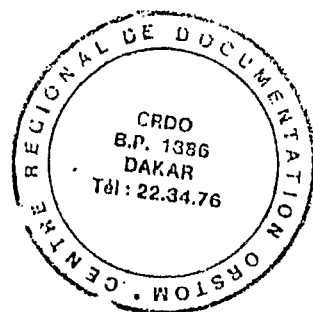


Pour Paris

Jean-Olivier JOB
Laboratoire des Sols Salés
Montpellier

J mp 267



RAPPORT DE MISSION AU SENEGAL

du 6 Juillet au 3 Août 1985

Fonds Documentaire ORSTOM



010005936

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: **B*5936** Ex: 1

L'effet de l'humidité du sol est difficile à évaluer sur le terrain. Des mesures en laboratoire devraient le permettre. Un rapport de mission scientifique complet est en préparation, mais d'ores et déjà on peut affirmer que la mesure de la salinité des sols par conductivimétrie magnétique permet le suivi de la salinisation (ou du désailement) des sols et que c'est une méthode de choix de diagnostic et d'étude de l'aménagement des sols salés.

Objectifs futurs: Pour arriver à une méthodologie cohérente, il faudrait en outre :

- 1/ Faire des mesures en milieux inondés permanents (Camargue).
- 2/ Faire des mesures en milieux très secs (Moyen Orient).

Les zones test seront choisies en fonction des données analytiques disponibles afin de pouvoir intégrer texture-porosité et densité apparente aux mesures.

- 3/ Préparer un logiciel d'exploitation des résultats.

Les points 1, 2, 3 doivent être étudiés en 85/86 au cours de missions à faire en France (Camargue, avec INRA), en Syrie (Euphrate avec ACSAD) et peut-être dans le Golfe Persique (avec CNRS-Maison de l'Orient Méditerranéen).

- 4/ Il faudrait également faire des mesures sur une colonne de sol en laboratoire (effet de l'humidité et de la température du sol), avec l'appareil de l'équipe MISEL de Dakar, en attendant que la base arrière de Montpellier dispose de son propre appareil, inscrit au budget 1986.

CONDUCTIVIMETRIE MAGNETIQUE
ESSAI D'ETALONNAGE SUR SOLS SALES DU SENEGAL.

INTRODUCTION

L'induction électromagnétique est une technique qui permet de mesurer la conductivité électrique des sols .Elle s'utilise en place, sans perturbation du sol ni prélèvement d'échantillon.Son principe est de créer un champ magnétique à l'aide d'une spire parcourue par un courant électrique. Ce champ à son tour crée des courants secondaires à l'intérieur du sol.Les lignes de force de ces courants sont captées par une spire receptrice qui affiche une déviation galvanométrique proportionnelle à leur intensité.La mesure finale ne représente qu'une conductivite apparente moyenne du sol ,intégrée sur une profondeur voisine de deux mètres.Bien que l'induction électromagnétique ait été abondamment utilisée en Géologie depuis une cinquantaine d'années ce n'est qu'en 1979 que son application à l'étude des sols a été envisagée (DE JONC et al.).Depuis lors,quelques études ont été entreprises,soit pour cartographier la salinité (WILLIAMS et G.C BAKER ,1982),Soit pour étalonner l'appareil par rapport à d'autres techniques d'interpretation plus aisée mais de mise en oeuvre plus laborieuse, comme la sonde quadripôle (RHOADES et CORWIN,1981).Le but de cette étude est de présenter cette technique et son application à quelques sols salés du Sénégal.

THEORIE DU FONCTIONNEMENT

Une spire primaire, parcourue par un courant électrique de fréquence f produit un champ H_p variable qui induit dans le sol, supposé homogène, des courants i_1, i_2, i_3 (fig.1). Ces courants, horizontaux, produisent à leur tour un champ secondaire H_s qui est mesuré à l'aide d'une spire secondaire SS . Si l'on néglige les interactions magnétiques entre les différentes lignes de courant, on démontre que la profondeur de pénétration ne dépend que de la distance interspire s . Si on pose :

μ^0 = permittivité de l'air
 σ = conductivité du sol (mS/m)
 s = distance interspire
 $y = 2\pi f \mu^0 \sigma$
 H_s = champ reçu par SS (vide)
 H_p = champ reçu par SS (milieu mesuré)

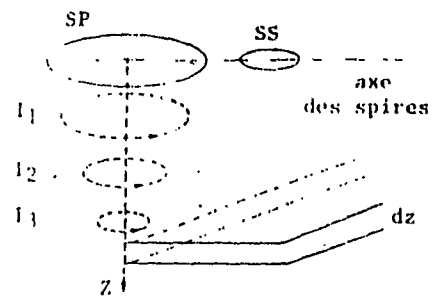


Fig. 1 : Principe de Fonctionnement

on a :

$$(H_s/H_p)_v = 2[9 - [9 + 9ys + 4(ys)^2[1 + ys/4]] \exp(-ys)] / (ys)^2 \quad (1)$$

et :

$$(H_s/H_p)_h = 2[1 - 3/(ys)^2 + [(3 + 3ys + (ys)^2) \exp(-ys)] / (ys)^2] \quad (2)$$

On peut simplifier ces formules: on introduit l'épaisseur d'atténuation δ d'une onde qui est la distance de parcours pour laquelle son amplitude est divisée par $1/e$ et qui est donnée par:

$$\delta = (1/\pi f \mu^0 \sigma)^{1/2} = (2i)^{1/2} / y$$

d'où: $y = (2i)^{1/2} / \delta$

et: $ys = (2i)^{1/2} s / \delta = B(2i)^{1/2}$ avec: B = nombre d'induction

Si $B \ll 1$, les formules (1) et (2) se simplifient et finalement on obtient une conductivité électrique apparente du milieu σ_a telle que:

$$\sigma_a = 4(H_s/H_p)_\otimes / 2\pi f \mu^0 s^2 \quad (3)$$

La notation \otimes signifiant que l'amplitude du champ magnétique que l'on mesure est en quadrature de phase avec l'onde incidente.

UTILISATION DANS UN MILIEU HOMOGENE

Si l'on admet que la pénétration des courants induits ne dépend, pour une fréquence et une intensité donnée, que de la distance interspire s , on peut calculer le champ dH induit dans une couche d'épaisseur dz à la profondeur z . Appelons $d(z)$ la contribution de la couche dz au champ secondaire :

on a: $d(z) = dH/H$

On peut intégrer cette fonction de la surface du demi espace représenté dans la figure (1) jusqu'à l'infini. On obtient les courbes (2a) et (2b) pour des configurations horizontales et verticales des spires. L'expression mathématique de chacune des courbes prend une valeur simple si on opère à valeur de B faible et si $\sigma a < 100$ mS/m.

$$\phi v(z) = 4z / (4z^2 + 1)^{3/2} \quad (4)$$

$$\phi h(z) = 2 - 4z / (4z^2 + 1)^{1/2} \quad (5)$$

$$\int_0^{\infty} \phi v(z) dz = Hsv \quad (6)$$

$$\int_0^{\infty} \phi h(z) dz = Hsh \quad (7)$$

z étant une variable adimensionnelle (rapport de la profondeur à la distance interspire s)

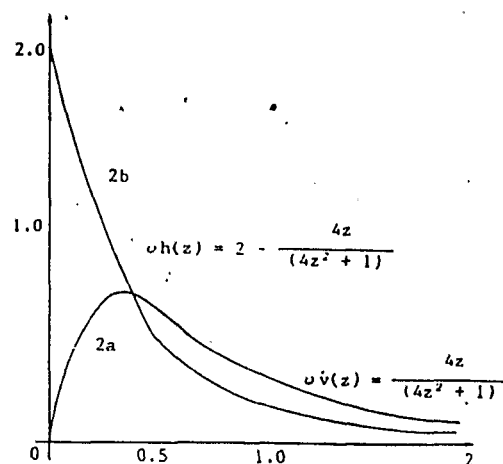


Fig. 2 : Contribution relative d'une couche dz située à la profondeur z au champ secondaire

On voit que l'intégrale (6) est plus grande entre les bornes 0 et 0,5 qu'entre 0,5 et l'infini. Autrement dit, en mode horizontal les couches superficielles donneront une réponse relative plus grande que les couches profondes.

Au contraire la valeur de l'intégrale (7) est sensiblement identique pour les deux régions séparées par $z=0,5$. Ce qui signifie qu'en mode vertical les couches superficielles de 0 à 50 cm (si $s=1$) auront la même réponse relative que le reste du demi-espace. Cette propriété est très importante car c'est grâce à elle que l'on peut différencier les strates horizontales de conductivité différentes. C'est la base de l'interprétation des résultats, qui peut se faire d'une manière un peu différente, par exemple, on peut tracer les courbes :

$$\int_z^{\infty} \phi v(z) dz = Rv(z) = 1 / (4z^2 + 1)^{1/2}$$

et : $\int_z^{\infty} \phi h(z) dz = Rh(z) = (4z^2 + 1)^{1/2} - 2z$

On obtient alors les figures (3a) et (3b) qui servent à interpréter les résultats de terrain. La valeur de $R(z)$ représente la contribution, rapportée à 1, de tout le demi-espace situé sous z. En dessous de $z=1$, la contribution sera 22% de la lecture finale, en supposant le milieu homogène. Ces courbes ne sont utilisables que pour des conductivités apparentes inférieures à 100 mS/m.

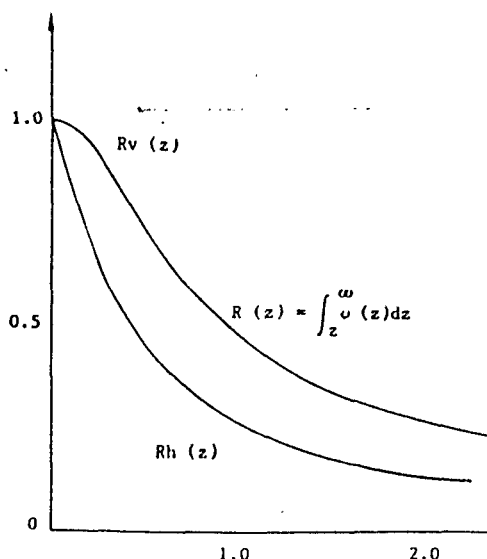


Fig. 3 : Réponse relative cumulée d'une couche de sol au-dessous de la profondeur z

PRINCIPE D'UTILISATION ET D'ETALONNAGE.

L'appareil donne une mesure intégrée sur une profondeur d'à peu près 2m si $s=1$. C'est une conductivité apparente dont on peut suivre la variation dans le temps, mais qu'il est utile de relier à la conductivité du sol mesurée par des méthodes classiques.

Première méthode: On interprète directement les courbes (3a) et (3b).

L'appareil est placé en position verticale puis horizontale. On mesure σ_v et σ_h . La géométrie des lignes de courant est différente dans chacun des deux cas. Si on suppose la conductivité constante le long du profil, 75% de la mesure faite en mode horizontal provient des premiers 90cm de sol. En mode vertical, la mesure provient pour 75% de sa valeur des premiers 190 cm. En appelant σ_1 et σ_2 les conductivités apparentes moyennes des horizons 0-90 et 0-190 respectivement, on a:

$$\sigma_{av} = 0,75 \cdot \sigma_1 + 0,25 \cdot \sigma_2$$

Et, d'une manière générale:

$$\sigma_{av} = \sigma_1 [1 - R_v(z)] + 2R_v(z) \sigma_2$$

$$\sigma_{av} / \sigma_1 = 1 + R_v(z) [k - 1] \quad \text{avec: } k = \sigma_2 / \sigma_1 \quad (8)$$

$$\sigma_{ah} / \sigma_1 = 1 + R_h(z) [k' - 1] \quad \text{avec: } k' = \sigma_2' / \sigma_1' \quad (9)$$

Les équations (8) et (9) ne peuvent pas se résoudre directement. Toutefois, si l'on fait une série de mesures au dessus du sol à des hauteurs différentes, on peut tracer $ECH = f(h)$ et $ECV = f'(h)$. Chaque couple de courbes caractérise un profil salin donné, une valeur de K , une valeur de σ_2 / σ_1 , une valeur de l'épaisseur t de conductivité 1. On les superpose ensuite à une série d'abaques (Mc NEILL, 1980) qui donnent 1 , 2 , et t (fig.4). Mais plusieurs valeurs de ces trois paramètres peuvent être raisonnablement déduites d'un seul tracé expérimental (fig.4). Il faut de plus que dans le sol, deux strates de conductivité nettement différentes existent, la première n'ayant pas plus de 50 cm d'épaisseur.

Deuxième méthode: On compare les mesures faites en conductivimétrie magnétique avec d'autres méthodes classiques, la sonde quadripôle par exemple, dont les mesures sont intégrées sur une profondeur de 0-120 cm (RHOADES 1981). On obtient :

$$\sigma_a = 0,4 \cdot ECQ + 0,5 \quad r = 0,945 \quad n = 9 \quad (10)$$

Ce type d'étalonnage peut être utilisé en première approche, mais il ne permet pas de différencier les horizons.

Troisième méthode: on suppose toujours le sol homogène. On peut alors écrire (RHOADES et CORWIN, 1981) :

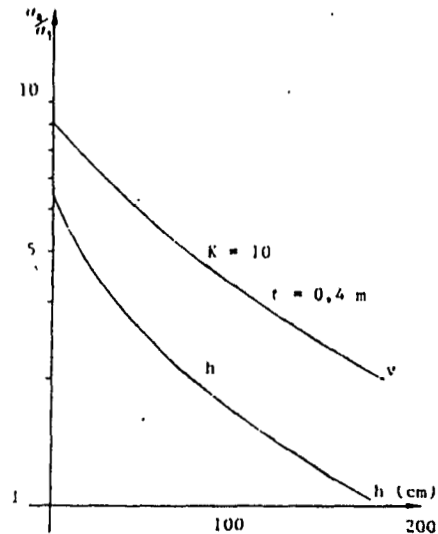


Fig. 4 : Exemple de courbe $R(z)$ pour $t = 0,4$ m et $K = 10$

$$100.ECHO=43.ECQ1 + 21.ECQ2 + 10.ECQ3 + 6.ECQ4 + 19.ECQ5 - 0,05$$

$$100.ECH30=8.ECQ1 + 25.ECQ2 - 5.ECQ3 + 7.ECQ4 + 16.ECQ5 + 1,40 \quad (11)$$

$$100.ECH60=66.ECQ1 - 2,3.ECQ2 + 4,1.ECQ3 + 3.ECQ4 + 3,2.ECQ5 + 11,88$$

où: ECHO=mesure magnétique au niveau du sol en mode horizontal.
 ECQ1=mesure avec la sonde quadripôle entre 0 et 30 cm.
 ECQ2=mesure avec la sonde quadripôle entre 30 et 60 cm, etc..

Les relations (11) sont vérifiées expérimentalement sur une série de profils salins pour optimiser les coefficients des termes en ECQ qui peuvent être déduits des courbes 3a et 3b. Ensuite on résout par le calcul cette série d'équations de manière à faire apparaître en premier terme ECQ1, ECQ2 ... qui sont les inconnues. Cette méthode est à répéter à chaque "emplacement géographique" (sic). Elle n'est donc pas utilisable dans la pratique.

Quatrième méthode: ajustement des coefficients (CORWIN et RHOADES 1982).
 D'après les figures 3a et 3b :

$$ECVO=0,15.\sigma_v(0-30) + 0,85.\sigma_v(30+) \quad (12)$$

$$ECHO=0,435.\sigma_h(0-30) + 0,565.\sigma_h(30+) \quad (13)$$

Où : ECVO, ECHO sont les mesures magnétiques au niveau du sol en mode vertical et en mode horizontal respectivement, $\sigma_v(0-30)$ la conductivité de l'horizon 0-30 mesurée sur un volume V_v , et $\sigma_h(0-30)$ la même conductivité mesurée sur un volume V_h .

Pour résoudre ces deux équations à quatre inconnues, il faut faire les approximations suivantes:

$V_v=V_h$ ce qui entraîne: $\sigma_v(0-30)=\sigma_h(0-30)=ECQ(0-30)$ par mesure à l'aide de la sonde quadripôle.

On peut donc calculer $\sigma_v(30+)$ avec l'équation (12), on suppose ensuite que si l'on remplace $\sigma_h(30+)$ par $\sigma_v(30+)$ dans (13), on obtient une valeur qui représente mieux la conductivité de tout le profil, ceci parce que la contribution des couches profondes à la mesure totale est plus grande en mode vertical (voir fig.2). L'équation (13) devient :

$$ECHO'=0,335.ECQ(0-30) + 0,66.ECVO \quad (14)$$

On peut alors mesurer ECQ(0-30) et calculer ECHO'. On répète l'opération sur un nombre suffisant de profils pour établir une corrélation entre ECHO et ECHO', soit:

$$ECHO'=0,95.ECHO + 0,15 \quad r^2=0.995 \quad n=16 \quad (15)$$

$$\text{On en déduit: } ECQ(0-30)=2,98.ECHO' - 1.98.ECVO \quad (16)$$

Finale-ment, la mesure de ECVO, ECHO et l'utilisation de la relation (15) permet de trouver la valeur de la conductivité du sol telle qu'elle est donnée par la sonde quadripôle. La validité de cette relation serait suffisamment générale pour qu'il ne soit pas nécessaire d'étalonner la sonde électromagnétique à chaque série de mesure. Un raisonnement analogue à celui tenu pour les horizons 0-30 cm conduit les auteurs à proposer des équations applicables à plusieurs profondeurs :

$$ECQ(0-60) = 2,286 \cdot ECH'(0-60) - 1,286 \cdot ECVO$$

$$ECQ(0-90) = 2,133 \cdot ECH'(0-90) - 1,133 \cdot ECVO \quad (17)$$

$$ECQ(0-120) = 2,054 \cdot ECH'(0-120) - 0,946 \cdot ECVO$$

Equations associées à :

$$ECH'(0-60) = 1,0645 \cdot ECHO - 0,0017 \quad r^2 = 0,977$$

$$ECH'(0-90) = 1,4355 \cdot ECHO - 0,3296 \quad r^2 = 0,961 \quad (18)$$

$$ECH'(0-120) = 1,7476 \cdot ECHO - 0,4802 \quad r^2 = 0,988$$

dans le cas de profils à salinité croissants en profondeur, (relation établie avec n=16),

$$\text{et à: } ECH^*(0-30) = 0,948 \cdot ECHO + 0,118 \quad r^2 = 0,997$$

$$ECH^*(0-60) = 0,826 \cdot ECHO + 0,229 \quad r^2 = 0,992 \quad (19)$$

$$ECH^*(0-90) = 0,846 \cdot ECHO + 0,150 \quad r^2 = 0,991$$

dans le cas de profils à salinité décroissant avec la profondeur (n=11).

Les équations (16) et (18) d'une part, et (19) d'autre part, peuvent être vérifiées si besoin est. Il faut disposer d'une sonde quadripôle pour mesurer ECQ(0-30).

CONDUCTIVITE DES SOLS

La conductivité des sols dépend de :

- la porosité.
- la teneur en eau.
- la température.
- la teneur en sels.

Effet de la porosité: Si σ_x est la conductivité propre du sol et σ_l celle du liquide remplissant les pores, le rapport σ_l/σ_x diminue dans l'ordre pour les roches dures, les argiles, les grès, les sables, les diatomées. Plus la porosité est grande, plus l'effet de l'électrolyte interstitiel est important (eq.23). Si Φ est la porosité, on peut écrire pour un empilement régulier et compact de sphères de rayon petit par rapport à la distance entre leurs centres :

$$\sigma_x/\sigma_l = 2\Phi(3 - \Phi) \quad \text{relation de Maxwell} \quad (20)$$

et: $\sigma_x/\sigma_l = \Phi^m$ relation d'Archie (21)

L'exposant m varie de 1,2 pour des sphères parfaites à 1,85 pour un empilement de particules plates. Ces deux relations ne s'appliquent qu'à des sols saturés en eau. Si seule une fraction f du volume des pores est remplie d'électrolyte, on a:

$$\sigma_x/\sigma_l = f^2 \quad (22)$$

Cette dernière équation montre que si f est petit, la conductivité mesurée peut également être très petite. Ce qui signifie dans la pratique qu'il est préférable de faire les mesures à taux d'humidité du sol élevé pour les sols peu salés. Une expression plus précise a été développée (RHOADES, RAATS et PRATHER 1976).

$$(\sigma_x - \sigma_s)/\sigma_l = \theta(a\theta + b) \quad (23)$$

où: θ = teneur en eau volumique (cm³/cm³).
 σ_s = conductivité de surface dépendant de la teneur en argile et de sa capacité d'échange.
 a, b = coefficients de texture.

La relation (23) montre qu'aux salinités et humidités faibles, l'influence de l'argile est prépondérante. Au contraire, aux fortes salinités, le rapport σ_s/σ_l reste faible et la conductivité d'un sol dépend fortement de θ et σ_l .

ETALONNAGE SUR LES SOLS SALES DU SENEGAL

Méthode: L'appareil a été étalonné sur une série de sols de profils salins variés. Les conductivités σ_{av} et σ_{sh} de seize points de mesure ont été mesurées de 0 à 120 cm de hauteur tous les 10 cm. Le sol a été prélevé tous les 10 cm à la tarière, jusqu'à la nappe phréatique. La salinité a été mesurée au laboratoire sur l'extrait 1/10°. Les résultats ont été exprimés en pourcentage de NaCl par rapport au volume de sol.

Caracteristiques des sites étudiés: Les échantillons ont été prélevés en différents endroits du Sénégal occidental (fig.5).

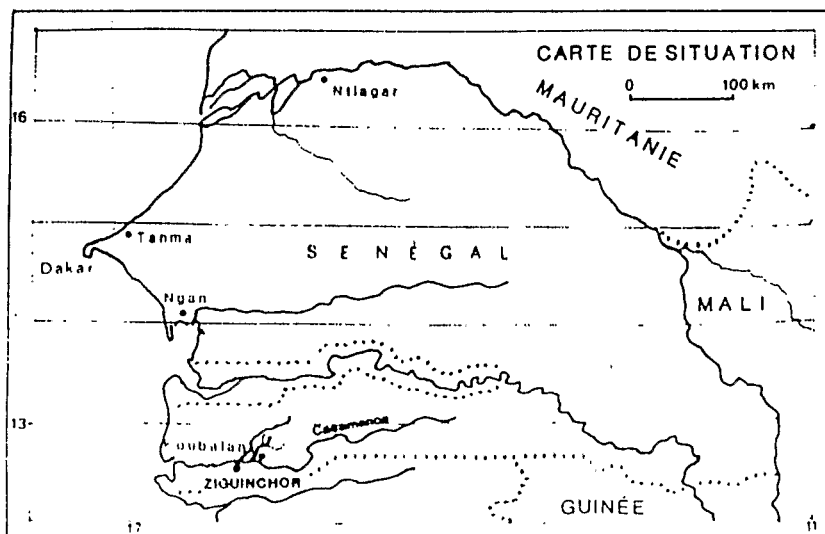


Fig 5 sites

Pour vérifier que tous les types de sols ont été choisis avec le même poids, les courbes des valeurs moyennes de $Rv(z)$ et $Rh(z)$ ont été comparées avec les valeurs théoriques pour un sol homogène (fig.6). Les deux courbes sont confondues jusqu'à 50° cm de profondeur, en dessous, il y a une petite différence, due peut-être à l'influence de la nappe sur certaines mesures.

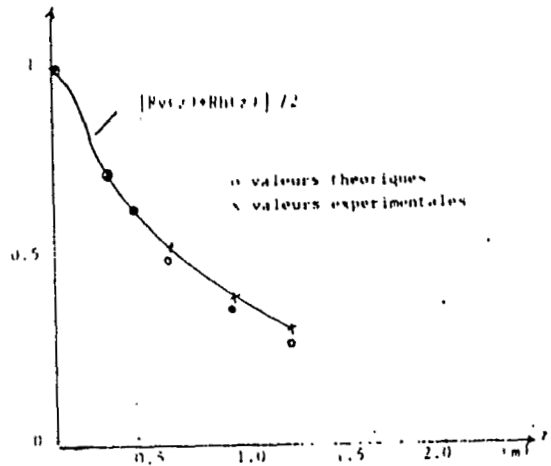


Fig. 6 : Contrôle de l'homogénéité des profils
comparaison des valeurs théoriques et des valeurs pratiques
des contributions moyennes du demi-espace en dessous de z

résultats de l'étalonnage:

les valeurs de la conductivité de l'extrait 1/10° sont transformées en NaCl% en utilisant les formules (24) et (25) suivant les valeurs de la conductivité mesurée, EC(mS/cm). Le pourcentage volumique de NaCl est ensuite obtenu en supposant que chaque prélèvement à la tarière correspond au même volume de sol en place.

$$\text{NaCl}(\text{gr}) = 0,415 \cdot \text{EC} \quad \text{avec } n = 1,15 \quad (\text{BOUTEYRE 1981}) \quad (24) \quad \text{pour } \text{EC} < 60$$

$$\text{NaCl}(\text{gr}) = 0,516 \cdot \text{EC} \quad \text{avec } n = 1,075 \quad (\text{LE BRUSQ et LOYER 1982}) \quad (25) \quad \text{pour } \text{EC} < 100$$

$$\text{On obtient: } \text{NaCl}\% = 0,020 \cdot \text{ECV0} - 0,941 \quad r = 0,930 \quad (26)$$

$$\text{et: } \text{NaCl}\% = 0,033 \cdot \text{ECVh}/n - 0,957 \quad r = 0,941 \quad (27)$$

pour l'ensemble des 16 profils et:

$$\text{NaCl}\% = 0,019 \cdot \text{ECV0} - 0,793 \quad r = 0,964 \quad (28)$$

$$\text{NaCl}\% = 0,031 \cdot \text{ECVh}/n - 0,842 \quad r = 0,964 \quad (29)$$

si on élimine les profils B7 et A1 qui sont très salés en surface et pour lesquels la mesure en mode vertical ne convient pas.

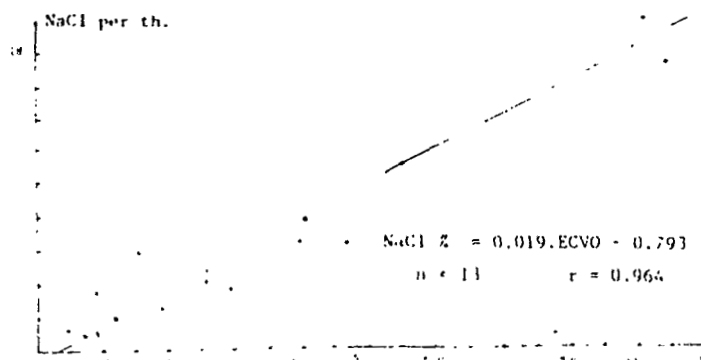


Fig-7: Corrélation entre teneur en sel et conductivité EC V0

ETUDE SUR LES SOLS DU MARIGOT DE KOUBALAN

Le Koubalan est un affluent de la rive droite du fleuve Casamance . Le point de confluence est à 40 km au Nord-Est de Ziguinchor (fig.8). Le climat est de type tropical avec une saison sèche de Novembre à Juin et une saison des pluies de Juillet à Septembre (climat tropical subguinéen) . La pluviométrie est de 1500 mm. Le marigot coule au milieu de la forêt classée dite des Kalounayes. Du marigot à la forêt, les associations végétales sont :

- Rhizophora racemosa, Rhiz. mangle
- Avicennia nitida, Scirpus
- Tanne vif (sans végétation)
- Tanne à Eleocharis mutata
- Rizières
- Forêt claire de palmiers
- Forêt à Fromagers

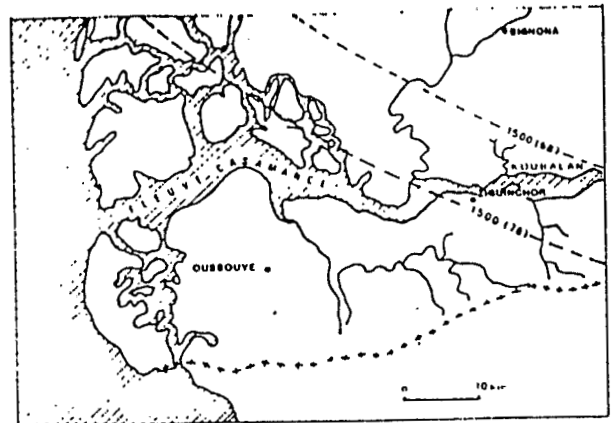


Fig. 8 : Situation de Koubalan

Les sols sont des sédiments marins riches en soufre .Celui-ci s'accumule au voisinage des racines des palétuviers après avoir été fixé par des bactéries sulfato-réductrices. En situation inondée par l'eau de mer le soufre reste réduit et le pH est voisin de la neutralité. Lorsque les sédiments sont exondés, l'oxydation du soufre donne du SO_4 qui se transforme en acide sulfurique et le pH peut tomber à 2. Depuis quelques années, la sécheresse a provoqué la sursalure puis l'oxydation des bordures du marigot et la mort des palétuviers. Le manque de lessivage a entraîné une salinisation des rizières .La conservation de l'espace cultivable s'est faite au détriment de la forêt qui a été défrichée.

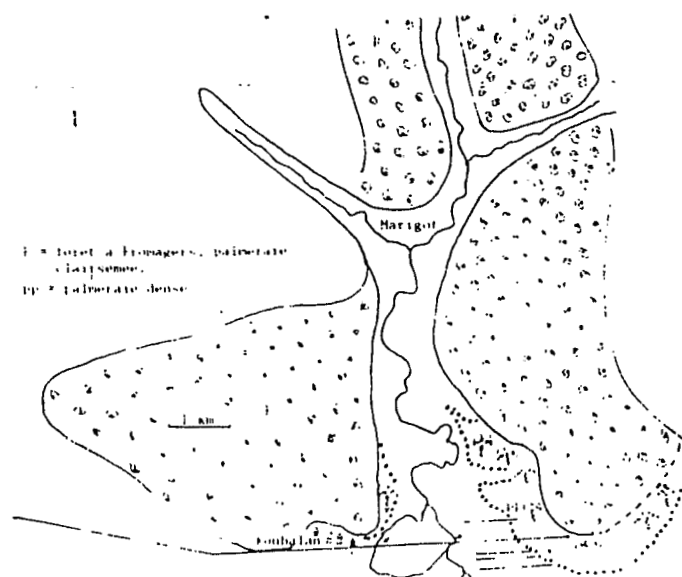


Fig. 9 : Marigot et Village de Koubalan

Site d'étude:

Une carte de salinité des sols au 1/3000° a été levée sur une dizaine d'hectares. Une série de mesures faites à hauteurs diverses en moins de trois heures ont permis de délimiter 9 niveaux de salinité qui correspondent tous à des associations végétales différentes. (fig.9 à fig.11). Il est donc possible de faire une carte de répartition des zones salées sans étalonnage préalable si l'on se contente de suivre l'évolution dans le temps d'un site donné.

Des mesures faites sur une micro parcelle de 100 m² à 24 heures d'intervalle pour une humidité du sol constante ont montré qu'il était possible d'estimer un gradient de salinité de 6 mS/m² (mesure intégrée sur une profondeur de sol de 1 m).

Ce qui correspond à une sensibilité de 0.006 % en NaCl volumique. Ces résultats ont été établis pour des conditions optimales de mesure : profil salin sensiblement constant en profondeur et conductivité voisine de 50 mS/m.

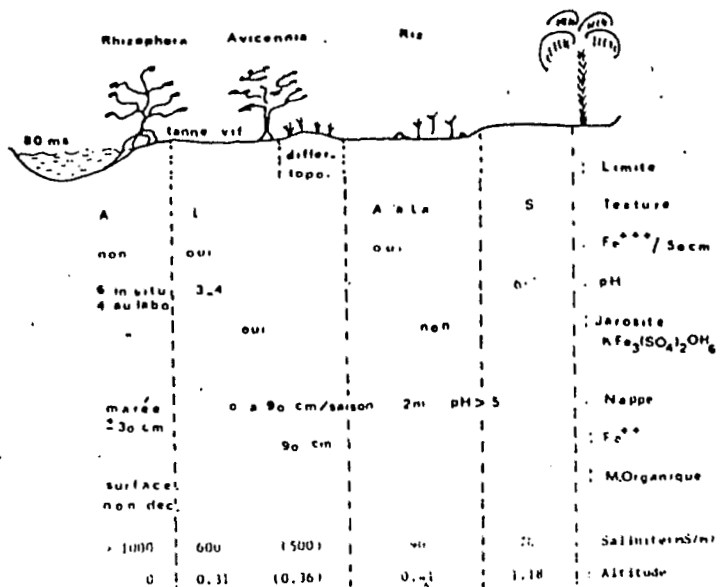
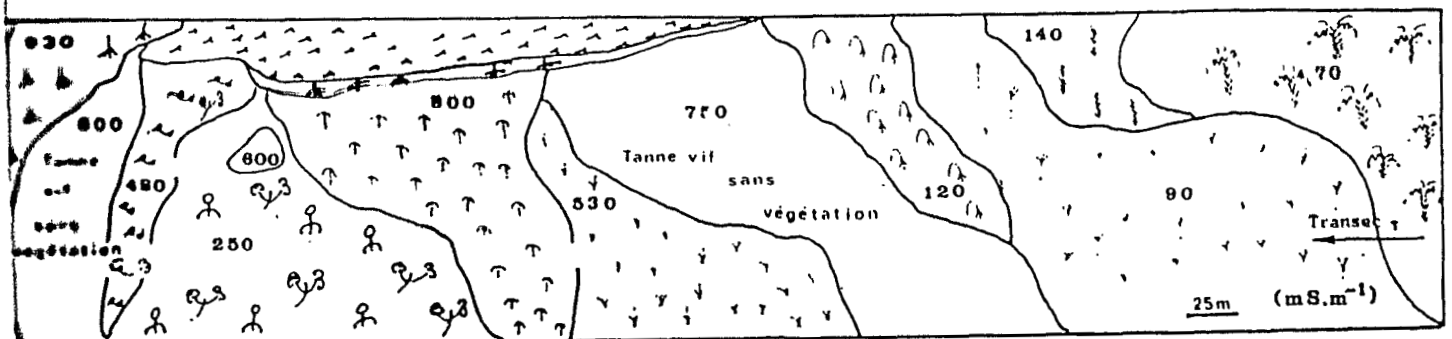
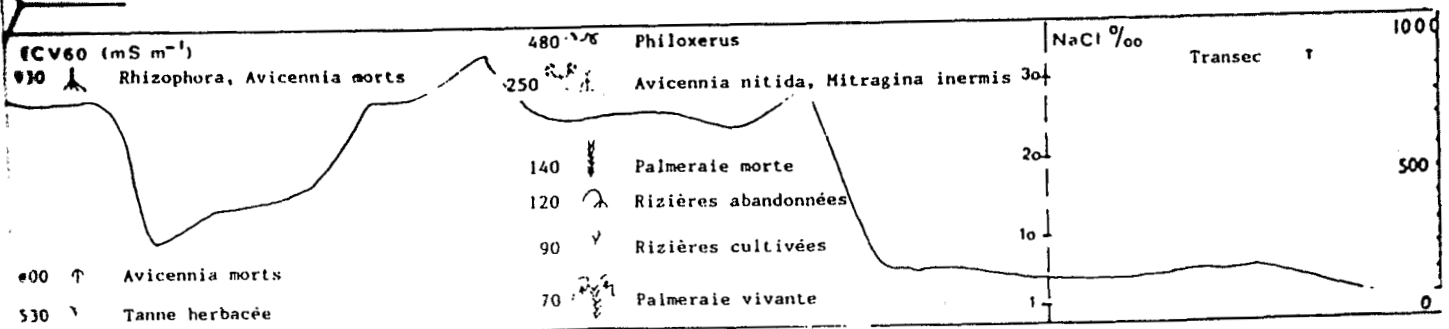


Fig. 10: Critères principaux de différenciation des sols du Marigot de Koubalan



MARIGOT DE KOUBALAN

fig.11 : Carte de la salinité au 1/3000



ETUDE DE LA PLANTATION DE NGAN

Le site de NGAN se trouve à 20 km au Nord de KAOLACK. En 1980 une plantation de 20 ha d'*Eucalyptus camaldulensis* a été faite par les Eaux et Forêts sur les tannes en bordure du marigot KHEL.

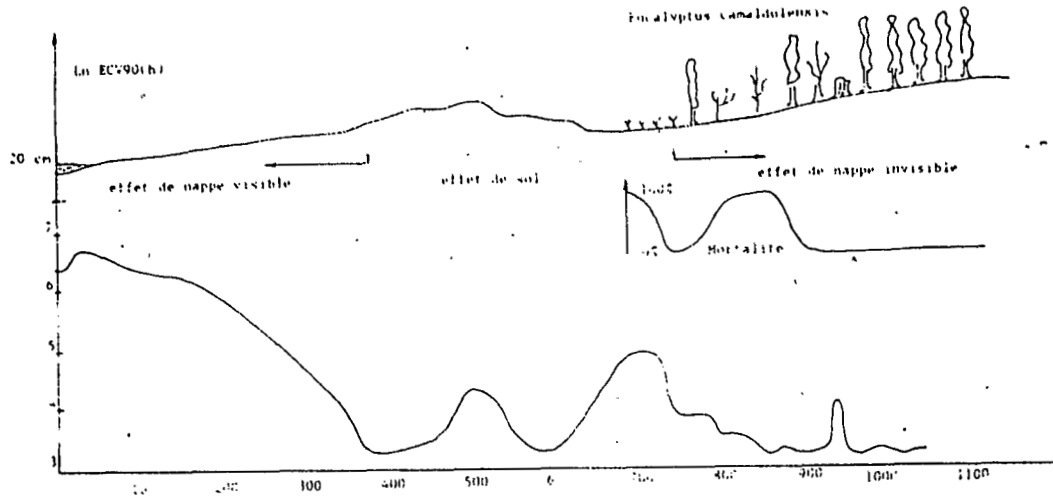


Fig-12: Plantation de NGAN

Quelques années après, une importante partie de certaines zones de plantation a été atteinte de mortalité. Celle-ci est attribuée soit à la salinité excessive du sol, pour une conductivité de l'extrait 1/5° supérieure à 2 mS/cm dans les bas de pente, soit à la présence d'une nappe de plus de 13 mS/cm (mortalité adulte de 25 à 75%). Des mesures de conductivité apparente ont été faites sur quelques transects dans le but de voir si le diagnostic de mortalité pouvait être fait sans prélèvement de sol, et si les zones potentiellement dangereuses pouvaient être délimitées.

Résultats:-Seule la mortalité liée à la salinité du sol a pu être mise en évidence à l'aide de la conductivimétrie magnétique, la nappe étant trop profonde pour donner une réponse avec un appareil ayant une distance interspire de 1 m (fig.12 et 13).

-La comparaison des valeurs ECVO et ECHO du même transec avant et après une pluie de 39 mm montre une autre possibilité d'utiliser les mesures de résistivimétrie magnétique. Si l'on suppose que toute la pluie a pénétré dans le profil jusqu'à 2m de profondeur, l'humidité moyenne augmente de 1.8% .Or il a été montré que dans les sols à surface spécifique faible, la conductivité apparente est proportionnelle à la teneur en eau volumique (RHOADES,1981). Si donc l'eau a pénétré dans tout le profil, les mesures de ECHO et ECVO ont dû augmenter dans la même proportion. Or la comparaison des résultats avant et après la pluie montre que ECHO a augmenté de 25% au cours de la pluie, alors que ECVO n'augmentait que de 12,9% pendant le même temps. On en déduit (fig.2) qu'après 12 heures l'eau a pénétré à moins de 50 cm. On voit aussi les endroits de pénétration préférentielle. Ce sont les points pour lesquels ECVO a augmenté significativement plus que la moyenne.

ETUDE DU REBOISEMENT DU LAC TANMA.

Un périmètre de 264 ha a été reboisé en 1965 en bordure du lac temporaire Tanma, dans la région de THIES (fig.14). Le lac Tanma s'est formé sur une ancienne lagune coupée de la mer par un cordon de dunes de 3 km de large à peu près.

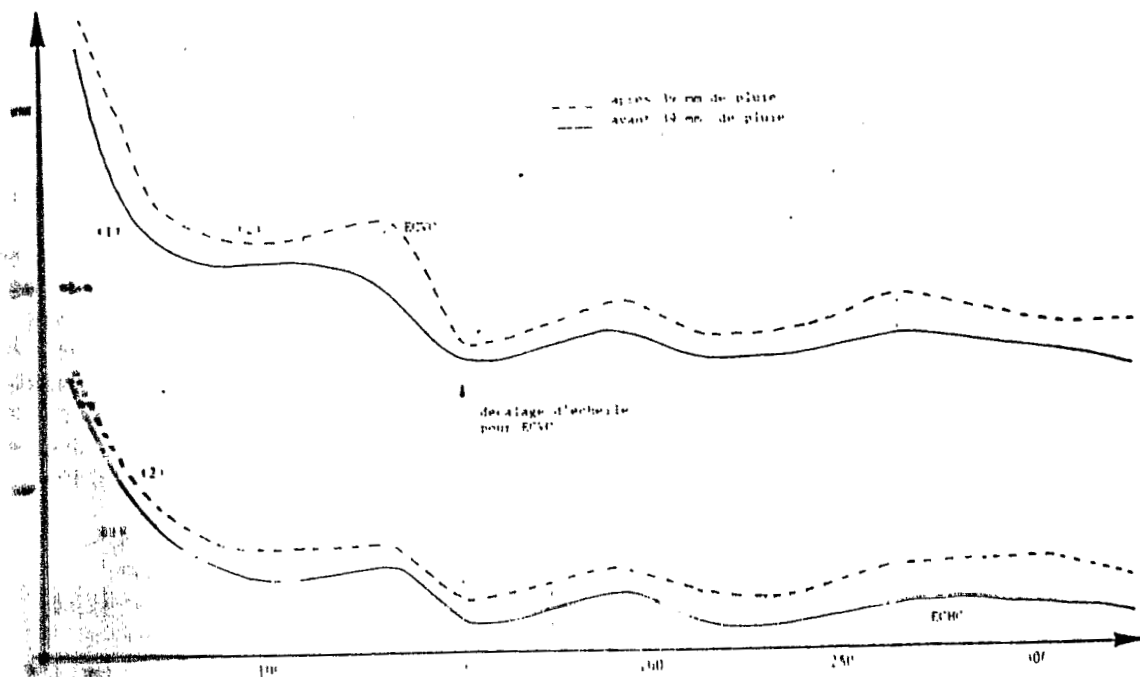


Fig. 13 : Fosset de NGAN : Comparaison entre les mesures ECVO et ECHO avant (1) et après (2) une pluie de 39 mm

Le lac se remplit en saison des pluies mais il s'assèche de plus en plus rapidement avec le déficit pluviométrique enregistré ces dernières années. (425 mm pour les dix dernières années contre 622 mm pour la décennie précédente).

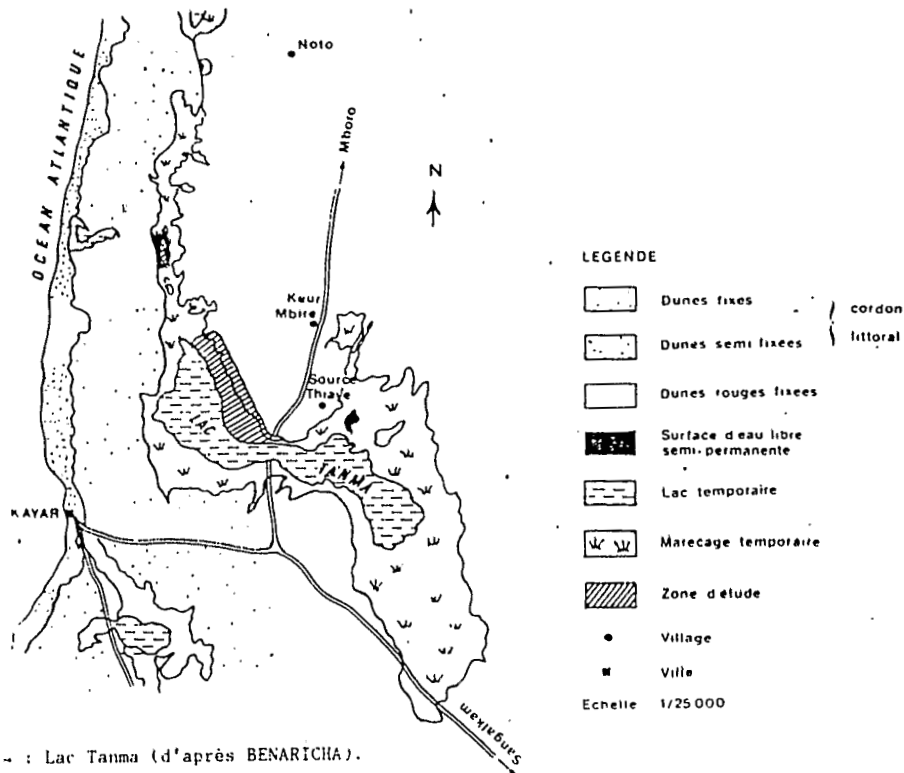


Fig. 1.- : Lac Tanma (d'après BENARICHA).

Les essences plantées sont: *Melaleuca leucadendron* (ou Niaouli), *Casuarina equisetifolia* (ou Filao) et *Eucalyptus camaldulensis*. De l'amont à l'aval de la plantation, les sols ont les caractères suivants:

-Sols peu évolués d'apport à texture sableuse avec un horizon de coquillages de 30 à 100 cm reposant sur du sable.

-Sols composés essentiellement de coquillages fossiles, *Arcas senilis* (MICHEL, 1973 in SADIO, 1985). Ces derniers sols sont en bordure du lac. Ils sont salés. (0,5 mS/cm et pH 8,5 en moyenne des extraits 1/5° de 0 à 160 cm.).

Depuis 1978 un certain nombre d'arbres sont morts, surtout dans la partie basse de la plantation. Une étude préliminaire (BENARICHA, 1985) a montré que le niveau de salinité des sols n'était pas suffisant pour expliquer à lui seul une mortalité aussi élevée, atteignant les arbres adultes. Par contre la nappe est salée en dehors des abords immédiats du lac (30 à 50 mS/cm). Tant que les arbres peuvent s'alimenter en même temps dans le sol et dans la nappe ils survivent. En saison sèche, l'alimentation par le sol est interrompue et la salinité de la nappe suffit à induire la mortalité observée. La résistance aux sels des espèces arborées est dans l'ordre:

- Melaleuca* et *Eucalyptus* qui résistent à EC < 25 mS/cm.
- Casuarina* qui supporte EC < 35 mS/cm.

Résultats obtenus par prospection magnétique : -Un premier transec d'Est en Ouest en travers du Lac montre qu'il y a une très bonne relation entre les critères de salinité visibles en surface et les mesures ECVO (fig.15). De plus, on distingue très bien les sols alcalinisés dont la surface est poudreuse. Ce sont les sols pour lesquels $ECHO > ECVO$.

-Par contre il n'a pas été possible de discerner les causes de mortalité en dehors des bords du lac en faisant un transec au dessus d'une nappe de profondeur variable.

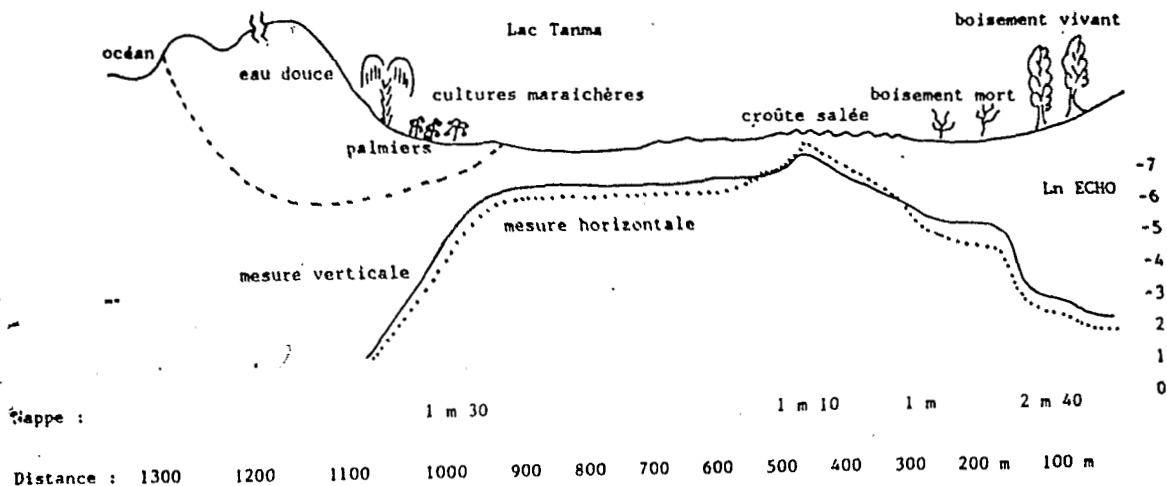


Fig. 15 : Profil salin en travers du lac et à ses abords immédiats

CUVETTE DE NTIAGAR

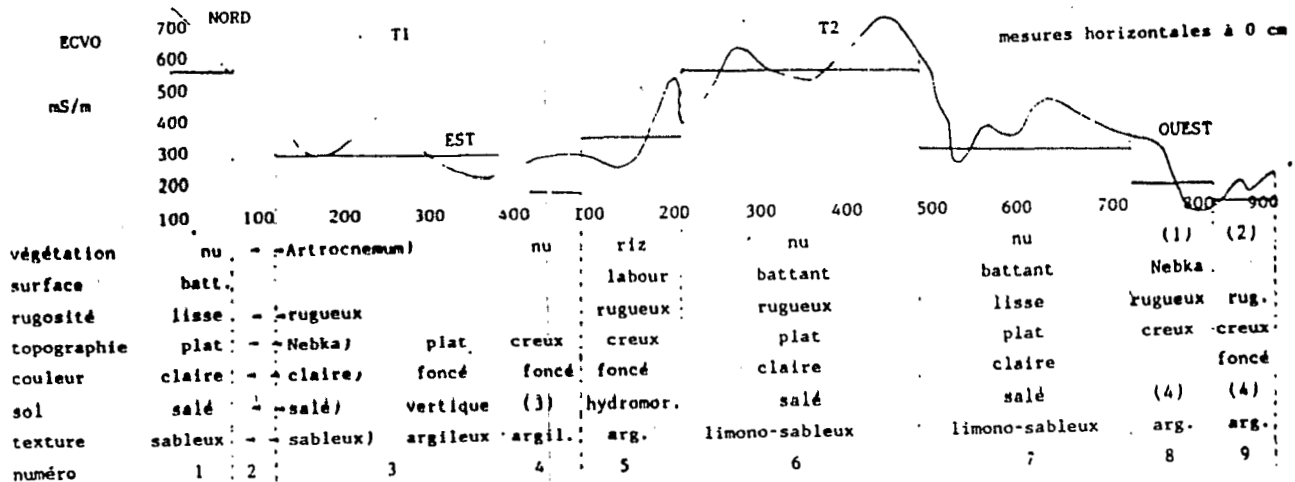
La cuvette de NTIAGAR se trouve sur l'amont du delta du fleuve Senegal à 5 km à l'Ouest de ROSSO sur des dépôts alluvionnaires récents. La partie étudiée est limitée au Nord par une digue anti-crues de 2 m de haut à peu près et au Sud par un canal d'irrigation (fig.16).

C'est une zone traditionnelle de parcours, non cultivée, l'irrigation se faisant au Sud de la digue depuis peu (Canne à sucre). La pluviométrie est de l'ordre de 350 mm, irrégulière en volume et en intensité, concentrée de Juillet à Octobre. L'évaporation théorique (évaporomètre PICHE) atteint 3245 mm. Les unités de sols (MOUGENOT 1982) sont en gros :

- sols sodiques plus ou moins hydromorphes associés à :
 - . *Artrocnemum glaucum* (extrait $1/5 > 2$ mS/cm)
 - . *Indigofera tinctoria*, *Borreria verticillata* ($0.5 < EC1/5 < 2$)
 - . *Balanites aegyptiaca*, *Salvadora persica*, *Acacia nilotica*
- sols vertiques de parties basse de cuvettes associés à :
 - . *Scirpus maritimus*
- sols hydromorphes (gley ou pseudo-gley) associés à :
 - . *Acacia nilotica* clairsemé

Toutes les textures se rencontrent dans chaque unité. Des mesures de conductivité électromagnétiques ont été faites sur trois transecs. Les transecs T1 et T2 ont été levés entre deux petites cuvettes, dans le but d'étudier les états de surface en relation avec la salinité.

Résultats: Les mesures et observations faites sur les transecs T1 et T2 sont groupées fig.17.A l'intérieur d'une unité de sol ayant des caractéristiques de surface constantes, la salinité mesurée en mode vertical, ECVO varie trop pour que les valeurs moyennes (en trait plein horizontal sur la figure) ait une signification. Sur les 9 unités définies par leur aspect de surface, seules les unités n°4 et 9 ont une conductivité identique tout en ayant des propriétés de surface semblables. Par contre les unités n°3 et 7 ont même conductivité moyenne bien qu'appartenant à des types de sol bien différents. Dans le cas présent donc salinité globale et aspects de surfaces sont indépendants. Les mesures effectuées en mode horizontal n'ont pas donné de meilleurs résultats.



(1) : Indigofera tinctoria ; (2) : Acacia nilotica ; (3) : vertique ; (4) : hydromorphe ; — moyenne ECVO

Fig. 17 : Transecs T1 et T2 dans la cuvette de NTIAGAR.

CONCLUSIONS

Les mesures de conductivité apparente du sol intégrées sur une profondeur de 2 mètres permettent :

- d'estimer la teneur en sels moyenne de n'importe quel sol, à condition que la nappe phréatique se trouve à plus de 2 m de profondeur.
- de délimiter de manière très rapide des unités de sols salés à condition que les sols soient suffisamment homogènes à l'intérieur d'une même unité.
- de suivre l'évolution du stock de sels dans le temps de n'importe quel profil à condition de ne comparer que les mesures faites à même taux d'humidité du sol.
- de déterminer l'allure du profil salin de n'importe quel sol salé.

Avec un minimum d'études préliminaires, cette technique permet de résoudre quelques problèmes posés lors de la caractérisation et de la mise en valeur des sols salés. Des études supplémentaires doivent permettre de mieux tirer parti des mesures, pour différencier les horizons. L'effet de la teneur en eau du sol sur les mesures a également besoin d'être précisé.

BIBLIOGRAPHIE

- BENARICHA B. - Etude pédologique du reboisement du Lac Tanma.
Centre ORSTOM de DAKAR, SENEGAL, juillet 1985, multigr., 76 p.
- BOIVIN P. - Etude pédologique de la vallée de Koubalan (Kalounayes Casamance). Etude de la variabilité spatiale du pH et de la conductivité d'un sol de Tanne. Centre ORSTOM de DAKAR, SENEGAL, septembre 1984, rap. multigr., 73 p.
- BOUTEYRE G. - Reutilisation of drainage water in AL HASSA OASIS.
Vol. 2. Pilot Farm Report. MAW-BRGM-BRL, 1981, comm. personnelle.
- CORWIN D.L. , RHOADES J.D. - An Improved Technique for Determining Soil Electrical Conductivity-Depth Relations from Above-ground Electromagnetic measurements. Soil Sci. Soc. Am. J. 46, 1982, 517-520.
- CORWIN D.L., RHOADES J.D. - Measurement of Inverted Electrical Conductivity Profiles Using Electromagnetic Induction. Soil Sci. Soc. Am. J., 48, 1984, 288-291.
- LE BRUSQ J.Y., LOYER J.Y. - Relations entre les mesures de conductivité sur des extraits aqueux de sols de rapports sol/solution variables, dans la vallée du fleuve SENEGAL. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XIX, n° 3, 1982, 293-301.
- MOUGENOT B. - Etude pédologique de la cuvette de N'tiagar (delta du fleuve SENEGAL). Centre ORSTOM de DAKAR, SENEGAL, septembre 1982, rapp. multigr., 152 p.
- McNEILL J.D. - Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical note TN6, GEONICS Ltd, 1980.
- RHOADES J.D., CORWIN D.L. - Monitoring soil salinity. J. Soil and Water Conservation. May, June 1984, 172-175.
- SADIO S. - Recherches sur la tolérance aux sels des essences forestières. I.S.R.A. et ORSTOM, SENEGAL. Mai 1985, rap., multigr., 18 p.
- WILLIAMS B.G., BAKER G.C. - An Electromagnetic Induction Technique for Reconnaissance Surveys of Soil Salinity Hazards. Aust. J. Soil Res., 20, 1982, 107-108.