

## Comment prévoir la répartition des sols salés dans la moyenne vallée du Sénégal ?

Laurent BARBIERO (1)

(1) IRD, BP 1386, Dakar, Sénégal

---

### RESUME

Une élimination partielle des sels apportés par la mer lors de la dernière transgression est généralement avancée pour expliquer la présence de sols salés dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Cependant, les zones salées présentent des caractéristiques morphologiques et géochimiques qui ne peuvent être expliquées par ce schéma. Elles concordent cependant très bien avec les caractéristiques morphologiques et géochimiques des lunettes en cours de formation dans le delta du fleuve Sénégal. Le lien définitif entre les lunettes du delta et les zones salées de la moyenne vallée est fourni par l'identification d'une transformation texturale abrupte de l'horizon superficiel des sols qui empêche l'émiettement et bloque la déflation éolienne et l'alimentation des lunettes.

La compréhension de l'origine de la répartition des sels, de ses relations avec les unités géomorphologiques anciennes, permet une cartographie rapide des sels sur de vastes surfaces selon une méthode simple, rapide et peu coûteuse, qui devrait être préconisée avant l'établissement de toute nouvelle infrastructure irriguée. Le cas du secteur N'Galenka est présenté en exemple.

---

### SUMMARY

The presence of saline soils in the mid-valley of the Senegal River is generally explained by the partial elimination of sea salt during the last transgression. However, the saline areas present morphological and geochemical characteristics, which could not be explained by this reasoning. They correspond well, however, with the morphological and geochemical characteristics of depressions, which are developing in the delta of the Senegal River. The identification of an abrupt textural transformation of the superficial horizon of the soils, which prevents fragmentation, wind erosion and water supply of these depressions revealed the true link between the depressions in the delta and the saline areas of the mid-valley.

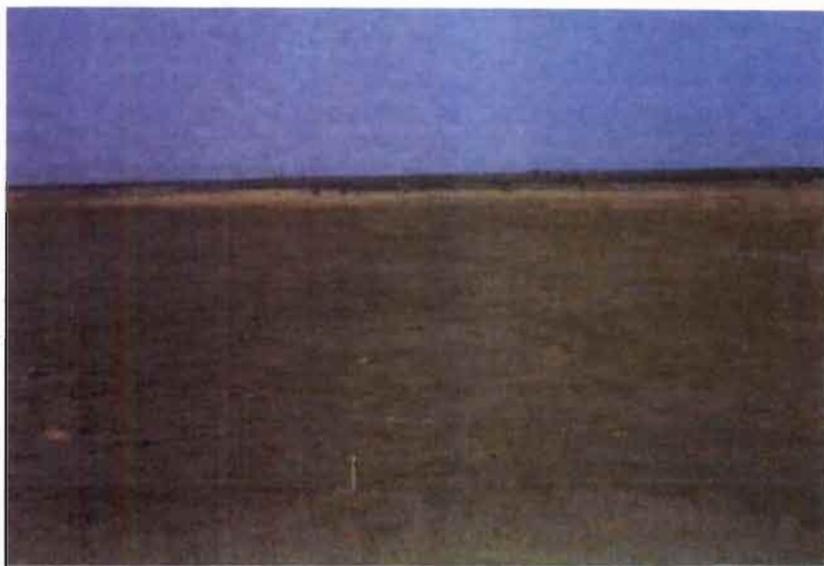
Based on the comprehension of the origin of salt distribution, its relationship with the former geomorphologic units and the use of a simple, rapid and low cost method, a rapid cartography of salt distribution over vast areas could be made. This method must be recommended before the establishment of any new irrigation infrastructure. The example presented is the case of the N'Galenka sector.

---

### INTRODUCTION

La présence de sols salés est une contrainte majeure à l'implantation durable de périmètres irrigués. Après une ou deux années de culture, il est classique de constater que des parcelles sont désertées par les paysans en raison de la présence d'efflorescences salines. Ces sels ne proviennent pas d'une mauvaise gestion de l'irrigation mais bel et bien de l'expression en surface d'une salinité existant avant l'aménagement et l'irrigation. Il convient donc d'implanter prioritairement les périmètres dans les secteurs non touchés par la salinité. Or, comme le montre la photo 1, les sels ne sont pas décelables d'emblée sur le terrain dans les conditions naturelles.

Un programme de recherche a donc été mené dans le cadre du PSI, dont le but est de comprendre la logique de répartition des sols salés dans le paysage afin de prévoir cette répartition avant l'aménagement. Ce séminaire de synthèse du PSI est l'occasion de présenter ces résultats. Après une présentation du cadre particulier qu'est la vallée du fleuve Sénégal dans laquelle on évolue et de la démarche adoptée, nous verrons que les sols salés présentent des caractéristiques morphologiques et géochimiques bien particulières et qu'elles s'accordent avec un modèle de redistribution éolienne des sels dans le paysage. Nous verrons comment les connaissances acquises permettent d'élaborer rapidement et à moindre coût des documents cartographiques de répartition des sols salés.



**Photo 1.** Une vue du paysage dans la moyenne vallée. Le couteau est planté au niveau d'une transition abrupte dans la salinité des sols. Première constatation, les sels ne sont pas décelables d'emblée sur le terrain.



**Photo 2.** Après une ou deux cultures, on observe de nombreuses efflorescences salines. Les paysans désertent alors les parcelles. Seconde constatation, la présence de sels est une contrainte physique majeure à l'implantation durable de l'agriculture irriguée.

## LE SCHEMA CLASSIQUEMENT ACCEPTE

La vallée a subi une transgression jusqu'à Boghé il y a environ 4000 ans (Faure *et al*, 1980). Lors de cette transgression, des sels marins ont été incorporés dans les sédiments (Michel, 1973). A la régression qui a suivi, une mangrove s'est installée dans le domaine fluvio-marin et a accompagné le retrait de la mer, balayant ainsi toute la vallée de l'amont vers l'aval. Cette végétation a marqué le sol par le développement de conditions acides résultant de l'oxydation des sulfures accumulés dans les racines et par le biais de bactéries fixatrices. Depuis, les crues du fleuve, dont l'eau d'origine continentale est faiblement minéralisée, ont contribué à une élimination partielle des sels et de l'acidité. Certaines zones restent salées par défaut de lessivage.

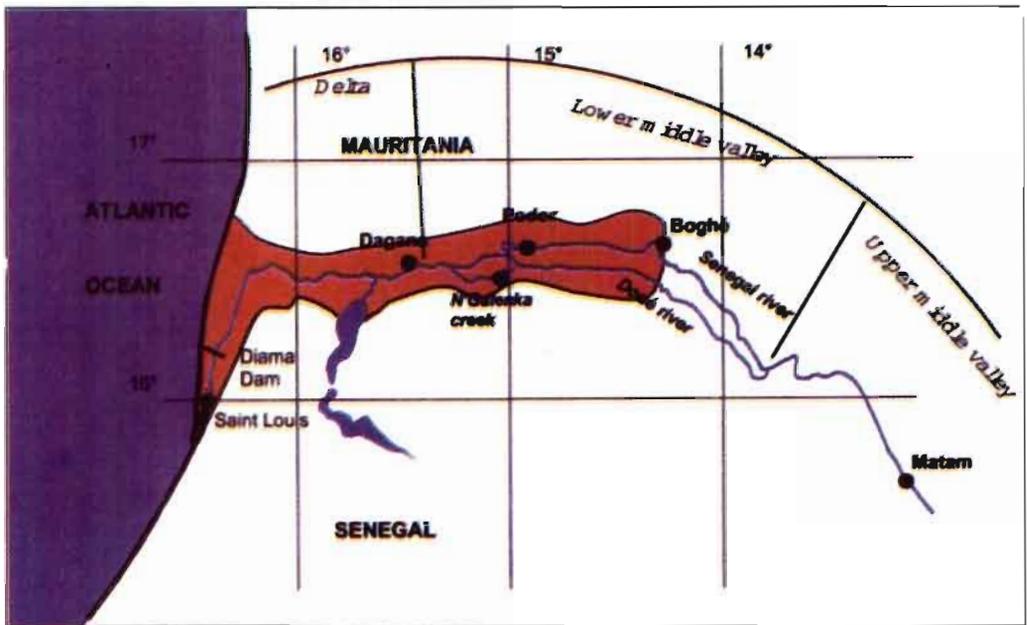
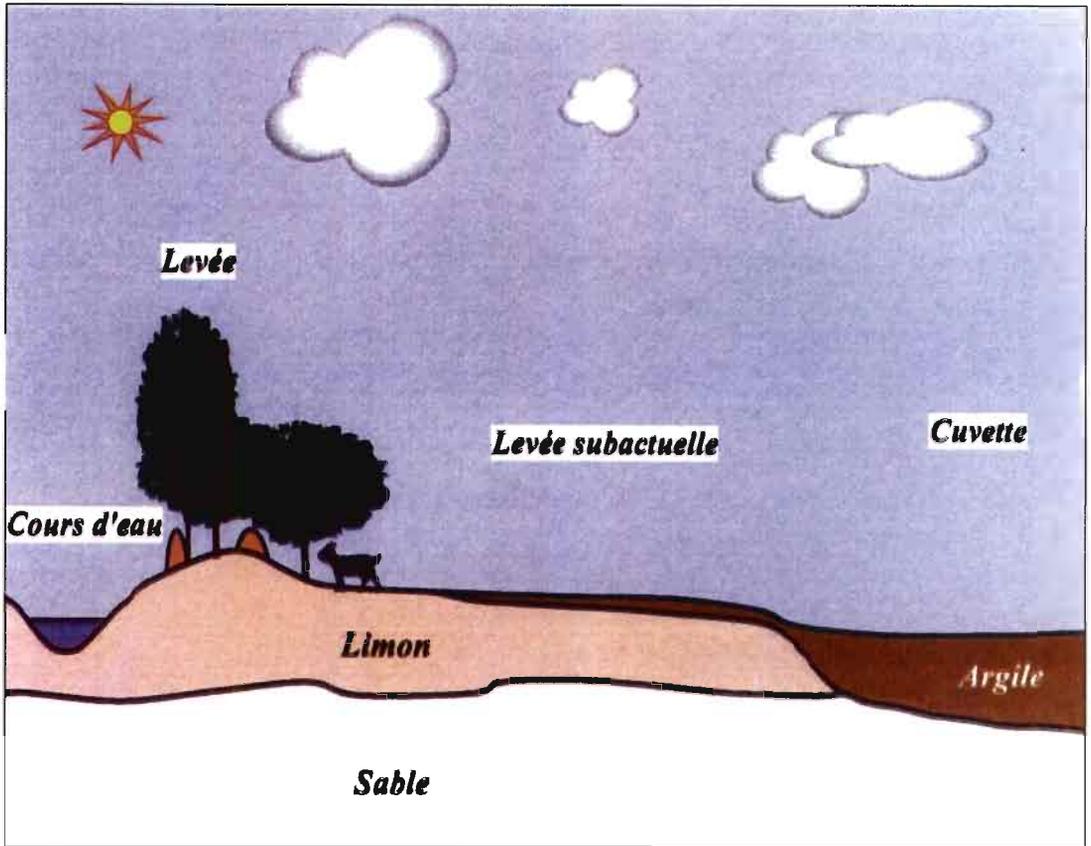


Figure 1. La Vallée du fleuve Sénégal

Ce schéma simple est attrayant et a été accepté avec fatalité depuis plusieurs années. Cependant, on peut rapidement constater une absence de corrélation entre la répartition des sels et les unités géomorphologiques, ce qui met ce schéma en défaut. On observe des levées salées ou non salées, des levées sub-actuelles salées ou non salées, des cuvettes salées ou non salées... Sur certains sites, la présence des sels peut correspondre exactement à la présence d'un bourrelet, sur d'autres à la présence d'une cuvette. Aussi, Loyer (1989) a avancé que les sels étaient piégés sous les bourrelets. Cunnac (1996) a proposé une hypothèse selon laquelle la salinisation provient de remontés capillaires à partir d'une nappe à faible profondeur, par effet de mèche dans les sédiments argileux des cuvettes. On peut également observer des cuvettes dont une moitié est salée et l'autre ne l'est pas. Nous allons voir que toutes ces observations sont valides, qu'elles ne sont pas contradictoires et qu'elles peuvent entrer dans un autre schéma de répartition des sels.



**Figure 2.** Selon les sites, les unités géomorphologiques peuvent être salées ou non salées. Cette caractéristique ne s'explique pas par un schéma simple d'élimination des sels par les crues du fleuve. Cette absence de corrélation sels-relief est un obstacle supplémentaire à la prévision de la répartition des sols salés.

## DEMARCHE

**La vallée du fleuve Sénégal vue comme chronoséquence.** Les sols se sont développés à partir de la vase potentiellement sulfatée acide de la mangrove. Cette mangrove ayant accompagné la régression marine depuis Boghé jusqu'à l'embouchure actuelle, les sols les plus jeunes sont observés à l'aval, juste à la sortie de la mangrove et les sols les plus évolués sont observés en amont dans la région de Boghé. La vallée correspond donc à une splendide chronoséquence, un véritable laboratoire pour l'étude des processus pédologiques et géomorphologiques dans le temps. Pour comprendre la genèse de caractéristiques identifiées dans la région de Podor, l'observation vers l'aval permet en quelque sorte de remonter le temps et vers l'amont, de voyager dans le futur. Cette particularité est ici mise à profit pour comprendre la mise en place des sols salés.

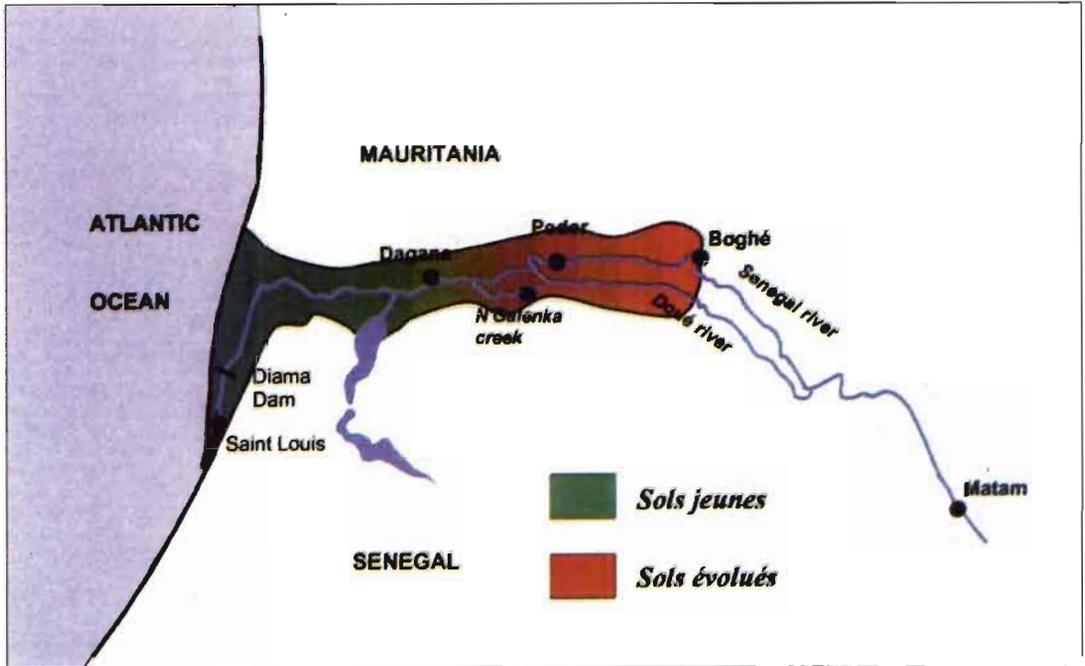


Figure 3. Une caractéristique fondamentale du milieu. L'évolution pédologique et geomorphologique est organisée spatialement de l'aval vers l'amont selon une chronoséquence

### UNE DEMARCHE ASCENDANTE

L'essentiel des résultats présentés a été acquis sur le secteur du N'Galenka, aujourd'hui en cours d'aménagement et en particulier, sur une zone à proximité de la grande boucle de Nianga Diéri.

La démarche choisie est une démarche ascendante, généralement fructueuse lorsque l'on souhaite aboutir à une cartographie systématique. L'action est menée en premier lieu sur des surfaces réduites (50 à 100 ha), où l'on cherche à caractériser le plus finement possible les sols salés, leur contour, topographie, géochimie... Les résultats acquis sur ces sites sont ensuite transposés à des surfaces plus vastes.

**Le contour des zones salées.** La cartographie est réalisée à l'aide d'un conductimètre électromagnétique (GEONICS, EM38). Ce matériel portable, rapide et léger est d'un emploi classique aujourd'hui pour ce genre de travail. Les mesures ont été réalisées suivant une grille carrée de 25 m. Les études plus détaillées sont réalisées suivant une grille plus resserrée de 10 m. On combine alors les mesures de conductivité électromagnétique et les mesures topographiques.

**Les caractéristiques géochimiques** sont abordées à partir de prélèvements à la tarière sur les transects courts mais présentant un fort gradient de conductivité des sols donc en bordure de zone salée. On s'affranchit ainsi d'une certaine variabilité spatiale et l'on focalise l'étude sur les processus géochimiques accompagnant la concentration des solutions.

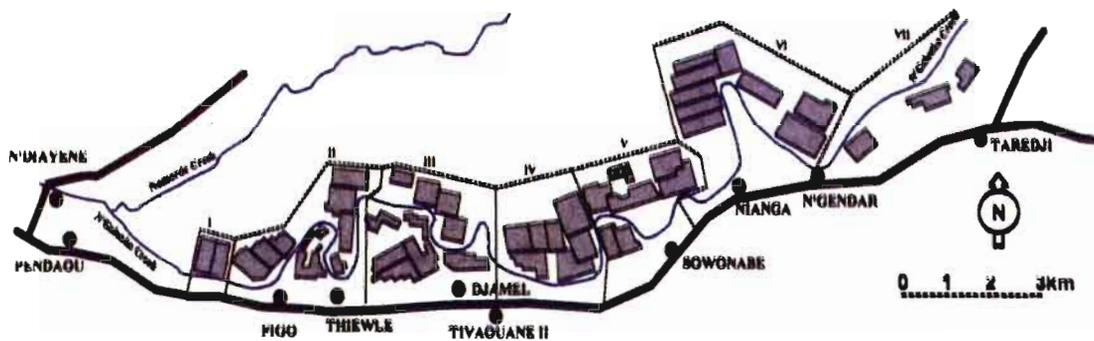


Figure 4. Le secteur N'Galenka en cours d'aménagement. Les périmètres irrigués sont attribués aux villages avoisinants avant leur mise en service.

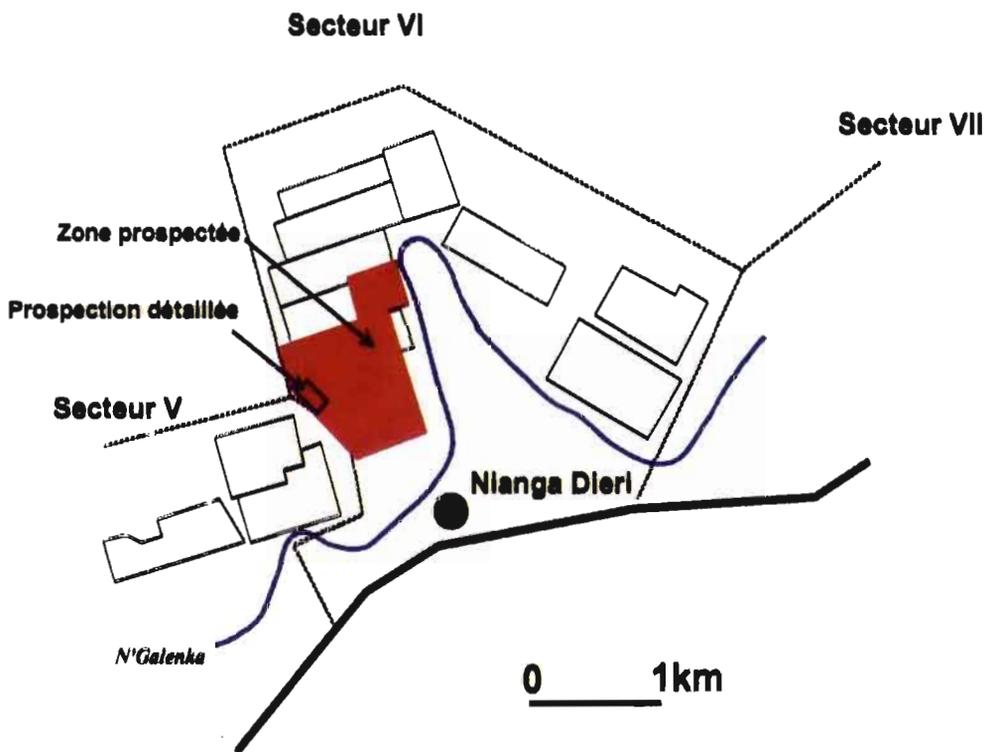


Figure 5. Détail de la zone prospectée, à proximité de la grande boucle du N'Galenka.



**Photo 3.** Les caractéristiques géochimiques des sols sont abordées à partir de prélèvements sur des transects court mais présentant un fort gradient de salinité.

## RESULTATS

**Morphologie des zones salées.** Les sols salés sont répartis selon une bande de terrain de 150 à 200 m de largeur et de plusieurs km de long. Cette bande traverse l'ensemble de la zone prospectée (figure 6). On remarque que sa limite nord est abrupte alors que sa limite sud est plus diffuse et présente plusieurs « tâches satellites » isolées. Il semble exister une asymétrie nord-sud dans la répartition de la salinité.

On observe également dans le détail que cette bande principale est composée de deux bandes mineures à salinité plus forte. Ceci est confirmé par une étude détaillée d'un secteur présenté sur la figure 7. La relation avec la topographie du site nous informe que dans cette bande principale, la bande mineure située au nord est dans une dépression alors que celle située au sud est sur une butte. A une asymétrie morphologique nord-sud dans la répartition du sel, il faut donc ajouter une asymétrie topographique. On peut schématiser en coupe la répartition de la salinité sur ce site comme présenté sur la figure 8.

Figure 6. Sur la zone prospectée, la salinité est répartie suivant une bande de 150 à 200 m de large.

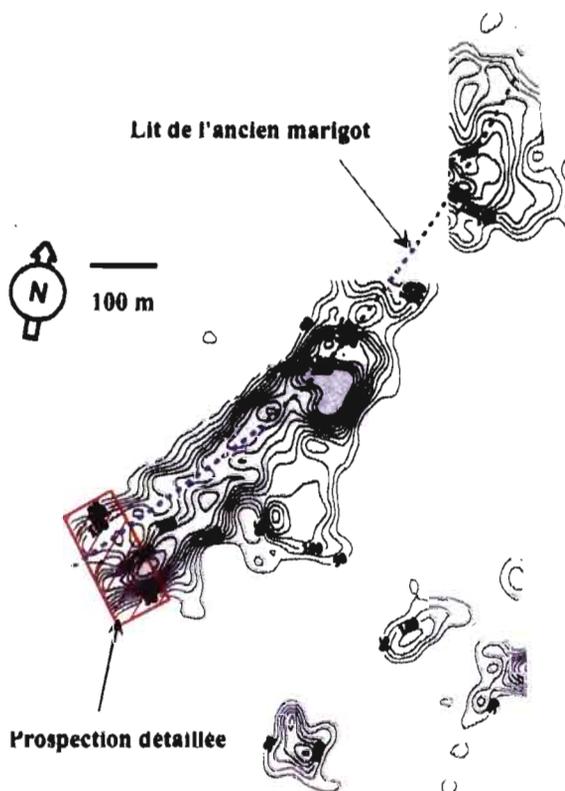
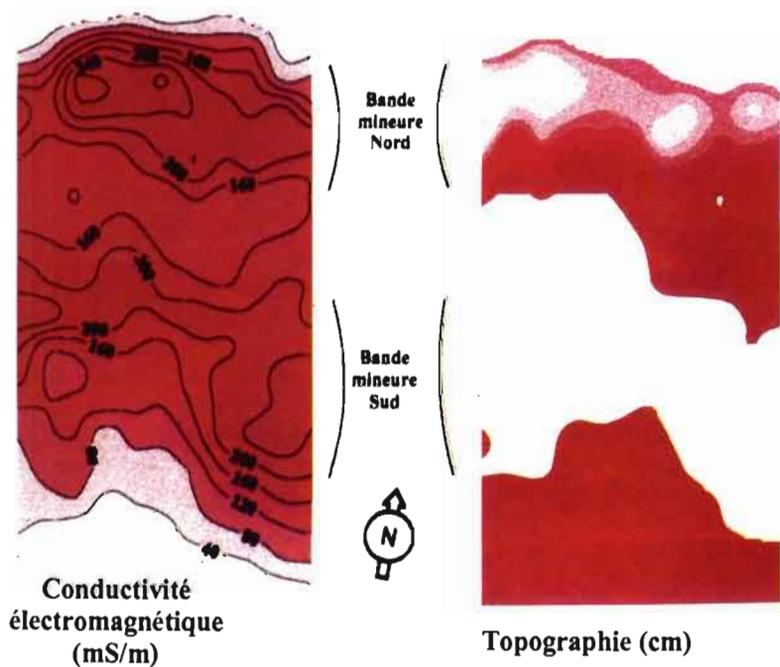


Figure 7. L'observation détaillée nous révèle que cette bande principale est composée de deux bandes à salinité plus forte, l'une sur une butte, l'autre dans une dépression



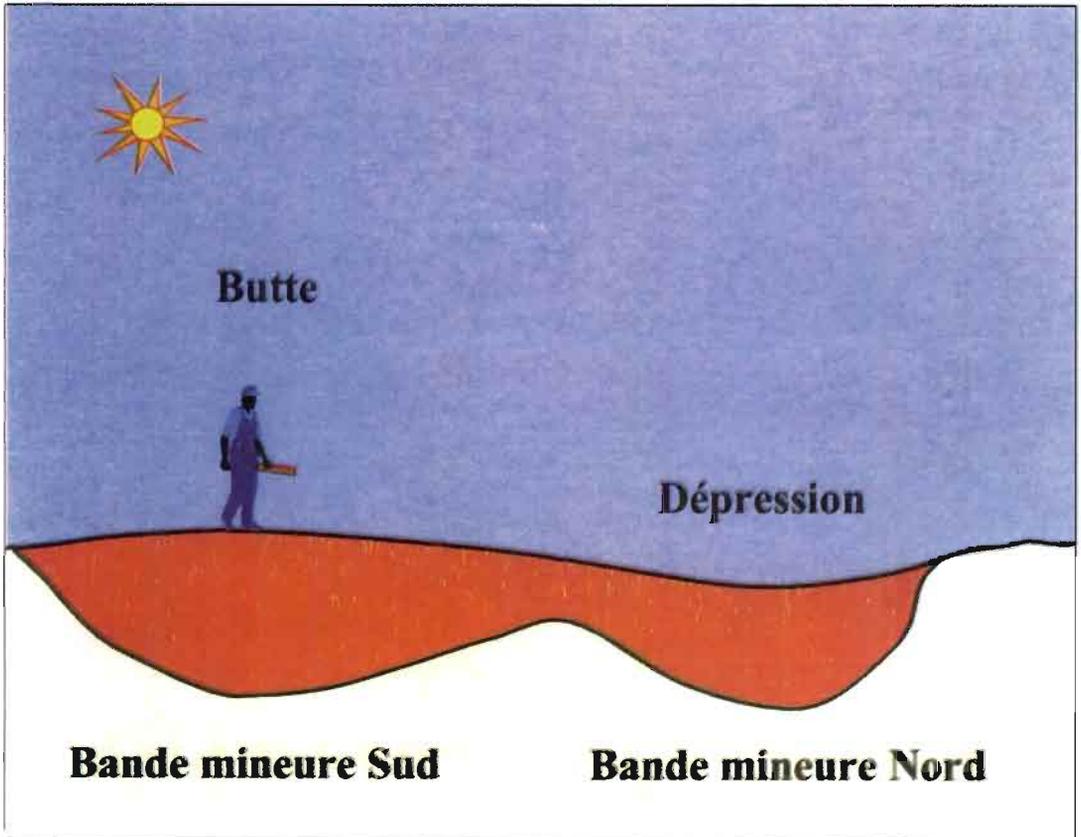


Figure 8. Coupe schématique de la morphologie des sols salés. La zone salée est représentée en rouge.

Le positionnement de ce résultat sur l'image aérienne (Geotronic, 1980) nous enseigne deux points supplémentaires.

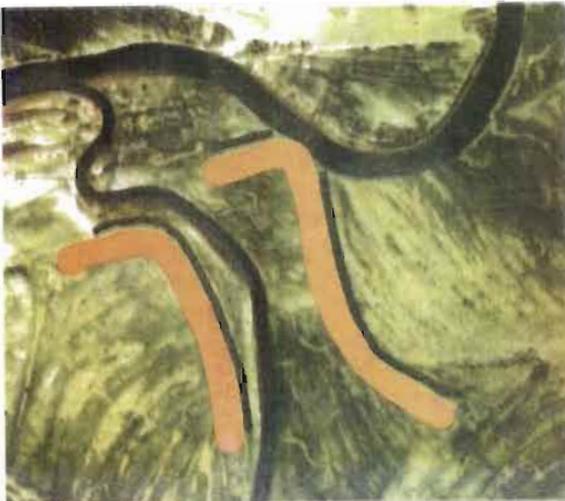
1. La bande de sols salés décelée sur le site est interrompue par le passage actuel du N°Galénka, ainsi que par ses dépôts récents. On peut en déduire que la répartition du sel est un phénomène relativement ancien et qu'il ne résulte pas d'une remobilisation récente.
2. La bande de sols salés peut être mise en relation avec un ancien passage de marigot, qui ne se détecte plus sur le terrain, mais apparaît encore sur l'image aérienne. Le passage de ce marigot correspond à la bande située au nord (on a vu qu'elle était localisée dans une dépression) et la bande la plus au sud correspond à un petit bourrelet sur la rive sud de ce marigot.



**Figure 9.** La bande de sols salés (trait rouge) est interrompue par le méandre du N'Galenka, dont le passage est donc plus récent que le dépôt de sel. On peut relier la bande de sols salés à un ancien marigot (trait noir). Il existe donc un relation entre la répartition du sel et l'ancienne géomorphologie.

**Représentativité de ces résultats.** Les caractéristiques morphologiques des zones salées mises en évidence sur ce site du N'Galenka ont été observés sur plusieurs sites dans la moyenne vallée autour de Podor. Nous irons même plus loin, à savoir que tous les sites étudiés présentent des caractéristiques similaires. Nous pouvons présenter le cas de M'Boyo, Donaye, Pont Gary...

Ces traits morphologiques sont donc représentatifs de la région et doivent impérativement être pris en considération dans l'élaboration d'un modèle de genèse de ces zones salées.



**Figure 10.** Une morphologie similaire est observée sur les secteurs de M'Boyo et Donaye...



**Figure 11.** ... où sur le site de Pont Gary, cuvette de Nianga

**Géochimie des zones salées.** La salinisation des sols est généralement attribuée à une solution d'un type chimique donné qui se concentre sous l'influence de l'évaporation. Aussi, les mécanismes d'acquisition des caractéristiques chimiques des eaux au cours de la concentration sont-ils classiquement étudiés le long de diagrammes de concentration. Il est d'usage dans le cas d'une salinité d'origine marine, d'utiliser la teneur en ions chlorure  $\text{Cl}^-$  pour estimer la concentration des solutions car celui-ci interagit peu avec son environnement et se concentre proportionnellement à la réduction du volume d'eau. Nous pouvons présenter les diagrammes de concentration réalisés sur deux sites localisés dans le delta (Rosso, Birette) où la salinisation est entretenue par une nappe salée à faible profondeur. On y observe que l'évolution des éléments chimiques tout au long de la concentration se traduit par un nuage de points organisé selon le facteur de concentration.

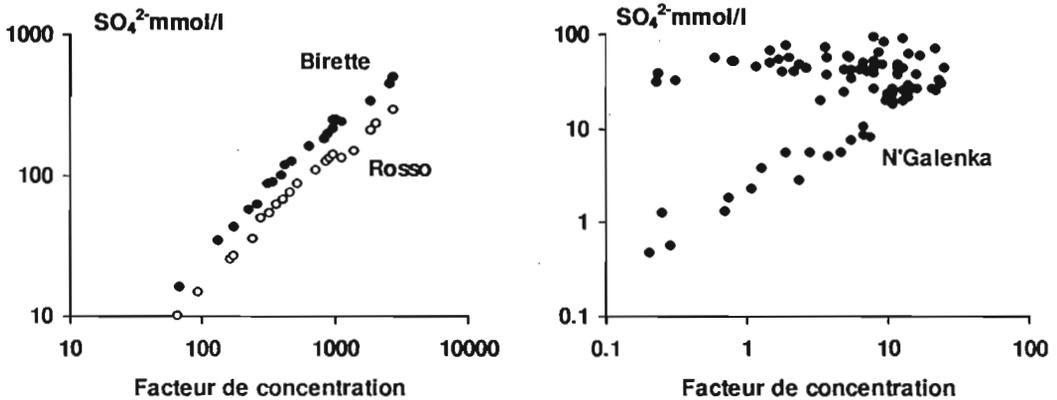


Figure 12. Evolutions des caractéristiques chimiques en fonction d'un facteur de concentration des solutions ( $\text{Cl}^-$ ) dans le delta (Birette, Rosso) et dans la moyenne vallée (N'Galenka).

L'organisation est en revanche tout autre dans le secteur N'Galenka. Les diagrammes de concentration présentent généralement deux branches. L'une de ces branches s'organise suivant une droite de pente 1. Elle correspond à l'échantillonnage réalisé dans la bande nord. L'autre branche, correspondant à l'échantillonnage dans la bande sud ne présente pas d'organisation selon le facteur de concentration. On peut déduire de cette étude géochimique que l'eau a été le vecteur de la salinisation dans le cas de la partie nord de la bande de sel principale. En revanche, dans la partie sud, les sels n'ont pas été apportés de manière dissoute mais sous la forme solide. Nous avons affaire dans ce cas à une salinisation sous la forme solide.

Des études géochimiques réalisées à M'Boyo (Diop, 1998) et Pont Gary (Thioub, 1999) montrent que ces caractéristiques géochimiques sont également représentatives de la région. Tout comme l'asymétrie morphologique et topographique, il existe une asymétrie géochimique qui doit être prise en compte dans l'élaboration d'un modèle de genèse de ces sols salés.

Deux possibilités peuvent être envisagées :

1. La répartition du sel est antérieure à l'arrivée de la solution actuelle du sol, dont le faciès chimique a été imposé par la mer. Selon ce schéma, la répartition du sel est antérieure à la transgression Nouakchottienne. La relation entre la bande salée et la géomorphologie ancienne (mais postérieure à la transgression) infirme cette hypothèse.
2. La salinisation est ancienne (on a vu que la bande est recoupée par le passage actuel du N'Galenka) mais postérieure à la transgression et a eu lieu sous la forme solide.

Il nous faut donc remonter le temps et voir quel environnement a pu donner naissance à une telle organisation dans le paysage. Pour cela, en fonction de la chronoséquence présentée précédemment, il nous faut suivre les caractéristiques des zones salées vers l'aval.

**Accumulation saline dans le delta du Fleuve Sénégal.** Le trait géomorphologique majeur encore actif dans le delta du Sénégal surtout dans le triangle Mauritanien du Parc National du Diawling, est la déflation éolienne et la formation de lunettes également appelée « clay dunes » (Maynard, 1949, Tricart, 1952, Mohamedou, 1998, Mohamedou *et al*, 1999).

Ces dunes ne sont pas de texture nécessairement argileuse. Elles présentent une texture relativement équilibrée et sont appelées clay dunes par opposition aux dunes de sable proprement dites. Sous l'influence de la forte salinité généralisée dans le delta et en présence de cristaux de sels à croissance rapide, s'observe un fractionnement en poudre de l'état de surface des sols. Les particules individualisées sont de la taille des limons et des sables. Elles sont composées essentiellement de sels. Elles sont arrachées par le vent et vont s'accumuler sur les bordures des cuvettes et derrière tous les obstacles, en particulier derrière les cordons-galleries de mangrove résiduels, localisés dans les cours d'eau.

Il en résulte des dunes salées, disposées comme un bourrelet de berge sous le vent dominant (donc au sud) des cours d'eau.

Cette accumulation permet d'expliquer :

1. Une asymétrie N-S dans la répartition des sels.
2. Une asymétrie N-S dans la topographie des sites. On y reconnaît en effet la dune, butte salée, et le cours d'eau, dépression salée.
3. Une asymétrie N-S dans la géochimie des sels. Lorsque l'accumulation saline se termine, les sels sont redistribués sous l'influence des pluies. On peut sans problème envisager une salinisation secondaire du lit du cours d'eau par le ruissellement très salé provenant de la dune salée. Ce point explique une salinisation particulière de la dune mais sous forme dissoute dans le lit du cours d'eau.
4. Une grande variabilité spatiale dans la salinité de la dune. Celle-ci s'observe dans la dune active. Elle peut s'expliquer par la nature différente des sels qui alimente la dune durant la saison. Au début de la saison sèche, ce sont essentiellement des sels relativement peu solubles tels que le gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) qui précipitent à la surface du sol. Lorsque la saison sèche avance, les solutions se concentrent et principalement dans les conditions acides, les sels sodiques et magnésiens se forment ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ;  $\text{NaCl}$  ;  $\text{MgSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$ ). La nature des sels varie donc en fonction de la saison et le dépôt, en fonction de la direction des vents et des « trous dans le rideau d'arbres ».

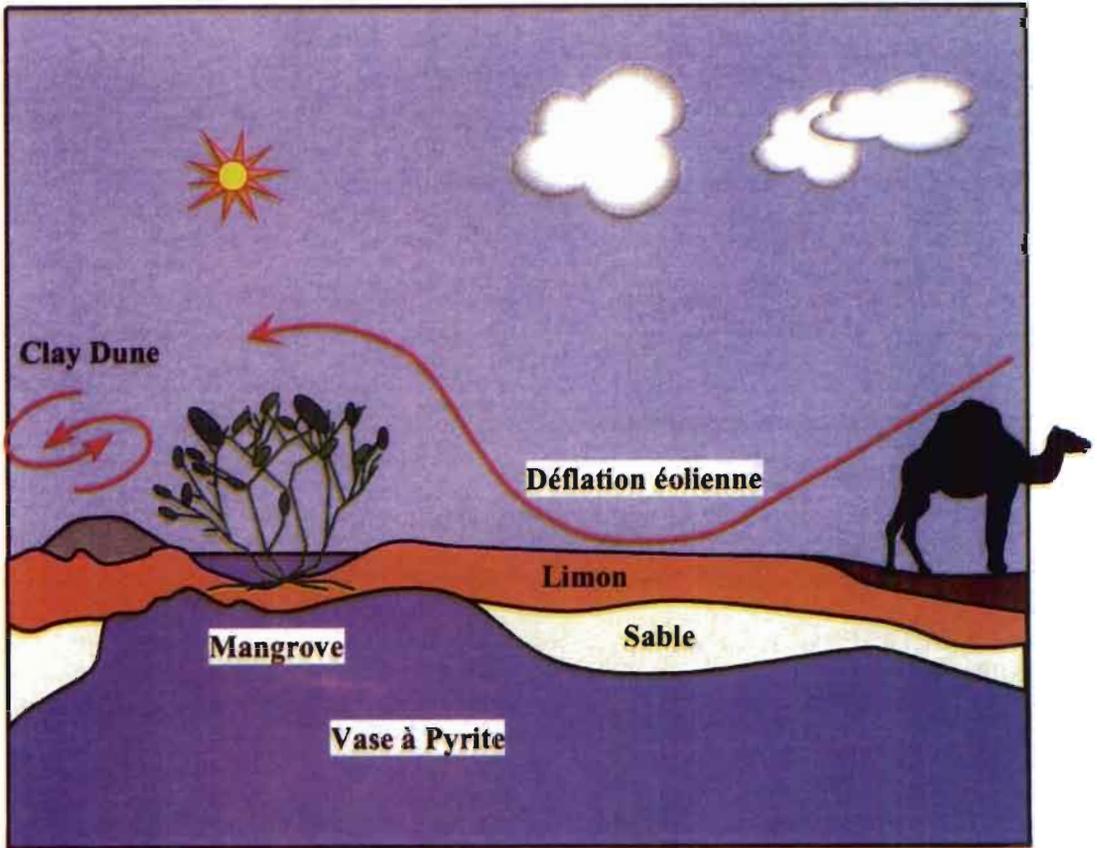


Figure 13. Dans le delta, le processus géomorphologique principal encore actif est l'accumulation de dunes de sels sous le vent dominant de tous les obstacles.

**Arrêt de la déflation éolienne et de la formation de « clay dunes ».** Un lien définitif entre l'accumulation éolienne actuelle dans le delta et les bandes de sols salés dans la moyenne vallée est l'identification d'un processus bloquant la déflation éolienne dans le temps.



Photo 4. La déflation éolienne est bloquée par une modification latérale dans la texture de l'horizon superficiel. On observe ici un état de surface en poudre (gauche) et en plaquettes centimétriques (droite)

A proximité de la mangrove, on peut observer des transitions abruptes entre un état de surface poudreux et vulnérable à la déflation éolienne et un état de surface en plaquettes centimétriques, non transportables par le vent. Mohamedou (1998) a montré que cette transition ne peut être attribuée à une modification dans la salinité des sols. En revanche, il peut être attribué à un changement dans la texture de l'horizon superficiel. Parallèlement, ce changement de texture est un stade d'évolution dans la maturation des profils à partir de la vase à pyrite de la mangrove. Le changement de texture accompagne donc la mangrove avec un certain retard dans le temps. Cette évolution latérale dans l'état de surface du sol a, tout comme la végétation de mangrove, balayé la vallée depuis Boghé jusqu'à sa situation actuelle. Ce point nous permet d'avancer que des conditions environnementales similaires à celles observées actuellement dans le delta, régnaient dans la moyenne vallée. Ces conditions étaient favorables à la déflation éolienne et à l'accumulation des sels.

**Application à la cartographie des sels en préalable à l'aménagement.** Le travail présenté a permis l'élaboration de connaissances nouvelles concernant le milieu et son fonctionnement. Dans le cadre du PSI, il convient de montrer comment ces connaissances peuvent être appliquées à une meilleure gestion de l'agriculture irriguée dans la vallée. Plusieurs intervenants lors du séminaire ont abordé la présence de sels et l'absence de logique apparente dans sa répartition insistant sur le fait qu'il s'agissait d'une contrainte majeure.

Nous avons tenté de mettre à profit les connaissances acquises pour la cartographie des sols salés dans l'ensemble de la vallée du N'Galenka en cours d'aménagement d'une superficie voisine de 4000 ha. L'hypothèse de départ est simple. Les sels semblent organisés en bandes longues et étroites, aux contours relativement abrupts. La répartition peut être reliée à l'ancienne géomorphologie du site qui apparaît sur les images aériennes. Partant de ce support, 11 transects ont été positionnés de manière à recouper au maximum l'ancienne morphologie et les structures supposées être salées. Les mesures de salinité ont été réalisées en continue à l'aide du conductimètre électromagnétique. Trois demi-journées de travail de terrain permettent de dresser un document présenté sur la figure 14.

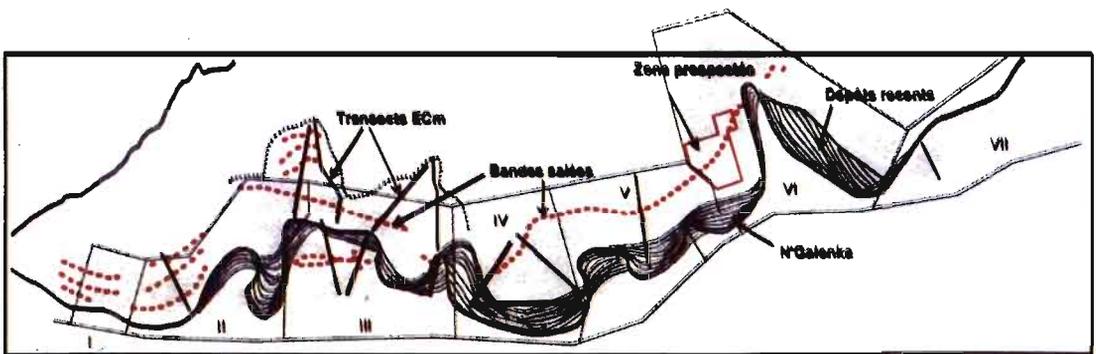


Figure 14. Carte de répartition des sols salés dans la vallée du N'Galenka.

**On y observe :**

1. que la distribution de la salinité en bande est un phénomène régional généralisé ;
2. qu'une large proportion des périmètres en cours d'aménagement est « traversée » par les bandes salées ;
3. en fonction de l'attribution des périmètres aux villages avoisinants que le préjudice est grand pour certains alors que d'autres villages ne sont pas concernés ;
4. qu'il serait simple de réorganiser l'aménagement pour tenir compte de la présence de ces bandes de sols salés.

Par la suite, plusieurs vérifications sur le terrain ont révélé que toutes les surfaces salées présentes sur ce secteur ont été décelées à partir de ces 11 transects initialement positionnés, confirmant l'efficacité de la méthode.

## **CONCLUSION**

Une redistribution des sels d'origine marine par le vent a été responsable d'une répartition des sols salés sous la forme de bandes de 150 à 200 m de largeur et de plusieurs km de longueur. Elle explique l'absence de relation entre les unités géomorphologiques actuelles et la répartition des sels. Elle explique également la grande variabilité dans le faciès chimique signalée par de nombreux auteurs.

La compréhension du rôle du vent dans ce phénomène et de la logique de répartition des sels permet aujourd'hui, avec un minimum de travail de terrain, l'élaboration rapide de documents cartographiques de la répartition des sols salés dans le paysage. Ces documents seraient un atout indiscutable à la bonne gestion de l'environnement et à l'implantation des périmètres irrigués dans le paysage. La méthode de prospection, simple, rapide et peu onéreuse, doit être préconisée avant tout aménagement.

## **BIBLIOGRAPHIE**

**Barbiéro L., M.A. Ould et V. Caruba, 1998.** Influence de la maturation des sols de mangrove sur la déflation éolienne et la formation de dunes argileuses dans le delta du fleuve Sénégal. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Science de la terre et des planètes 327:115-120.

**Barbiéro L. et C. Laperrousaz, 1999.** La cartographie de la salinité dans la vallée du fleuve Sénégal. Succès d'une démarche ascendante. Colloque Geofcan, Géophysique des sols et des formations superficielles, 21-22 septembre 1999, Orléans (BRGM, INRA, IRD, UPMC).

**Barbiéro L., S. Cunnac, L. Mané, C. Laperrousaz, C. Hammecker, J.L. Maeght, 2000.** Salt distribution in the Senegal middle valley. Analyse of a saline structure on the future irrigation schemes of creek N'Galenka. Agricultural Water Management (sous presse).

**Cunnac S., 1996.** Etude de la variabilité spatiale de la salinité des sols des futurs périmètres irrigués du Marigot N'Galenka (Sénégal). Rapport ORSTOM-PSI-ESA Purpan.

**Diop A., 1998.** Salinité des sols de la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Zone de M'Boyo. Aspects morphologiques et géochimiques. Mémoire de DEA en Science de l'Environnement de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar - ORSTOM, 78 p.

- Faure, H., J.C. Fontes, L. Hebrard, J. Monteillet, P.A. Pirazzoli, 1980.** Geoidal changes and shore-level tilt along holocene estuaries : Senegal river area, West Africa. *Science* **210**:421-423.
- GEOTRONIX, 1980.** Couverture aérienne, mission Teledyne Geotronics (USA). Photographies Infra-rouge fausses couleurs 1/50 000<sup>ème</sup>.
- Laperrousaz C. et L. Barbiéro, 1999.** Influence de la variabilité du faciès chimique sur la conductivité électromagnétique. Colloque Geofcan, Géophysique des sols et des formations superficielles, 21 – 22 septembre 1999, Orléans (BRGM, INRA, IRD, UPMC).
- Laval, F., 1996.** Rapport d'activités. Travaux d'expérimentation ORSTOM-FED dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal. Région de Podor. ORSTOM de Dakar Hann.
- Mané L., 1998.** Utilisation de la télédétection et du SIG pour l'étude de la dégradation par salinisation des terres agricoles. Exemple de la vallée alluviale du fleuve Sénégal. Rapport de recherche Post Doctorale, UCL, AUPELF-UREF, ORSTOM, 54 p.
- Loyer, J.Y. 1989.** Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution et évolution sous cultures. Etudes et Thèses ORSTOM Edition, Paris.
- Michel, P., 1973.** Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mémoire ORSTOM, 752 p.
- Ould M.A., L. Barbiéro, G. Giannerini et C. Caruba, 1997.** Interactions sol-eau dans le parc du Diawling (Mauritanie) et leurs effets sur l'environnement de la zone. *In* Faure H. et Faure L., Editeurs : Changement aux marges des déserts en Afrique depuis 135000 ans : Implication pour l'Eau, le Carbone et l'Homme. Nouakchott, 29 décembre 1996-12 janvier 1997.
- Ould M.A., 1998.** Contribution à l'étude de l'environnement du parc national du Diawling (Mauritanie). Eaux-Sols-Végétation. Thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 155 p.
- Ould M.A., A. Aventurier, L. Barbiéro, R. Caruba et V. Valles, 1999. Geochemistry of Clay dunes and associated pan in the Senegal delta (Mauritania). *Arid Soil Research and Rehabilitation* **13**(3):265-280.
- Thioubé I.G., 1999.** Etude de deux systèmes pédologiques, l'un en milieu alluvial dans la moyenne vallée du Sénégal, l'autre en milieu soudanien de glacis à Thyssé-Kaymor dans la région de Kaolack. Relations respectives avec les principales contraintes pour l'agriculture que sont la salinité et l'érosion. Mémoire CNFTAGR Ziguinchor, génie de l'Agriculture/IRD, 13 p. + annexes.
- Zanolin A., 1996.** Etude de site pour l'implantation d'un réseau piézométrique sur périmètres irrigués (vallée du Fleuve Sénégal). Mémoire DESS Eaux Souterraines, UJF Grenoble, 73 p.

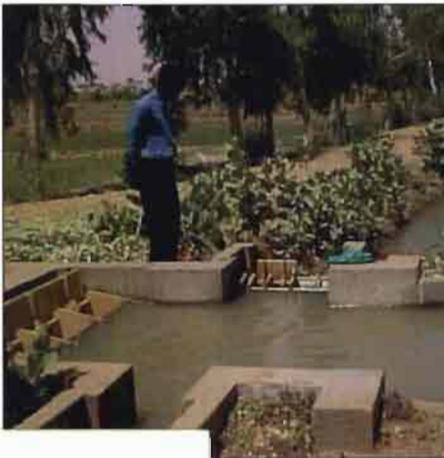
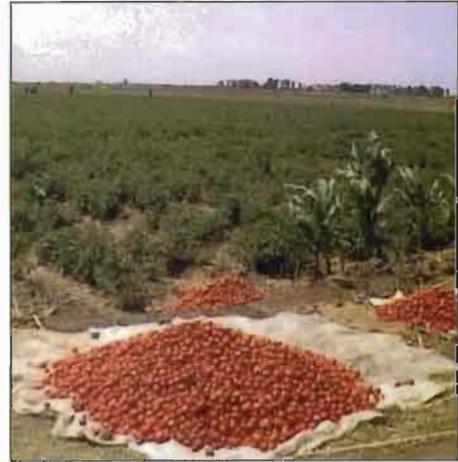


# Pour un Développement Durable de l'Agriculture Irriguée dans la Zone Soudano-Sahélienne



Synthèse des Résultats du Pôle Régional de Recherche sur  
les Systèmes Irrigués (PSI/CORAF)

*JC.Legoupil, C.Dancette, P.Godon, IM.Maïga et KM.Ndiaye*



# Pour un Développement Durable de l'Agriculture Irriguée dans la Zone Soudano-Sahélienne

Synthèse des Résultats du Pôle Régional de Recherche  
sur les Systèmes Irrigués (PSI/CORAF)

*Editeurs*

*JC.Legoupil*

*C.Dancette, P.Godon, IM.Maïga et KM.Ndiaye*

*avec la collaboration de N. Dupuy pour l'édition scientifique*

**© PSI/WECARD-CORAF**  
**Tous droits de traduction et de reproduction réservés**  
**Crédit photographique : PSI/WECARD-CORAF**  
**Edition WECARD-CORAF, juin 2000**  
**ISSN 0851-0296**