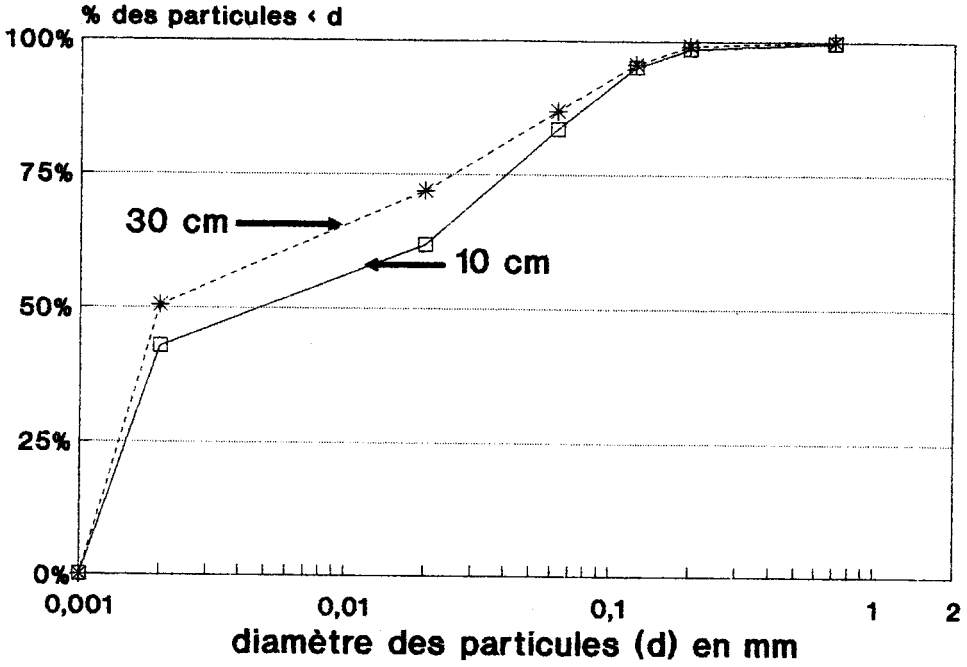


Figure 11. Distribution de la taille des particules.

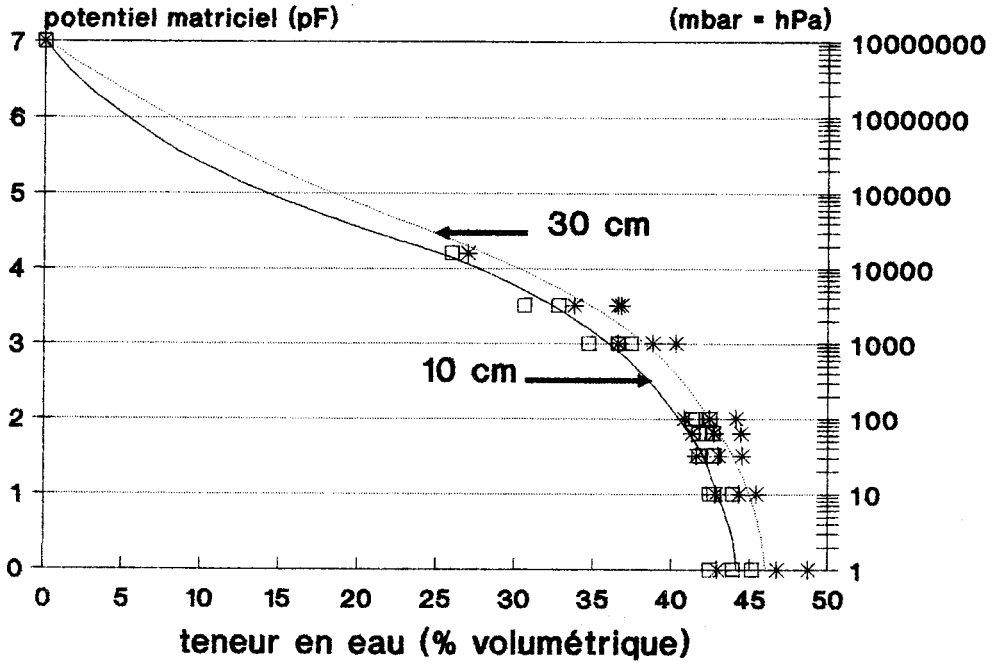


Figure 12. Courbe caractéristique de l'humidité du sol.

▪ Makhana (10 cm)

Densité apparente ..1.60 gr/cm^3
Conductivité hydraulique de sol saturé
(Echantillons avec des anneaux Copecky) ..4.0 mm/jour

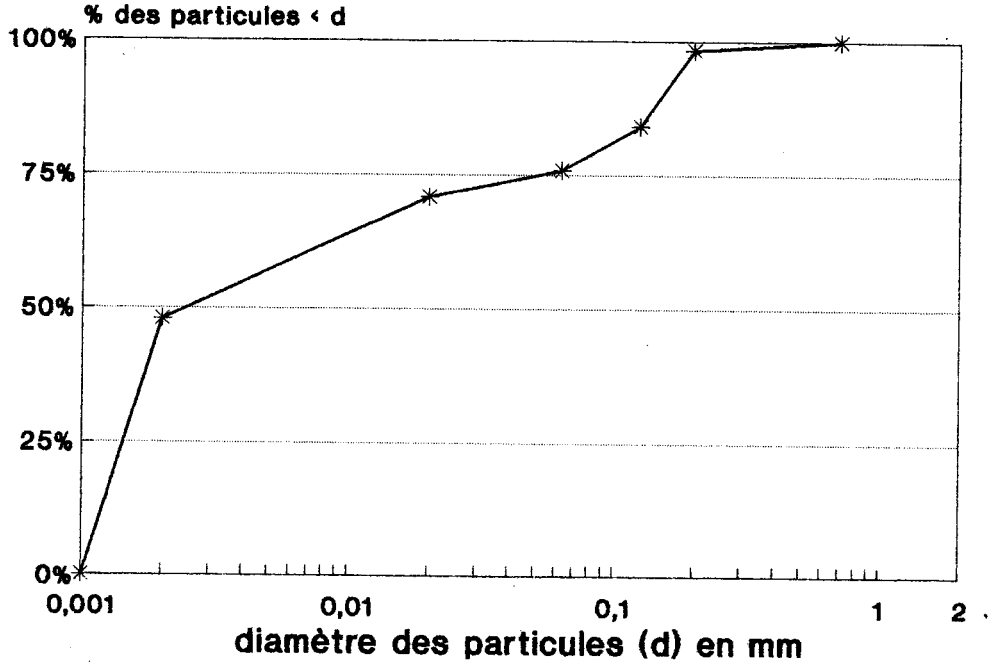


Figure 13. Distribution de la taille des particules.

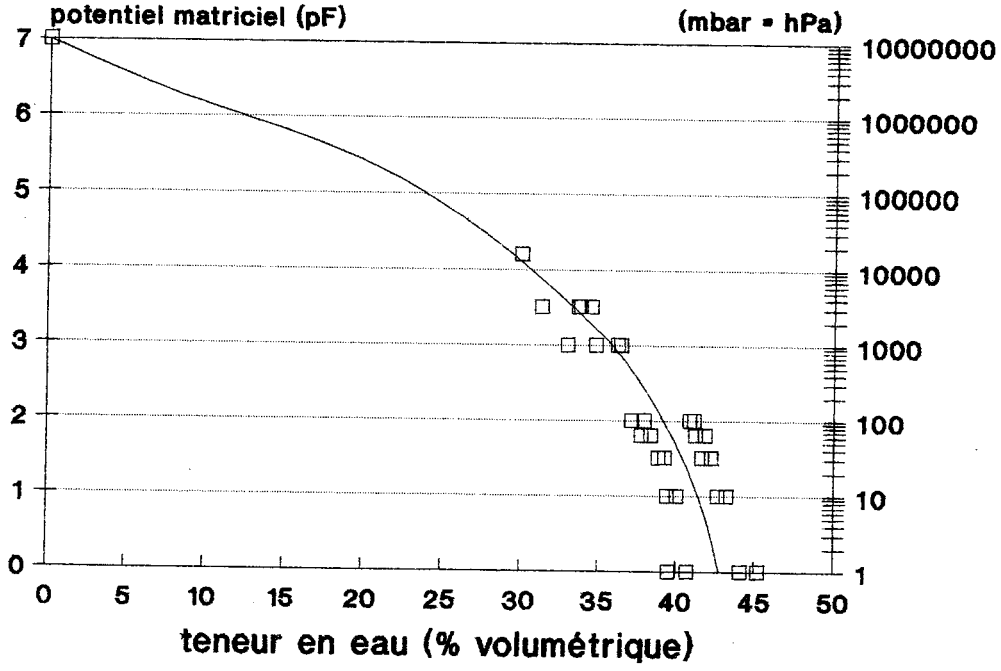


Figure 14. Courbe caractéristique de l'humidité du sol.

■ Ross-Béthio (10 et 30 cm)

Densité apparente ..1.48 gr/cm^3
Conductivité hydraulique de sol saturé
(Echantillons avec des anneaux Copecky) ..2.5 mm/jour

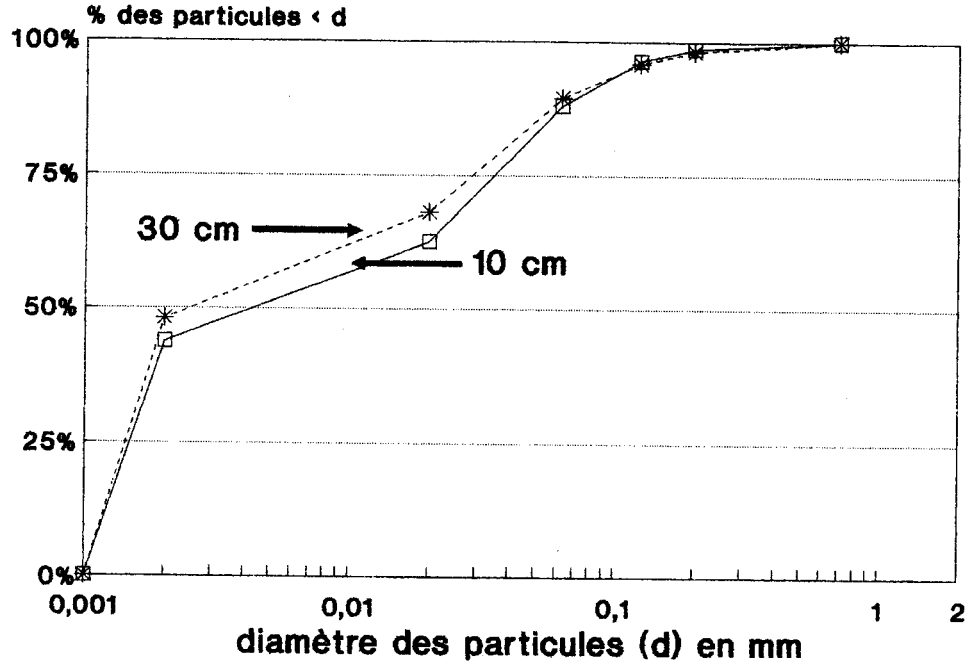


Figure 15. Distribution de la taille des particules.

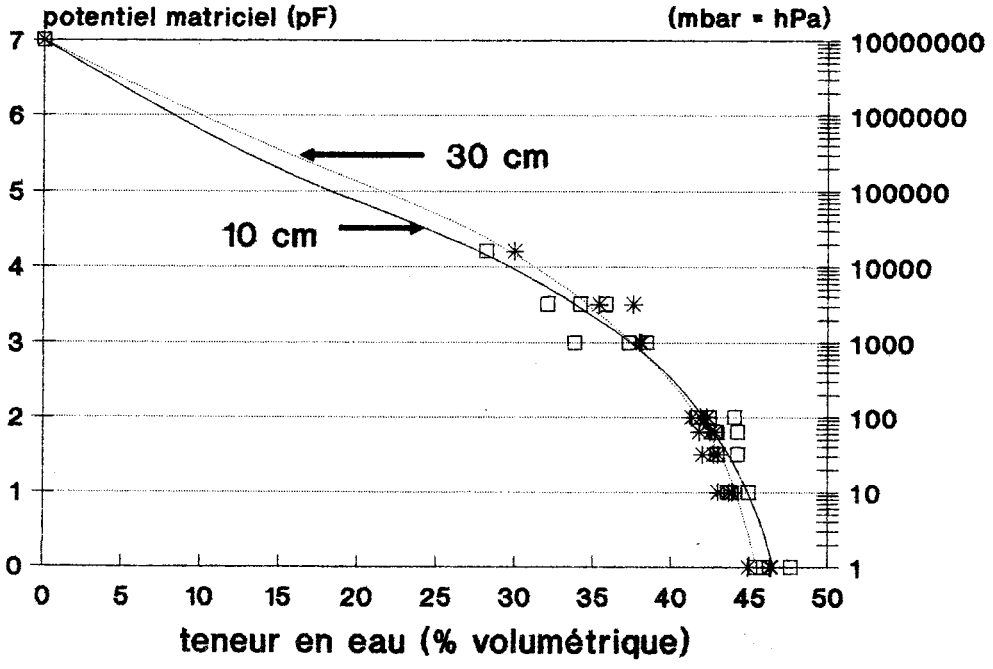


Figure 16. Courbe caractéristique de l'humidité du sol.

▪ Tamach (60 cm)

Densité apparente ..1.55 gr/cm^3
Conductivité hydraulique de sol saturé
(Méthode du trou à la tarière) .. 543 mm/jour

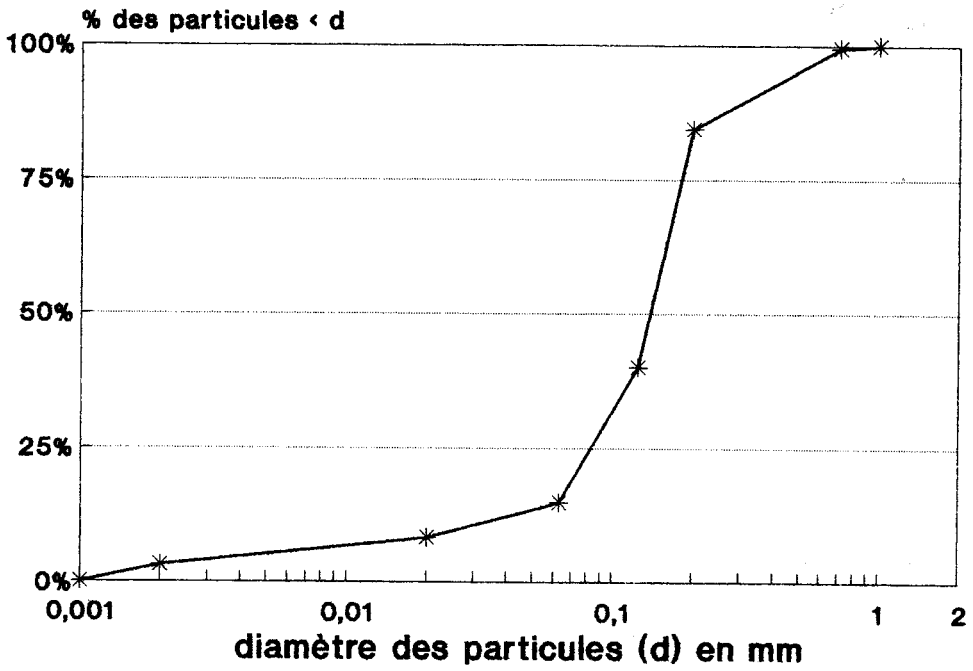


Figure 17. Distribution de la taille des particules.

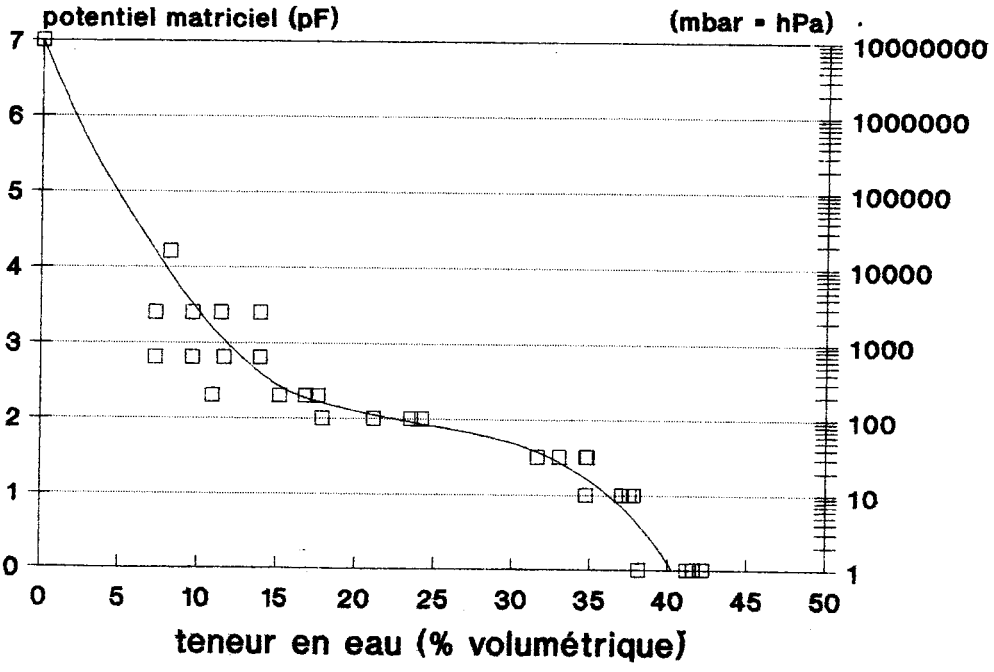


Figure 18. Courbe caractéristique de l'humidité du sol.

▪ Savoigne (10 - 30 cm)

Densité apparente ..1.65 gr/cm^3
Conductivité hydraulique de sol saturé
(Méthode du trou à la tarière inversé) .. 910 mm/jour

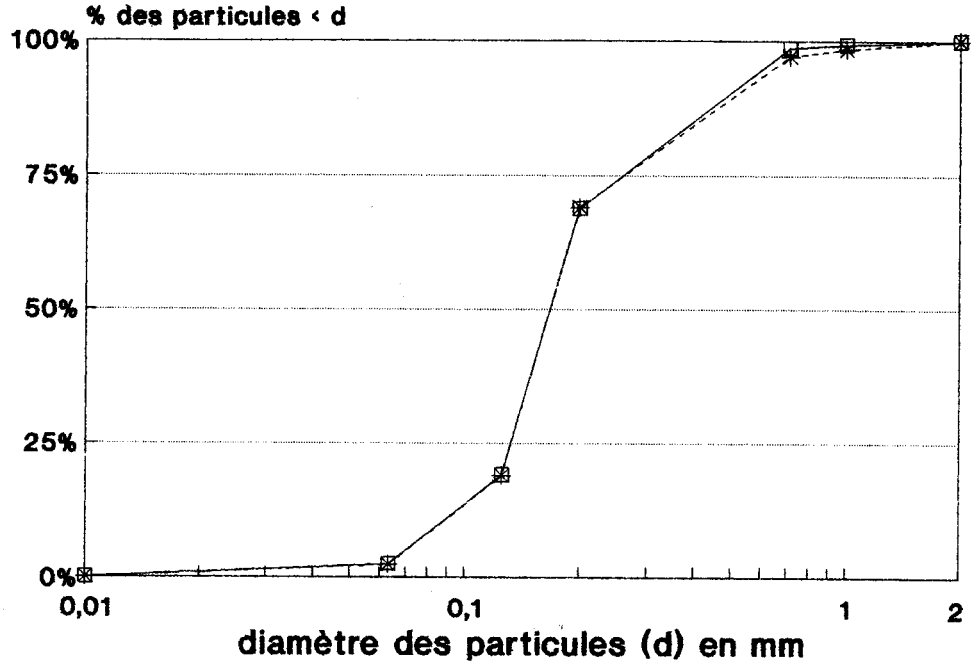


Figure 19. Distribution de la taille des particules.

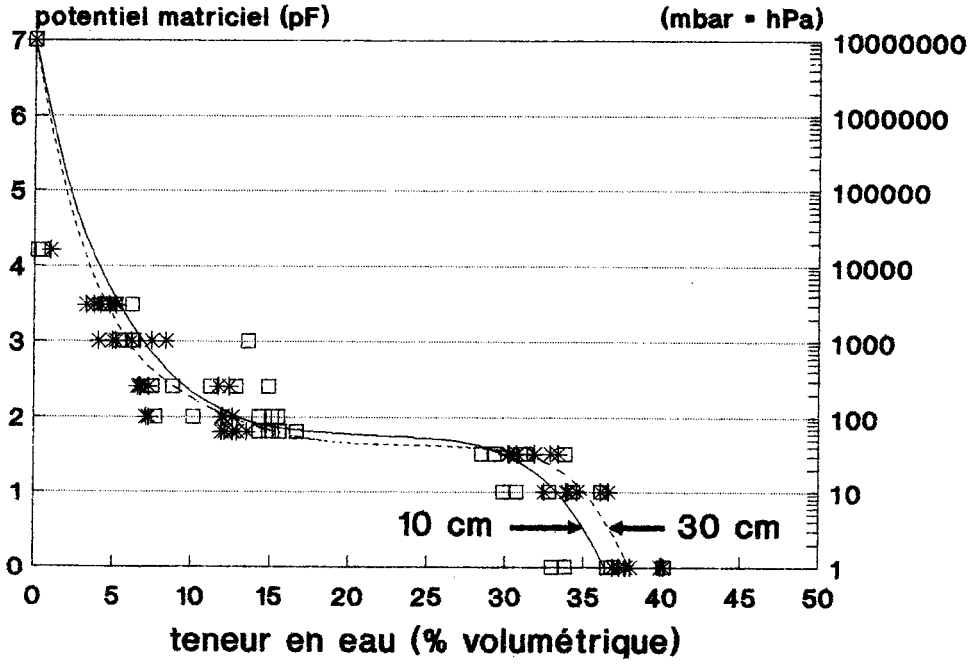


Figure 20. Courbe caractéristique de l'humidité du sol.

■ Pont-Gendarme (20 - 50 cm)

Densité apparente ..1.60 gr/cm^3

Conductivité hydraulique de sol saturé
(Méthode du trou à la tarière inversé) ..3960 mm/jour

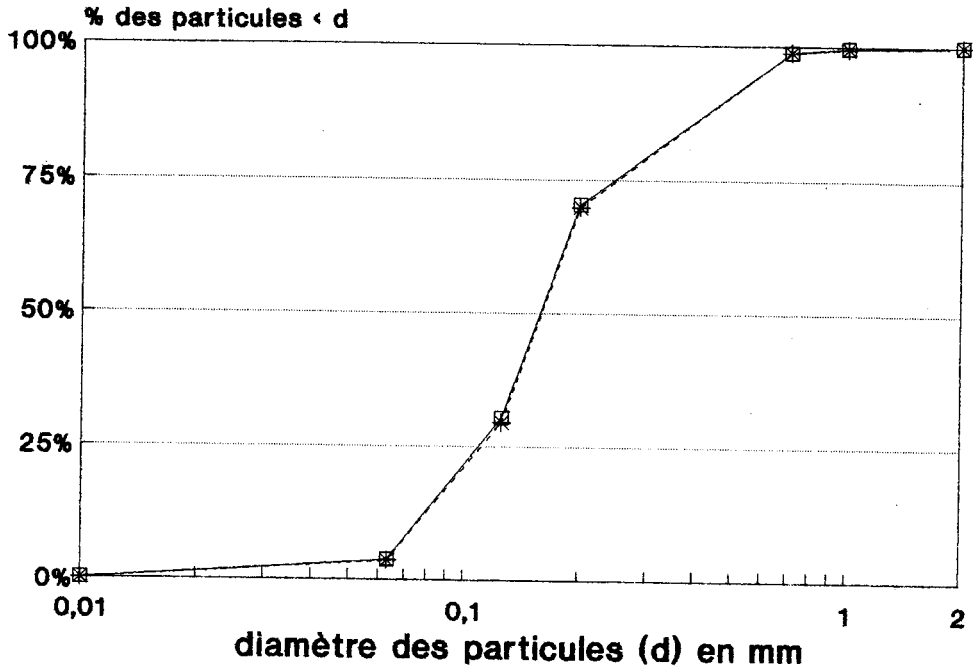


Figure 21. Distribution de la taille des particules.

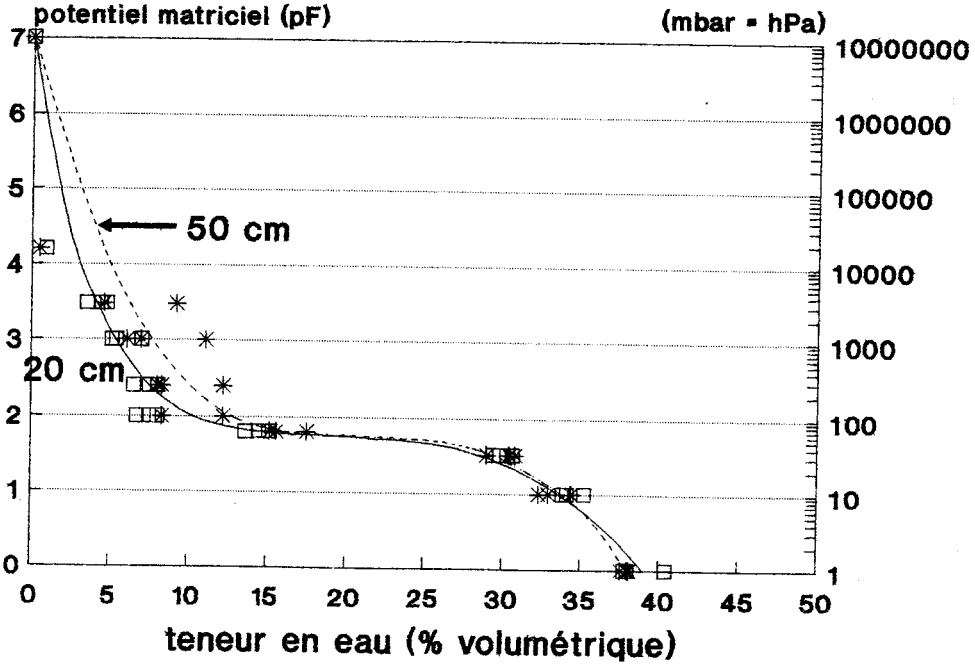


Figure 22. Courbe caractéristique de l'humidité du sol.

▪ MBane (15 - 30 cm)

Densité apparente ..1.55 gr/cm^3
Conductivité hydraulique de sol saturé
(Méthode du trou à la tarière inversé) ..2060 mm/jour

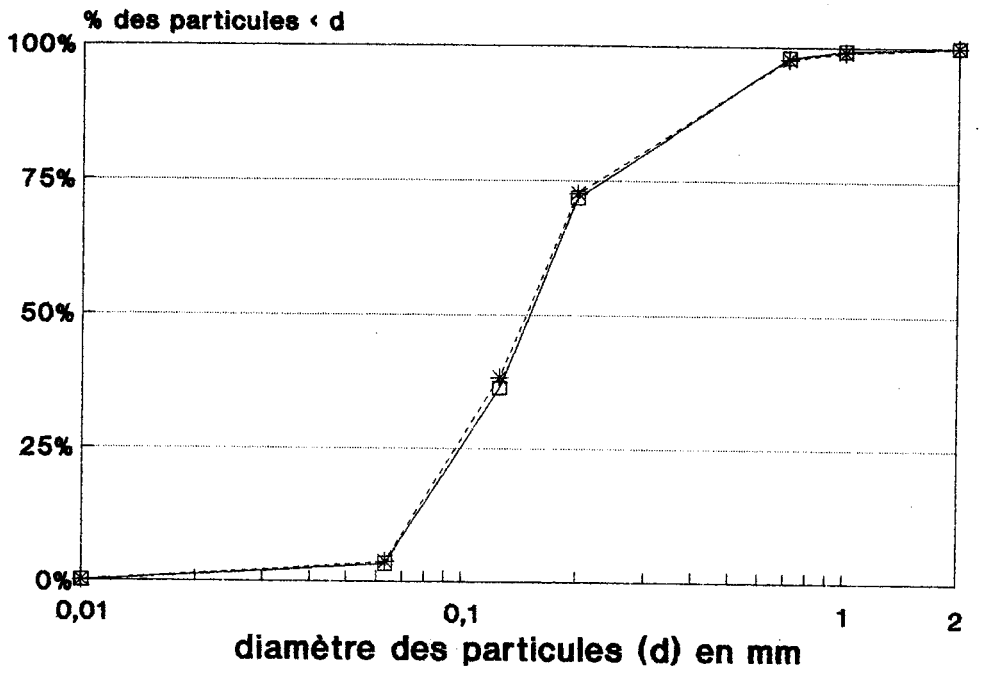


Figure 23. Distribution de la taille des particules.

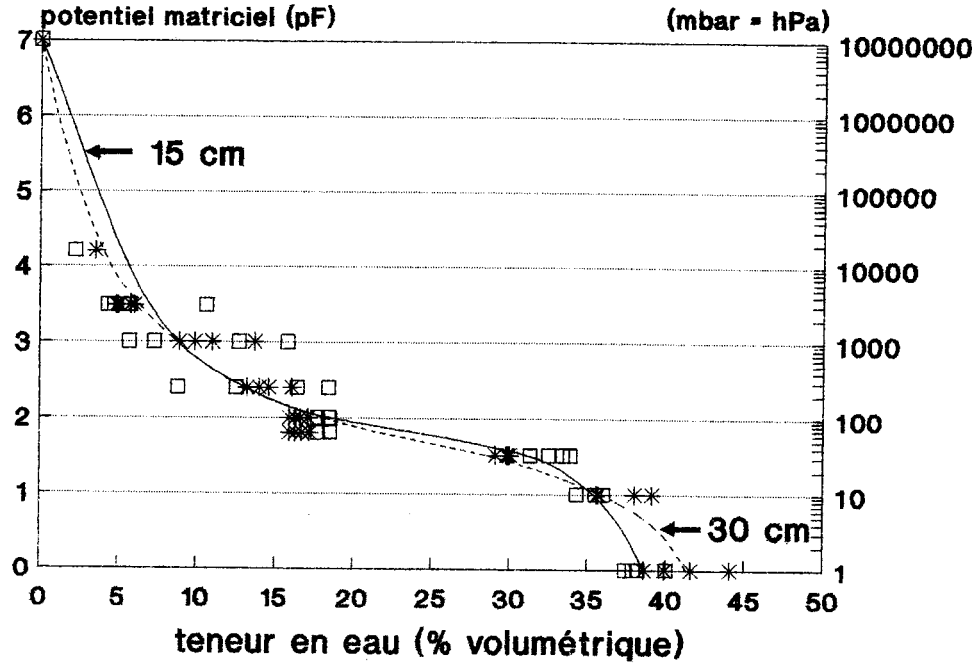


Figure 24. Courbe caractéristique de l'humidité du sol.

2.4 Conséquences pratiques

Résalinisation des sols argileux

L'ascension capillaire de l'eau saumâtre de la nappe phréatique vers la surface, observée pendant la saison où les rizières sont hors-culture, a son influence sur la (ré)salinisation de la zone radiculaire. Vu que l'eau de la nappe est fortement salée, des quantités de sels importantes sont transportées avec la remontée capillaire. A la surface du sol, l'eau s'évapore et les sels s'accumulent.

▪ **Profils types**

A fin de pouvoir exécuter des simulations, des profils types ont été composés. Les relations mesurées de h-θ et K-θ de quelques horizons représentatifs ont été combinés pour créer des profils types. Ils décrivent les caractéristiques hydro-dynamiques d'un sol fondé (sur une levée), d'un hollaldé (dans une cuvette de décantation) et d'un sol à texture très fine (dépôt lagunaire). Chaque profil est composé de deux horizons : un horizon supérieur et un sous sol. Parce que l'épaisseur des horizons a son influence sur les résultats des simulations, différentes profondeurs ont été prises en considération dans la composition de chaque profil type. Les profils types retenus sont :

Fondé (limon sablo-argileux)
- **h-θ, K-θ :**
  horizon supérieur : Gorom (10 cm), Ksat : 5.3 mm/jour
  sous-sol : Gorom (70 cm), Ksat : 1300 mm/jour
- **Epaisseur :**
  Cas 1 : horizon supérieur : 0 - 30 cm (peu profond)
  Cas 2 : horizon supérieur : 0 - 50 cm

Holladé (sol argileux sur limon sablo-argileux)
- **h-θ, K-θ :**
  horizon supérieur : NDiaye (10 cm), Ksat : 2.4 mm/jour
  sous-sol : Gorom (70 cm), Ksat : 1300 mm/jour

Epaisseur :
  Cas 1 : horizon supérieur : 0 - 30 cm (peu profond)
  Cas 2 : horizon supérieur : 0 - 50 cm

Dépôt Lagunaire (sol très lourd sur sable Nouakchottien)
- **h-θ, K-θ :**
  horizon supérieur : Debi (10 cm), Ksat : 1 mm/jour
  sous-sol : Tamach (60 cm), Ksat : 543 mm/jour

Epaisseur :
  Cas 1 : horizon supérieur : 0 - 50 cm
  Cas 2 : horizon supérieur : 0 - 100 cm (profond)

Les relations h-θ et K-θ des différents horizons sont présentées en Annexe A.

• Ascension capillaire

La montée de l'eau dans le sol à partir d'une nappe phréatique est appelée ascension capillaire. Ce processus se manifeste si l'horizon supérieur est suffisamment sec. Après l'assèchement de la rizière avant la récolte, la forte évapo(transpi)ration fait que l'horizon supérieur sèche rapidement. Après 15 à 20 jours (Le Gal, 1993) les parcelles deviennent portantes pour les moissonneuses-batteuses et la récolte du riz peut démarrer.

Si les rizières ne sont pas cultivées à nouveau, l'absence des apports d'eau par l'irrigation et la pluie et la forte évaporation font que l'horizon supérieur devient de plus en plus sec après la récolte. Si la nappe n'est pas trop profonde, le sol sera humidifié par l'ascension capillaire et après un certain temps un équilibre peut s'installer dans le profil entre l'apport de l'eau à partir de la nappe phréatique et l'évacuation de l'eau à la surface par le processus d'évaporation. Dans un régime permanent (steady-state), l'équation qui décrit cet écoulement vertical s'écrit :

$$z = \int_0^h K/(q+K)\ dh$$

où z est la coordonnée verticale, K la conductivité hydraulique, q le flux du régime permanent (le volume d'eau écoulé par unité de surface et par unité de temps) et h le potentiel matriciel. Pour intégrer le terme de droite de l'équation, il faut connaître la relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau (K-θ) et entre la teneur en eau et le potentiel matriciel (h-θ). Pour un flux donné (q), l'équation donne le potentiel matriciel (h) à chaque point (z) dans le profil.

Avec l'équation donnée ci dessus, l'ascension capillaire vers la surface (couche d'une épaisseur de 10 cm) a été estimée. Les calculs ont été faits pour les différents profils types, et en supposant que l'horizon supérieur est très sec (potentiel matriciel au point de flétrissement ou plus sec). Différentes profondeurs de la nappe ont été considérées. Les résultats sont données dans la Figure 25.

Les résultats montrent que l'ascension capillaire est plus élevée dans un hollaldé que dans un fondé. Dans les sols développés sur les dépôts lagunaires la conductivité hydraulique est si faible que l'apport d'eau est quasi-inexistant.

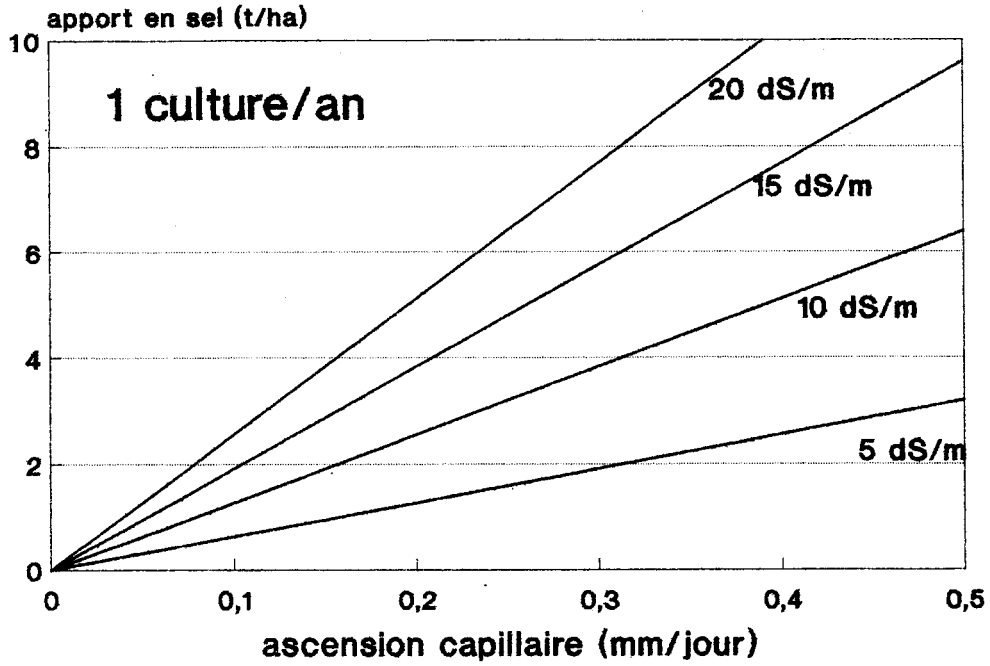


Figure 26.
Apport en sel par ascension capillaire
pour différents taux de salinité de la nappe phréatique.
Une culture par an.

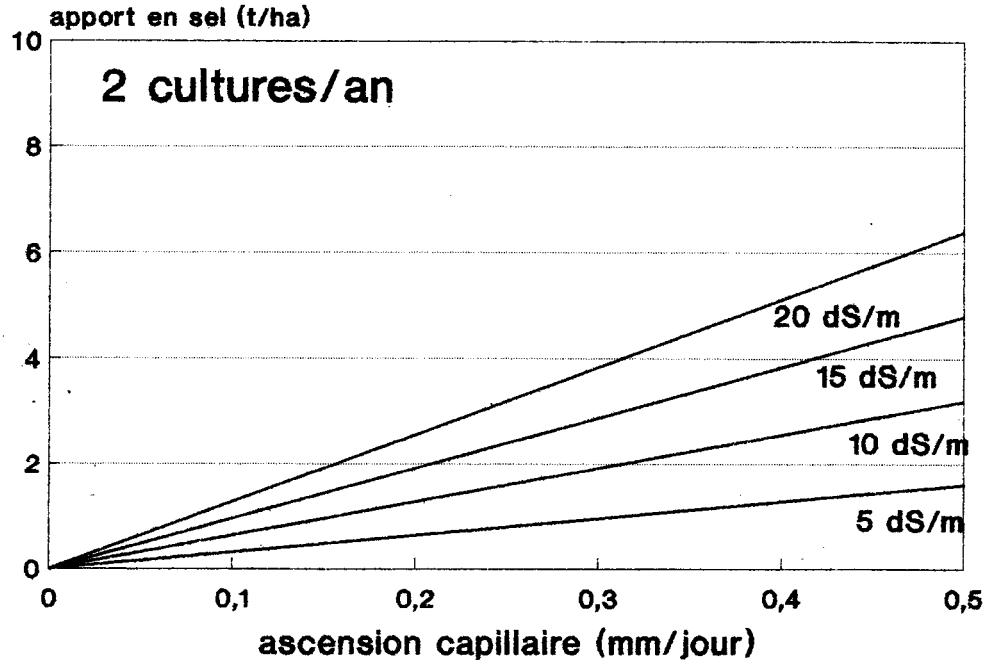


Figure 27.
Apport en sel par ascension capillaire
pour différents taux de salinité de la nappe phréatique.
Deux cultures par an.

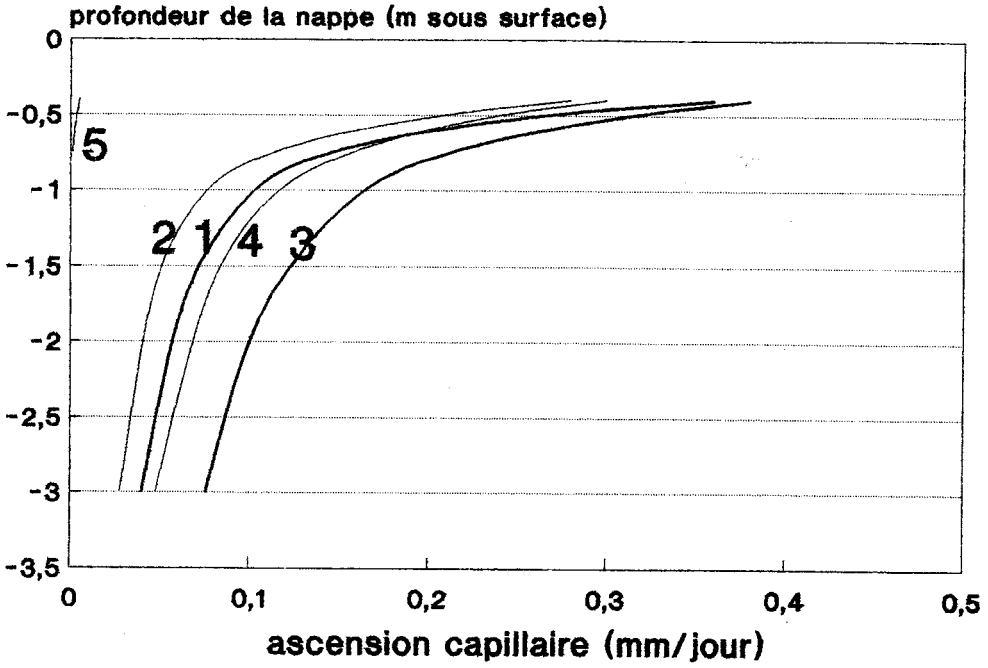


Figure 25.
Ascension capillaire vers la surface.
1. Fondé (peu profond), 2. Fondé, 3. Hollaldé (peu profond), 4. Hollaldé, 5. Dépôt Lagunaire.

▪ **Apport en sel**
Avec la connaissance de la profondeur et de la salinité de la nappe, les apports de sels peuvent être estimés.

Le taux de la salinisation de la nappe phréatique est très élevé. Il diminue du centre du delta vers la périphérie de plus que 16 dS/m à 0.2 dS/m. En admettant que 1 dS/m est équivalent à 640 mg de sel par litre, l'apport de sel par un flux vertical de 1 mm/jour est de l'ordre de 6.4 kg/ha.jour par dS/m.

Des apports estimés de sel en fonction de la salinité, du taux de l'ascension capillaire et l'intensité culturale sont présentés dans les Figures 26 et 27. Si on pratique la double culture, on a admis que pendant 100 jours les sels peuvent se concentrer à l'horizon supérieur par l'action capillaire. Avec une seule culture de riz par an, 200 jours ont été utilisés dans les calculs.

Avec la nappe phréatique à une profondeur de 0.75 m, on peut s'attendre d'après nos estimations à une ascension capillaire de 0.15 mm/jour et donc en conséquence un apport en sel de 1 (double culture) à 2 tonnes/an (simple culture) pour une salinité de la nappe égale à 10 dS/m. L'apport en sel est deux fois si grand si la salinité de la nappe est 20 dS/m.

▪ Désalinisation

Une fois que les rizières sont de nouveau mises en culture, les champs sont submergés et la percolation de l'eau à travers le profil vers la nappe phréatique, et l'évacuation de la lame d'eau par un drainage de surface vont enlever les sels de l'horizon supérieur. Cette évacuation est discutée dans le Chapitre 3.

Irrigation de sols sableux

Des schémas d'arrosages ont été établis à l'aide du logiciel IRSIS (Raes et al., 1988) pour des cultures emblavées sur des sols sableux. A part les propriétés physiques du sol, les schémas sont déterminés par le climat, la culture et le mode d'irrigation.

▪ Climat

Le niveau d'évapotranspiration et la probabilité d'occurrence de pluies dans différents endroits du delta et à différentes périodes de l'année ont été analysés (Raes et Sy, 1992). La Figure 28 donne la tendance des valeurs mensuelles moyennes de l'évapotranspiration de référence (ETo) obtenues à partir d'une estimation selon la méthode de Penman (approche Doorenbos et Pruitt, 1977). Elle est dressée avec les données des neufs dernières années et pour trois lieux distincts du delta (Saint-Louis à la côte, NDiaye à l'intérieur et Richard-Toll à l'extrême

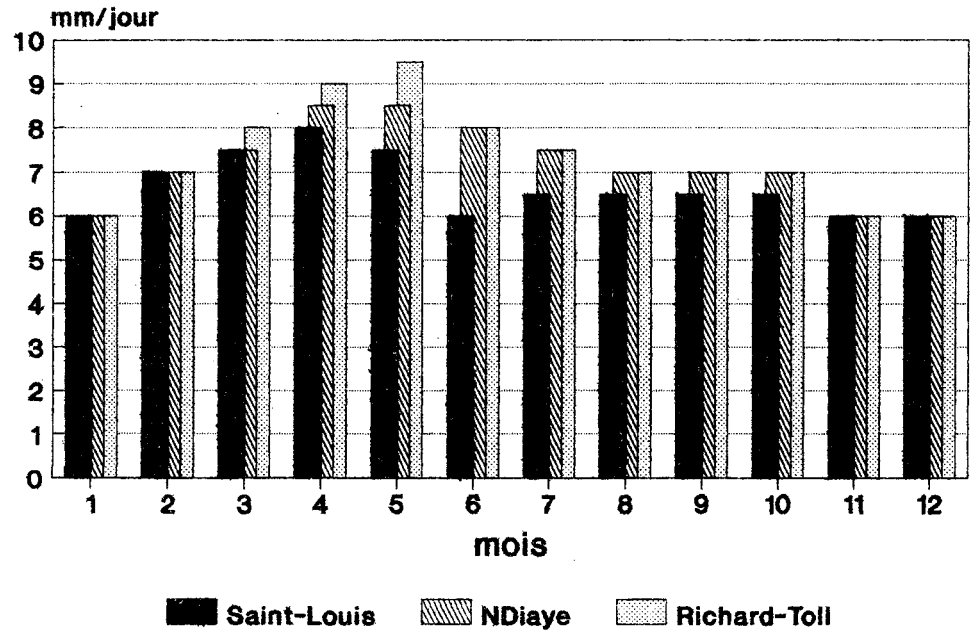


Figure 28.
Niveau d'évapotranspiration de référence.

Est du delta). Dans la Figure 29, des résultats de l'analyse fréquentielle des précipitations décadaires (1976-1991) de Saint-Louis sont résumés. Dans la figure sont représentées trois courbes correspondantes à des hauteurs de précipitations auxquelles on peut s'attendre à différentes probabilités. La courbe correspondante à une occurrence de 5 ans sur 10, est nommée 'Décade Normale'. Les hauteurs de précipitations décadaires qu'on ne dépasse que 2 ans sur 10, ou qu'on n'atteint pas 2 ans sur 10, sont données respectivement par la courbe 'Décade Humide' et 'Décade Sèche'.

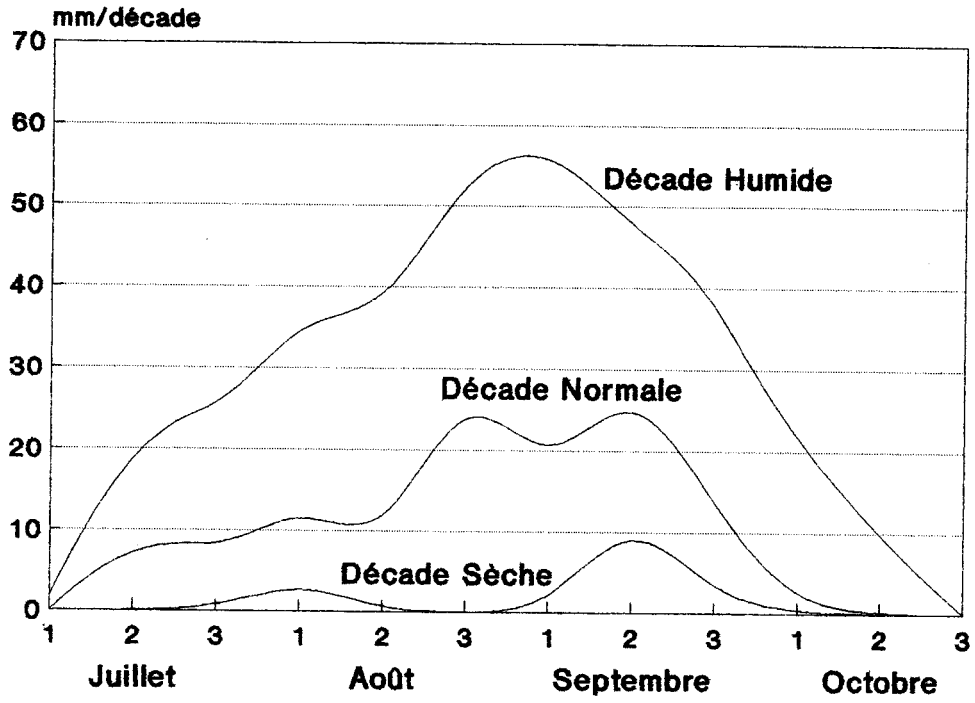


Figure 29.
Hauteurs des précipitations décadaires à Saint-Louis.

▪ **Cultures**

Les paramètres des différentes cultures ont été obtenus à partir des discussions avec des instituts régionaux (SOCAS, CSS), des conseillers agricoles de la SAED et des présidents des unités d'irrigations, à partir des observations directes au terrain et par un dépouillement de la littérature (Doorenbos et Pruitt, 1977; Doorenbos et Kassam, 1979; JICA, 1991). Les paramètres utilisés par le logiciel IRSIS sont :

- le coefficient cultural (kc) des différentes phases de végétation,
- la profondeur d'enracinement (z) en fonction de la croissance de la culture,
- la réserve facilement utilisable (p), et
- le facteur de réponse au rendement (ky).

Dans le Tableau 3 sont représentés la profondeur maximale d'enracinement (z_{max}), les coefficients culturaux en phase de végétation initiale (kc_1), pleine végétation (kc_3) et à la fin de maturation (kc_4), la réserve facilement utilisable (p) exprimée en fraction de la réserve utile du sol, et la période critique par rapport à l'irrigation (haute valeur de ky) des cultures retenues dans l'étude.

Tableau 3.
Paramètres des cultures.

Culture	z_{max} (m)	Coefficient cultural kc_1 ... kc_3 ... kc_4	p	Période critique
Arachide	0.8	0.40...1.10...0.90	0.4	Floraison
Maïs	1.0	0.40...1.15...0.50	0.5	Floraison
Oignon	0.4	0.70...0.95...0.75	0.25	Dévelopmt. des bulbes
Tomate	1.0	0.70...1.10...0.60	0.4	Floraison

• Mode d'irrigation

A la suite d'une étude économique, on a opté pour une irrigation par aspersion avec des asperseurs mobiles montés sur des patins. Les conduites latérales sont des tuyaux souples, raccordés perpendiculairement à la direction de la conduite principale qui est enterrée. Au bout de chaque tuyau latéral, un arroseur sur des patins est monté. Les arroseurs sont tirés à la nouvelle position chaque fois que la dose d'irrigation est appliquée.

• Schémas d'arrosages

Après la détermination des paramètres liés au sol, climat, plante et mode de l'irrigation, différents schémas d'irrigation ont été calculés et évalués à l'aide du logiciel IRSIS (Irrigation Scheduling Information System). L'évaluation est basée sur la quantité d'eau perdue par percolation (hors de la zone radiculaire) occasionné par une sur-irrigation, et sur la baisse en rendement occasionnée par une sous-irrigation. Des schémas simples, où les sur- et sous-irrigations sont minimales, sont représentés dans le Tableau 4.

Tableau 4.
Schémas d'irrigation de quelques spéculations cultivées sur des sols sableux dans le delta du fleuve Sénégal.

Site	Savoigne	Pont-Gendarme	MBane
Arachide (hivernage) :			
Pré-Irrigation (mm)	20	20	20
Schéma(°)	s...1½mois	s...½mois	s...½mois
- intervalle (jour)	3... 4	1... 4	3... 5
- dose (mm)	12... 28	15... 30	20... 35
Maïs (hivernage) :			
Pré-Irrigation (mm)	20	20	30
Schéma(°)	saison	s...½mois	s...½mois
- intervalle (jour)	4	3... 4	3... 4
- dose (mm)	28	20... 35	20... 35
Maïs (contre-saison froide) :			
Pré-Irrigation (mm)	20	20	30
Schéma(°)	saison	s..1 mois	s..1 mois
- intervalle (jour)	4	3... 5	3... 5
- dose (mm)	30	10... 40	20... 35
Oignon (contre-saison froide) :			
Pré-Irrigation (mm)	20	20	30
Schéma(°)	saison	s..1 mois	s..1 mois
- intervalle (jour)	2	1... 3	2... 4
- dose (mm)	15	10 20	15... 25
Tomate (contre-saison chaude) :			
Pré-Irrigation (mm)	20	20	
Schéma(°)	s...2½mois	saison	
- intervalle (jour)	4... 4	4	
- dose (mm)	24... 28	25	

(°) s (= semis), après...x mois

Chapitre 3
L'acidité

3.1. Développement

Acidité potentielle

La formation du pyrite dans le sous-sol du delta date de la période de la transgression Duinkerke pendant laquelle le delta était couvert d'une forêt dense de mangroves. Pyrite est formé par un processus bactérien par lequel des sulfates, amenés par l'eau de la mer, sont transformés en sulfites. Les bactéries anaérobies responsables pour cette réaction sont Desulfovibrio et Desulfatomycilium. La réaction est décrite comme suite:

$$Fe_2O_3 + 4SO_4^{2-} + 8CH_2O + \tfrac{1}{2}O_2 \rightarrow 2FeS_2 + 8HCO_3^- + 4H_2O$$

La formation des pyrites (FeS_2) est conditionnée par des facteurs extérieurs (Driessen and Dudal, 1991) :
- la présence du fer dans le milieu (Fe_2O_3),
- un apport de sulfates par l'eau de la mer (SO_4^{2-}),
- la présence de la matière organique comme source d'énergie pour les bactéries (CH_2O),
- un milieu anaérobie (inondation),
- le lessivage de l'alcalinité (HCO_3^-) par l'alternance entre la marée haute et basse, et
- une vitesse de sédimentation lente (temps de la réaction).

La présence des pyrites dans le sol peut être inférée par une couleur noire et une odeur de sulfure. Les cristaux de pyrite peuvent donner une lueur d'or à la matière. Toutes ces conditions étaient plus ou moins optimales dans le delta. Dans telles conditions, un gramme de soufre par 100 g de sol peut être fixé en 100 années (Dent, 1986). Il suffit donc d'avoir un régime de mangrove pendant 75 années pour une accumulation critique de 0.75 % de soufre dans le sous-sol, pour qu'un sol devienne un Thionic Fluvisol selon la classification FAO/UNESCO. Dans la classification Soil Taxonomy, les Thionic Fluvisols sont classés plus en détails. On y distingue les Sulfaquents qui représentent les sols contenant du pyrite qui viennent d'être déposés. Dès que les sols sont évolués ils sont classifiés dans l'ordre des Sulfaquepts. Dans la classification Française on parle des Sols Sulfatés Acides.

Au vu de l'histoire mangrove dans le delta depuis 2000 av JC, on peut donc s'attendre à des taux assez élevés de pyrite dans les cuvettes du delta, là où les mangroves ont poussé pendant des centaines d'années, notamment dans les cuvettes de décantation.

Acidité actuelle

Le développement de l'acidité actuelle s'est accéléré après la construction de la digue de protection en 1964, qui a coupé le régime d'inondation annuelle qui conservait le pyrite dans les sols. Le niveau de la nappe a baissé dans la zone d'accumulation du pyrite dans certains endroits. Ceci a provoqué une oxydation du pyrite pour former de l'acide sulfurique d'après la réaction globale suivante (Driessen and Dudal, 1991) :

$$FeS_2 + 7/2O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+$$

Le fer continue à oxyder pour former l'hydroxyde de fer ($Fe(OH)_3$) qui a la couleur rouge qui est tellement typique dans la couche supérieure des sols dans les cuvettes de décantation.

▪ Réaction en présence des coquillages

Il est évident que l'acidité formée par la réaction décrite ci-dessus, va réagir avec les minéraux qui se trouvent dans le profil. Ceci est particulièrement important dans certaines zones du delta où il y a une abondance en carbonate de calcium sous forme de coquillages. L'acidité sera neutralisée par la formation de gypse par la réaction suivante :

$$CaCO_3 + 2H^+ + SO_4^{2-} + H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O + CO_2$$

Ces cristaux de gypse ont été retrouvés dans le sous-sol par exemple dans la pédo-séquence de Pollo (Le Brusq, 1980).

▪ Réactions en l'absence du carbonate de calcium

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

$$3Fe(OH)_3 + K^+ + 2SO_4^{2-} + 3H^+ \rightarrow KFe_3(SO_4)_2(OH)_6 + 3H_2O$$

Le jarosite ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) a une couleur typique dans les sols acides sulfatés qui ressemble à la couleur de paille. La présence de jarosite signifie une très forte acidification.

▪ Réactions finales
Après une longue période d'évolution, l'acidité qui s'est formée sera diluée par le lessivage du sol. Le jarosite sera hydrolysé en hydroxyde de fer, le pH de l'horizon monte et la couleur évolue de jaune vers rouge-brunâtre.

Thionic Fluvisols

Dans le delta on peut retrouver des sols sulfatés acides (Thionic Fluvisols) en différents stades d'évolution.

A fin de faciliter la discussion, les différents stades d'évolution des sols dans le delta seront discutés à l'aide des pictogrammes qui indiquent de façon qualitative, la présence et l'intensité des différents produits de référence, qui ont leur importance pour l'identification des types de sol. La légende est donnée dans la Figure 30.

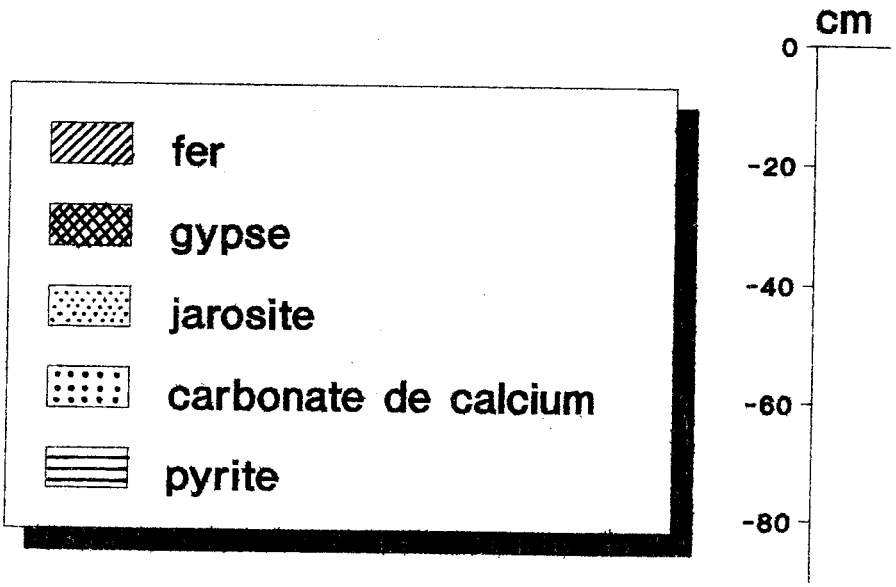
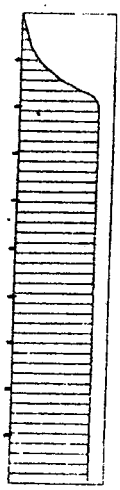


Figure 30.
Légende des pictogrammes.

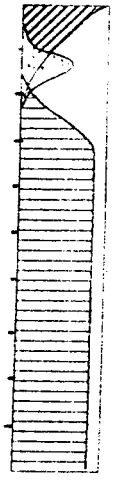
▪ Stade No 1
Thionic Fluvisol frais (Acidité potentielle haute, acidité actuelle basse, pH neutre)



Le sol est continuellement inondé. Des conditions réduites résultent à une couleur noire dans les horizons qui contiennent le pyrite. La plus grande partie de S dans le profil est présent sous forme de pyrite.

Figure 31.
Thionic Fluvisol frais.

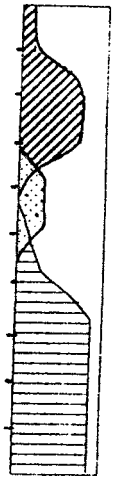
▪ Stade No 2
Thionic Fluvisol peu évolué (Acidité potentielle haute, acidité actuelle moyenne, pH bas)



Suite a une oxydation de la couche supérieure les couleurs varient entre ocre à la surface ($Fe(OH)_3$ et Fe_2O_3), jaune aux couches peu pro-fondes (jarosite) et noire dans le sous-sol (pyrite). Dans la couche superficielle tout le pyrite est déjà oxydé. La couleur jaune de la couche antérieure indique une acidification maximale avec une formation abondante de jaro-site. Dans cet horizon une partie de l'élément S se présente toujours sous forme d'acidité potentielle (fraction pyrite). Le taux du pH est une mesure de l'acidité actuelle qui s'est déjà formée.

Figure 32.
Thionic Fluvisol peu évolué.

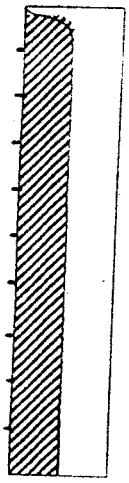
▪ Stade No 3
Thionic Fluvisol évolué (Acidité potentielle moyenne, acidité actuelle haute, pH bas)



Dans ce stade la couleur dominante est celle du jarosite. Une grande partie du pyrite du profil est transformée en jarosite. Il existe donc un taux élevé d'acidité actuelle et un niveau bas d'acidité potentielle. Dans les couches à grande profondeur on trouve très souvent des taux élevés de pyrite, qui n'ont pas trop d'importance pour l'agriculture.

Figure 33.
Thionic Fluvisol évolué.

▪ Stade No 4
Thionic Fluvisol neutralisé (Acidité potentielle et actuelle basse, pH neutre)



Ce stade est caractérisé par une absence totale de pyrites et de jarosite. La couleur dominante est rouge dans les sols bien drainés à cause d'une dominance de hématite (Fe_2O_3, brun) ou hydroxydes de fer ($Fe(OH)_3$, rouge). En conditions plus humides ces produits sont transformés en goethite (FeOOH) qui a une couleur brun-jaunâtre.

Figure 34.
Thionic Fluvisol neutralisé.

3.2. Echantillonnage et analyse

Sites d'échantillonnage

Les sites d'échantillonnage ont été choisis sur la base des paysages pédologiques décrits dans la Figure 35. Le choix des huit sites a été fait sur la base de la littérature (FAO, 1969), Le Brusq (1980), Van Lavieren et Van Wetten (1988) d'une part et de la connaissance du terrain d'autre part. Comme le montre la Figure 35, les pédo-paysages les plus importants ont étés étudiés en traçant des traverses représentatives à chaque site. En tout dix traverses ont étés étudiées:

- **NDioll (ND)**
Une traverse qui démontre une topo-séquence typique des Thionic Fluvisols déjà évolués.

- **Tamach (TAM)**
Tamach se trouve dans une dépression en direction SO-NE où différents facteurs de développement pédologiques coïncident. Le site a été couvert de mangroves. Puis il y a eu l'influence de l'homme qui s'est manifesté déjà dans la pré-histoire, comme témoignent les grands dépôts de coquillages (Kiöke moding) et les artefacts archéologiques qui se trouvent sur les terrasses marines. Plus récemment des efforts ont été faits pour installer des périmètres d'irrigation sans succès.

- **Savoigne (SA)**
Ici les racines de mangroves fossiles indiquent une accumulation historique d'acidité potentielle. En étant proche d'une terrasse marine, des strates sableuses se sont déposées sous un régime de régression. De plus des quantités de coquillages ont été retrouvées. Ce site est irrigué depuis une dizaine d'années.

- **NDelle-NDiaye (NDND)**
Ces sites ont connu une histoire de mangroves, mais ont été sous irrigation plus ou moins intensive pendant des années.

- **Khant (KH)**
Une dépression dont la physiographie est comparable à celle de NDiaell.

- **NGuine (NG)**
Dépression entre deux dunes en direction SO-NO. La situation est plus ou moins comparable à celle de NDiaell et Khant. La différence principale est la présence à NGuine d'une terrasse marine dont l'influence sera évaluée. Les

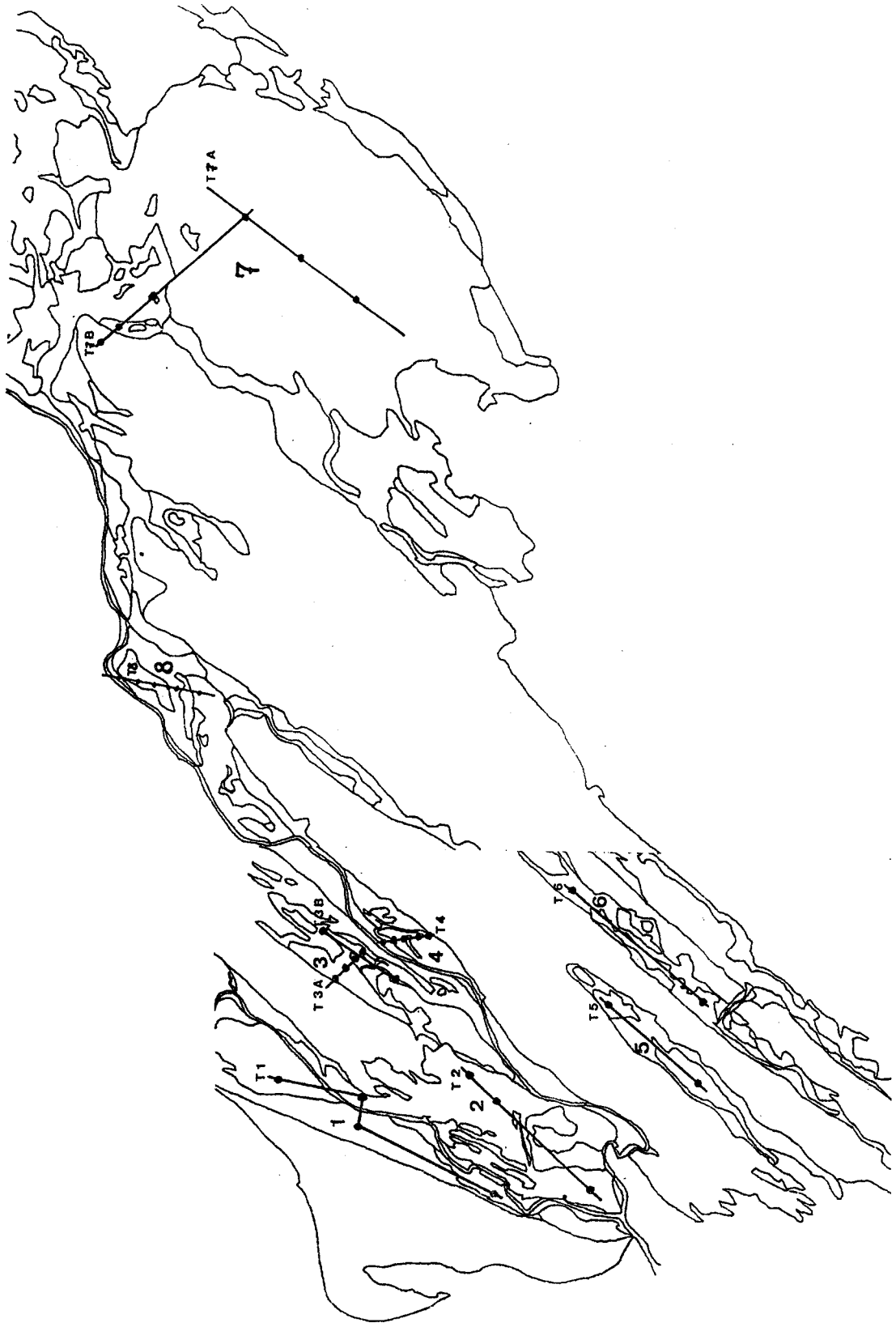


Figure 35.
Les sites d'échantillonnage
par rapport aux pédo-paysages dans le delta.
1. NDioll, 2. Tamach, 3. Savoigne, 4. NDelle-NDiaye,
5. Khant, 6.NGuine, 7. NDiaell, 8. Pont-Gendarme.

sols sont plus sableux et une présence de coquillages a été notée au terrain.

- **NDiaell (ND)**

Cuvette de décantation en direction SSO-NNE, où les conditions pour la formation du pyrite ont été optimales.

- **Pont-Gendarme (PG)**

Le périmètre de Pont-Gendarme donne une pédo-séquence qui est typique pour le Delta. On y trouve une levée, un delta de rupture et une cuvette de décantation. Le fait que le site ait été irrigué pendant au moins une décade a résulté en une influence anthropique assez marquée.

Observations en place

Avant de débuter la prospection par la tarière, quelques profils types ont été étudiés. Les observations par sondage ont été calibrées sur les phénomènes observés dans ces profils. Un résumé des paramètres observés à chaque point d'observation se trouve ci-dessous :

- **Facteurs extérieurs**
- Utilisation du terrain (irrigué ou non),
- Altitude, et
- Profondeur de la nappe phréatique.
- **Paramètres qui indiquent la présence d'une acidité potentielle ou actuelle**
- Profondeur des horizons,
- Texture de chaque horizon,
- Maturité de l'horizon qui donne une idée du stade évolutif du profil. Un sol acide sulfaté frais ressemble à une boue, tandis qu'un sol mur est plus ou moins consolidé. La maturité du matériel a été testé en pinçant un échantillon frais entre les doigts pour mesurer la consistance,
- Le pH au champ, par une réaction colorimétrique, et
- Présence des tâches
  - bruns-jaunâtres (goethite)
  - bruns (oxydes de fer)
  - rouges (hydroxyde de fer)
  - jaune de paille (jarosite)
  - couleur d'or du pyrite
  - jaune pâle du Soufre élémentaire
- **Paramètres qui indiquent une neutralisation de l'acidité**
- Présence des cristaux de gypse bien développés, et
- Présence du carbonate de calcium.

Analyses au laboratoire

Quand bien même les observations du terrain sont très valables, il est toujours nécessaire de supporter les

hypothèses par des analyses de laboratoire. A l'occasion de cette étude plusieurs méthodes ont été testées afin de trouver la méthodologie la plus apte aux conditions du delta. Certaines analyses ont été faites au laboratoire de pédologie de la SAED à Ross-Béthio tandis que pour d'autres les échantillons ont été analysés à la KULeuven en Belgique.

- **Détermination de l'acidité potentielle dans le sol**

- Méthode 1. Oxydation du pyrite par H_2O_2 et mesure de la baisse du pH, (Konsten, et al.,1986) :
  20 grammes de sol frais sont suspendus en 50 ml de 1M NaCl. Après une heure le pH d'équilibre est mesuré. On ajoute H_2O_2 jusqu'à ce qu'on obtienne une oxydation complète. L'excès de H_2O_2 est évaporé et le rapport eau-sol est rétabli en ajoutant de l'eau ou par évaporation. Puis le pH est déterminé.
- Méthode 2. Oxydation du pyrite par H_2O_2 et mesure de la quantité de sulfate qui se forme :
  100 ml d'eau distillée est ajouté à 10 grammes de sol frais. Puis la suspension est filtrée et le taux de sulfate est mesurée par gravimétrie (après précipitation avec Baryum).
- Méthode 3. Oxydation du pyrite par H_2O_2 et détermination du taux total de S par chromatographie ionique. Cette analyse est basée sur le principe d'une différence en vitesse migratoire des ions dans un médium poreux.
- Méthode 4. Identification du pyrite au moyen de la diffraction de radiation X.

- **Détermination de l'acidité actuelle dans le sol**

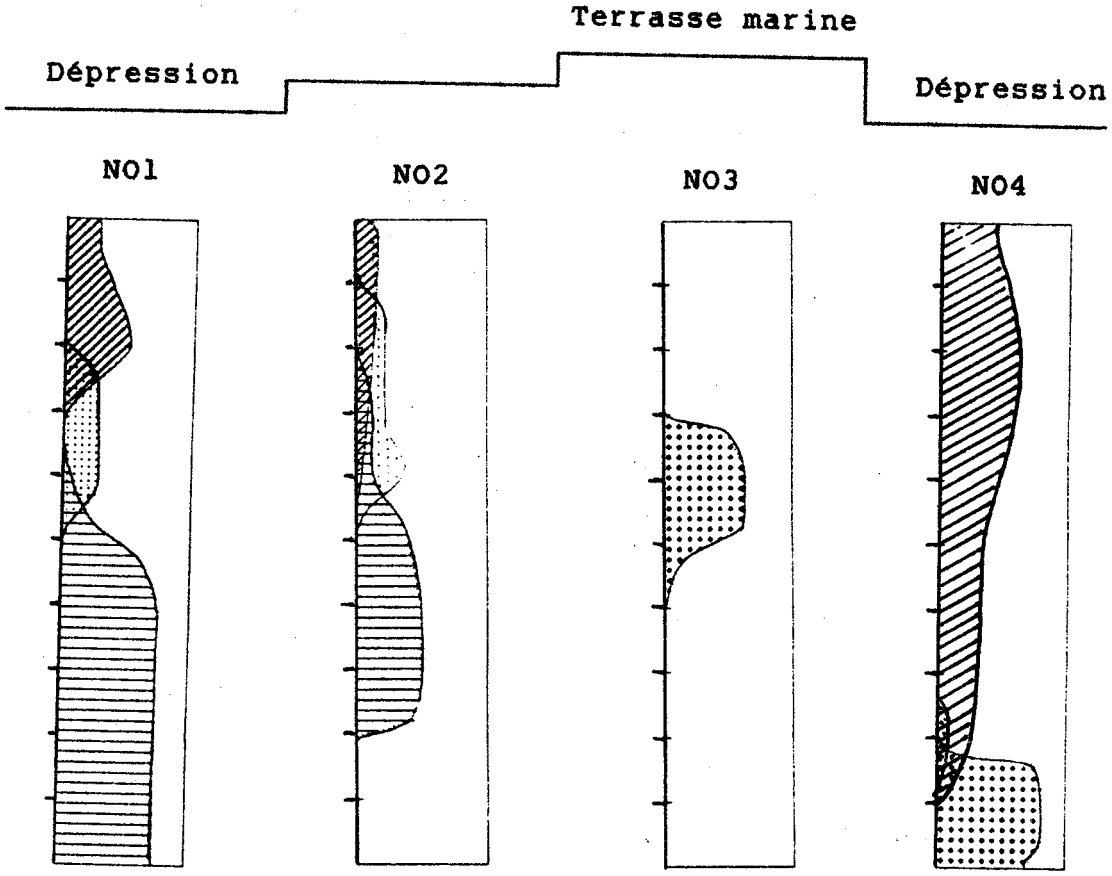
Il s'agit ici de l'horizon sulfurique où le pyrite a déjà été converti en sulfates ou en jarosite.

- Méthode 1. Détermination directe du pH, dans une suspension 1/2½ de 1M NaCl.
- Méthode 2. Détermination du jarosite par diffraction de radiation X.
- Méthode 3. Détermination des sulfates par chromatographie ionographique.
- Méthode 4. Détermination des sulfates par gravimétrie (après précipitation avec Baryum).

3.3. Résultats

Les détails des analyses sont regroupés par traverse en Annexe B. Sur les pages suivantes, chaque traverse échantillonnée est présentée par un croquis. Les profils sont représentés sous forme des pictogrammes (Légende: Figure 30). Dans une note explicative, l'évolution de chaque profil est discutée en relation avec les facteurs pédogénétiques.

▪ NDioll (NO)



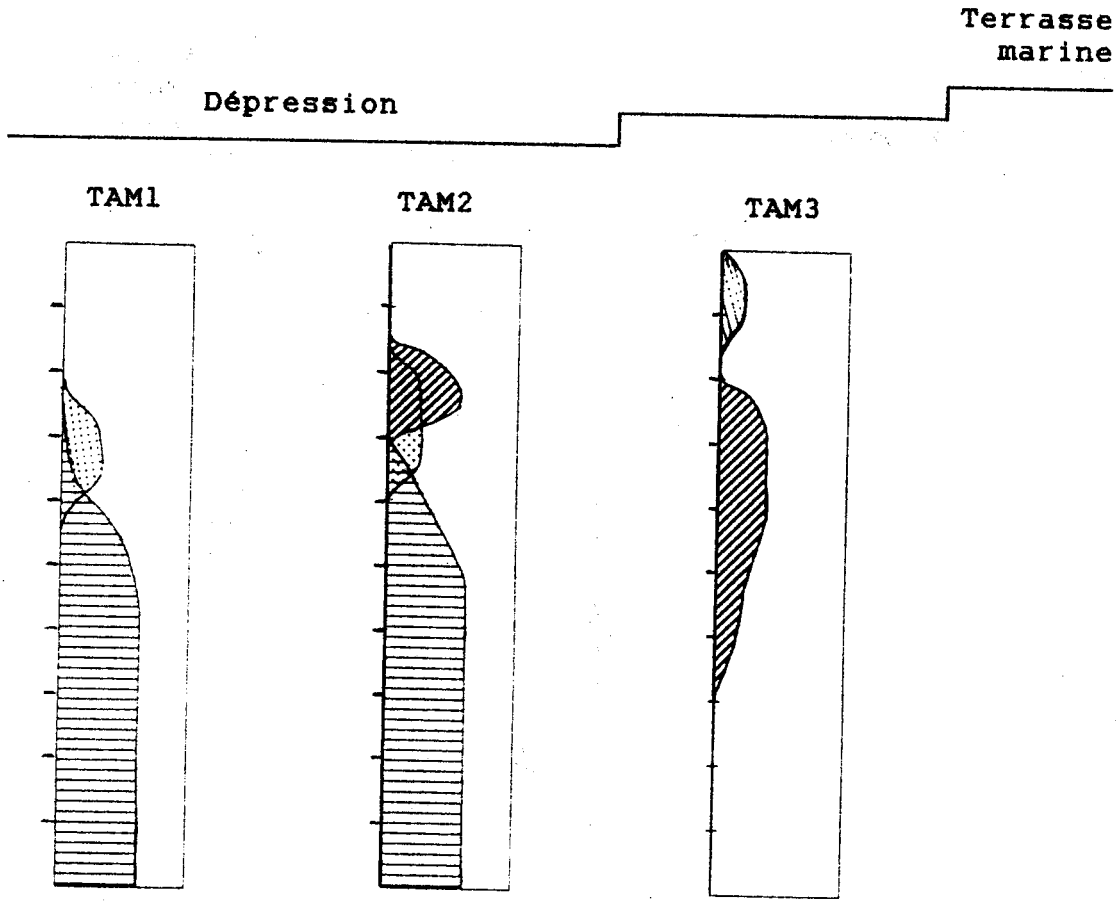
▪ Dans la **dépression** (NO1) se trouve un Thionic Fluvisol typique avec un horizon de jarosite qui commence à 40 cm de profondeur. Une quantité considérable d'acidité potentielle se trouve à 80 cm de profondeur avec 0.73 % de S total et une baisse du pH de 3.44 à 2.67.

▪ Le profil NO2 est une **transition vers la terrasse marine**. La teneur en acidité actuelle et potentielle n'a jamais été aussi élevée que dans la dépression (S total de 0.23).

▪ Sur la **terrasse marine** (NO3) il n'y a pas de problème d'acidité.

▪ Le profil NO4 est typiquement un Thionic Fluvisol évolué presque neutralisé. L'abondance de coquillages sur cette localité explique pourquoi toute acidité potentielle a déjà disparu. Il reste encore une faible quantité d'acidité actuelle.

▪ Tamach (TAM)

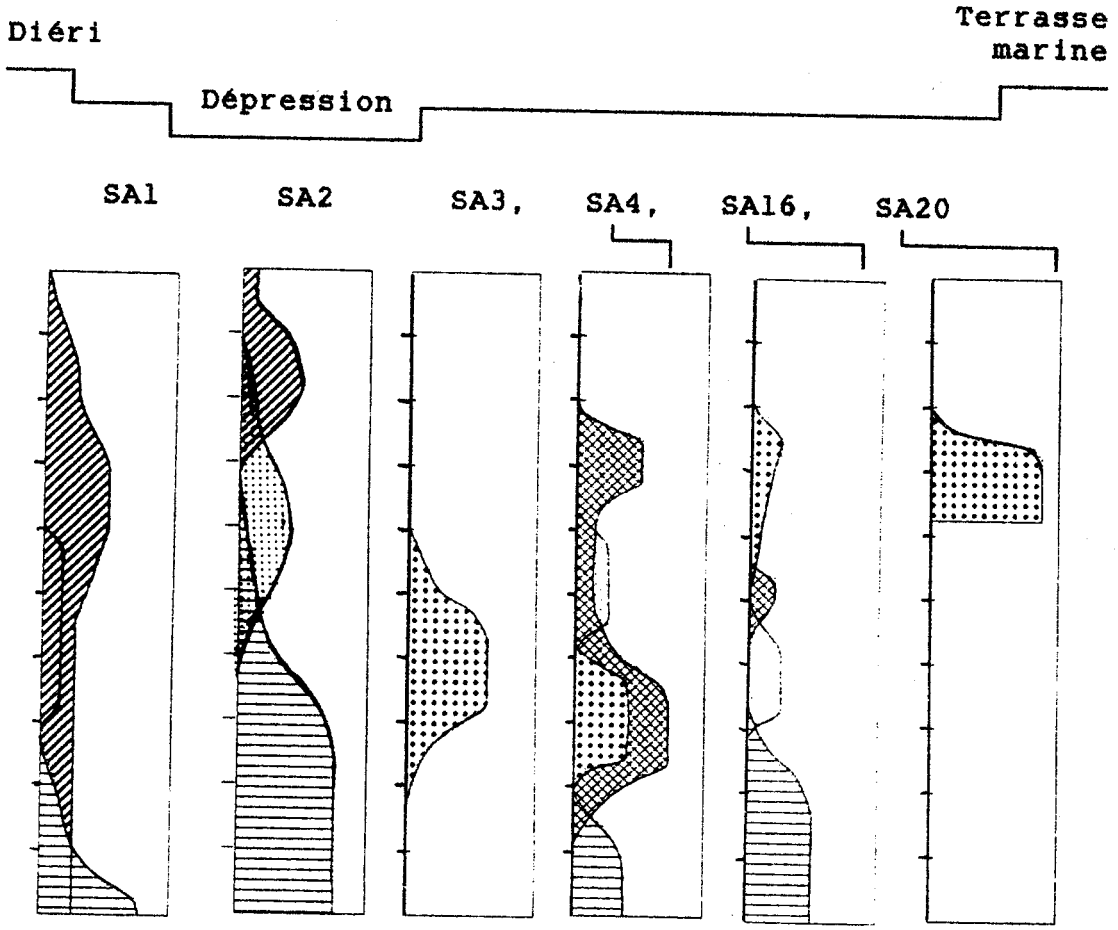


La présence des racines de mangrove dans les profils indiquent une fixation de S dans le passé. La présence des terrasses marines et des dunes rouges a aussi eu son importance. Les sols sont donc sensiblement plus légers. Plusieurs tentatives ont été faites pour cultiver le riz dans cette zone. Après un maximum de deux années les champs étaient abandonnés.

▪ Dans la **dépression** (TAM1 et TAM2), on trouve toujours de l'acidité actuelle (pH de champs entre 3.5 et 4.0). Le taux de S total est de 0.38 % ce qui n'est pas suffisant pour classifier ces sols dans le groupe des Thionic Fluvisols. Le fait que le pH dans le sous-sol baisse en dessous de 2.5 après oxydation (H_2O_2), indique qu'il reste toujours une quantité d'acidité potentielle.

▪ Le profil TAM3 se situe **entre la dépression et la terrasse marine**. Il est logique qu'on trouve un sol qui n'a jamais contenu beaucoup d'acidité potentielle. Par la présence des coquillages cette acidité est pour la plus grande partie neutralisée.

▪ Savoigne (SA)

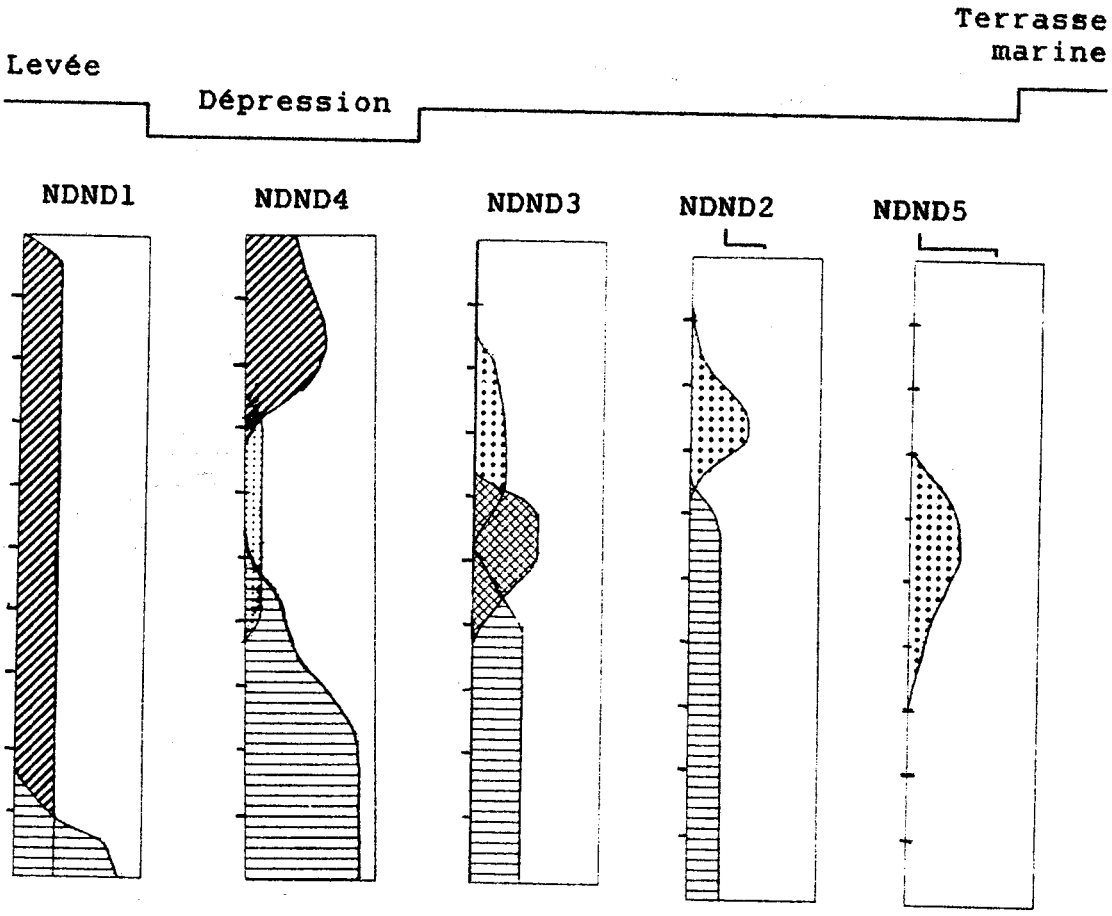


▪ La **zone transitoire entre le Diéri et la dépression** à SA1 consiste clairement en du sable rouge d'origine éolienne qui a couvert une partie d'une cuvette de décantation. Une acidité potentielle est présente à grande profondeur, mais n'a aucune importance pour l'agriculture.

▪ Dans la **dépression** (SA2), se trouve un Thionic Fluvisol évolué qui contient beaucoup de jarosite et de pyrite. Le taux total de S à la profondeur de 60 à 100 cm est 0.55 % et la chute du pH après traitement avec H_2O_2 est de 3.62 à 3.06.

▪ La situation **près de la terrasse maritime** varie fortement d'une localité à l'autre. Les profils SA3 et SA20 ne contiennent ni d'acidité actuelle, ni potentielle. La réserve en coquillages est grande. 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.

▪ NDelle NDiaye (NDND)

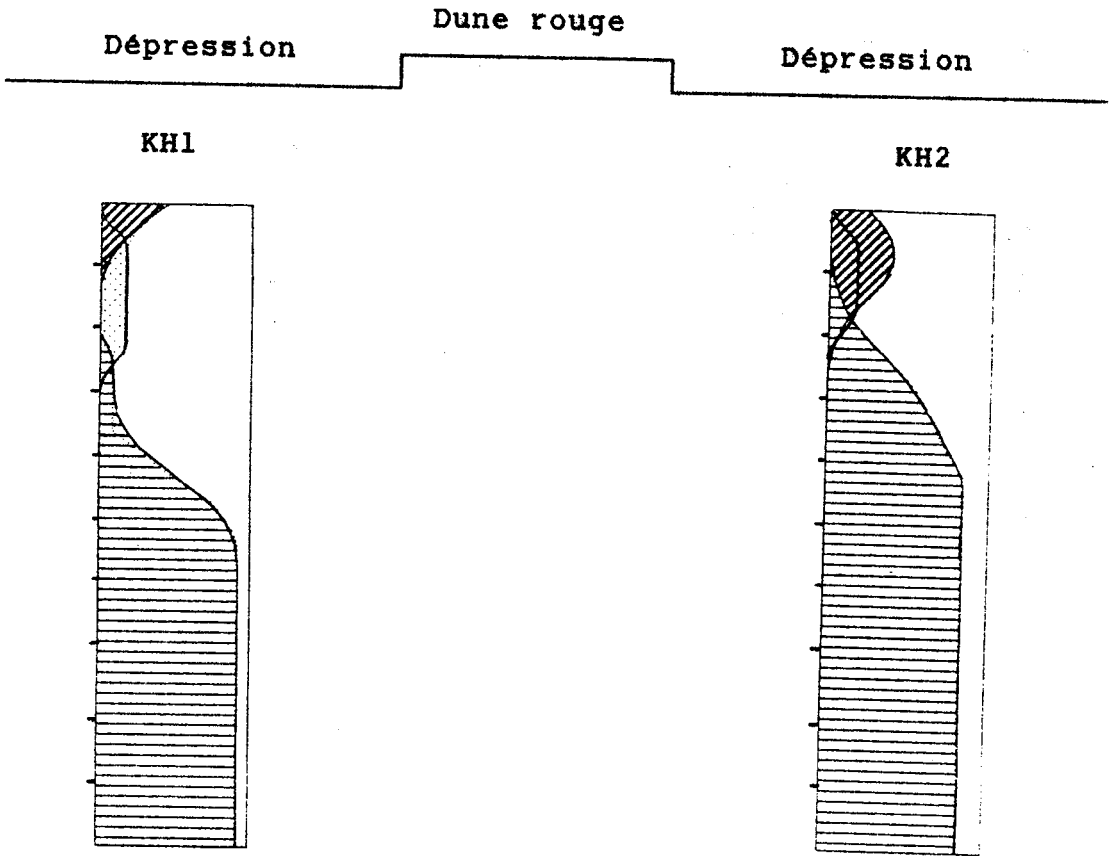


▪ En accord avec le développement d'une **levée**, il n'y a presque pas d'acidité actuelle et potentielle dans le profil NDND1.

▪ Dans la **dépression** par contre (NDND4) on trouve toujours une quantité non négligeable de S total (jusqu'à 0.55 % dans l'horizon de 50 à 110 cm). La chute du pH après oxydation avec H_2O_2 indique la présence d'une acidité potentielle. Le jarosite est présent à 50 cm de profondeur, tandis que la couche de la pyrite apparait entre 80 et 110 cm.

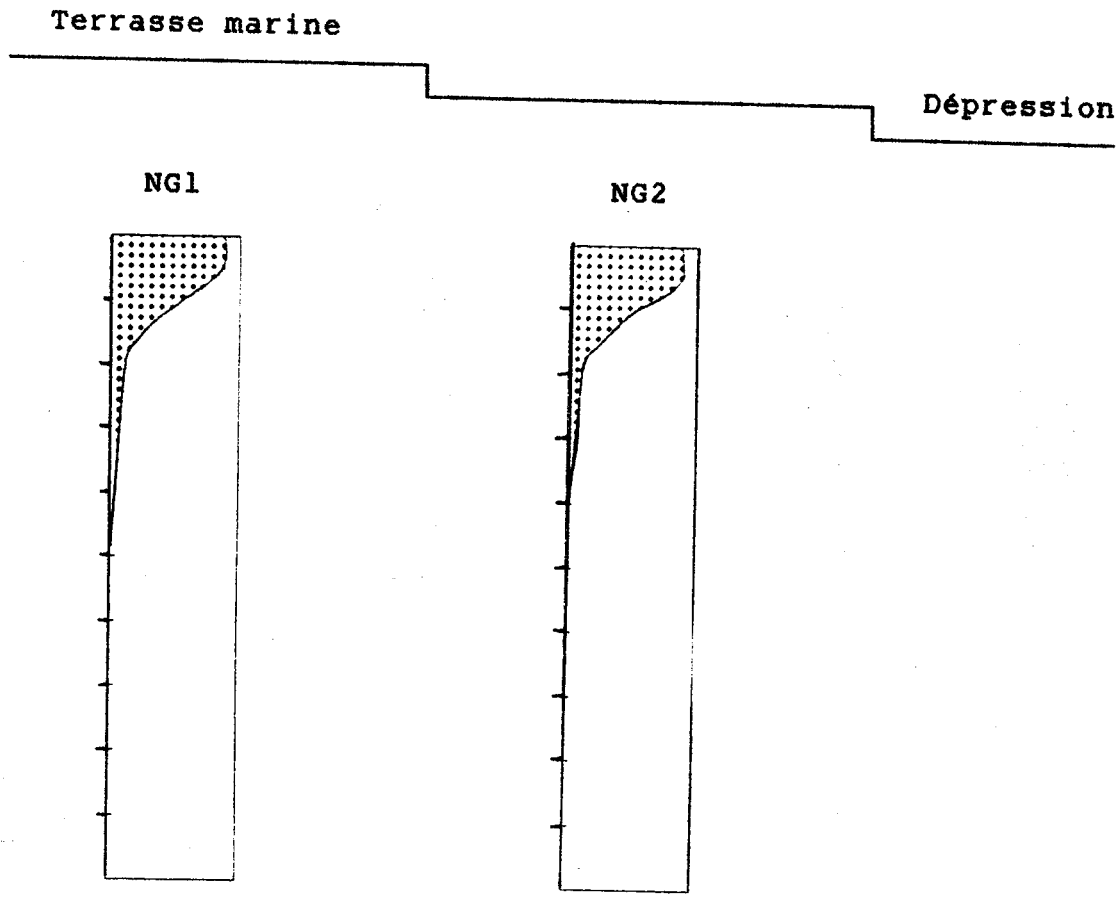
▪ Les profils NDND3, NDND2 et NDND5 représentent la **zone transitoire entre la dépression et une terrasse marine.** Les sols sont plus sableux et les conditions étaient moins favorables pour la fixation de S. La plupart de l'acidité des couches supérieures a été neutralisée par les coquillages. Les profils NDND3, NDND2, et NDND5 montrent qu'il existe une grande variabilité spatiale dans cette zone de transition. On y trouve toujours des sols qui contiennent une acidité potentielle dans le sous-sol NDND3 et NDND2, tandis que le profil NDND5 n'a probablement jamais connu d'acidité.

▪ Khant (KH)



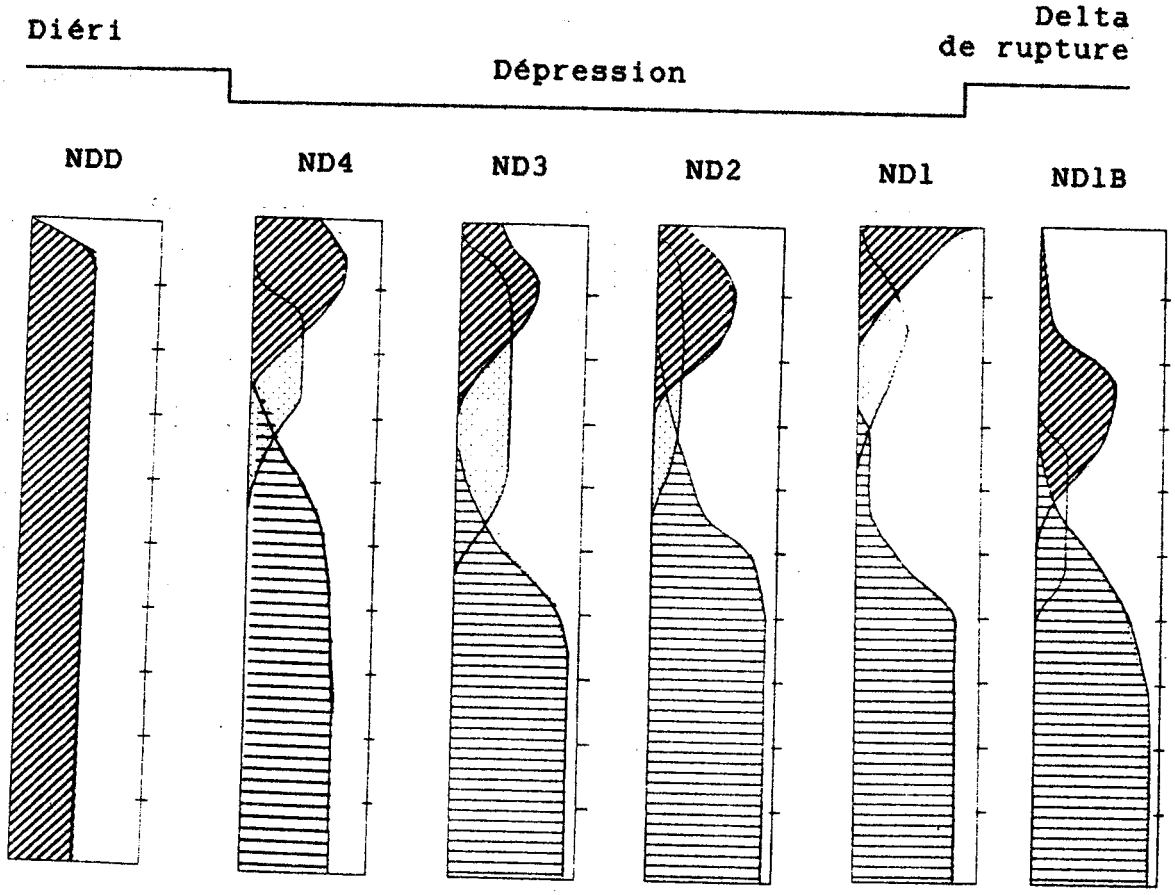
Le relief à Khant est comparable avec NDiaell. Les deux profils (KH1 et KH2) se trouvent dans la **dépression**. Les conditions ont étés favorables pour la formation de la pyrite dans le sol pendant plusieurs siècles. Les couches de jarosite et de pyrite ne se dissipent presque pas, ce qui indique une nappe phréatique assez stable à Khant. Le jarosite commence déjà à quelques centimètres de profondeur. La couche de pyrite se situe à faible profondeur (40 cm). Les pH de terrain mesurent entre 3.0 et 3.5 et le taux de S varie entre 0.81 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 clairement des Thionic Fluvisols peu évolués.

▪ NGuine (NG)



Le site de NGuine se situe dans une dépression interdunale dans le complexe des trois marigots. La zone est connue pour ses sites archéologiques. On y trouve des établissements pré-historiques de pêcheurs sur les terrasses marines. Ils mangeaient des huîtres qui poussent sur les racines aériennes des mangroves. Les déchets des coquillages sont tassés le long de la terrasse marine. Le profil NG1 se trouve sur la **terrasse marine** tandis que NG2 représente la **zone transitoire entre la terrasse marine et la dépression**. Le taux total de S varie entre 0.08 et 0.13 %. Le pH est assez élevé (7.5 - 7.8). Les chiffres des analyses confirment clairement qu'à NGuine il n'y a jamais eu beaucoup de fixation de S dans le sous-sol, ce qui est en accord avec le développement du pédo-paysage d'une terrasse marine. La moindre quantité de S qui aurait pu être fixée, est déjà neutralisée par l'abondance des coquillages dans ce milieu.

▪ NDiaell (ND)

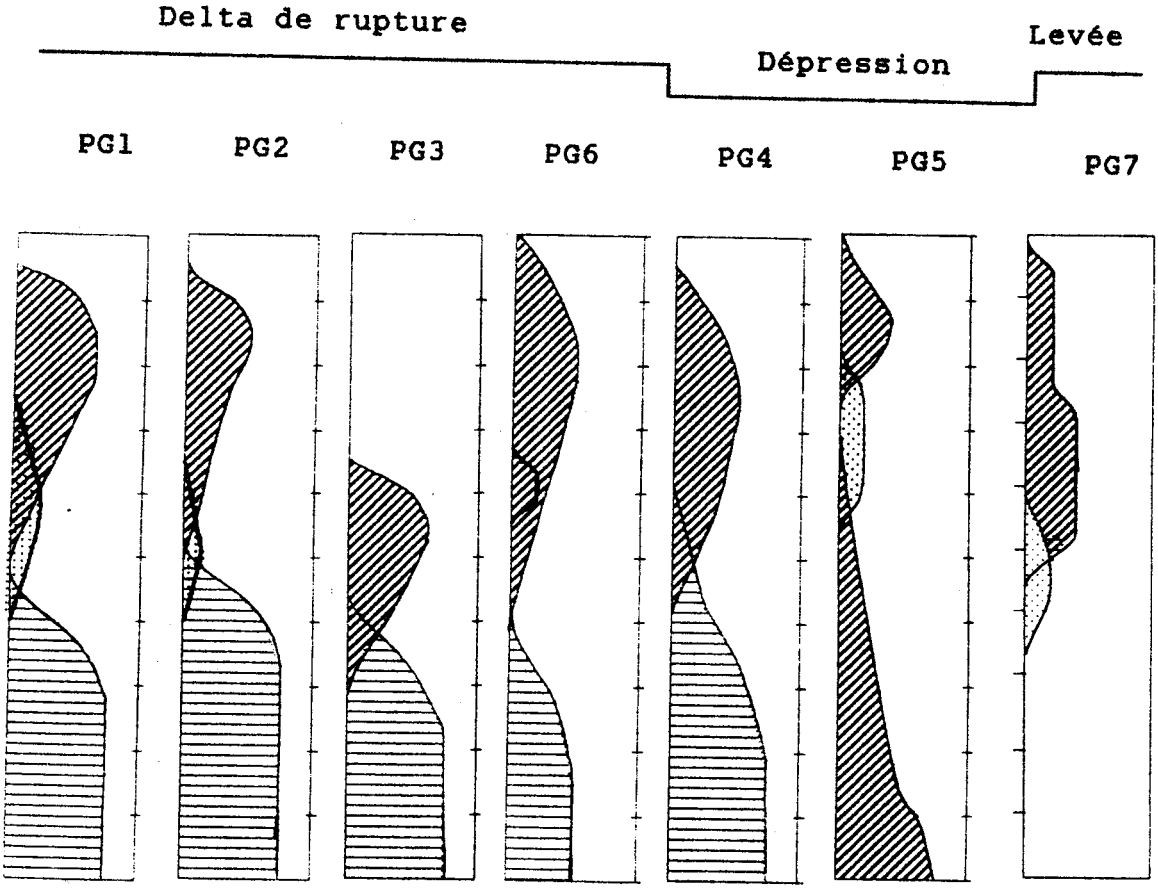


▪ Dans la **dépression** (ND4, ND3, ND2, ND1) le jarosite est présent à la surface. Le pyrite se trouve à une profondeur de 60 à 80 cm. Les deux couches se dissipent là où ils se rencontrent, ce qui peut être expliqué par les fluctuations de la nappe phréatique. Dans la dépression de NDiaell, le pH mesuré au champ varie entre 2.0 et 3.5 et le taux de S entre 0.92 et 1.11 %. La présence d'une quantité considérable d'acidité potentielle est démontrée par la chute du pH en dessous de 2.5 après oxydation. Ces sols ont atteint le stade d'un Thionic Fluvisol évolué, cela veut dire que c'est un sol qui contient beaucoup d'acidité actuelle, ainsi qu'une quantité non négligeable d'acidité potentielle, même proche à la surface.

▪ Dans les sols sur le **delta de rupture** (ND1B), les couches acides potentielles et actuelles se trouvent à grande profondeur.

▪ Puisque les sols du **Diéri** (NDD) n'ont pas connu d'histoire de mangrove on ne trouve pas d'acidité.

▪ Pont-Gendarme (PG)



▪ Les profils PG1, PG2, PG3 et PG6 décrivent un **delta de rupture**. Les textures sont un peu plus légères et l'acidité se trouve à grande profondeur. Depuis 1980 tout le terrain a été irrigué.

▪ Il est un peu surprenant que dans la **dépression** (PG4 et PG5) le taux de S-total soit tellement bas (PG5: 0.07 % à 50/90 cm). La raison est sans doute l'influence bénéficiaire 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.

3.4 Evolution

Acidité actuelle

La Figure 36 montre l'évolution de l'acidité actuelle du profil dans une cuvette (Pont-Gendarme) qui a été irriguée depuis 1980.

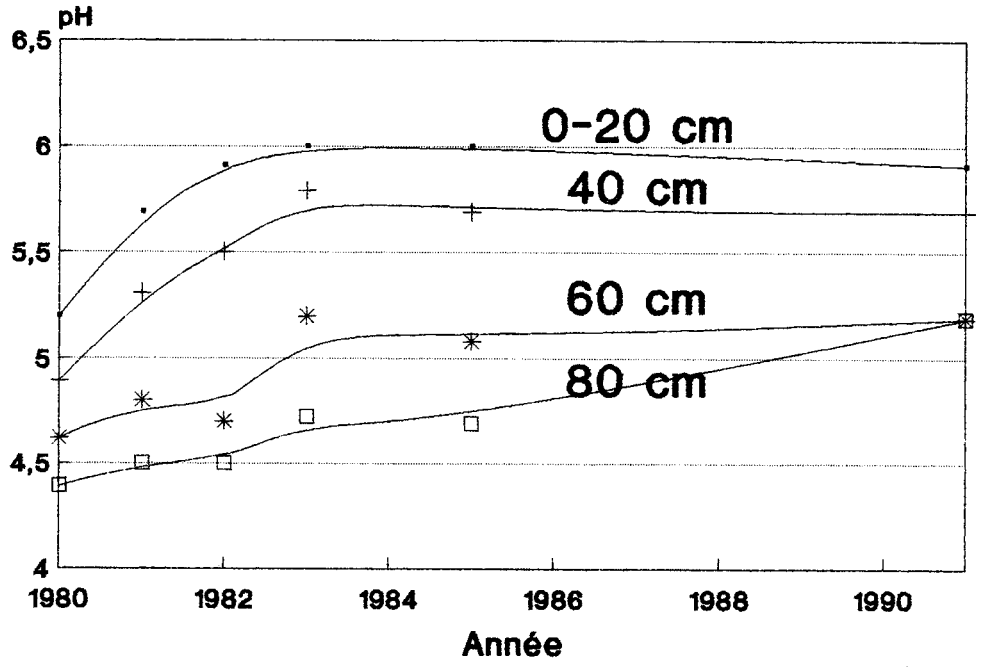


Figure 36.
Evolution du pH dans le sol à Pont-Gendarme.

Le pH dans la couche supérieure est montée de 5.2 en 1980 vers 6. Depuis 1985 le pH est 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 continu d'eau d'irrigation qui a engendré un lessivage continu de l'acidité du profil.

Acidité potentielle

Le taux total de soufre dans le sous-sol est une mesure de l'acidité potentielle. La traverse étudiée à Pont-Gendarme a été aussi analysée par Loyer et Diallo (1979) en 1979. La comparaison des deux études est faite dans la

Figure 37. Le contenu de soufre est tombé considérablement sous l'influence de l'irrigation. La baisse de soufre total est maximale dans les terres qui étaient vierges en 1979 (PG1 et PG2) mais qui sont maintenant en exploitation.

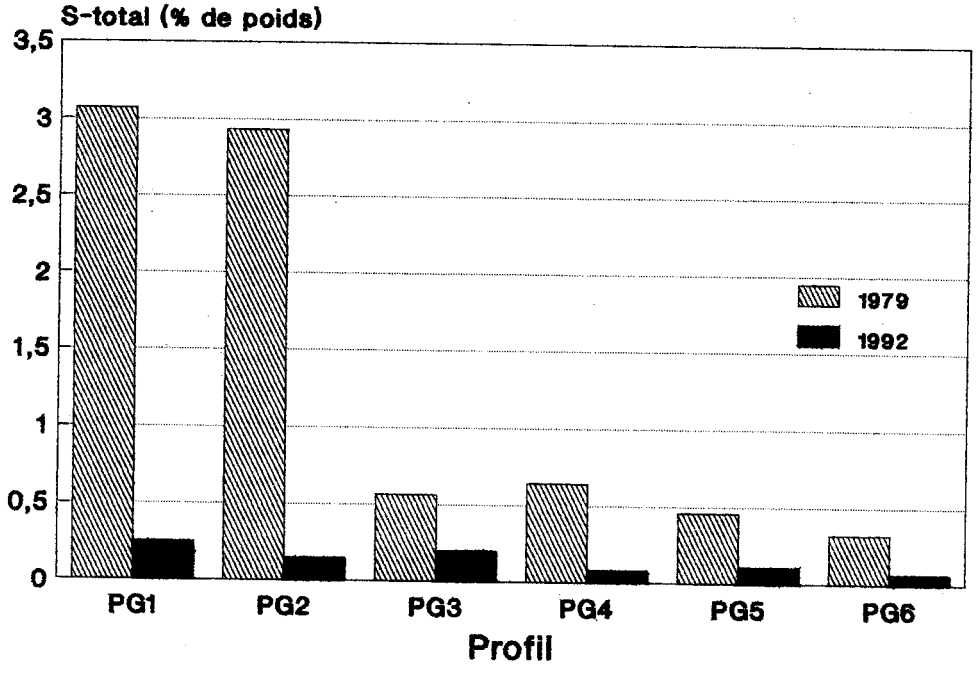


Figure 37.
Evolution de S-total dans la traverse de Pont Gendarme.

Conclusion

La pratique d'irrigation a résulté en une évolution favorable aussi bien pour l'acidité actuelle que pour l'acidité potentielle.

3.5 Conséquences pratiques

Acidité actuelle

▪ Présente au-dessous de la zone radiculaire
Dans les endroits où l'acidité actuelle est absente de la zone radiculaire, il n'existe pas de danger immédiat pour la culture. L'acidité éventuelle dans le sous-sol sera lentement lessivée par la quantité d'eau d'irrigation qui infiltre hors de la zone radiculaire.

▪ Présente dans la zone radiculaire
Avant d'être mis en culture les sols où l'acidité actuelle (pH en dessous de 5.5) est présente dans la zone radiculaire, un chaulage doit être effectué. Un apport de 10 à 15 tonnes de coquillages moulus, mettra le pH de la zone radiculaire au niveau optimal (entre 6 et 7). Les coquillages sont présents partout dans le delta, mais la faisabilité du chaulage dépendra du coût de transport et du traitement des coquillages.

Acidité potentielle

Un taux élevé de pyrite se trouve à faible profondeur dans le sous-sol d'un grand nombre de sols. Cette couche d'acidité potentielle est localisée dans la zone peu aérée de la nappe phréatique. Une baisse artificielle de la nappe par un drainage souterrain devrait donc être évitée. Ceci pourrait engendrer l'oxydation de la pyrite avec la formation de l'acide sulfurique (H_2SO_4). Une fois de grandes quantités d'H_2SO_4 formées, le pH descend si bas (pH 2.5) que des quantités énormes de chaux seront nécessaires pour remettre le sol de nouveau en culture. Une baisse de la nappe phréatique par un drainage souterrain est donc à éviter si une acidité potentielle existe dans le sous-sol.

Aptitude des sols

Une évaluation de l'aptitude des sols au riz irrigué est présentée dans la Figure 38. Cette évaluation est uniquement basée sur la présence d'une acidité actuelle et/ou potentielle dans le sol et ne tient pas compte d'autres déficiences des terres, comme des déficiences dues à l'excès de sels, de la topographie, du drainage, etc.

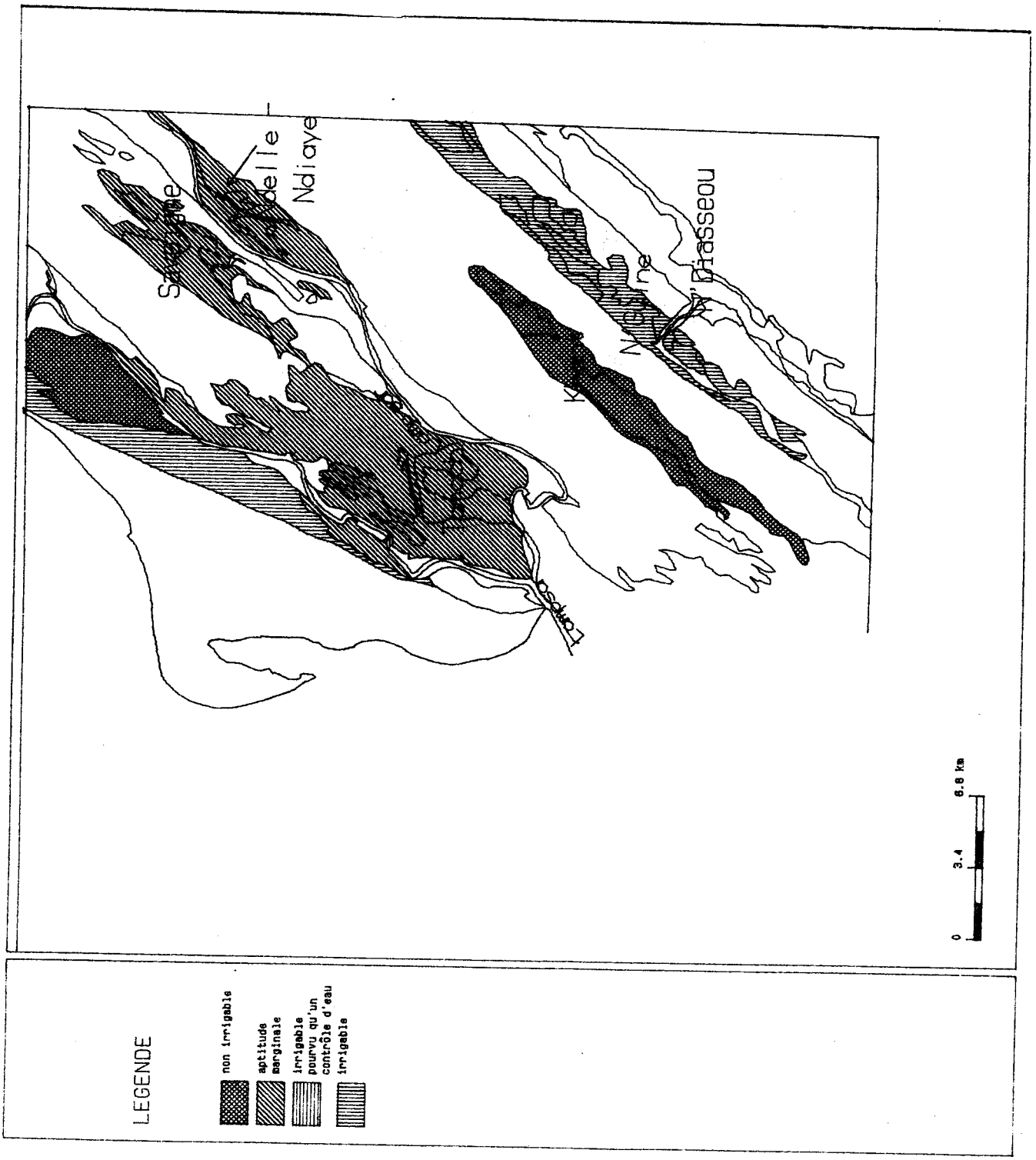


Figure 38a
Aptitude des terres du delta du Sénégal à la riziculture, basée sur la présence ou non d'acide.

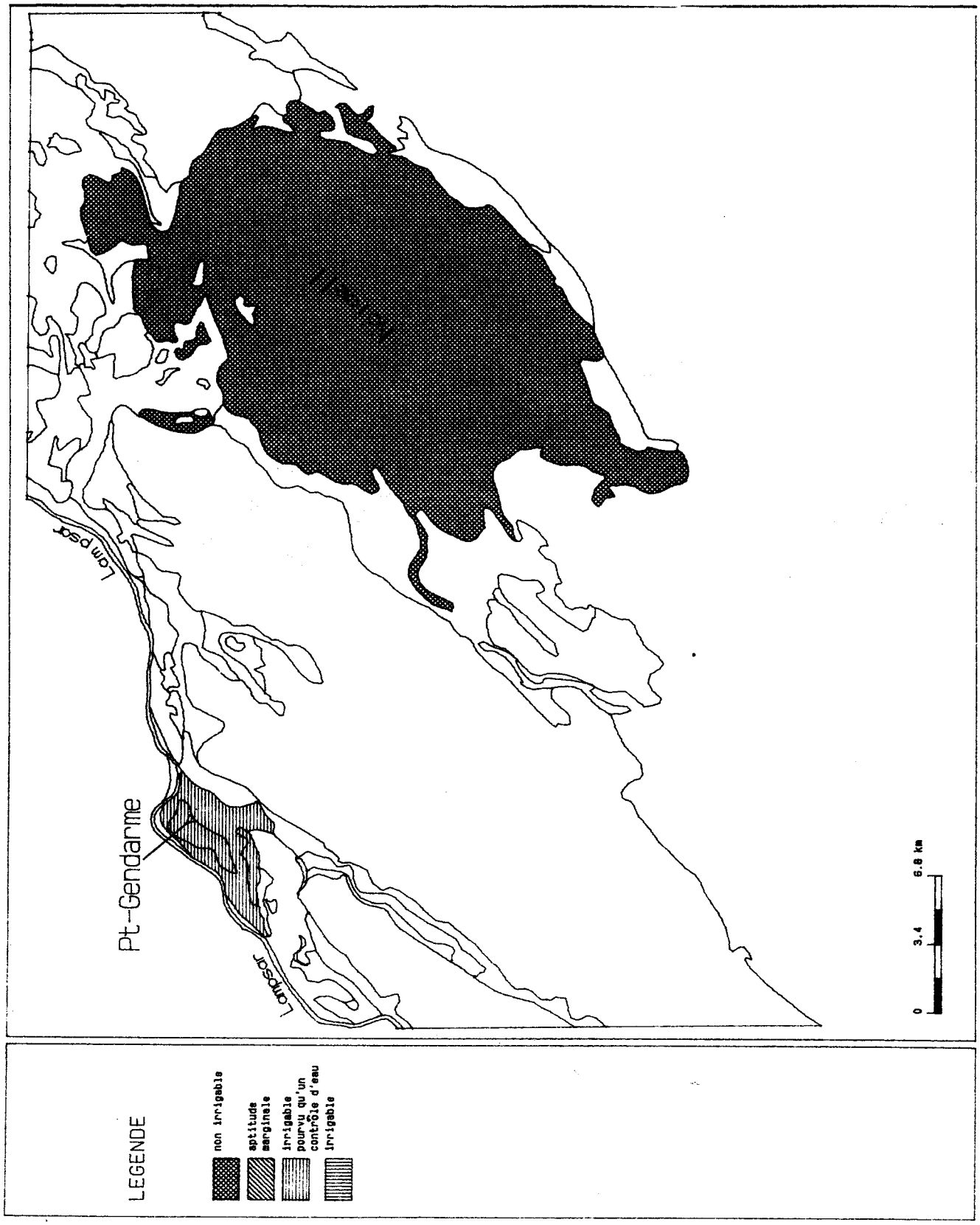


Figure 38b
Aptitude des terres du delta du Sénégal à la riziculture, basée sur la présence ou non d'acide.

Chapitre 4
La salinité

4.1. Problématique

Le chapitre 1 décrit l'origine de la grande quantité des sels dans les sols du delta. La salinité a une influence directe sur la croissance des cultures par l'augmentation de la pression osmotique dans le milieu racinaire. Aussi l'équilibre ionique dans l'environnement racinaire, est-il crucial pour une absorption équilibrée des minéraux. En fortes doses, certains ions peuvent devenir toxiques pour la plante ou peuvent affecter les conditions physiques du sol.

Une évacuation des sels solubles est donc nécessaire afin de mettre le terrain en culture. Cette évacuation doit se faire de façon continue parce que pendant la saison sèche l'eau chargée de sels monte de la nappe phréatique vers la surface (voir 2.4). En fonction de l'intensité culturale, du type de sol, de la profondeur et du degré de salinité de la nappe, l'apport en sel est de l'ordre de 1 à 4 tonnes/ha.an selon nos estimations (Figures 26 et 27).

Les rizières sont désalinisées par une percolation de l'eau douce de l'irrigation à travers la zone racinaire et par une évacuation de la lame d'eau devenue saumâtre par une dissolution des sels. Dans les périmètres de la SAED, le drainage de surface est pratiqué systématiquement pendant la saison de croissance. Par contre dans les périmètres privés le drainage de surface se fait moins régulièrement. Le résultat est que parfois les champs situés sur des terrains très salés et peu perméables doivent être abandonnés après quelques années de culture à cause d'une salinisation.

L'influence de la salinité sur le rendement des cultures est fonction du stade de croissance. Le riz par exemple est très tolérant à la salinité en phase de germination, mais est sensible au début du stade de végétation. Le stade le plus sensible se situe entre la montaison et la floraison.

4.2 Qualité de l'eau

La qualité de l'eau d'irrigation joue un rôle important dans la désalinisation des sols. L'aptitude de l'eau pour

l'irrigation dépend de sa salinité, représentée par la conductivité électrique, et de sa teneur en Na^+. La classification des eaux d'irrigation se fait par le diagramme de Riverside (Figure 39).

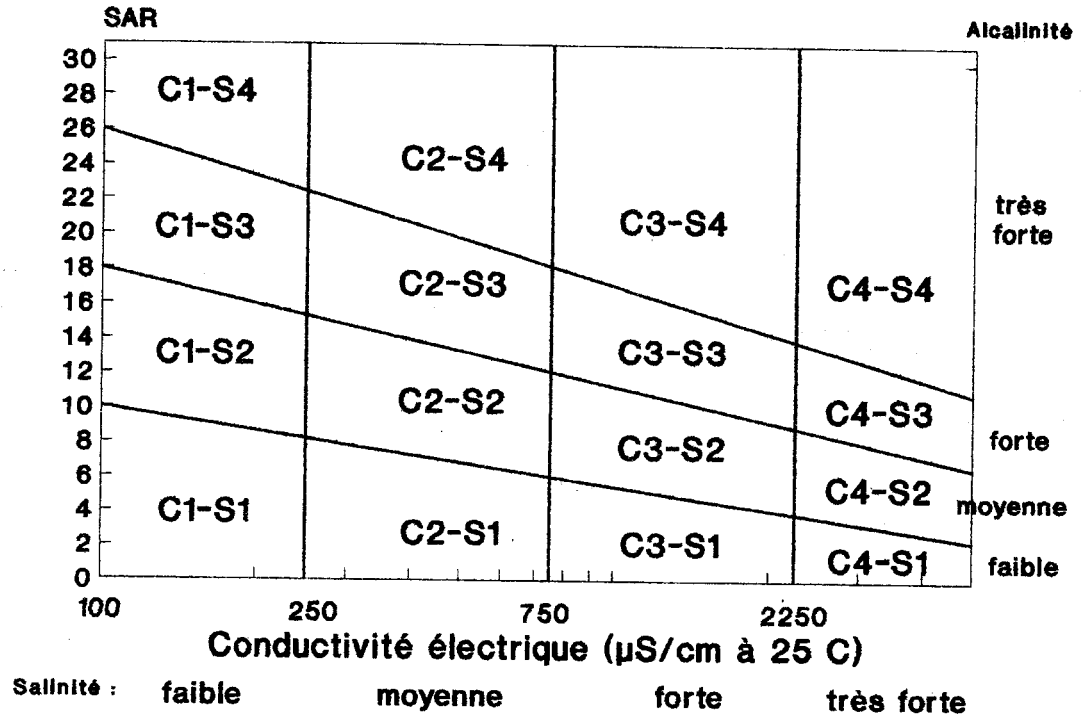


Figure 39.
Diagramme de Riverside.

- **La salinité** a une influence directe sur la croissance des cultures. Pour l'irrigation en général il ne se pose pas de problème si la salinité est moins que 750 µS/cm. Dès problèmes sévères se présentent si la conductivité dépasse 3 dS/m. Dans le delta, le riz tolère sans dommage une salinité de l'eau de l'ordre de 1 à 1.5 dS/m. Au delà et jusqu'à 4 dS/m, la baisse du rendement potentiel de 7 ton/ha est de 1 à 1.5 ton, pour chaque augmentation de la salinité d'une unité en dS/m (ADRAO/WARDA, 1993).

- Dans **l'équilibre ionique**, c'est surtout l'élément Na^+ qui joue un rôle important. L'effet de sodium dépend de la concentration des autres ions présents dans la solution, notamment le Ca^{++} et le Mg^{++}. Ceci est exprimé par le rapport :

$$SAR = Na^+ / \sqrt{[(Ca^{++} + Mg^{++})/2]}$$

où Na^+ = Concentration en Sodium en meq/l,
Ca^{++} = Concentration en Calcium en meq/l,
Mg^{++} = Concentration en Magnesium en meq/l.

Le sodium affecte la performance des cultures de deux manières; par sa toxicité directe et par son influence sur la perméabilité du sol. Les valeurs critiques pour la SAR dépendent de la conductivité électrique de l'eau et de la tolérance des cultures.

4.3. Echantillonnage et analyse

Sites d'échantillonnage

Le Brusq et Loyer (1984) ont étudié la désalinisation de sol à la suite des irrigations dans deux cuvettes du périmètre de Lampsar. La conclusion de cette étude était que la salinité est sous contrôle dans les périmètres irrigués. Afin d'évaluer l'évolution de la salinité et la durabilité du périmètre de Lampsar après dix années de culture, quatre sites dans la cuvette de NDiaye et cinq à Pont-Gendarme ont été choisis pour notre étude en 1990 et 1991. La recherche a évalué :

- l'évolution de la salinité dans le sol,
- L'évolution des équilibres ioniques dans le sol,
- La qualité de l'eau d'irrigation,
- L'évolution de la salinité de la lame d'eau pendant la saison, et
- la salinité dans les drains.

La sélection des champs d'échantillonnage s'est faite sur la base de la carte pédologique (Le Brusq, 1980), qui contient des données sur la conductivité électrique et le pH des profils. La carte pédologique et les localités de prélèvement sont données dans les Figures 40 et 41.

En plus, en 1992, la salinité de la lame d'eau a été suivie dans des champs d'un périmètre privé dans la même zone. Dans ce périmètre, le drainage de surface est très difficile à cause d'un manque de réseau de drainage.

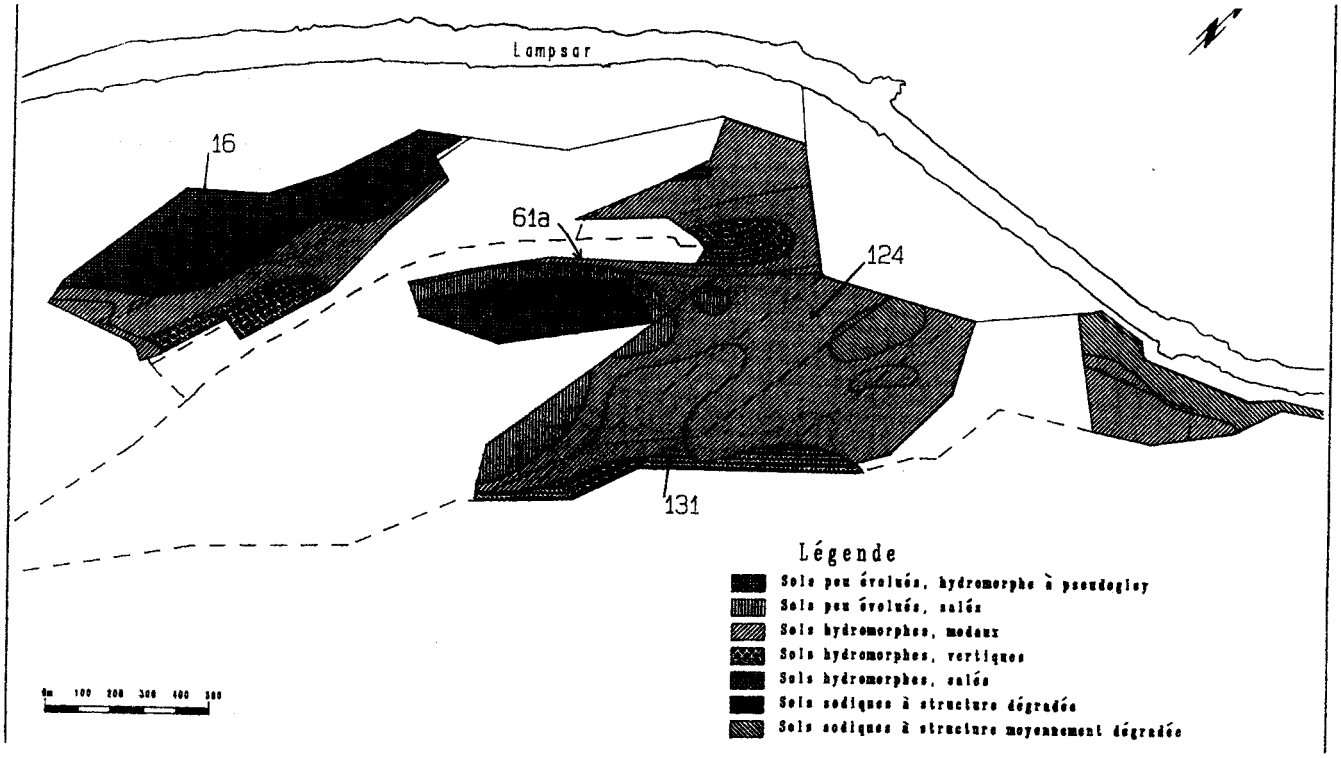


Figure 40.
Carte pédologique et localités de prélèvement de la cuvette de Ndiaye.

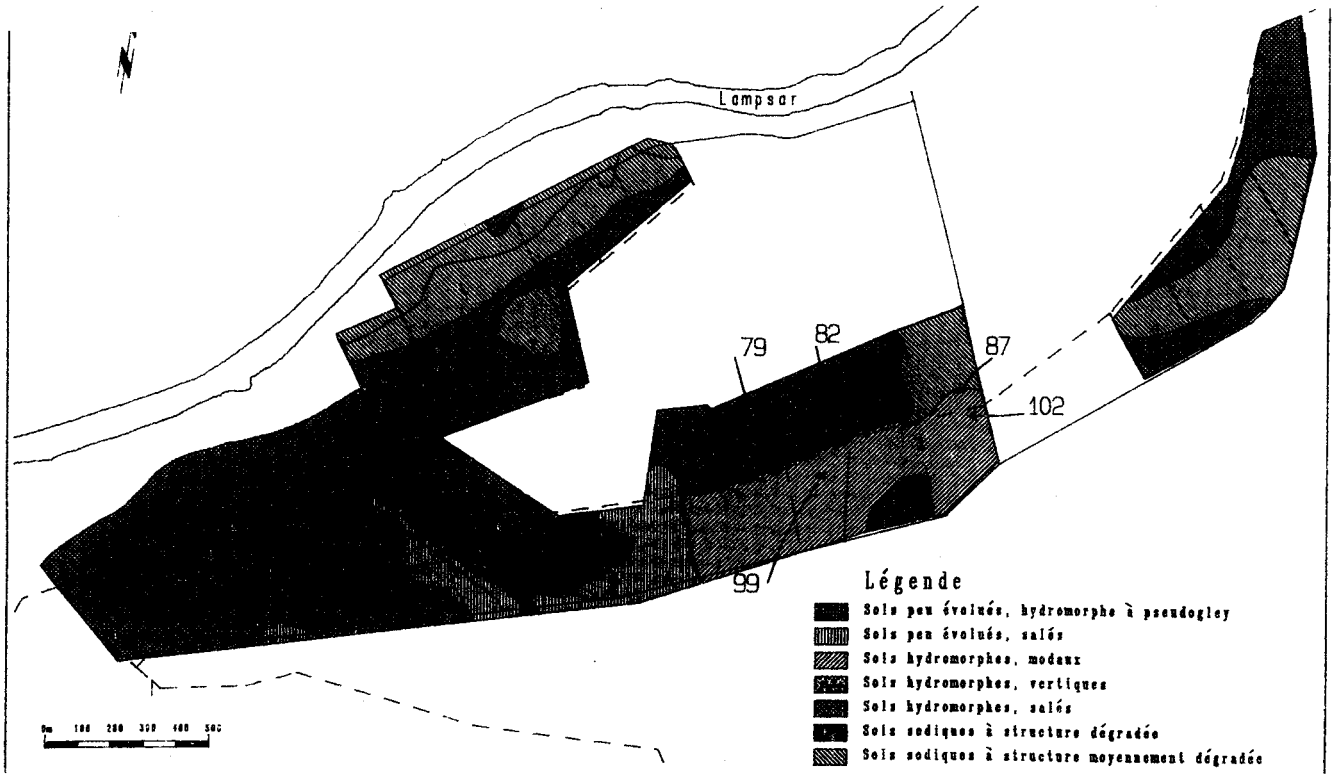


Figure 41.
Carte pédologique et localités de prélèvement de la cuvette de Pont-Gendarme.

Analyses effectuées

- **Analyses de sol**
- Conductivité électrique $EC_{1/5}$,
- pH dans une suspension aquatique de (1/2½),
- sels solubles :
  - Ca^{++} et Mg^{++} par titration avec EDTA,
  - K^{+} et Na^{+} par spectrophotométrie à flamme,
  - SO_4^{--} par gravimétrie comme $BaSO_4$, et
  - Cl^{-} par titrimétrie avec $K_2Cr_2O_7$ et $AgNO_3$
- **Analyses de la lame d'eau (échantillonnage régulier)**
  - conductivité électrique,
  - équilibre ionique.

4.4. Résultats et Discussions

Evolution de la salinité dans le sol

Les Tableaux 5 et 6 donnent l'évolution de la conductivité électrique du sol à Pont-Gendarme et à NDiaye. Les données obtenues sur des extraits aqueux 1/5 ont été converties en conductivités électriques de l'extrait saturé (ECe) à l'aide d'une relation entre la conductivité des différents extraits, développée par Loyer (1989) sur 60 échantillons représentatifs du Delta.

Tableau 5.
Evolution de la conductivité électrique de l'extrait saturé (ECe) à Pont-Gendarme.

		Champs				
		102	99	87	82	79a
Année	Profondeur (cm)	ECe (dS/m)				
1980*1	0-30	3.5-11	3.5-11	>11	>11	>11
Août '90	0-20	13.16	0.89	1.75	0.95	7.05
	20-40	15.99	0.89	1.19	0.99	2.11
Déc. '90	0-20	2.07	1.02	1.61	0.36	1.40
	20-40	3.12	2.00	2.07	0.85	1.65

*1 Données reprises de la carte pédologique (Le Brusq, 1980).

Tableau 6.
Evolution de la conductivité électrique de l'extrait saturé (ECe) à NDiaye.

		Champs			
		16	61a	124	131
Année	Profondeur (cm)	ECe (dS/m)			
1980*1	0-30	<1.65	3.5-11	1.65-3.5	<1.65
1990	0-20	1.16	0.36	2.68	17.21
	20-40	1.93	0.95	3.45	9.19

*1 Données reprises de la carte pédologique (Le Brusq).

Dans la Figure 42 l'influence sur le rendement des cultures est présentée en fonction de la conductivité électrique de l'extrait saturé (ECe). Le riz tolère une salinité modérée (modérément sensible). Les baisses de rendement correspondant à différents niveaux de salinité données par la FAO (Doorenbos and Kassam, 1979) sont : 0% pour ECe<3; 10% pour ECe=3.8; 25% pour ECe=5.1; 50% pour ECe=7.2 et 100% pour ECe=11.5 dS/m. Dans le delta, où l'évapotranspiration est tellement élevée à cause de l'aridité du climat, les baisses seront même plus importantes.

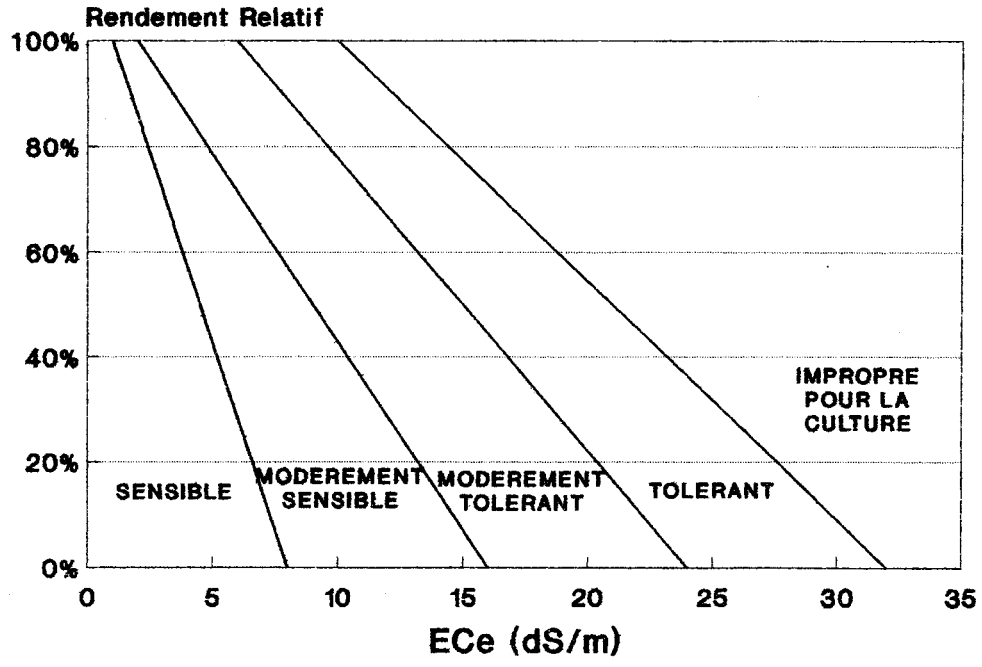


Figure 42.
Classification des cultures en fonction de leur tolérance à la salinité et l'influence de la salinité sur le rendement (Ayers and Westcot, 1985; Maas, 1984).

- **Evolution à long terme**

La comparaison des données de 1980 avec celles de 1990 montre que dans la plupart des champs, la conductivité électrique a diminué considérablement au cours d'une décennie grâce à une irrigation continuelle. Une étude plus élaborée, effectuée par A. Diallo, confirme ces résultats. Dans les Figures 43 et 44 la comparaison est faite entre la salinité de la couche superficielle à Pont-Gendarme en 1980 et la situation en 1990. Il est clair qu'il y a eu une amélioration nette de la salinité dans la plupart des champs.

- **Variation saisonnière**

Surtout là où la conductivité est haute au début de la campagne, beaucoup de sels sont évacués par lessivage ou drainage profond pendant la saison. A Pont Gendarme au champs 102 par exemple, la conductivité électrique dans la couche superficielle tombe de 13.16 avant la campagne (Août 1990) à 2.07 à la récolte de riz (Décembre 1990). La salinité n'est donc pas un facteur limitant pour la production du riz sous un bon contrôle de la salinité.

Evolution des équilibres ioniques dans le sol

La qualité du sol dépend en partie de la quantité de sels qui y sont présents. Les équilibres ioniques ont aussi leur influence sur cette qualité. L'évolution des équilibres ioniques dans le sol a été étudiée dans plusieurs cuvettes de décantation par Loyer (1989). Il a suivi les rapports entre les anions et les cations dans les sels solubles. Cette étude a montré qu'entre 1980 et 1983 une indéniable accumulation relative de sodium s'était faite. Cela impliquerait une alcalinisation dans certains endroits du delta, nécessitant une application de gypse pour neutraliser le sodium.

Les Tableaux 7 et 8 font la comparaison entre les données de Loyer (plusieurs cuvettes de décantation) et les mesures qui ont été faites à Pont-Gendarme et NDiaye dans le cadre du projet en 1990 et 1991.

Bien que les valeurs données dans les tableaux soient des moyennes de plusieurs sites d'une même position géomorphologique (Cuvette de décantation), il est intéressant d'observer quelques tendances importantes :

- **L'équilibre des cations :**

Concernant les sels solubles, Na^{+} est toujours dominant, tandis que Mg^{2+} et Ca^{2+} occupent plus ou moins le même pourcentage et K^{+} est le moins représenté. Les valeurs SAR (Sodium Absorption Ratio) sont assez basses pour ne pas poser de problèmes pour la culture du riz

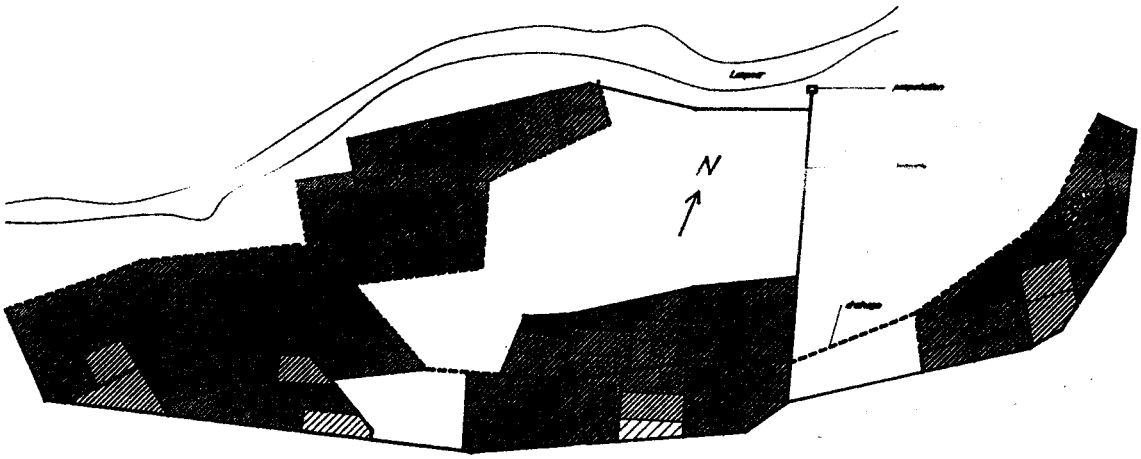


Figure 43.
Salinité du sol à Pont-Gendarme en Août 1980.

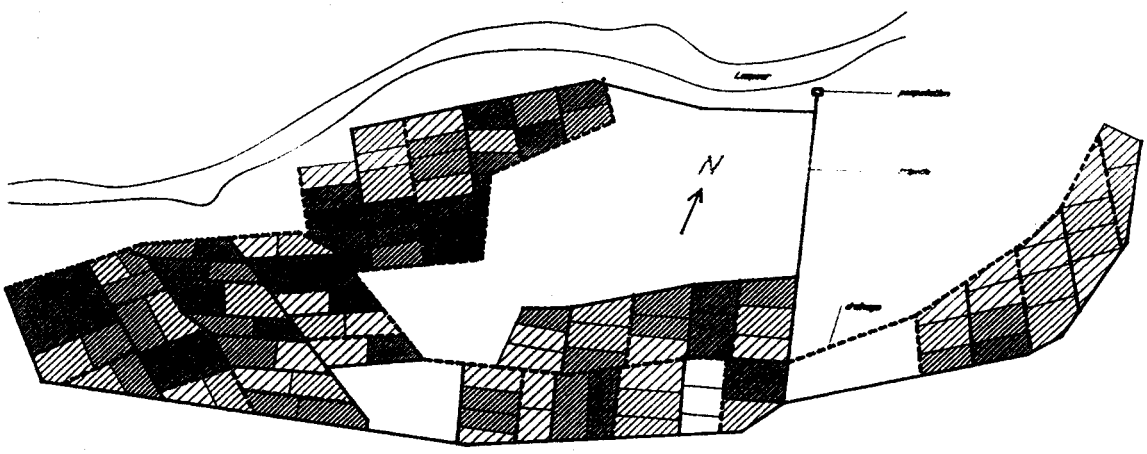


Figure 44.
Salinité du sol à Pont-Gendarme en Mai 1990.

Sol	Conductivité Electrique de l'extrait de pâte de sol saturé ECe
non salin	< 1.65 dS/m
peu salin	1.65 ... 3.5
salin	3.50 ... 7.0
très salin	7.00 ... 15
extrêmement salin	> 15 dS/m

Légende

Tableau 7.
Evolution d'équilibre ionique (couche supérieure du sol).

	Cl/SO_4	Na/Ca	Na/Mg	Ca/Mg	Na/K
	(cmol/kg = meq/100 gram)				
Loyer (1989) :					
Août 1980	3.30	4.30	3.25	0.75	13.00
Janvier'81	0.45	1.00	0.68	0.63	5.00
Janvier'82	2.00	9.20	6.60	0.70	3.45
Janvier'83	2.10	11.80	8.50	0.70	6.70
Pont-Gendarme :					
Août 1990	5.10	0.70	0.80	1.10	6.20
Décembre'90	7.10	0.40	0.40	0.90	3.80
Décembre'91	1.19	3.38	1.72	0.5	-
NDiaye :					
Août 1990	0.80	0.50	0.60	1.10	4.10

Tableau 8.
Evolution d'équilibre ionique (sous-sol).

	Cl/SO_4	Na/Ca	Na/Mg	Ca/Mg	Na/K
	(cmol/kg = meq/100 gram)				
Loyer (1989) :					
Août 1980	1.80	4.30	3.25	0.75	13.00
Janvier '81	0.22	1.20	1.59	1.32	6.00
Janvier '82	1.80	8.00	5.70	0.70	10.50
Janvier '83	7.50	15.60	7.80	0.50	8.30
Pont-Gendarme :					
Août 1990	3.40	0.60	0.80	1.30	5.90
Décembre'90	5.40	0.50	0.50	1.00	4.20
Décembre'91	0.92	2.16	3.20	0.73	-
NDiaye :					
Août 1990	1.40	0.60	0.70	1.20	4.10

- **L'équilibre des anions :**
  Le tableau montre une différence nette entre l'équilibre ionique à NDiaye et à Pont-Gendarme. A Pont-Gendarme la salure est plus chlorurée avec un rapport Cl/SO_4 entre 3.4 et 7.1. A NDiaye ce rapport est plutôt en faveur de sulfate (Cl/SO_4 entre 0.8 et 1.4). Quand-même, les niveaux de Cl^- et de $SO4^{--}$ dans la zone racinaire ne provoqueront pas une baisse du rendement du riz.
- **Problème de l'alcalinisation :**
  En général on peut conclure que la tendance vers l'alcalinisation qui était observée par Loyer (1989), ne s'est pas confirmée à Pont-Gendarme ni à NDiaye après une longue période d'irrigation. Une application de gypse ne se pose pas.

Qualité de l'eau d'irrigation

Le SAR de l'eau du fleuve est inférieur à 1 et la conductivité électrique est de l'ordre de 0.2 dS/m (OMVS/USAID, 1990). Cela veut dire que l'aptitude de l'eau pour l'irrigation est très favorable. Il est classé dans C1-S1 dans le diagramme de Riverside (Figure 39) et l'on ne s'attend pas à une baisse sur le rendement du riz.

L'eau du fleuve alimente des défluents sur lesquels des stations de pompage sont branchées. Avant d'alimenter les champs, l'eau doit cheminer à travers un réseau d'irrigation et de ce fait, peut être chargée en sel sur son parcours. En 1990 et 1991, la salinité de l'eau dans les canaux principaux des cuvettes de NDiaye et Pont-Gendarme a été mesurée régulièrement pendant les campagnes hivernales. Les résultats obtenus montrent qu'en 1990 (Figure 45) la salinité est montée jusqu'à 1200 µS/cm au mois de Septembre. Cette hausse de la concentration en sel dans l'eau d'irrigation était accidentelle. La salinisation était causée par une intrusion marine à travers le pont-barrage de Dakar-Bango pendant une opération d'alimentation du Lampsar par l'aval. Cette salinisation ne s'est plus répétée en 1991 (Figure 46), période au cours de laquelle la conductivité électrique a fluctué entre 100 et 400 µS/m.

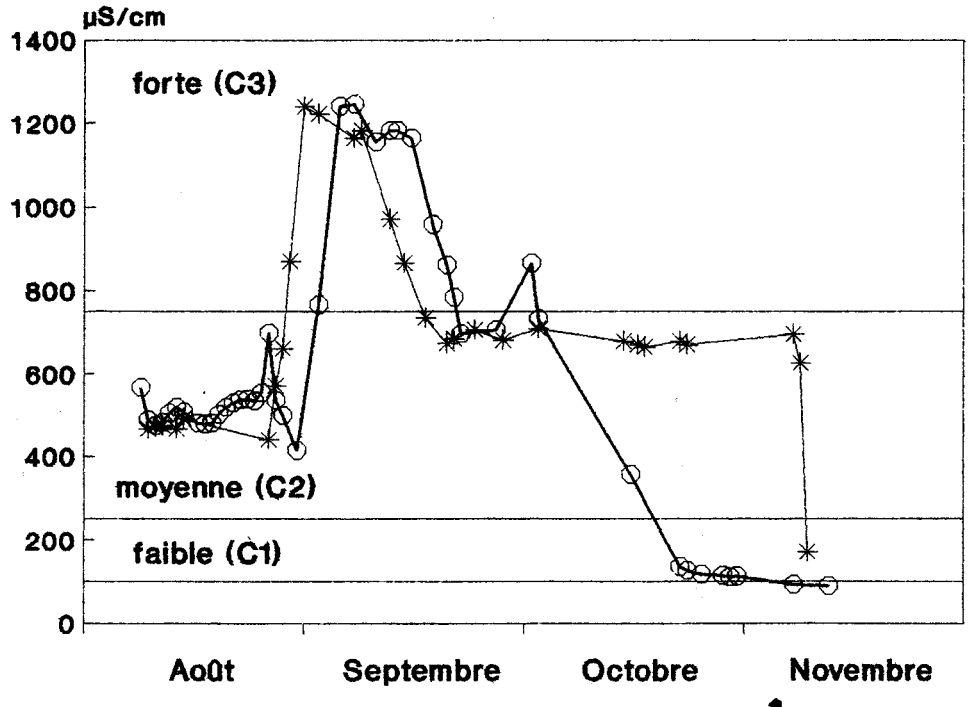


Figure 45.
Evolution de la conductivité électrique en 1990 dans le canal principal à NDiaye (*) et à Pont-Gendarme (0), avec indication des classes de Riverside.

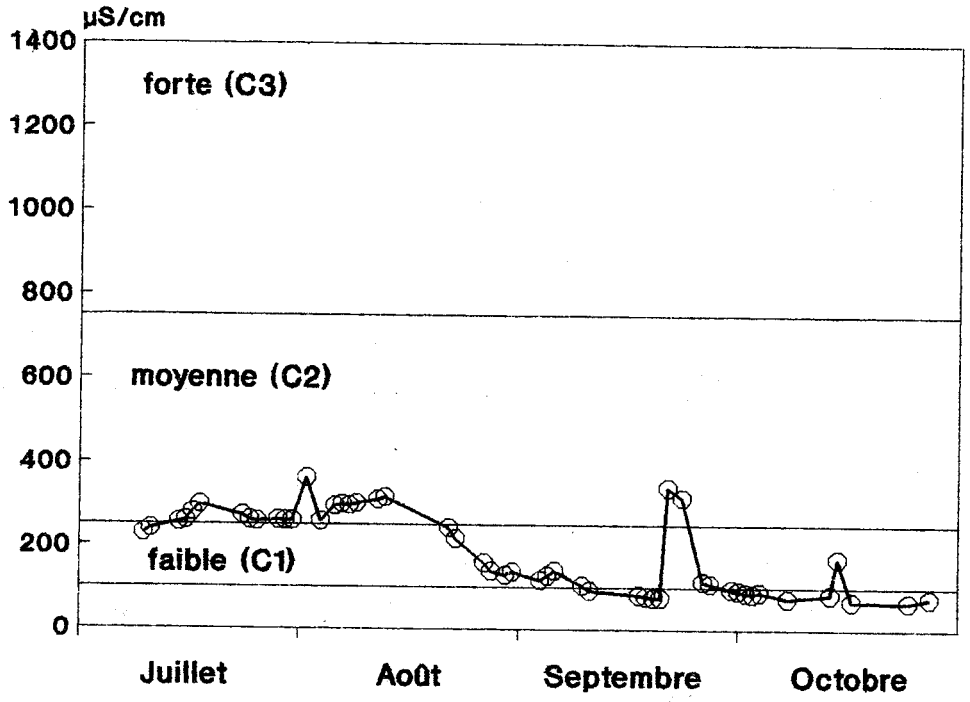


Figure 46.
Evolution de la conductivité électrique en 1991 dans le canal principal à Pont-Gendarme, avec indication des classes de Riverside.

En règle générale, la qualité de l'eau d'irrigation est telle qu'on ne s'attend pas du tout à une baisse en rendement du riz. Exceptionnellement, l'intrusion marine, comme survenue en 1990, peut provoquer quelques dommages, surtout si elle se produit en période sensible.

Salinité de la lame d'eau

L'évolution de la salinité de la lame d'eau dans plusieurs champs des cuvettes de NDiaye et Pont-Gendarme a été suivie pendant les campagnes hivernales de 1990 et 1991. Pendant l'hivernage de 1992, des champs d'un périmètre privé dans la même zone (cuvette de Thilène) ont été suivis.

Dans les Figures 47, 48 et 49 est représentée la salinité de la lame d'eau rapportée à un profondeur de 10 cm. En effet, avec simplement la variation de la hauteur de la lame au cours de la saison, la concentration en sel va varier dans le temps. Pour tirer des conclusions, les sels sont supposés concentrer sur une lame de 10 cm de hauteur qui est une moyenne observée dans les champs irrigués du delta.

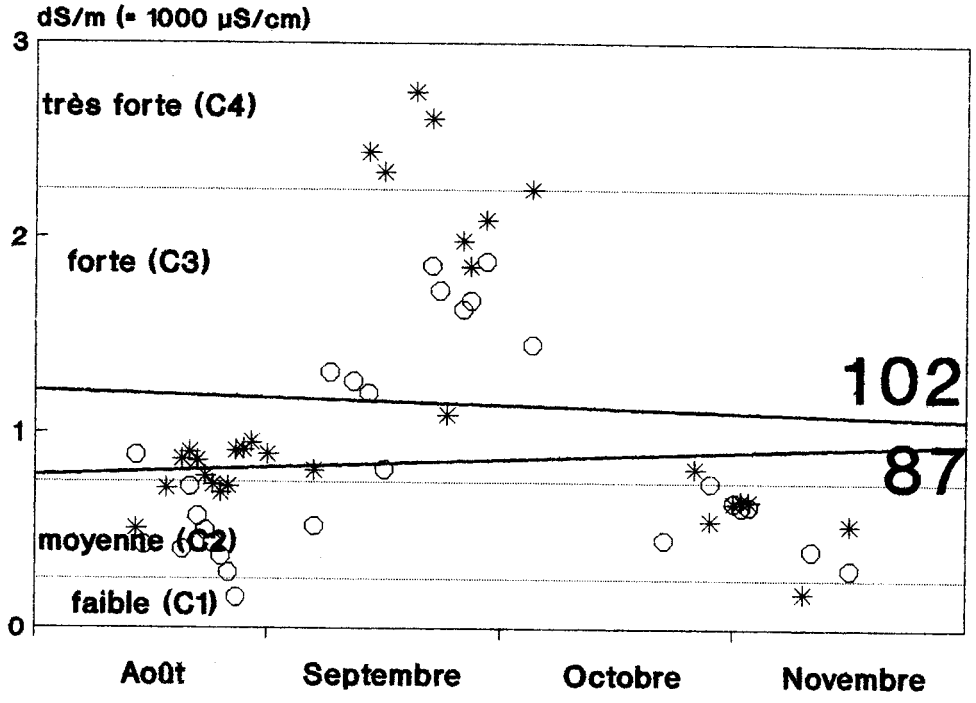


Figure 47.
Valeurs de la conductivité électrique dans la lame d'eau des champs 102 (*) et 87 (0) de Pont-Gendarme, pendant l'hivernage de 1990 avec indication de la tendance de l'évolution et les classes de salinité de Riverside.

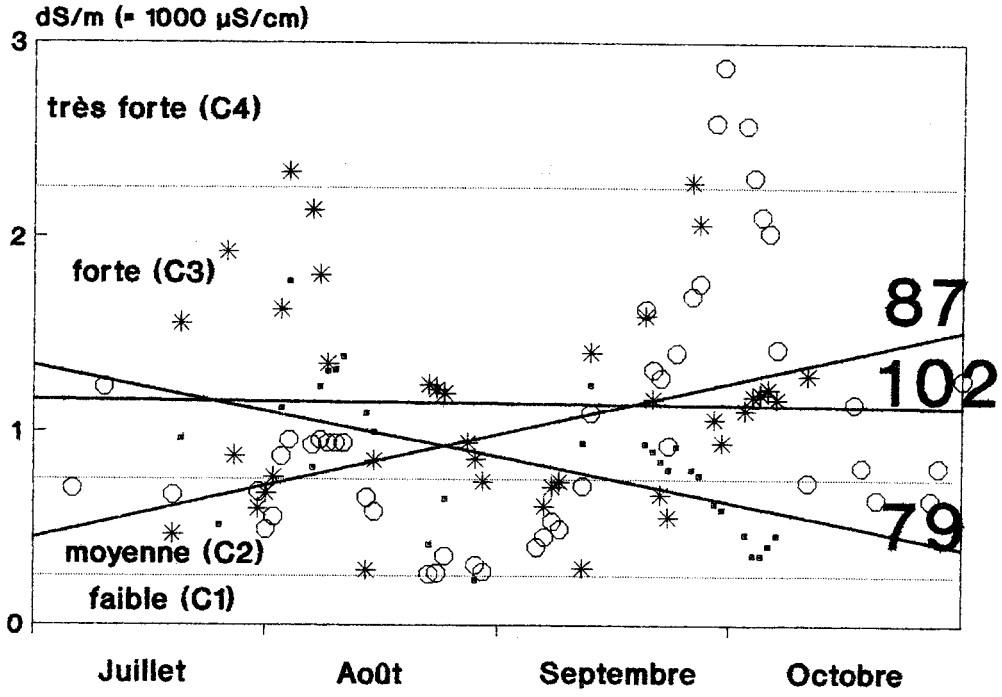


Figure 48.
Valeurs de la conductivité électrique dans la lame d'eau des champs 79(▪), 102 (*) et 87 (0) de Pont-Gendarme, pendant l'hivernage de 1991 avec indication de la tendance de l'évolution et les classes de salinité de Riverside.

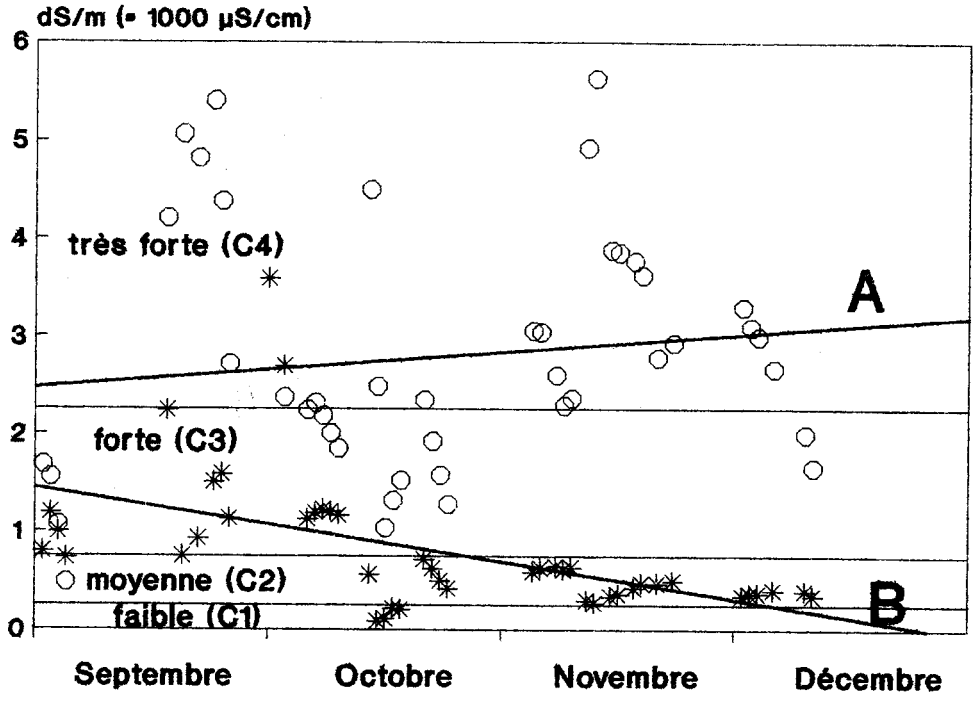


Figure 49.
Valeurs de la conductivité électrique dans la lame d'eau des champs A (*) et B (0) d'un périmètre privé suivi en 1992 avec indication de la tendance de l'évolution et les classes de salinité de Riverside.

Dans la Figure 47, on note que la salinité dans les deux champs illustrés est presque la même au début et à la fin de la saison. Pendant la saison, la salinité est quand-même montée suite à l'intrusion marine dans l'eau d'irrigation (Figure 45). En 1991 (Figure 48), l'évolution constatée dans ces champs est demeurée la même. Des fluctuations sur le niveau de la salinité au cours de la saison ont apparu, mais celles-ci sont surtout liées à l'absence d'un drainage adéquat. Si le contrôle de salinité est bien mené (champ 79), la salinité de la lame diminue au cours de la saison. Par contre dans des champs moins bien contrôlés, la salinité moyenne de la lame reste constante (champs 102) ou peut bien monter (champ 87) avec de grandes fluctuations pendant la saison. Dans tous les champs, la salinité de la lame d'eau reste à un niveau favorable. Des baisses en rendement peuvent être notées si la concentration en sel survient à une période sensible du riz.

Dans les périmètres privés, où le drainage de surface est quasi inexistant, la percolation de l'eau d'irrigation à travers la zone racinaire n'est pas toujours suffisante pour un contrôle de la salinité. Dans la plupart de ces aménagements, l'irrigation se faisant d'un champ à l'autre, elle peut constituer de ce fait un drainage de surface qui peut transporter du sel dans les champs

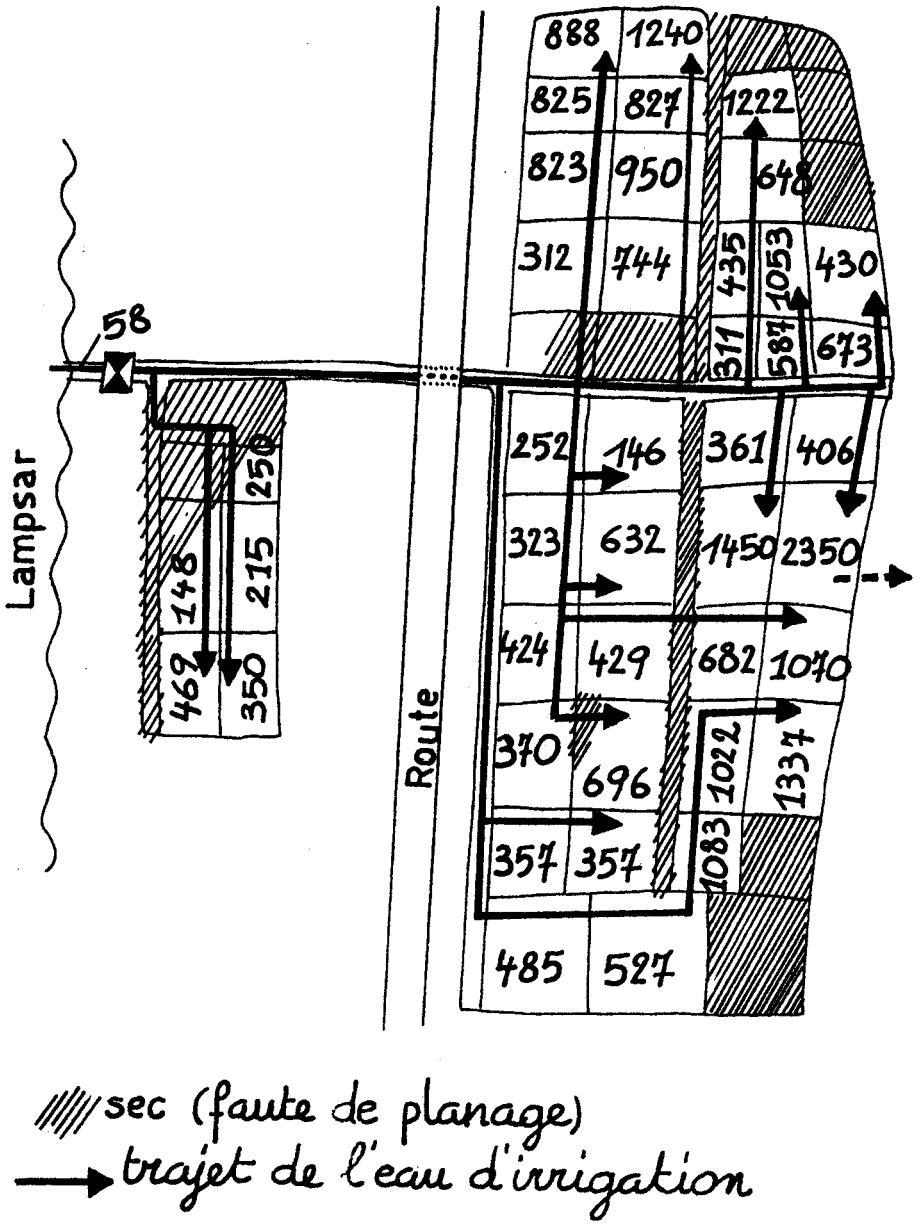


Figure 50.
Conductivité électrique de la lame d'eau (µS/cm) dans les champs d'un périmètre privé où l'irrigation est effectuée d'un champ à l'autre (Deggo (13.5 ha) 16/10/1991).

situés en aval. Ce phénomène est illustré dans les Figures 49 et 50. La Figure 49 montre l'évolution de la salinité dans deux champs adjacents A et B où le champ A est irrigué à partir du champ B. La salinité dans le champ B est comparable à celle des champs adéquatement drainés. Par contre dans le champ A, la salinité est d'une telle teneur qu'elle va causer des dégâts énormes au riz, se traduisant en une forte baisse du rendement. La Figure 50 montre la variation de la salinité dans un

périmètre privé où l'irrigation se fait d'une parcelle à l'autre. On constate un gradient de salinité qui monte de l'amont vers l'aval. La salinité de la lame d'eau n'est pas trop élevée grâce à la perméabilité de ce sol (fondé) et la possibilité d'évacuer l'eau saumâtre dans des champs abandonnés.

Salinité dans les drains

La conductivité électrique de l'eau dans le drain principal à NDiaye et à Pont-Gendarme a été mesurée régulièrement en 1990 (Figure 51).

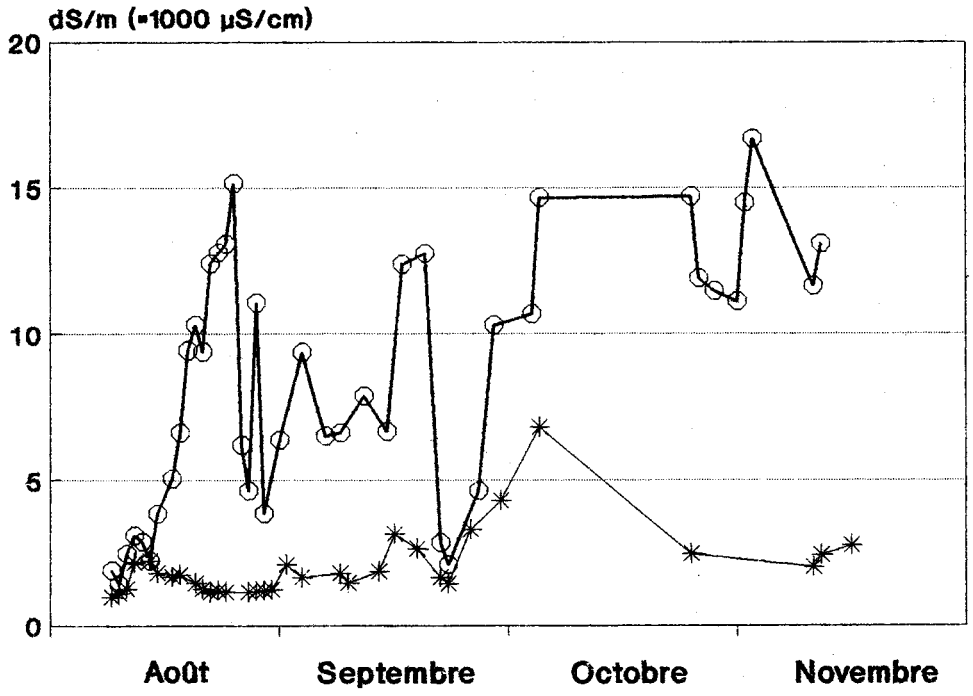


Figure 51.
Evolution de la conductivité électrique dans le drain principal à NDiaye (*) et à Pont-Gendarme (0).

La moyenne de la conductivité électrique est 2 dS/m à NDiaye, ce qui est en conformité avec la salinité de l'eau évacuée. A Pont-Gendarme par contre, la conductivité électrique atteint plus que 16 dS/m ce qui est surprenant. Cette valeur extrêmement haute s'explique par la réhabilitation de la cuvette de Pont-Gendarme au cours de laquelle les canaux de drainage ont été approfondis. Ceci a entraîné un drainage de la nappe phréatique, qui peut atteindre une conductivité électrique de plus de 20 dS/m.

4.5 Conséquences pratiques

Cette recherche, bien que restreinte car ne couvrant que trois années d'études et ne concernant que la zone du Lampsar, donne quand-même des tendances sur l'évolution de la salinité dans des rizières. Au cours de ces trois années, des recherches ponctuelles ont concerné des zones autres que le Lampsar et les résultats obtenus confirment nos prévisions.

Bilan de sel

▪ Apport

- Par ascension capillaire :

En fonction de l'intensité culturale, du type de sol, de la profondeur et du degré de la salinité de la nappe, l'apport en sel est de l'ordre de 1 à 4 tonnes par an et par ha selon nos estimations (voir 2.4).

- Par eau d'irrigation :

D'une façon générale, l'eau du fleuve est d'une bonne qualité pour l'irrigation. Cependant il y a lieu de faire attention aux détériorations causées par le sel du fait d'une intrusion marine accidentelle ou d'une évacuation des eaux d'exhaure dans le fleuve ou dans ses défluents. En plus, l'eau d'irrigation, dans son cheminement à travers le réseau, peut devenir saumâtre surtout en début de campagne par l'entraînement des sels déposés dans les canaux par l'ascension capillaire en période de non-irrigation.

Tableau 9.
Besoins nets en eau (m^3/ha.campagne de riz).

	Contre-saison	Hivernage
Imbibition	1750	1750
Evapotranspiration	12750	9100
1°assèchement(°)	800	800
Lame	1000	1000
Percolation([1])	1450 à 5800	1200 à 4800
Total	17750 à 22100	13850 à 17450

(°) Dans les rizières du delta, un premier assèchement est toujours effectué, 1 semaine après le semis.
([1]) de 1 mm/jour (cuvette) à 4 mm/jour (fondé)

Malgré la bonne qualité de l'eau, des quantités énormes de sels peuvent être apportées, vu le grand besoin en eau

d'irrigation pour une riziculture dans un climat chaud et aride. Les besoins nets en eau pour une campagne de riz sont donnés dans le Tableau 9 (Raes et Sy, 1992).

Par la connaissance des besoins en eau (Tableau 9) et la conductivité électrique de l'eau d'irrigation, les quantités apportées en sel par campagne sont résumées dans la Figure 52.

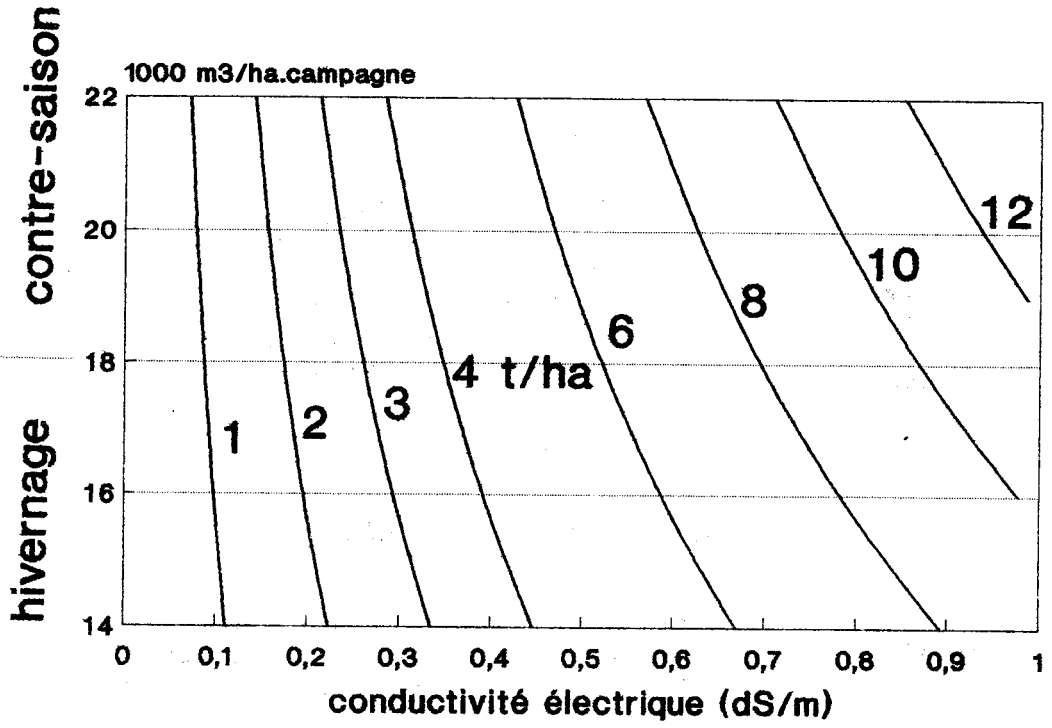


Figure 52.
Quantité de sel apportée au cours d'une campagne par l'eau d'irrigation en fonction de sa conductivité électrique et les besoins en eau.

▪ Evacuation

Une évacuation des sels s'impose donc dans les rizières. Ce processus doit être continuel à cause de l'apport en sel par l'eau d'irrigation et par l'ascension capillaire à partir de la nappe phréatique pendant la période hors culture. Cette évacuation est possible par un drainage vertical de l'eau d'irrigation à travers la zone racinaire et par un drainage de surface de la lame d'eau.

- Par drainage vertical :

Le drainage vertical peut être important au début de la campagne. Mais après peu de temps, il se stabilise à un niveau de 1 à 2 mm par jour dans les cuvettes aménagées et jusqu'à 4 à 5 mm par jour dans les périmètres avec des sols fondés. La Figure 53 donne la quantité de sel évacuée au dessous de la zone racinaire au cours de chaque

campagne de riz en fonction de la percolation du terrain et de la conductivité électrique moyenne de la lame d'eau au cours de cette campagne.

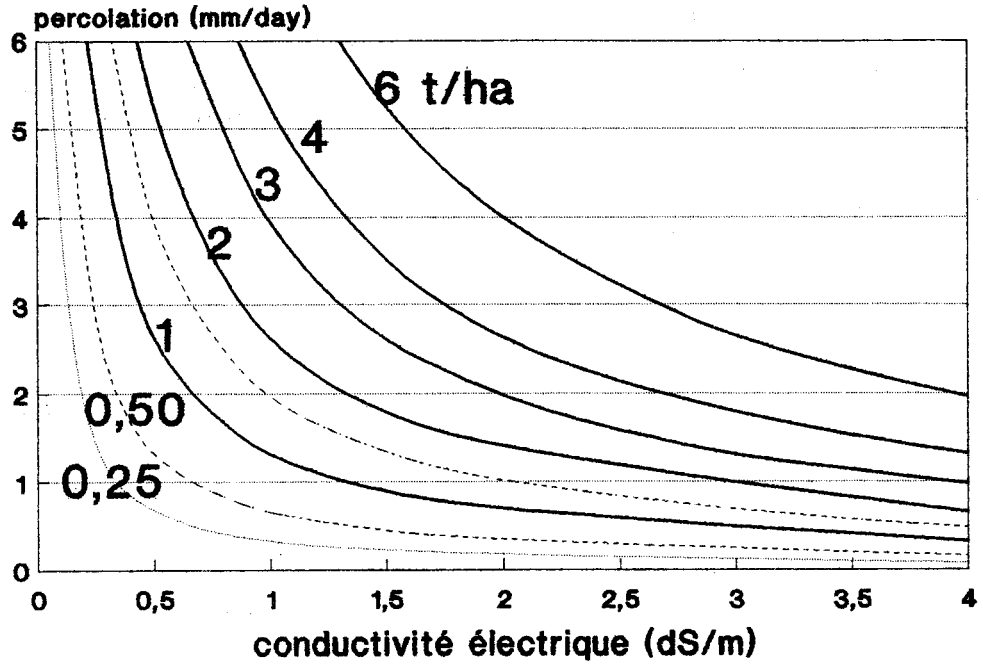


Figure 53.
Quantité de sel évacuée au cours d'une campagne par percolation en fonction de la perméabilité du terrain et la conductivité électrique moyenne de la lame d'eau.

- Par drainage de surface de la lame d'eau :
Le drainage vertical n'est souvent pas suffisant et n'est en plus qu'une exportation provisoire qui ne fait que déplacer les sels hors de la zone racinaire, d'où une nécessité de le coupler avec un drainage de surface. Pour ce drainage de surface, un premier assèchement est effectué une semaine après le semis pour favoriser l'enracinement des plantules. Selon nos mesures (Raes et Sy, 1993), environ 80 mm sont drainés à ce moment, évacuant ainsi 0.5 tonnes de sel/ha en admettant une salinité de la lame de 1 dS/m.

En fonction de la salinité des champs, d'autres drainages de surface peuvent être nécessaires pendant la période de croissance afin de garder la qualité de la lame d'eau dans de bonnes limites. Ces drainages peuvent correspondre à des besoins liés à l'entretien de la culture (application des herbicides). Nos observations ont montré que souvent un ou plusieurs drainages sont effectués en cours de saison. Avec la Figure 54, les quantités de sel évacuées par drainage de surface peuvent être estimées par la connaissance de la hauteur et de la conductivité électrique de la lame évacuée.

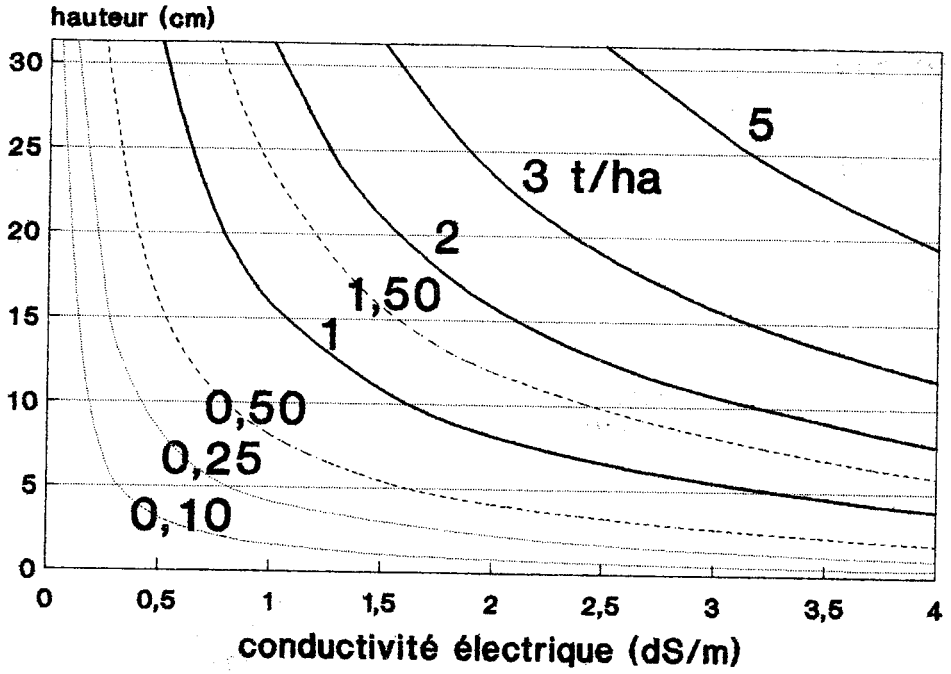


Figure 54.
Quantité de sel évacuée au cours de chaque drainage de surface en fonction de la hauteur et de la conductivité électrique de la lame évacuée.

L'assèchement avant récolte, pratiqué dans tous les champs, évacue encore des sels qui n'ont plus d'influence sur le rendement de la culture en cours mais qui ont leur importance pour une désalinisation progressive des sols.

▪ Conclusions

Dans le Tableau 10 il est résumé, nos estimations des apports en sel auxquels on peut s'attendre et des évacuations nécessaires, selon qu'on est en présence d'un sol fondé ou hollaldé et en admettant une salinité de lame de l'ordre de 1 à 1.5 dS/m, qui est une bonne tolérance pour la riziculture.

Le bilan de sel présenté dans le Tableau 10 n'est qu'un guide pour une première évaluation. Les quantités peuvent varier en fonction :
- de la qualité et de la quantité de l'eau d'irrigation,
- de la profondeur et de la salinité de la nappe,
- de la perméabilité et de la salinité du terrain, et
- du mode de gestion de l'irrigation et de drainage pratiqué.

Néanmoins, les bilans présentés sont en conformité avec des valeurs trouvées dans l'établissement des bilans d'eau de plusieurs cuvettes du delta (Raes et Sy, 1993).

Tableau 10.
Sels apportés et évacués en tonne/ha.campagne de riz.

Processus	Fondé	(Faux)-Hollaldé	Référence
Apport			**Figures**
- irrigation	1...2...4	1..2..4	51
- nappe	1..1.5..2	1..2..4	26, 27
Evacuation			
- percolation	3	2	52
- drainages de surface			
1°assèchement (80mm)	0.5	0.5	53
drainages (150 mm)	-	1.5	53

Il est possible de pratiquer la riziculture dans des périmètres dépourvus de réseaux de drainage à la condition d'une part d'une bonne perméabilité du terrain et d'autre part d'une assurance de drainages de surface même par le biais d'une irrigation de parcelle en parcelle.

Recyclage des eaux d'exhaure

En principe, l'eau évacuée des champs, une fois bien recyclée, peut servir pour d'autres irrigations. En réalité ces eaux de drainage sont souvent collectées dans des drains très profonds, évacuant ainsi l'eau de la nappe phréatique. A ce moment, l'eau des drains devient inapte pour une réutilisation à cause de sa haute teneur en sels.

Chapitre 5
Conclusions Générales

▪ Dans cette étude on s'est d'abord intéressé aux **PROPRIETES PHYSIQUES** des différents types de sol rencontrés dans le Delta. Des échantillons de sols sableux et argileux ont été prélevés et analysés. Avec les résultats, des profils types ont été établis. On a composé ainsi des relations h-θ (potentiel matriciel - humidité du sol) et K-θ (conductivité hydraulique - humidité du sol) pour des sols sableux et des sols argileux : un fondé sur les levées, un hollaldé dans les cuvettes de décantation et un sol développé sur des dépôts lagunaires. Ces résultats ont permis d'une part de simuler l'apport en sel par l'ascension capillaire dans les sols argileux, et d'autre part de développer des schémas d'irrigation pour plusieurs spéculations cultivées sur des sols sableux. Les relations h-θ et K-θ ont aussi leur utilité dans d'autres études qui nécessiteront une simulation de l'écoulement de l'eau dans le sol.

▪ Pour des sols argileux, **L'EVOLUTION DE L'ACIDITE ET DE LA SALINITE** sous l'influence de l'irrigation a été étudiée. Il résulte de cette étude que la riziculture, du fait de son mode d'irrigation, est une bonne spéculation pour un contrôle de l'acidité et de la salinité. En effet, les sols sont lessivés en permanence et les sels sont en plus évacués par un drainage de surface dans des aménagements à maîtrise complète de l'eau. Si ce drainage de surface n'est pas pratiqué et le terrain est peu perméable, une salinisation se manifeste et les champs doivent être abandonnés après quelques années de culture. Une estimation du bilan de sel a été développée en fonction :
- de la qualité et de la quantité de l'eau d'irrigation,
- de la profondeur et de la salinité de la nappe,
- de la perméabilité du terrain, et
- du mode de gestion du drainage appliqué.

▪ Malgré que le riz soit une bonne spéculation et prisée par les agriculteurs, une **INTENSIFICATION DE LA RIZICULTURE** sans contrôle dans l'espace et le temps (double culture) risque de provoquer une remontée de la nappe phréatique. Cette remontée va se traduire en une ascension capillaire plus importante, donc en un apport en sel plus élevé, d'où des besoins en eau plus grands. Ce processus va s'intensifier jusqu'à ce que la nappe très salée atteigne la zone racinaire. A ce moment toute culture devient de ce fait impossible et un drainage souterrain s'impose.

▪ Il est à éviter que **LE DRAINAGE SOUTERRAIN** qui va s'imposer après une intensification de la riziculture, soit trop profond parce qu'à ce stade il risque d'aérer la zone où se trouve le pyrite, provoquant ainsi une forte acidification. Par ce que le drainage ne doit pas être trop profond, le réseau sera de ce fait dense, donc couteux.

Références

Abrol, I.P., J.S.P. Yadav et F.I.Massoud, 1988. Salt-affected soils and their management. FAO Soils Bulletin n°39. Rome, Italie. 131 p.

ADRAO/WARDA, 1993. Rapport annuel de 1992. West Africa Rice Development Association, Bouaké, Côte d'Ivoire. (en impression).

Ayers, R.S, and D.W. Westcot, 1985. Water quality for agriculture. FAO, Irrigation and Drainage Paper n°29. Rome, Italie. 174 p.

Dent, D. (Ed.), 1986. Acid sulphate soils : a baseline for research and development. ILRI, Wageningen, The Netherlands. 204 p.

De Wachter, I., 1993. Zure sulfaatbodems in de Senegal-delta. Eindverhandeling. KULeuven, Fac. Landbouwweten-schappen, Leuven, Belgie. 144 p.

Doorenbos, J. and A.H. Kassam, 1979. Yield response to water. FAO, Irrigation and Drainage Paper n°33. Rome, Italie. 193 p.

Doorenbos, J. and W.O. Pruitt, 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO, Irrigation and Drainage Paper n°24. Rome, Italie. 144 p.

Driessen, P.M. and R. Dudal, 1991. The major soils of the world. Agricultural University Wageningen (The Netherlands) - KULeuven (Belgium). 310 p.

FAO, 1969. Etude 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.

Gaucher, G., 1966. Etude pédologique de la vallée du Lampsar et de la basse vallée du Djeuss. Société Centrale pour l'Equipement du Territoire-Coopération (SCET-Coop), République Française. 87 p.

Hillel, D. 1974. L'eau et le sol - principes et processus physiques. Vander-éditeur, Leuven, Belgique. 288 p.

Jackson, R.D., 1972. On the calculation of hydraulic conductivity. Soil Sci. Amer. Proc. 36 : 380-382.

JICA, 1991. Etude expérimentale du développement agricole. Rapport Final, Agence Japonaise de Coöpération Internationale, Sénégal. 361 p.

Konsten, C.J.M, W. Andriesse and R. Brinkman, 1986. A field laboratory method to determine total potentiel and actual acidity in acid sulphate soils. In Dost H.: Selected papers of the Dakar symposium on acid sulphate soils. ILRI, Wageningen, The Netherlands : 106 - 134.

Kunze, R.J., G. Uehara and K. Graham, 1968. Factors important in the calculation of hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 32 : 760-765.

Lauryssen, K., 1993. Zoutevolutie onder kleinschalige rijstkultuur in de Senegal delta. Eindverhandeling. KULeuven, Fac. Landbouwwetenschappen, Leuven, Belgie. 95p.

Le Brusq, J.Y., 1980. Etude pédologique des cuvettes de la vallée du Lampsar. ORSTOM, Dakar, Sénégal. 114 p.

Le Brusq, J.Y. et J.Y. Loyer, 1984. Evolution de la salinité des sols et des eaux en relation avec la riziculture submergée dans le delta du fleuve Sénégal. ORSTOM, Centre de Dakar-Hann, Sénégal. 29 p.

Le Gal, P-Y., 1993. Rapport annuel d'activités - 1992. ISRA - CIRAD, Saint-Louis, Sénégal. 60 p.

Liberloo, Y., 1992. Haalbaarheidsstudie van een beregeningssysteem met mini-haspels voor de ontginning van de Djeri. Eindverhandeling. KULeuven, Fac. Landbouwwetenschappen, Leuven, Belgie. 93 p.

Loyer, J.Y., 1989. Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Editions de l'ORSTOM. Collection Etudes 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. 18p.

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.

Maas, E.V., 1984. Salt tolerance of plants. In : The handbook of Plant Science in Agriculture. B.R. Christie (ed.) CRC Press, Boca Raton, Florida. USA.

OMVS/USAID, 1990. Rapport de synthèse hydrogéologique du delta du fleuve Sénégal. Projet 625-0958. Rapport Final, Volume II. International Science and Technology Institute, Washington, USA. 76 p.

Raes, D., H. Lemmens, P. Van Aelst, M. Vanden Bulcke and M. Smith, 1988. IRSIS - Irrigation Scheduling Information System. KULeuven, Lab of Soil and Water Engineering. Reference Manual 3, Volume 1 (Manual). Leuven, Belgium. 119 p.

Raes, D., et B. SY, 1992. Analyse de la pluviométrie et de l'évapotranspiration dans la zone du Delta du fleuve Sénégal. Bulletin Technique n° 5. Projet Gestion de l'Eau. KULeuven-SAED, Saint-Louis, Sénégal. 67 p.

Raes, D., et B. SY, 1993. Analyse du bilan d'eau de quelques périmètres rizicoles du Delta et de la Vallée du fleuve Sénégal. Bulletin Technique n° 6. Projet Gestion de l'Eau. KULeuven-SAED, Saint-Louis, Sénégal. (en préparation).

Serneels S. en L. Van Passel, 1991. Waterbeheer in de Lampsar Perimeter. Eindverhandeling. KULeuven, Fac. Landbouwwetenschappen, Leuven, Belgie. 149 p.

Vanden Berghe, J., 1993. Een onderzoek naar de bereidbaarheid van de rijstvelden in de Senegal-Delta aan de hand van het SWATRER-Model. Eindverhandeling. KULeuven, Fac. Landbouwwetenschappen, Leuven, Belgie. 89 p.

Van Lavieren, B. et J. Van Wetten, 1988. Profil de l'environnement de la vallée du fleuve Sénégal. Direction Général de la Coopération au Développement (DGIS), Pays-Bas. 159 p.

Vermeire, J., 1992. Onderzoek naar de evolutie van het zoutgehalte en de pH in de delta van de Senegal. Eindverhandeling. KULeuven, Fac. Landbouwwetenschappen, Leuven, Belgie. 80 p.

Annexe A

Relations h - θ (potentiel matriciel - teneur en eau) et **K - θ** (conductivité hydraulique - teneur en eau)
des horizons supérieurs :
- d'un fondé,
- d'un hollaldé,
- d'un sol à texture très fine (dépôt lagunaire),
- d'un sol sableux,

des sous-sols :
- d'un sol limon sablo-argileux,
- du sable Nouakchottien.

Horizon supérieur
Fondé (levée)

Θ teneur en eau	h potentiel matriciel	K conductivité hydraulique
[vol%]	[m]	[m/day]
0	-100000.000	0.00E+00
1	-64738.000	2.00E-17
2	-49426.000	3.04E-16
3	-36620.000	1.49E-15
4	-24429.000	4.99E-15
5	-17830.000	1.42E-14
6	-12821.000	3.65E-14
7	-8946.000	8.82E-14
8	-6728.000	2.04E-13
9	-4766.000	4.54E-13
10	-3531.000	9.85E-13
11	-2994.000	2.05E-12
12	-2121.000	4.06E-12
13	-1502.000	7.95E-12
14	-1113.000	1.56E-11
15	-888.900	3.06E-11
16	-658.600	5.87E-11
17	-525.900	1.10E-10
18	-395.560	2.04E-10
19	-306.560	3.71E-10
20	-234.050	6.71E-10
21	-189.730	1.20E-09
22	-149.260	2.11E-09
23	-119.200	3.65E-09
24	-96.630	6.21E-09
25	-71.600	1.05E-08
26	-55.490	1.78E-08
27	-41.730	3.04E-08
28	-31.390	5.27E-08
29	-21.730	9.33E-08
30	-15.050	1.71E-07
31	-10.660	3.29E-07
32	-7.441	6.53E-07
33	-4.146	1.37E-06
34	-2.766	3.15E-06
35	-1.367	8.02E-06
36	-0.717	2.43E-05
37	-0.292	8.94E-05
38	-0.100	4.62E-04
39	0.000	5.30E-03

Gorom (10 cm)

Horizon supérieur Hollaldé (cuvette)

θ teneur en eau	h potentiel matriciel	K conductivité hydraulique
[vol%]	[m]	[m/day]
0	-100000.000	0.00E+00
1	-52481.000	2.41E-17
2	-33469.000	4.45E-16
3	-21345.000	2.67E-15
4	-15119.000	1.07E-14
5	-9788.000	3.47E-14
6	-7252.000	9.91E-14
7	-5373.000	2.55E-13
8	-3981.000	6.02E-13
9	-3039.000	1.33E-12
10	-2356.000	2.80E-12
11	-1881.000	5.60E-12
12	-1524.000	1.07E-11
13	-1236.000	1.97E-11
14	-1032.000	3.48E-11
15	-837.000	5.98E-11
16	-710.000	1.00E-10
17	-611.000	1.64E-10
18	-503.000	2.61E-10
19	-432.000	4.09E-10
20	-362.000	6.30E-10
21	-311.000	9.60E-10
22	-260.000	1.45E-09
23	-238.000	2.15E-09
24	-204.000	3.15E-09
25	-176.000	4.57E-09
26	-149.000	6.55E-09
27	-128.000	9.34E-09
28	-106.000	1.33E-08
29	-85.700	1.90E-08
30	-69.500	2.73E-08
31	-54.950	3.97E-08
32	-41.730	5.90E-08
33	-32.320	8.99E-08
34	-24.320	1.41E-07
35	-18.020	2.29E-07
36	-12.200	3.88E-07
37	-8.260	6.97E-07
38	-5.510	1.35E-06
39	-3.410	2.80E-06
40	-1.900	6.45E-06
41	-1.010	1.73E-05
42	-0.464	5.55E-05
43	-0.163	2.39E-04
44	0.000	2.40E-03

NDiaye (10 cm)

Horizon supérieur
Dépôt lagunaire (cuvette)

θ teneur en eau	h potentiel matriciel	K conductivité hydraulique
[vol%]	[m]	[m/day]
0	-100000.000	0.00E+00
1	-71174.000	1.44E-19
2	-54222.000	2.10E-18
3	-41308.000	9.95E-18
4	-31469.000	3.18E-17
5	-23974.000	8.34E-17
6	-18768.000	1.94E-16
7	-14893.000	4.18E-16
8	-11818.000	8.44E-16
9	-8762.000	1.64E-15
10	-6496.000	3.12E-15
11	-5026.000	5.93E-15
12	-4091.000	1.11E-14
13	-3475.000	2.02E-14
14	-2683.000	3.56E-14
15	-2072.000	6.17E-14
16	-1690.000	1.06E-13
17	-1341.000	1.81E-13
18	-1078.000	3.05E-13
19	-844.000	5.11E-13
20	-698.000	8.52E-13
21	-546.000	1.41E-12
22	-416.000	2.33E-12
23	-353.000	3.86E-12
24	-284.000	6.34E-12
25	-219.000	1.03E-11
26	-174.000	1.69E-11
27	-129.000	2.78E-11
28	-97.120	4.66E-11
29	-73.990	7.96E-11
30	-54.110	1.39E-10
31	-40.120	2.46E-10
32	-29.740	4.45E-10
33	-20.320	8.22E-10
34	-15.480	1.55E-09
35	-11.020	2.97E-09
36	-7.840	5.74E-09
37	-6.140	1.11E-08
38	-4.080	2.14E-08
39	-2.710	4.24E-08
40	-1.800	8.82E-08
41	-1.250	1.90E-07
42	-0.720	4.24E-07
43	-0.500	1.00E-06
44	-0.260	2.49E-06
45	-0.140	7.05E-06
46	-0.063	2.36E-05
47	-0.023	1.03E-04
48	0.000	1.00E-03

Débi (10 cm)

Horizon supérieur
Sol sableux

θ teneur en eau	h potentiel matriciel	K conductivité hydraulique
[vol%]	[m]	[m/day]
0	-100000.000	0.00E+00
1	-1726.000	5.40E-16
2	-372.000	3.81E-12
3	-100.000	1.45E-10
4	-36.750	2.66E-09
5	-15.840	2.75E-08
6	-8.420	1.90E-07
7	-4.760	9.50E-07
8	-3.030	3.80E-06
9	-1.930	1.28E-05
10	-1.430	3.75E-05
11	-1.190	9.46E-05
12	-1.030	2.07E-04
13	-0.844	4.05E-04
14	-0.737	7.35E-04
15	-0.646	1.26E-03
16	-0.588	2.05E-03
17	-0.549	3.20E-03
18	-0.514	4.80E-03
19	-0.500	6.94E-03
20	-0.469	9.72E-03
21	-0.457	1.33E-02
22	-0.447	1.77E-02
23	-0.437	2.31E-02
24	-0.427	2.96E-02
25	-0.417	3.73E-02
26	-0.407	4.63E-02
27	-0.398	5.69E-02
28	-0.389	6.90E-02
29	-0.380	8.30E-02
30	-0.369	9.89E-02
31	-0.347	1.17E-01
32	-0.318	1.37E-01
33	-0.235	1.61E-01
34	-0.182	1.89E-01
35	-0.119	2.25E-01
36	-0.071	2.78E-01
37	-0.033	3.83E-01
38	-0.000	9.10E-01

Savoigne (30 cm)

Sous-sol
Limon sablo-argileux

θ teneur en eau	h potentiel matriciel	K conductivité hydraulique
[vol%]	[m]	[m/day]
0	-100000.000	0.00E+00
1	-28809.000	6.04E-14
2	-13211.000	2.25E-12
3	-6149.000	2.34E-11
4	-3478.000	1.55E-10
5	-1910.000	7.64E-10
6	-1218.000	3.13E-09
7	-754.000	1.10E-08
8	-526.000	3.41E-08
9	-384.000	9.40E-08
10	-289.000	2.32E-07
11	-231.000	5.21E-07
12	-195.000	1.07E-06
13	-168.000	2.04E-06
14	-149.000	3.62E-06
15	-141.000	6.05E-06
16	-138.000	9.55E-06
17	-135.000	1.43E-05
18	-132.000	2.05E-05
19	-129.000	2.84E-05
20	-126.000	3.82E-05
21	-123.000	5.02E-05
22	-120.000	6.45E-05
23	-115.000	8.16E-05
24	-111.000	1.02E-04
25	-103.000	1.25E-04
26	-94.000	1.53E-04
27	-87.000	1.85E-04
28	-78.000	2.23E-04
29	-73.800	2.68E-04
30	-63.500	3.21E-04
31	-55.500	3.84E-04
32	-45.660	4.62E-04
33	-39.300	5.59E-04
34	-33.330	6.83E-04
35	-26.220	8.47E-04
36	-21.250	1.07E-03
37	-15.750	1.39E-03
38	-11.670	1.88E-03
39	-9.179	2.68E-03
40	-5.854	4.05E-03
41	-3.569	6.75E-03
42	-2.381	1.29E-02
43	-1.307	2.80E-02
44	-0.676	7.23E-02
45	-0.334	2.29E-01
46	0.000	1.30E+00

Gorom (70 cm)

Sous-sol
Sable Nouakchottien

θ teneur en eau	h potentiel matriciel	K conductivité hydraulique
[vol%]	[m]	[m/day]
0	-100000.000	0.00E+00
1	-25076.000	4.69E-17
2	-10484.000	2.16E-15
3	-3660.000	2.82E-14
4	-1674.000	2.80E-13
5	-567.000	2.21E-12
6	-271.000	1.81E-11
7	-130.000	1.12E-10
8	-65.100	5.92E-10
9	-34.600	2.78E-09
10	-21.400	1.13E-08
11	-12.700	3.97E-08
12	-7.690	1.28E-07
13	-4.970	3.90E-07
14	-3.570	1.09E-06
15	-2.610	2.73E-06
16	-1.990	6.26E-06
17	-1.610	1.32E-05
18	-1.320	2.60E-05
19	-1.140	4.77E-05
20	-1.000	8.26E-05
21	-0.955	1.35E-04
22	-0.912	2.10E-04
23	-0.871	3.11E-04
24	-0.832	4.42E-04
25	-0.794	6.10E-04
26	-0.759	8.19E-04
27	-0.724	1.08E-03
28	-0.673	1.39E-03
29	-0.597	1.77E-03
30	-0.499	2.24E-03
31	-0.429	2.82E-03
32	-0.364	3.57E-03
33	-0.273	4.54E-03
34	-0.205	5.91E-03
35	-0.152	7.97E-03
36	-0.100	1.14E-02
37	-0.071	1.76E-02
38	-0.043	3.03E-02
39	-0.028	5.92E-02
40	-0.014	1.33E-01
41	-0.000	5.43E-01

Tamach (60 cm)