



Rapport de Campagne

Bilan de quatre années de suivi de la salure d'une vallée
aménagée anti-sel
par Conductivimétrie Electromagnétique et Krigeage

Boivin, P. et Brunet, D., Pédologues ORSTOM

Janvier 1990

Rapport de Campagne

Bilan de quatre années de suivi de la salure d'une vallée
aménagée anti-sel
par Conductivimétrie Electromagnétique et Krigeage

Boivin, P. et Brunet, D., Pédologues ORSTOM

Rapport de Campagne

Bilan de quatre années de suivi de la salure d'une vallée aménagée anti-sel par Conductivimétrie Electromagnétique et Krigeage

Boivin, P. et Brunet, D., Pédologues ORSTOM

*Orstom, 70-74 route d'Aulnay, 93140 Bondy
Orstom, BP 1386, Dakar, Sénégal*

Introduction : Le milieu naturel et sa problématique

Le domaine fluvio-marin de basse Casamance subit une forte dégradation saline depuis quelques années. Cette salure est due au déficit pluviométrique que connaît la région et à la topographie plane de l'estuaire du fleuve Casamance (Boivin et al, 1986).

Le climat actuel est contrasté : une saison des pluies de juin à octobre, caractérisée par une forte variabilité spatiale et temporelle, et une saison sèche de fin octobre à la mi-juin environ.

Traditionnellement exploités en rizières, les bas-fonds ont été dans un premier temps abandonnés par les cultivateurs. Puis sont apparus des aménagements divers destinés à stopper la salure, dont le plus efficace est le petit barrage anti-sel (CEE-ORSTOM, 1988). Ces petits barrages anti-sel sont des digues construites par les paysans, auxquelles s'ajoute un ouvrage bétonné réalisé sur le lit mineur : seuil et batardeaux. L'aménagement concerne de cent à mille hectares de sols salés qui se trouvent ainsi poldérisés et submergés par une lame d'eau douce en saison des pluies.

Si ce type d'ouvrage s'est toujours avéré efficace pour stopper l'avancée de la langue saline, les sols lourds et la topographie plane n'ont pas permis, de façon générale, un dessalement significatif des sols protégés par la digue. L'ouvrage à batardeaux s'est alors montré insuffisant, ne permettant pas de contrôler avec précision la lame d'eau en amont, et notamment d'évacuer les premières eaux de ruissellement fortement salées.

L'ORSTOM a alors conçu et réalisé un système de vannes robuste et peu coûteux devant permettre d'accélérer le processus de dessalement des sols. Cette démarche et ces observations ont été réalisées sur une vallée-test, suivie depuis 1984. La suite de ce rapport illustre la méthodologie originale mise en oeuvre pour disposer d'un suivi de la salure des sols de bonne qualité, dans l'espace et dans le temps, au cours des différentes phases de l'aménagement.

I. Site d'étude, historique de l'aménagement.

Le site choisi est une petite vallée de 150 hectares située en bordure du massif forestier des Kalounayes, en rive droite du fleuve Casamance, au nord de Ziguinchor. Une carte de situation est présentée en figure 1. La vallée est désignée sous le nom de l'un des villages qui la bordent : vallée de Djiguinoum.

Les 150 hectares de la vallée sont poldérisés par une digue en terre compactée de 245 mètres de longueur, équipée sur le lit mineur d'un ouvrage bétonné. Une carte de la vallée est présentée en figure 2.

Les sols de la vallée sont sulfatés et acides (Brunet, D., 1988) et presque toujours salés. Les salures, mesurées sur extrait 1/5e de sol sont, pour plus de la moitié de la superficie, supérieures à 2mS/cm

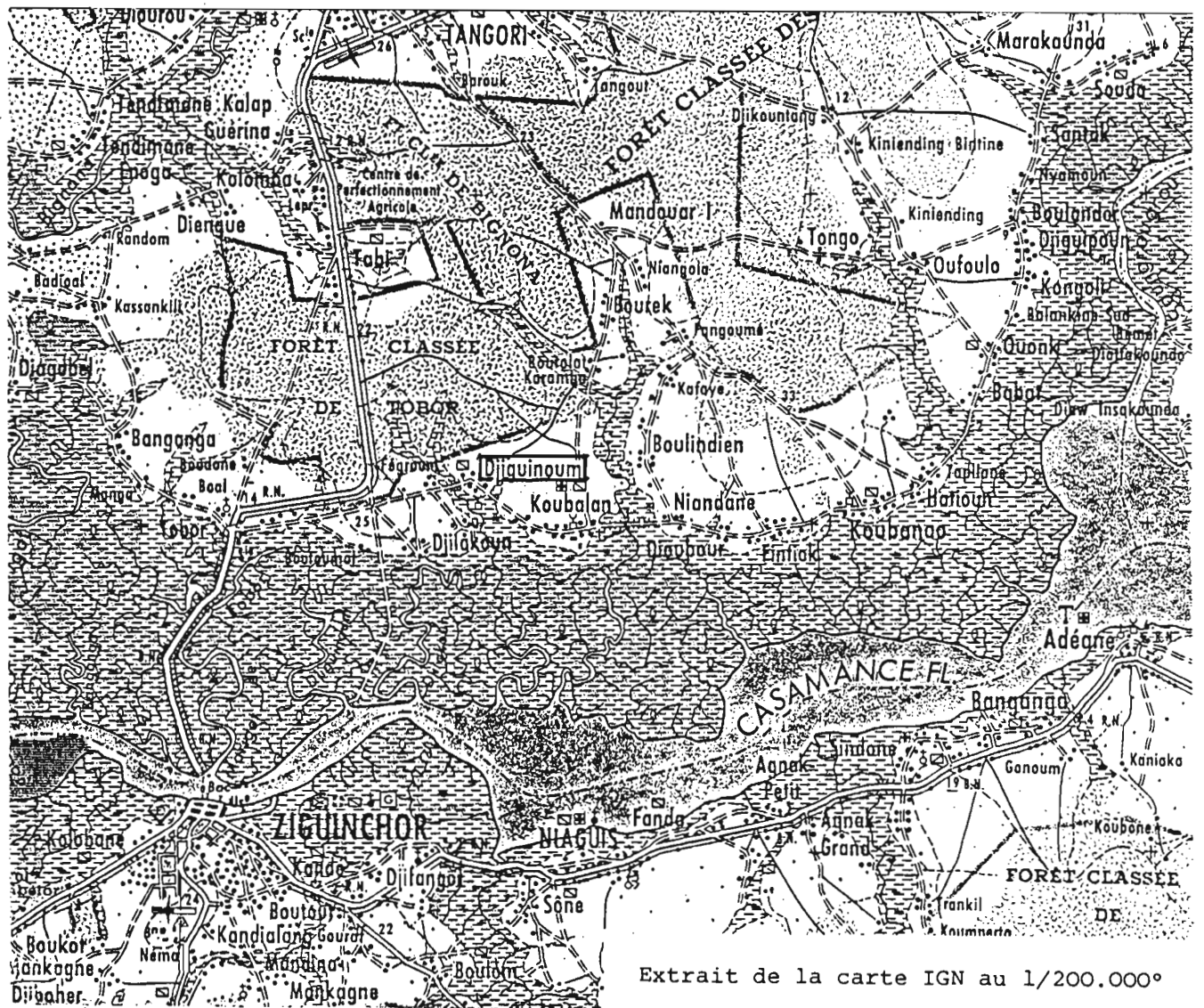
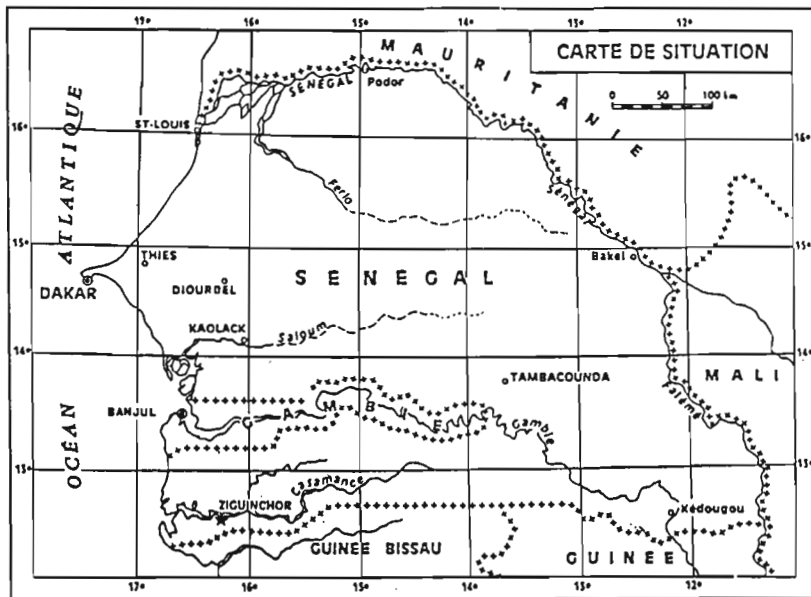


Fig. 1 : Carte de situation générale

en 1988 (Brunet, D., 1989).

La digue a été construite au cours de la saison sèche 1984, mais n'a été définitivement fermée qu'à partir de l'hivernage 1985. La retenue se remplit depuis lors en saison des pluies. Après environ 400 mm de précipitations, la lame d'eau douce dépasse la crête du déversoir et déborde alors en aval. Ce dispositif n'évacue que de l'eau douce, les sels restant présents dans les sols de la vallée. Cette constatation nous a conduit à installer une vanne à ouverture par le fond, maniable par un seul homme, dans le but d'évacuer les eaux salées des premiers ruissellements.

Utilisé à partir de l'hivernage 1988, le nouveau dispositif a permis d'évacuer pour la première fois des dizaines de tonnes de sels marins (Brunet, D., 1989). L'expérimentation que nous décrivons dans la suite de ce rapport est destinée à mettre en évidence au niveau des sols d'éventuelles variations de la salure, de 1986 à 1989.

II. Méthodologie de cartographie de la salure.

La méthodologie de cartographie de la salure adoptée associe l'utilisation d'un conductivimètre électromagnétique et les techniques d'interpolation numérique par krigeage. Cette méthode est la seule, dans ce milieu, nous permettant de réaliser une évaluation spatiale et temporelle des variations de la salure de façon fiable et pour un coût mineur (Boivin et al, 1988).

Le principe de la mesure au conductivimètre électromagnétique est présenté par McNeill J.D. (1980). L'exploitation de l'appareil dans un but cartographique à l'aide du krigeage est exposée par Boivin et al (1988). Les cartes de salure des sols ont été réalisées en 1986, 1987, 1988 et 1989.

Les mesures ont toujours été faites fin mars, au moment où le milieu naturel a atteint un équilibre de saison sèche. C'est le cas notamment du profil d'humidité volumique des sols (Zante, P., 1987). Cette condition nous a permis d'estimer que les mesures de conductivité électromagnétique (CEM) ont toujours été réalisées à profil d'humidité du sol constant d'une année à l'autre. Cette approximation sera toutefois discutée ci-après.

La zone cartographiée représente 90 hectares de terres salées, réparties entre la digue de fermeture (au sud), et la piste qui coupe la vallée dans sa partie nord (figure 2). En 1986, la mesure de CEM a été réalisée en 114 points répartis sur des transects recoupant la vallée et présentés en figure 3 : sur chaque transect, les points de mesure ont été espacés de 40 mètres. Pour 1987, 1988 et 1989, les mesures ont été faites aux noeuds d'un réseau de mailles carrées de 100 mètres de côté, soit environ 100 points de mesure (figure 4).

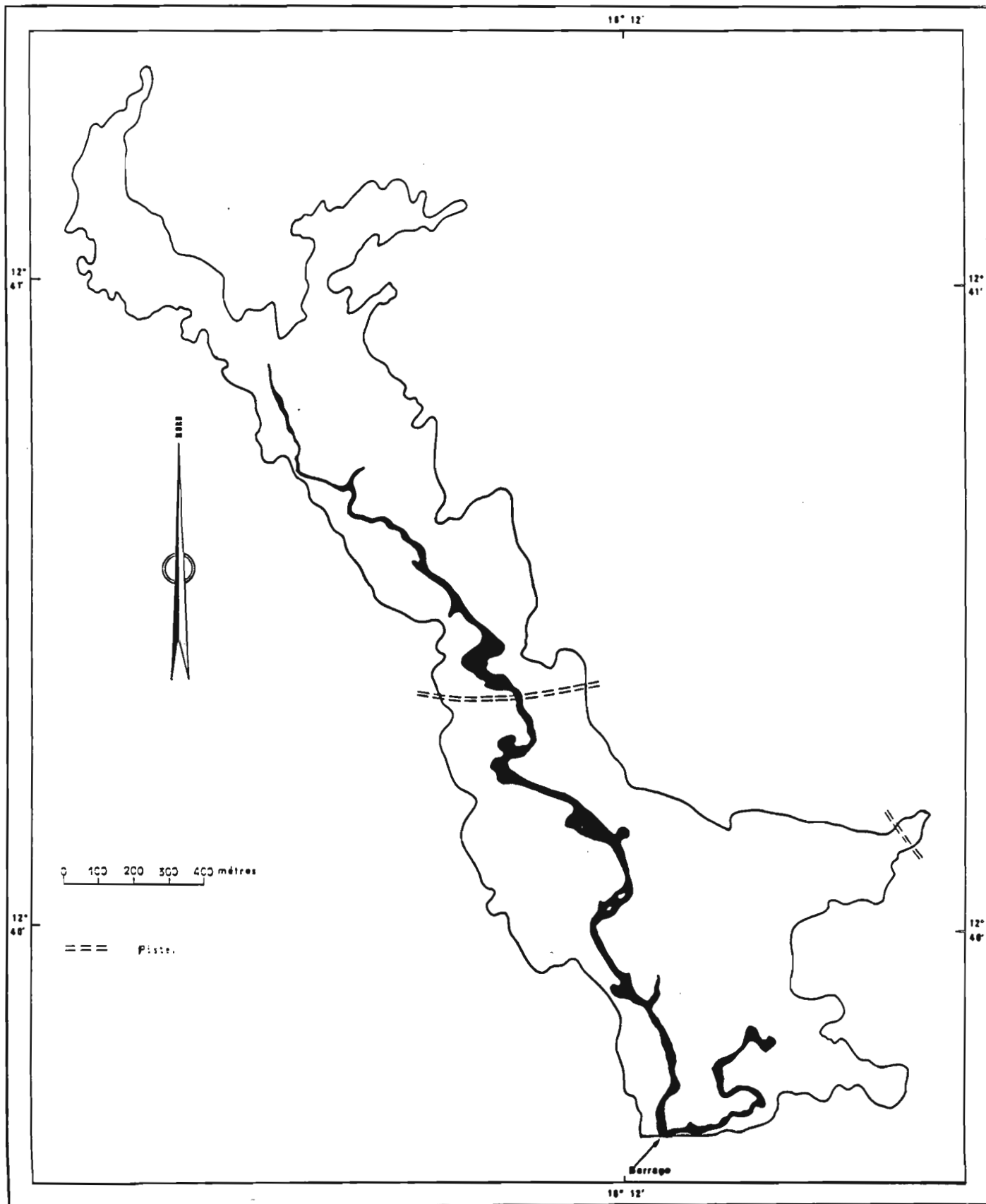


Fig. 2 : Carte de la vallée de DJIGUINOUM

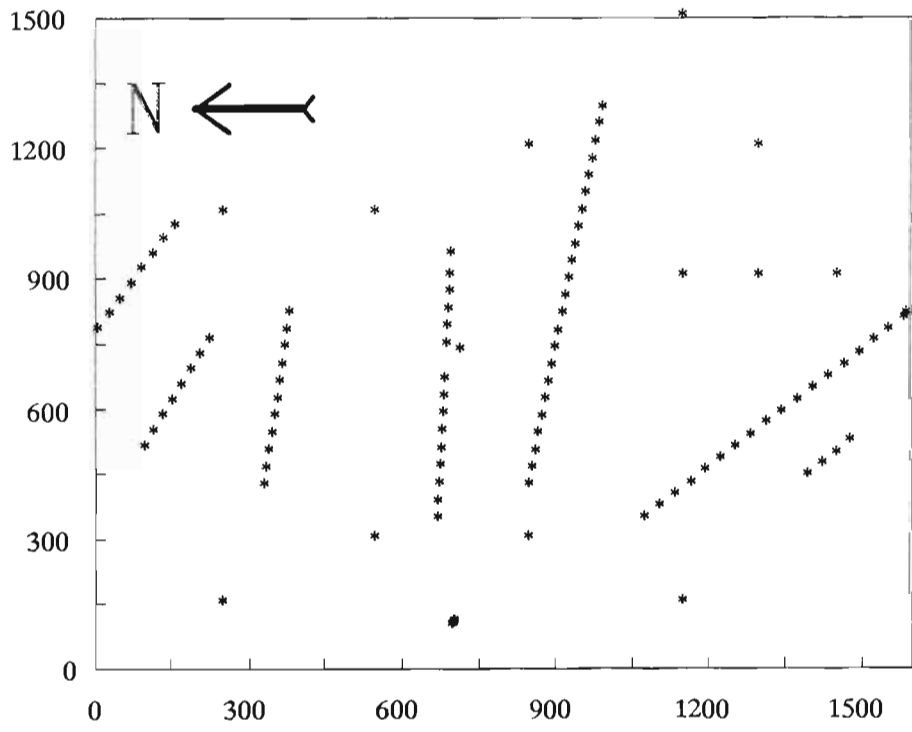


Figure 3 : plan d'échantillonnage, année 1986.

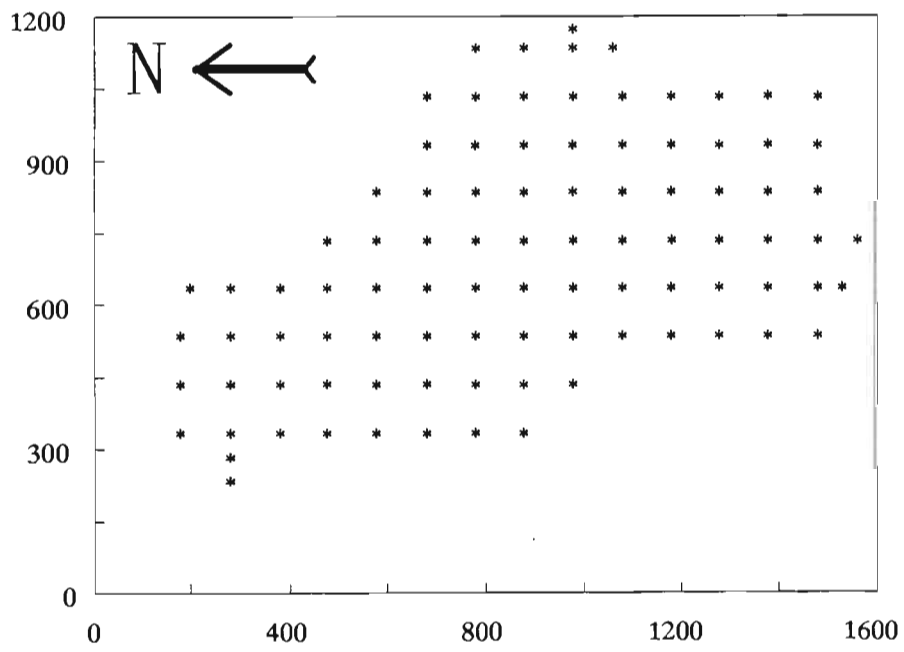


Figure 4 : plan d'échantillonnage, années 1987, 1988 et 1989.

III. Résultats.

Le variogramme moyen calculé sur les données obtenues en 1986 est présenté en figure 5.

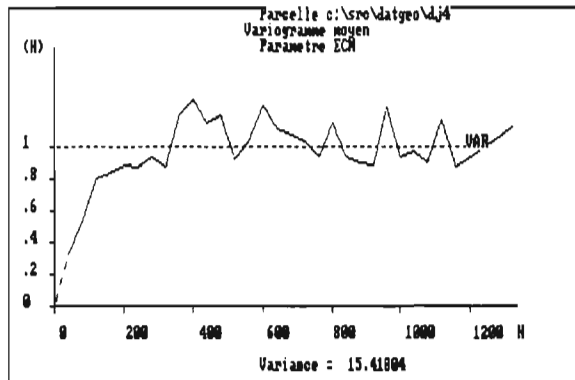


Figure 5: variogramme moyen des valeurs de conductivité électromagnétique mesurées en 1986

Abcisses : distances en mètres
Ordonnées : semi-variogramme.

Il met en évidence une variable fortement structurée, correspondant à un modèle sphérique d'effet de pépite nul, de palier 1.1 et de portée égale à 200 mètres.

Les variogrammes calculés pour les trois années suivantes révèlent la même structure, ils sont présentés en figures 5,6 et 7.

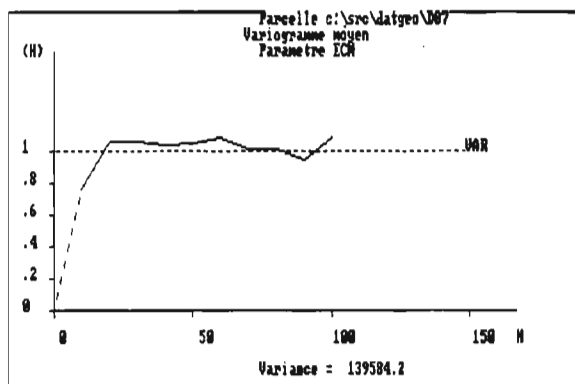


Figure 5: variogramme moyen des valeurs de conductivité électromagnétique mesurées en 1987

Abcisses : distances en dizaines de mètres
Ordonnées : semi-variogramme.

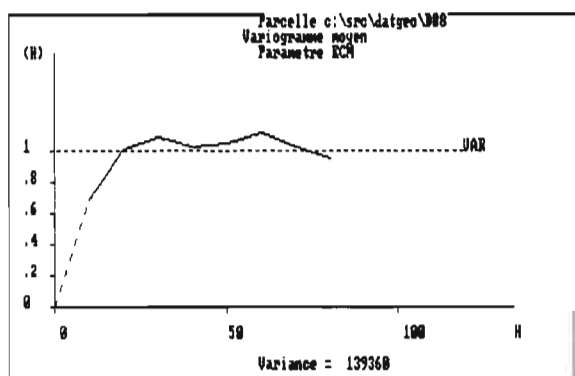


Figure 6: variogramme moyen des valeurs de conductivité électromagnétique mesurées en 1988

Abcisses : distances en dizaines de mètres
Ordonnées : semi-variogramme.

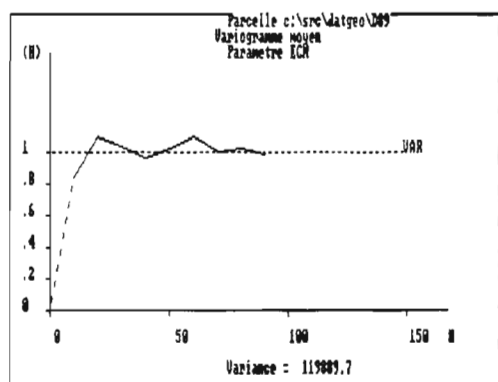


Figure 7: variogramme moyen des valeurs de conductivité électromagnétique mesurées en 1989

Abcisses : distances en dizaines de mètres
Ordonnées : semi-variogramme.

La structure spatiale de la mesure de CEM est donc remarquablement stable au cours du temps. Ceci nous a permis de calculer par krigeage des cartes de CEM interpolées, en adoptant pour modèle d'interpolation le même variogramme pour chaque calcul. Ces cartes sont restituées en figures 8, 9 et 10 en fin de rapport.

On constate une stagnation, voire une augmentation des surfaces salées, de 1986 à 1988. En particulier, les cartes de 1987 et 1988, établies à partir du même plan d'échantillonnage, se superposent parfaitement dans la partie nord. La salure des sols semble en revanche avoir fortement diminué de 1988 à 1989. Ce résultat confirme les mesures de salinité effectuées au niveau des lâchers d'eau et illustre l'efficacité du dispositif de vannes mis en place.

Le tableau I présente les superficies salées en hectares pour les trois dernières années, par classe de salure. On constate une forte diminution des surfaces les plus salées, et une augmentation conjointe des surfaces non salées, de 1988 à 1989, tandis que ces surfaces étaient restées stables en 1987 et 1988.

Surfaces	1987	1988	1989
ECM < 300 mS/m	46.35	43.92	58.95
ECM < 500 mS/m	25.83	28.53	25.83
ECM < 700 mS/m	23.13	29.1	23.76
ECM < 900 mS/m	22.5	17.73	16.6
ECM > 900 mS/m	14.04	12.6	6.75

Tableau I: Evolution des surfaces salées de 1987 à 1989
(Surfaces en hectares)

IV. Discussion.

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette expérimentation.

a) Efficience de l'aménagement.

Les cartes de salure confirment le non-dessalement de la vallée antérieurement à la mise en service des vannes (saison des pluies 1988), et le bon fonctionnement de ces dernières. Ce résultat doit avoir valeur de test pour l'ensemble des petits barrages de ce type en service en Casamance (au nombre de 25 en 1987). Ainsi, les paysans des communautés villageoises de Djiguinoum et Djilakoun concernées par l'aménagement ont décidé la mise en culture des rizières dès 1989. Ces dernières étaient abandonnées depuis plus de quinze ans.

b) Qualité de la mesure au CEM et des cartes obtenues par krigeage.

Une excellente reproductibilité des résultats cartographiques a été obtenue les années où l'ouvrage n'a pas permis l'évacuation des sels. En particulier, les isovaleurs et les surfaces calculées en 1987 et 1988 sont identiques. Un dessalement a été diagnostiqué en 1989, en accord avec les mesures effectuées sur lâchers d'eau.

En première conclusion, la mesure au CEM semble donc très fiable et reproductible. Il faut ajouter à ceci l'observation suivante : la nappe phréatique superficielle, qui se situait à environ deux mètres de profondeur en 1985 après la fermeture du barrage, a vu son niveau remonter chaque année en raison des bonnes précipitations.

En 1989, la nappe se trouvait à moins de un mètre de profondeur fin mars, au moment de la cartographie. L'hypothèse de stabilité du profil d'humidité des sols d'une année sur l'autre, formulée au début de ce rapport, n'est donc pas vérifiée en milieu aménagé. En particulier, les sols étaient proches de la saturation en de nombreux points de mesure en 1989. L'augmentation chaque année de l'humidité des sols aurait alors théoriquement conduit à surestimer l'état de salure des sols (McNeill J.D. 1980). La stabilité de la mesure de 1986 à 1988, puis sa chute en 1989, prouvent donc la robustesse de la méthode de mesure de CEM en milieu fortement salé, lorsque l'humidité du sol varie.

Techniquement, l'utilisation des méthodes de krigeage, réalisée dans ce cas à l'aide du logiciel GEOSTAT-PC (Boivin, 1988), assure un gain de temps et un critère d'objectivité aux documents établis. Les avantages de cette méthode ne sont par ailleurs plus à démontrer : estimation non biaisée et connaissance des variances d'estimation.

c) Conséquence pour l'étude de la pédogenèse des sols.

La vallée de Djiguinoum a été également étudiée pour son intérêt géochimique. Les sols de bas-fonds de la région subissent, depuis quelques années, le développement d'une pédogenèse acide aboutissant à la formation d'un type de sol identifié pour la première fois à cette occasion : le sol sulfato-alunique (AFES-INRA, 1988).

Ce sol se distingue entre autre par :

- une très forte acidité «in situ» : pH fréquemment inférieur à 2;
- un taux d'aluminium échangeable très élevé, une grande quantité d'aluminium en solution dans les nappes et les sols (souvent plus de 50 meq/l) (Le Brusq et al, 1987);
- la précipitation en surface de paragenèses minérales à sulfates de fer, d'aluminium et de magnésium.

Le Brusq et al (1987) ont défini les réactions géochimiques pouvant aboutir à ce type de sol à partir d'un sol sulfaté acide. Ils montrent notamment que cette pédogenèse ne peut se développer qu'en milieu dessalé, le sodium ayant une action protectrice au niveau des argiles : tant que le cation Na^+ sature la capacité d'échange des argiles, les ions H^+ libérés dans le milieu s'échangent difficilement

avec les ions Al^{+++} des feuillets des argiles.

De fait, les sites à sulfatosols aloniques n'ont été identifiés jusqu'alors qu'en bordure de vallée, pour des sols non salés.

Or on a pu observer, corrélativement au retrait de la salure dans la vallée de Djiguioum, un développement rapide des précipitations superficielles de sulfates d'aluminium (essentiellement de la tamarugite) dans les secteurs non salés. Ces modifications géochimiques du milieu illustrent donc parfaitement, dans l'espace et dans le temps, le scénario géochimique établi théoriquement.

La fiabilité, la légèreté et la reproductibilité de la méthode employée, ont permis d'obtenir ici un résultat, résultat au coût prohibitif et à la faisabilité incertaine avec une autre méthode.

Conclusion

Le couplage d'une évaluation ponctuelle de la salure par conductivimétrie électromagnétique et d'une interpolation par krigeage semble donc particulièrement adapté au suivi de la salure sur sol fortement salé. La mesure se révèle peu sensible aux variations d'humidité et l'interpolation est reproductible d'une année sur l'autre.

Bibliographie

Association Française pour l'étude des sols, 1988: Référentiel Pédologique Français, Multig. INRA.

Boivin, P., Loyer, J.Y., Mougnot, B. et Zante, P., 1986, Sécheresse et évolution des sédiments fluvio-marins au Sénégal, INQUA, Symposium Dakar 1986, pp 49-53.

Boivin P., Brunet D. et Job J.O., 1988, Conductivimétrie électromagnétique et cartographie des sols salés, à paraître dans Cahiers de Pédologie ORSTOM, 1988, I.

Boivin P., 1988, GEOSTAT-PC, logiciel conversationnel pour calcul géostatistique, Bull. GFHN, 1988, 1.

Brunet, D., 1988, Carte pédologique de la vallée de Djiguioum, Multig. ORSTOM Dakar.

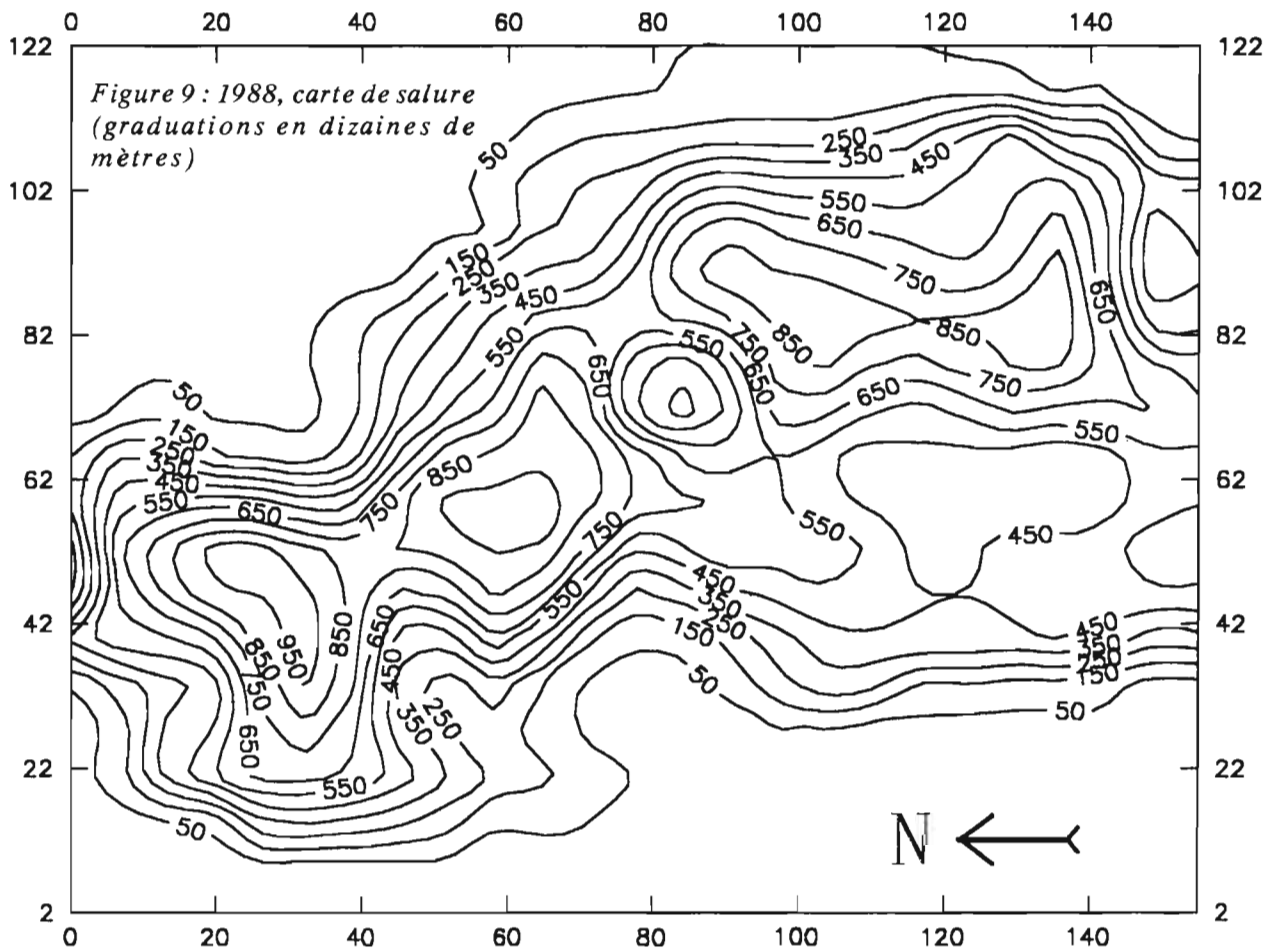
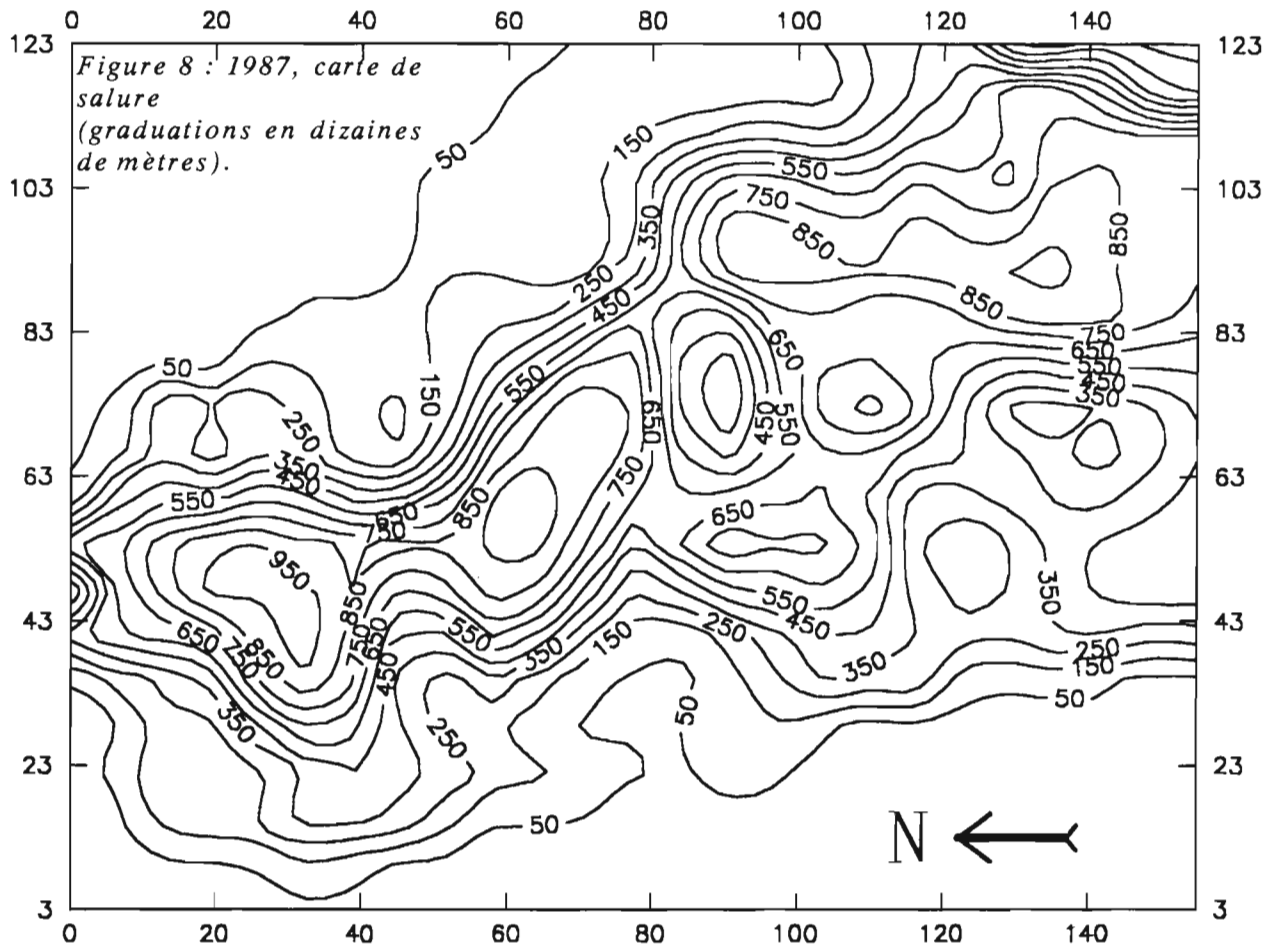
Brunet, D., 1989, Dessalement des sols de la vallée de Djiguioum, estimation des débits hydrique et salin de l'hivernage 1988, Multig; ORSTOM Dakar.

CEE-ORSTOM, 1988, Mise en valeur des mangroves au Sénégal, Commission des Communautés Européennes, contrat TSD-A-104 MR, rapport final, Multig. Orstom Montpellier, 64 pp.

Le Brusq, J.Y., Loyer, J.Y., Mougnot, B. et Carn, M., 1987, Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. Science du Sol, 1987-3, vol. 25, pp. 173-184.

McNeill J.D., 1980, Electrical conductivity of soils and rocks, Geonics, Technical note TN-5, 22 pages.

Zante, P., 1987, Mise en valeur des mangroves du Sénégal, massif forestier des Kalounayes, site d'étude de Koubalan. Comportement hydrique des sols de la séquence au cours de la saison 1984-1985. Multig. ORSTOM Dakar.



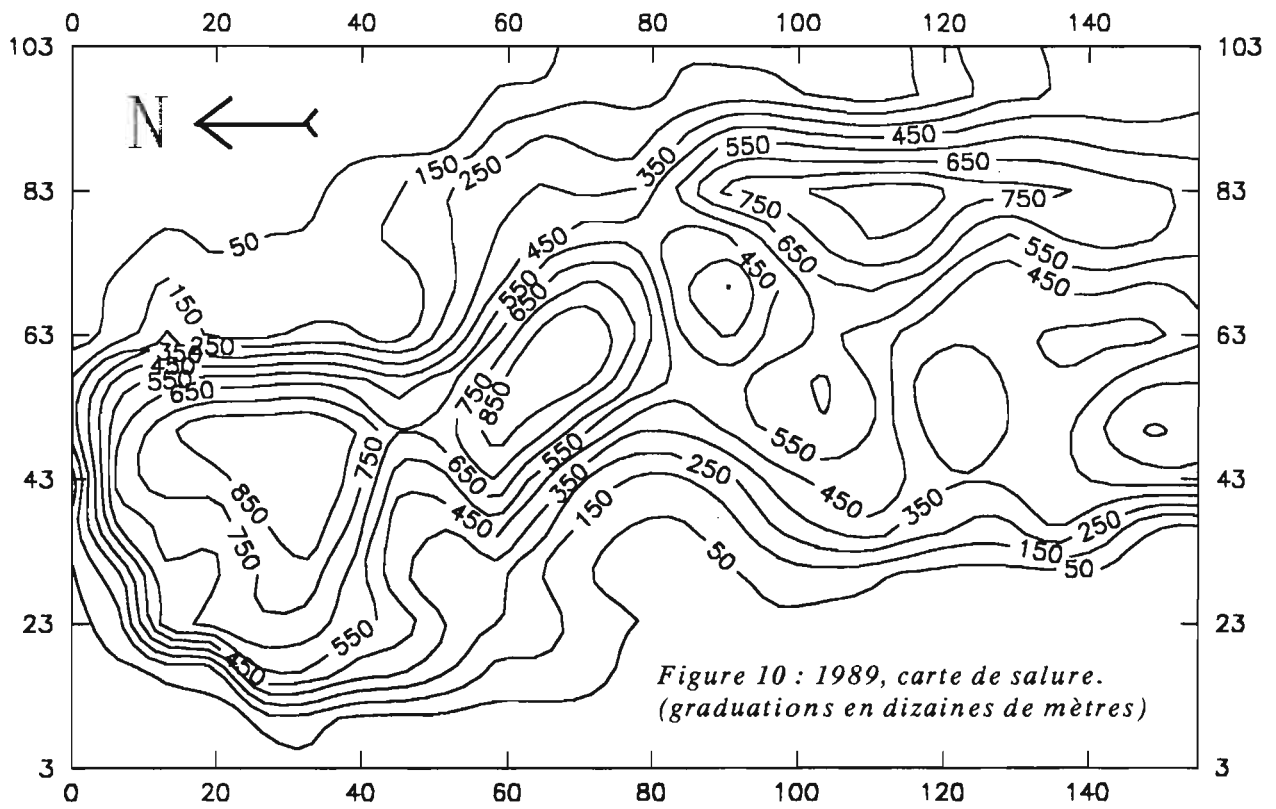


Figure 10 : 1989, carte de salure.
(graduations en dizaines de mètres)