

Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols

J.O. JOB (1), J.Y. LOYER (1), M. AILOUL (2)

(1) Pédologues ORSTOM - Centre de Montpellier - B.P.5045 - 34032 Montpellier Cédex

(2) Pédologue ACSAD (Arab Center for the Study of Arid Zones and Dry Lands) - B.P. 2440 - Damas - Syrie

RÉSUMÉ

L'étude de la répartition spatiale des sels dans les sols par prélèvements d'échantillons suivis d'analyses de laboratoire est difficile à cause de la grande variabilité des teneurs en sels d'un point à un autre. Une manière de mettre en évidence cette variabilité, consiste à utiliser la conductivité électromagnétique. Le principe de la mesure et les paramètres du sol qui affectent les résultats sont décrits. Des exemples d'utilisation sont donnés pour trois situations salines différentes. La première sur une dépression de la Côte Nord du Sénégal, la deuxième sur sols sulfatés acides de Basse Casamance (Sénégal), la troisième sur un sol de la vallée de l'Euphrate (Syrie). Une interprétation des résultats des mesures est présentée.

MOTS-CLÉS : Salinité — Sols Salés — Conductivité — Résistivité — Mesures in situ — Cartographie — Sénégal — Syrie.

ABSTRACT

DIRECT MEASUREMENT OF SOIL SALINITY BY ELECTROMAGNETIC CONDUCTIVIMETRY

The study of the spatial distribution of salts in soils is impeded by the great variability of this parameter. To deal with variability, a great number of samples must be analysed in laboratory. In order to avoid this tedious task, several non destructive methods of monitoring soil salinity have been recently described. Among them, the electromagnetic conductivimetry seems to be a promising one. The method is described, the different parameters affecting the results are reviewed and three examples of application are given. The first one applies to a saline depression of Northern Senegal, the second to an acid sulphate soil in Southern Senegal (Casamance). The third one shows the use of this technique as an aid to cartography the salinity of an experimental plot bordering Euphrates river (Syria).

KEY WORDS : Salinity — Saline Soils — Electric Conductivity — Measurement in situ — Equipment — Cartography — Senegal — Syria.

INTRODUCTION

L'étude des sols salés commence par la mesure de la distribution des sels dans le sol. La méthode employée classiquement consiste à prélever des échantillons de quelques centaines de grammes à différentes profon-

deurs. La quantité de sels est ensuite estimée dans des extraits à l'eau des échantillons, soit à saturation (RICHARDS *et al.*, 1954), soit en utilisant des rapports sol/eau fixes. En dehors de la justification chimique de ces rapports d'extractions, déjà discutée par ailleurs, (SMITH *et al.*, SERVANT et SERVAT 1966, JOB 1981),

cette manière de faire répond mal aux questions que l'on se pose actuellement sur la caractérisation et le fonctionnement du sol en place. En effet, la quantité de sels mesurée sur un échantillon ne peut pas être extrapolée à un grand volume de sol, la distribution spatiale des sels étant en général très hétérogène. De plus, si l'on considère la salinité comme une variable régionalisée (DELHOMME 1976), on ne peut mettre en évidence une structure du phénomène qu'avec un nombre très élevé de prélèvements. Il faut donc se tourner vers d'autres méthodes d'estimation de la salinité.

Pour pouvoir opérer directement in situ et étudier la répartition des sels à grandes échelles, le sol a été exploré par des électrodes à espacement variable (RHOADES et INGVALSON, 1971, LE DAIN 1977, BOTTRAUD *et al.*, 1984) ou quadripôles (RHOADES et SCHILFGAARDE, 1976). Dans le premier cas le volume de sol exploré est ajustable mais le système est encombrant, dans le deuxième, on mesure la conductivité de quelques dm³ seulement et le contact des électrodes avec le sol est imparfait aux faibles humidités.

C'est pour éviter ces inconvénients que la prospection électromagnétique a été adaptée aux sols (de JONG *et al.* 1979). Le but de cette étude est de montrer l'utilisation que l'on peut faire de cette technique, quelles sont ses contraintes, ses limites et ses avantages.

1. MÉTHODOLOGIE

1.1. Principe de fonctionnement et description

Une spire SP, parcourue par un courant électrique de fréquence f produit un champ magnétique primaire HP de même fréquence qui induit dans le sol, supposé homogène, des courants i_1, i_2, i_3 (fig.1). Ces courants produisent à leur tour un champ secondaire HS 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 peut mesurer une conductivité du sol qui dépend de la fréquence f et de la géométrie des lignes de courant induites dans le sol. Elle est liée à l'ordre de succession des résistivités vraies des matériaux rencontrés.

Si on pose :

μ° = permittivité de l'air

σ_a = conductivité apparente du sol (mS/m)

s = distance interspire

H_p = champ reçu par SS (vide)

H_s = champ reçu par SS (milieu mesuré)

On démontre (McNEILL, 1980) que si l'on choisit convenablement la fréquence f et l'écartement des spires s , la conductivité apparente peut s'écrire :

$$\sigma_a = 4(H_s/H_p)/2\pi f\mu^\circ s^2 \text{ soit : } \sigma_a = k(H_s/H_p) \quad (2)$$

k étant une constante dépendant de la construction de l'appareil. On voit que la conductivité mesurée (notée CEM par la suite) est reliée linéairement au rapport (H_s/H_p) qui est donné par l'appareil.

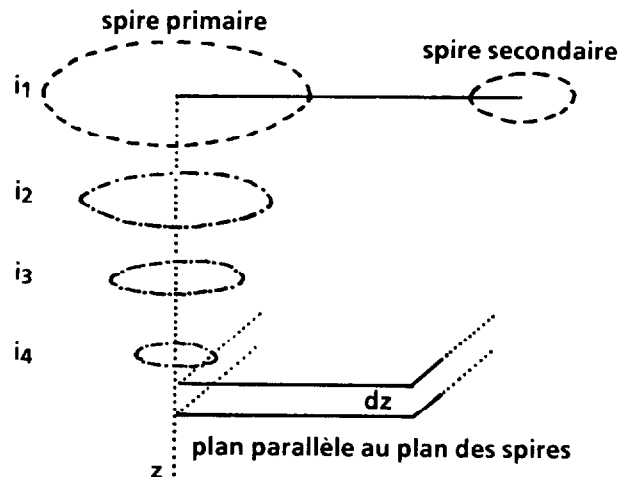


FIG. 1. — Principe de fonctionnement de la conductivimétrie électromagnétique

Celui que nous avons utilisé (fig.2) possède deux spires séparées de 1 m. La fréquence d'excitation est de 14,6 kHz. Deux cadrans disposés perpendiculairement permettent la lecture des résultats jusqu'à 1000 mS/m lorsque l'axe des spires est maintenu soit horizontal soit vertical.

1.2. Utilisation pour l'étude des sols

L'induction électromagnétique s'utilise en place, sans perturbation du sol ni prélèvement d'échantillon. L'appareil est simplement posé sur le sol ou maintenu en hauteur horizontalement. Il n'y a donc pas de problème de contact sol-sonde, et la mesure est immédiate. Nous donnerons quelques exemples d'utilisation.

1.2.1. MESURES DE SURFACE

La contribution d'une couche élémentaire de sol d'épaisseur dz , située à la profondeur z , au champ secondaire H_s est : $d\Phi = dH_s/H_s$. C'est une fonction non linéaire de la profondeur. On peut donner (McNEILL, 1980) l'expression de $\Phi(z)$ entre $z = 0$ et $z = 2$ m, profondeur maximum explorée pour chacune des configurations verticales et horizontales des spires. On obtient (fig.3) les courbes (3a) et (3b) d'équation :

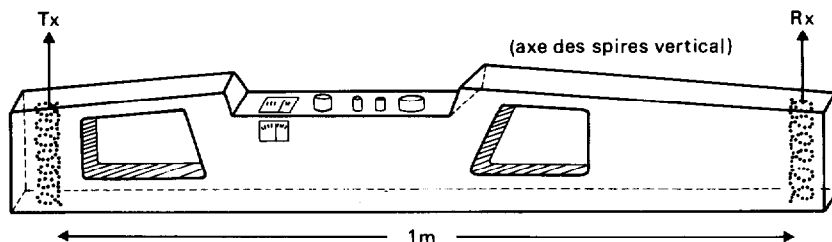


FIG. 2. — Schéma de l'appareillage (EM-38 de Geonics) : les dipôles des spires émettrices (Tx) et réceptrices (Rx) sont situés dans un plan vertical

$$\Phi_v(z) = 4z/(4z^2 + 1) \quad 3/2 \text{ m} \quad (2)$$

$$\Phi_h(z) = 2 \cdot 4z/(4z^2 + 1) \quad 1/2 \quad (3)$$

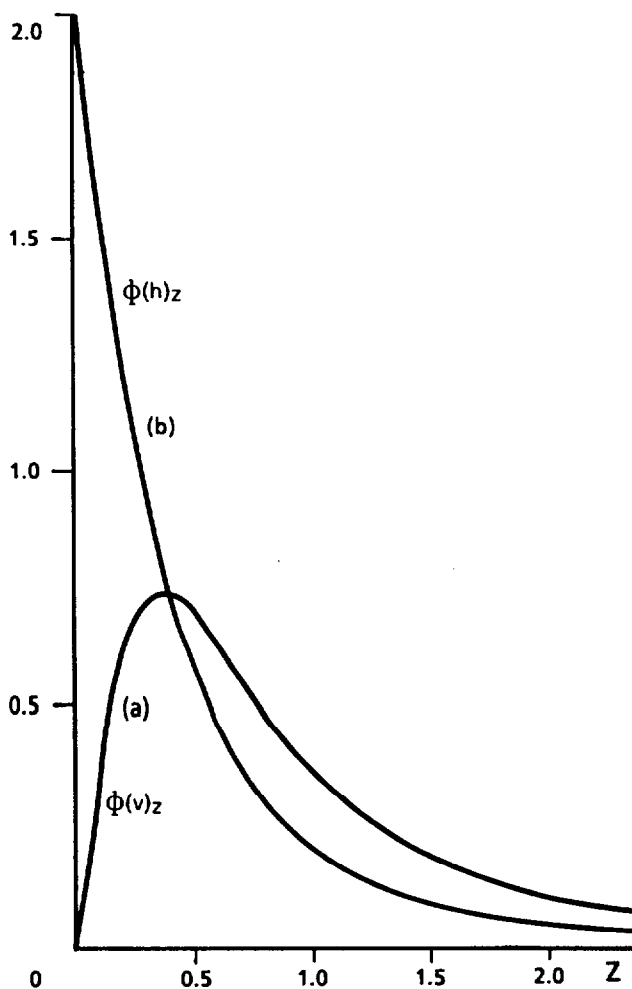


FIG. 3. — Contribution d'une couche de sol élémentaire dz située à une profondeur normalisée z au champ secondaire Hs : a) en position verticale des dipôles ; b) en position horizontale des dipôles

La contribution d'une couche d'épaisseur z cm, comptée à partir de la surface est donnée par l'aire située sous la courbe jusqu'à l'abscisse z. Si l'axe des solénoïdes est horizontal (ECH), les premiers 50 cm de sol donneront une réponse relative plus grande que les couches profondes, alors qu'en mode vertical (ECV) les couches superficielles auront une réponse sensiblement égale à celle du demi-espace restant. Autrement dit lorsque ECH > ECV on se trouve au-dessus d'un profil salin décroissant avec la profondeur, situation indiquant une concentration des sels en surface. Dans le cas contraire il s'agit d'un profil salin croissant en profondeur, où les sels se sont accumulés. La comparaison de ECH et ECV est donc une première possibilité d'interprétation des résultats. Un exemple d'application est donné sur la figure 4. Dans le cas choisi les manifestations salines de surface, structure poudreuse et croûtes correspondent bien au cas ECH > ECV. Ces deux valeurs sont élevées, indiquant une forte concentration sur tout le profil.

1.2.2. MESURES AU-DESSUS DU SOL

Lorsque la salinité est élevée, on peut tracer les courbes de variation de la conductivité mesurée en mode vertical (ECVh) ou horizontal (ECHh), en fonction de la hauteur de mesure h au-dessus du sol. La valeur maximum de h est deux mètres. L'interprétation se fait par une série d'abaques (Mc NEILL, 1980). Dans la pratique, on n'obtient une image de la stratification des horizons salés dans le sol que s'il y a une différenciation très nette des teneurs en sels, la strate superficielle n'ayant pas plus de 50 cm d'épaisseur.

En soulevant l'appareil au-dessus du sol, on introduit une couche d'air que l'on peut assimiler, en ce qui concerne la réponse du conductivimètre, à une couche de sol de conductivité nulle et d'épaisseur connue. Les mesures en hauteur seront faites systématiquement pour les conductivités apparentes supérieures à 1000 mS/cm, l'appareil étant saturé au niveau du sol (fig.5).

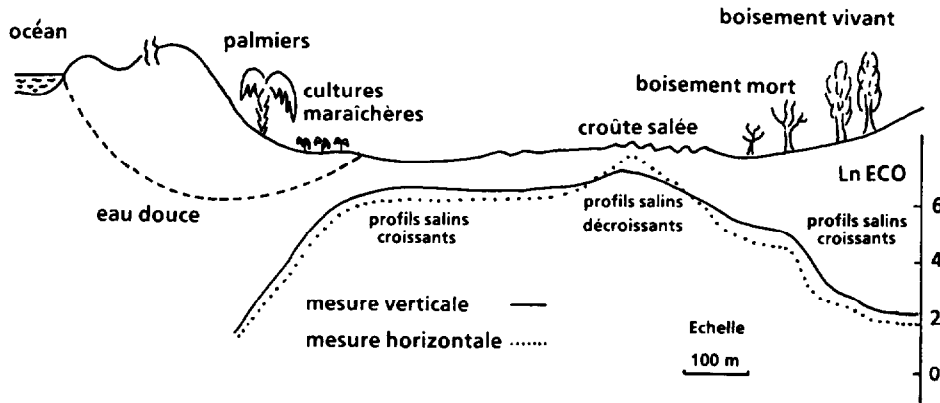


FIG. 4. — Lac salé de Tanma (Sénégal) : inversion des profils salins sur un transect

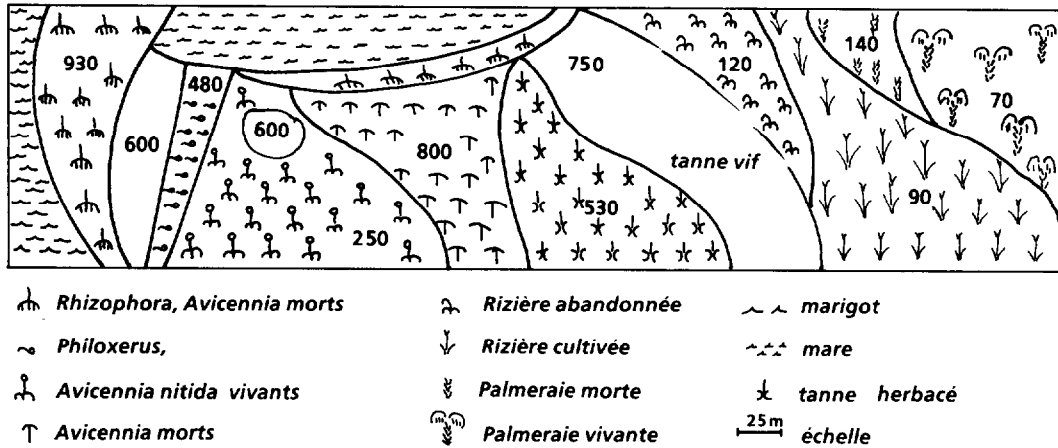


FIG. 5. — Marigot de Koubalan (Casamance Sénégal) : salinité des sols et couvertures végétales associées. Mesures en mode vertical à 60 cm du sol en mS/m

2. INTERPRÉTATION DES MESURES

2.1. Influence des paramètres pédologiques

Pour une position donnée de l'appareil par rapport au sol, la mesure obtenue est proportionnelle à la conductivité propre du sol et de sa solution, donc à sa texture, son humidité volumique et sa porosité. Pour une fréquence f d'excitation donnée, la profondeur explorée dépend de la conductivité propre σ du sol traversé :

$$Z = (1/2\pi) \sqrt{(10/\sigma f)}$$

2.1.1. EFFET DE LA POROSITÉ ET DE LA TEXTURE DU SOL

Soit σ_x la conductivité totale du sol. En assimilant le sol à un assemblage de particules dont une fraction f de la porosité est occupée par le liquide intersticiel de conductivité σ_l on peut écrire :

$$\sigma_x/\sigma_l = f^2 \quad (4)$$

Le rapport σ_x/σ_l augmente dans l'ordre pour les roches dures, les grès, les sables, les argiles. Plus la porosité est grande, plus l'effet de l'électrolyte qui remplit les pores est important. Cette dernière équation montre également que si f est petit, la conductivité mesurée peut être très faible. Ce qui implique, pour les sols peu salés, de faire les mesures à taux d'humidité du sol élevé.

2.1.2. EFFET DE L'HUMIDITÉ

L'expression de la variation de f avec l'humidité du sol a été développée (RHOADES, RAATS et PRATHER 1976) :

$$(\sigma_x - \sigma_s)/\sigma_l = \Theta (a\Theta + b) \quad (5)$$

où : σ_s = conductivité de surface dépendant de la teneur en argile et de sa capacité d'échange.

a, b = coefficient de texture.

Θ = humidité volumique du sol.

La relation (5) 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 du sol dépend plus de Θ et σ_l .

2.1.3. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

Un changement de température affecte la viscosité, donc la mobilité des ions et la conductivité du milieu. Le gradient est de 2 à 2,4 % par degré suivant les électrolytes (ROBINSON et STOKES, 1959).

Des mesures effectuées sur un même sol montrent un gradient de 1,1 % pour une humidité pondérale comprise entre 14,3 et 25 % en mode vertical.

En résumé, on mesure le rapport (Hs/Hp) qui pour une même position initiale des spires dépend de la géométrie des lignes de courant dans le sol, donc du volume exploré. Ce dernier varie avec l'humidité et la porosité, mais aussi avec la conductivité propre du sol et celle du liquide interstitiel. On peut limiter l'influence de l'humidité en faisant par exemple des mesures sur un même type de sol à des moments où les profils hydriques sont semblables. On exploite alors des variations de mesures qui permettent de suivre le sens d'évolution de la salinité du sol. Une assez grande latitude est laissée quant à la période d'intervention, des essais sur parcelles irriguées ayant montré qu'entre 14,5 et 23 % d'humidité pondérale le gradient de variation de ECVO était de 1,1 %. Par contre, il convient d'étalonner les réponses de l'appareil par rapport aux mesures classiques dès qu'une interprétation quantitative est requise, car dans tous les cas on ne mesure qu'une conductivité apparente globale du sol.

3. UTILISATION ET PREMIERS RÉSULTATS OBTENUS

3.1. Utilisation en surface

On a représenté (fig.4) le profil en long d'un bas-fond de la côte Ouest du Sénégal. Les mesures ont été faites en fin de saison sèche, au niveau du sol, en mode horizontal et en mode vertical. Les manifestations de salure visibles en surface [étiolement et mort des arbres (*Melaleuca quinquinerva*, *Eucalyptus camaldulensis*), croûte salée en surface et disparition de la salinité] sont parfaitement suivies par les variations des conductivités apparentes de 8 à 1000 mS/m.

3.2. Utilisation en hauteur

Une série de mesures faites au Sénégal en bordure du marigot de Koubalan (Basse Casamance) a permis de lever une carte des salinités apparentes mesurées en mode vertical à 60 cm au-dessus du sol. On peut mettre en évidence 9 niveaux de salinité qui correspondent

tous à des associations végétales ou à des états de végétation différents (fig.5). Par exemple, le riz ne survit pas à des salinités supérieures à 90 mS/m et à partir de 900 mS/m même les espèces les plus résistantes de la mangrove à palétuviers périssent (*Avicennia*).

Ce type de mesure sans étalonnage permet d'étudier les variations de salinité, sans pouvoir quantifier les sels. Des mesures faites dans les meilleures conditions, à humidité du sol constante sur une micro parcelle de 100 m² cultivée en riz, ont montré qu'il est possible d'estimer un gradient de salinité de 6 mS/m. Pour les sols étudiés cela correspondrait à 0,006 % en NaCl volumique.

3.3. Etalonnage par rapport à d'autres sondes

RHOADES et CORWIN (1981), ont proposé un étalonnage par rapport aux résultats fournis par une sonde quadripôle, appareil dont on connaît par ailleurs les limites d'utilisation (El OUMRI et VIELLEFON, 1983). L'étude de la littérature (CORWIN et RHOADES 1982) montre que ce type d'étalonnage est complexe à appliquer à n'importe quel type de sol. Il implique de plus un certain nombre d'hypothèses simplificatrices qui restreignent son emploi.

3.4. Etalonnage par rapport à la conductivité d'extraits de sol

Nous avons donc essayé de trouver une méthode simple en étalonnant la réponse de l'appareil par rapport à la conductivité électrique de l'extrait au dixième. On suppose que la totalité des sels solubles se trouve dans cet extrait : la répartition des humidités est homogène. La parcelle choisie se trouve dans la Basse Vallée de l'Euphrate en Syrie dans une station expérimentale de l'ACSAD. Les sols sont différenciés sur des alluvions subrécentes de texture homogène ; la salinité est moyenne à forte (ECsat de 6 à 60 mS/cm), avec un horizon B contenant de 5 à 15 % de gypse. Les caractéristiques sont données dans le tableau I. Le profil D1 est représentatif de la parcelle, excepté pour les teneurs en gypse en profondeur, très variables.

Les conductivités électromagnétiques apparentes ont été mesurées à la surface du sol, en mode horizontal et vertical (notations ECHO et ECVO). Le sol a été en même temps prélevé tous les 10 cm, jusqu'à la nappe phréatique, à 175 cm de profondeur. Les valeurs de conductivité des extraits 1/10 en dS/m ont été corrélées avec les mesures faites en mode horizontal et en mode vertical, en mS/m. L'humidité volumique moyenne Θ est de 23 % pour les 9 points de mesure, la densité apparente de 1,4 à 1,5 sur tout le profil. Les équations obtenues sont :

$$EC(1/10) = 0,0077.ECVO - 0,0414 \quad r = 0,842 \quad (6)$$

$$\text{et : } EC(1/10) = 0,0069.ECHO - 0,0833 \quad r = 0,817 \quad (7)$$

TABLEAU I
Principales caractéristiques des sols cultivés (D1) et non cultivés (D2) de Beni Thagheb (Syrie)

	D1(cm): 0-10:10-50:50-110:110-140:				D2:0-1:1-20:20-40:40-65:60-130:				
arg.% :	15	25	25	30	10	15	15	30	30
lim.% :	50	50	60	35	50	50	50	50	45
sab.% :	35	25	15	35	40	35	35	20	25
CaCO ₃ % :	14	15	15	14	8	12	15	16	15
gypse% :	-	-	-	15	3	2	-	-	-
ECsat* :	3.5	3.9	3.9	4.2	98	66	55	20	16
pHsat :	7.8	7.7	7.7	7.7	7.6	8.2	8.1	8.1	8.3
SAR :	2	3	4	4	251	120	60	36	30
ESP % :	4	5	6	7	-	-	63	45	55

*dS/m

La corrélation est meilleure en mode vertical car les échantillons ont été prélevés et analysés jusqu'à 170 cm, profondeur mieux représentée par les mesures en mode vertical. L'équation (6) permet de tracer une carte des salinités de l'extrait 1/10 pour tous les sols de la moyenne terrasse de même texture et pris dans des conditions de profils hydriques similaires. Il est possible dans ce cas d'étudier l'effet de l'irrigation sur la répartition spatiale des sels, et même de quantifier cet effet.

L'équation d'étalonnage (6) peut s'exprimer en pourcentage volumique de sels. On obtient :
Sels (% vol.) = 0,0041.ECVO - 0,021 (8)

Cette équation n'est utilisable que pour les sols de cette terrasse pris à une humidité volumique d'environ 23 pour cent.

3.5. Essai de cartographie de la salinité

Trois cents mesures ont été faites sur une parcelle de 90 ha, équipée de drains enterrés espacés de 40 à 80 m et irriguée depuis une dizaine d'années. La distribution des fréquences relatives des mesures (fig.6) est asymétrique, la majeure partie se trouvant dans l'intervalle 80 à 120 mS/m, il n'y a pas de mesures inférieures à 60 mS/m, indiquant qu'il existe une salinité résiduelle, même faible. Il y a par contre quelques taches de salinité supérieure à 150 mS/m, mais de surface réduite. La parcelle dans son ensemble est donc assez homogène. Une telle homogénéité n'a pas pu être mise en évidence par des prélèvements d'échantillons.

La figure 7 montre la corrélation entre les valeurs de CEM en mode vertical et en mode horizontal. ECVO et ECHO étant deux variables partiellement indépendantes, la corrélation entre les couples de mesures signifie simplement que le gradient de salinité avec la profondeur est semblable aux points de mesure. On voit que le champ exploré est particulièrement homogène de ce point de vue.

Les points de mesure situés au-dessus de ab sont caractérisés par une accumulation excessive des sels en profondeur, ceux qui sont situés sous a'b' dénotent

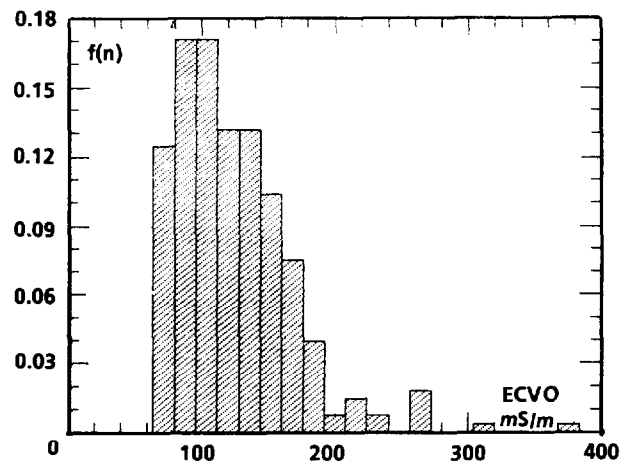


FIG. 6. — Beni Taghleb (Syrie) : histogramme des fréquences relatives de 300 mesures faites en mode vertical (ECVO) sur 9 ha

une accumulation des sels en surface, due à l'évaporation. Hormis ces points exceptionnels, le fonctionnement de la parcelle est celui d'un sol irrigué correctement drainé, avec un appauvrissement homogène de la teneur en sels des horizons de surface.

On peut distinguer par exemple quatre niveaux de salinité et cartographier la répartition de la salinité dans les sols (fig.8). Le logiciel utilisé permet d'ailleurs de distinguer plus de courbes d'isovaleurs de salinité, mais pour les cultures de cette parcelle cela ne présente pas d'intérêt. Par contre dans une parcelle voisine plantée d'abricotiers, on peut déceler une première réaction aux sels à partir de 100 mS/m jusqu'à la mortalité à 200 mS/m (valeurs de ECVO). On pourrait donc subdiviser les classes de salinité plus finement dans ce cas pour mieux suivre la production fruitière suivant les degrés de salinité.

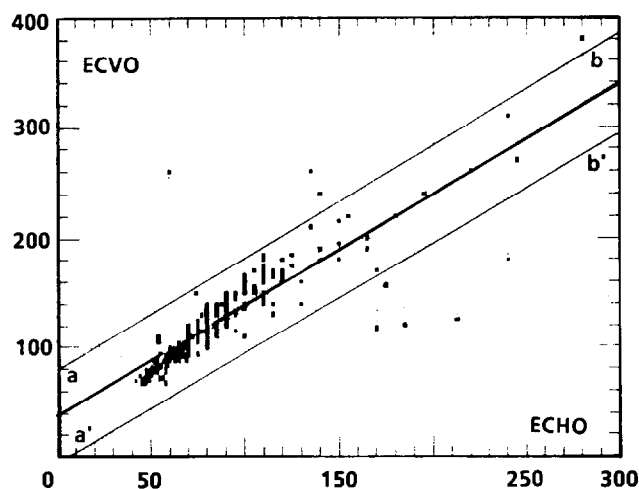


FIG. 7. — Beni Taghleb : test d'homogénéité des profils salins. Corrélation entre les mesures en mode vertical (ECVO) et celles en mode horizontal (ECHO). Limite de confiance à 95 % : ab et a'b'

3.6. Variation spatiale de la salinité

Si l'on suppose que la fonction ECVO est une fonction aléatoire intrinsèque, on peut tracer son demi-variogramme (DELHOMME, 1976). Il représente en ordonnées l'écart quadratique moyen entre deux points de mesure quand la distance entre ces deux points, portée en abscisse, augmente.

On voit (fig.9) que la mesure en mode vertical est une variable structurée, ce qui n'est pas toujours le cas (voir en particulier BOIVIN, 1984). Sa portée est de 50 m à peu près dans la parcelle considérée. Cette propriété, mise en évidence à partir de trois cents mesures, peut être utilisée pour suivre l'effet de l'irrigation. En effet, un champ identique jamais irrigué a été mesuré dans les mêmes conditions. Le variogramme des mesures est

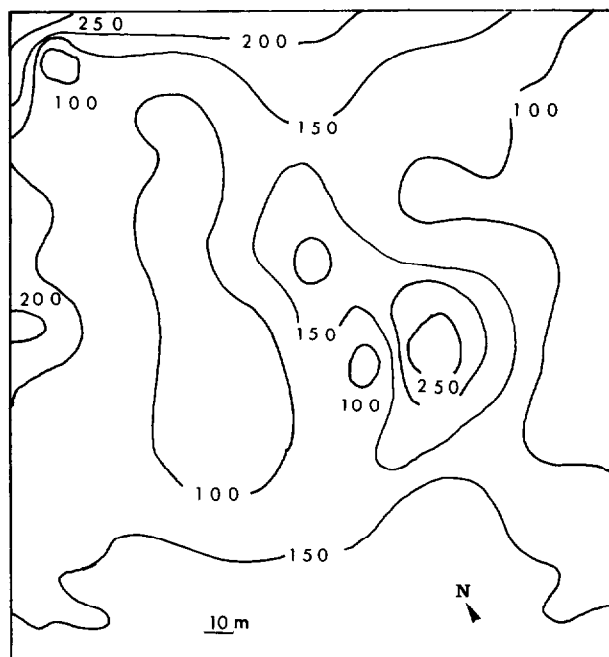


FIG. 8. — Beni Taghleb : carte des isovaleurs de salinité (mS/m). Valeurs de la fonction spline en ses nœuds

linéaire et continuellement croissant. Ce champ fonctionne donc comme une entité saline en soi, chaque point dépendant du voisin. Au contraire, après irrigation, il se produit une différenciation, deux points distants de plus de 50 mètres évoluant indépendamment.

Enfin le grand nombre de mesures obtenus permet de faire la cartographie des salinités par krigeage, ce qui n'est pas possible par prélèvement d'échantillons.

Dans l'exemple de la figure 8, nous avons représenté les valeurs de la fonction spline en ses nœuds, pour 123 points de mesure sur une superficie de 4,5 ha. On

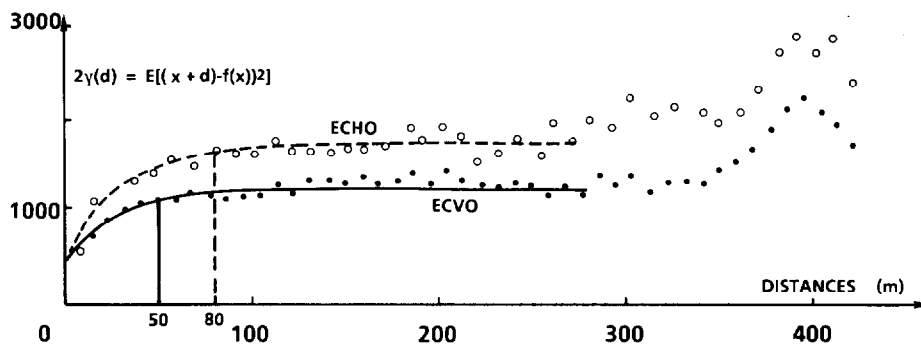


FIG. 9. — Beni Taghleb : variogrammes des fonctions ECVO et ECHO

utilise pour cela les valeurs du variogramme pour calculer les valeurs que prend une fonction d'estimation, ici une fonction spline de type plaque mince. On trace ensuite les isovaleurs choisies préalablement.

CONCLUSIONS

Les exemples que nous avons cités montrent le parti que l'on peut tirer de la conductivimétrie électromagnétique pour la caractérisation et la mise en valeur des sols salés. Une grande facilité de mise en œuvre, et surtout une possibilité de s'affranchir du problème de l'hétérogénéité de la répartition des sels dans le sol. Ces avantages peuvent être exploités à condition de faire les mesures à humidité du sol comparable. On peut ainsi délimiter de manière très rapide des unités de sols salés à condition que ceux-ci soient suffisamment homogènes à l'intérieur d'une même unité et suivre l'évolution des sels dans le temps. On peut déterminer immédiatement l'allure du profil salin de n'importe quel sol.

Par contre les analyses quantitatives ne sont possibles qu'après étalonnage par rapport aux méthodes de

laboratoire. Des études supplémentaires devraient en élargir le domaine d'application. Entre autres il semblerait intéressant d'introduire dans les équations de type (6) et (7) un facteur d'humidité volumique du sol. Pour mieux tirer parti des mesures, il faudrait pouvoir aussi différencier les horizons. On pourrait théoriquement le faire dans le cas d'horizons très tranchés de salinités très différentes.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 5 octobre 1987

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos plus vifs remerciements au Dr. Ahmed OSMAN, directeur de la division des sols de l'ACSAD pour son appui logistique en Syrie, à Mr. Claude CHEVERRY (INRA) pour la lecture du manuscrit et Mr. Thierry LEBEL, hydrologue ORSTOM pour les calculs informatiques.

BIBLIOGRAPHIE

- BOIVIN (P.), 1984. — Etude pédologique de la vallée de Koumbalan. Etude de la variabilité spatiale du pH et de la conductivité d'un sol de tanne. *Rapport multigr.* ORSTOM/Dakar, 72 p.
- BOTTRAUD (J.C.), BORNAND (M.), SERVAT (E.), 1984. — Mesures de résistivité appliquées à la cartographie en pédologie. *Sci. du Sol, Bull., de l'A.F.E.S.*, n° 4 : 279-284.
- CAMERON (D.R.), De JONG (E.), READ (D.W.L.), OOSTERVELD (M.), 1981. — Mapping salinity using resistivity and electromagnetic techniques. *Can. J. Soil. Sci.*, 61 : 67-78.
- CORWIN (D.L.), RHOADES (J.D.), 1982. — An Improved Technique for Determining Soil Electrical Conductivity-Depth Relations from Above-ground Electromagnetic Measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46 : 517-520.
- CORWIN (D.L.), RHOADES (J.D.), 1984. — Measurement of Inverted Salinity Profiles Using Electromagnetic Induction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 : 288-291.
- DELHOMME (J.P.), 1976. — Applications de la théorie des variables généralisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Paris VI-Ecole des Mines de Paris.
- EI OUMRI (M.), VIEILLEFON (J.), 1983. — Etude expérimentale de la conductivité électrique globale de sols. Application à l'estimation de leur salinité. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XX, n° 2 : 91-103.
- JOB (J.O.), 1981. — Some Problems in Analysis of Soils of arid Areas, in : Third Int. Soil Class. Workshop Proceedings, ACSAD pub N° SS/P17/81 : 219-237.
- JOB (J.O.), 1983. — Analysis of soils : accuracy and precision. Third Int. Training Session on Soil Analysis. ACSAD/ORSTOM n° SS/R48/83.
- JONG (E., de), BALLANTINE (A.K.), CAMERON (D.R.), READ (D.W.L.), 1979. — Measurement of Apparent Electrical Conductivity of Soils by an Electromagnetic Induction Probe to Aid Salinity Surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43 : 810-812.
- Le DAIN (A.Y.), 1977. — Origine et fonctionnement d'une tache de salin en Camargue. Utilisation d'une méthode électrique de mesure in situ de la salinité. D.E.A. Agronomie option Pédologie, ENSAM/USTL Montpellier.
- McNEILL (J.D.), 1980. — Electromagnetic conductivity terrain measurement at low induction numbers. Technical note n° TN-6, Geonics Ltd, Mississauga, Canada.

- NADLER (A.), FRENKEL (H.), 1980. — Determination of Soil Solution Electrical Conductivity from Bulk Soil Electrical Conductivity Measurements by the Four-Electrode Method. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44 : 1216-1221.
- RHOADES (J.D.), INGVALSON (R.D.), 1971. — Determining Salinity in Fields Soils with Soil Resistance Measurements. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35 : 54-60.
- RHOADES (J.D.), CORWIN (D.L.), 1981. — Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Am. J.*, 45 : 225-260.
- RHOADES (J.D.), RAATS (P.A.C.), PRATHER (R.J.), 1976. — Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Am. J.*, 40 : 651-655.
- RHOADES (J.D.), VAN SCHILFGRAARDE (J.), 1976. — An Electrical Conductivity Probe for Determining Soil Salinity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40 : 647-650.
- RICHARDS (L.A.) *et al.*, 1954. — Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. U.S. Salinity Laboratory. Handbook n° 60. USDA.
- ROBINSON (R.A.), STOKES (R.H.), 1959. — Electrolyte Solutions, Londres, Butterworths.
- SERVANT (J.), SERVAT (E.), 1966. — Introduction à l'étude des sols salés du littoral du Languedoc-Roussillon. *Annales Agronomiques* vol.17, n° 1 : 53-73.
- SMITH (H.W.), MOODIE (C.D.), OKAZAKI Rose, ELLSWORTH Norma, 1966. — Hydrolysis and salt retention errors in conventional cation-exchange capacity procedures, II. *Soil Sci.*, vol.202, n° 2 : 94-106.