

Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés

Une méthode rapide et fiable

Pascal BOIVIN (1), Didier BRUNET (2) et Jean-Olivier JOB (3)

(1) Pédologue ORSTOM, 70-74 route d'Aulnay, 93143 Bondy Cédex

(2) Pédologue ORSTOM, BP.1386, Dakar, Sénégal

(3) Pédologue ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cédex

RÉSUMÉ

Dans l'optique d'une cartographie de sols salés, la mesure de la conductivité électrique sur extrait de sol (CE) et l'emploi d'un conductivimètre électromagnétique sont comparés. La CE apparaît comme une mesure peu fiable, lourde d'emploi et difficile à interpréter par comparaison avec la conductivité électromagnétique (CEM). Une méthode de cartographie basée sur cette mesure et l'emploi d'un logiciel de géostatistique rédigé pour micro-ordinateur sont proposés. Ils doivent permettre de travailler vite à moindre coût, en produisant un document fiable, reproductible dans le temps et dont l'erreur d'estimation est maîtrisable.

MOTS-CLÉS : Conductivité — Infographie — Krigeage — Salinité — Sénégal — Syrie.

ABSTRACT

COMPUTER ASSISTED MAPPING OF SALINE SOILS USING ELECTROMAGNETIC CONDUCTIVITY

Electromagnetic conductivity (CEM) and traditional electrical conductivity (CE) are compared with respect to their ability to provide a relevant parameter for soil salinity mapping. Kriging of CEM measurements proved to be an efficient method. Maps of apparent salinity can be obtained quickly, with low cost, good reproducibility, and controllable estimation error.

KEY WORDS : Computer assisted cartography — Conductivity — Kriging — Salinity — Senegal — Syria.

INTRODUCTION

La cartographie de la conductivité électrique (CE) d'un sol salé doit satisfaire certaines exigences, particulièrement lorsqu'elle est associée à un schéma de développement ou de suivi d'un périmètre irrigué.

En dehors du coût et du temps de réalisation de la carte, le document obtenu doit satisfaire les critères de qualité suivants :

- erreur d'estimation minimale ;
- reproductibilité de la méthode, notamment dans l'hypothèse d'un suivi intersaisonnier ou interannuel ;
- résolution optimale.

La méthode de référence en matière de mesure de la CE d'un sol est la mesure effectuée sur pâte saturée. La mesure sur extrait 1/n de sol (CE_n^1) est également d'un emploi courant et des formules de comparaison de ces différentes solutions ont été proposées (LE BRUSQ et LOYER, 1982).

Après avoir décrit, par l'étude de quelques cas, les difficultés d'utilisation de la mesure sur extrait de sol pour la cartographie, nous présenterons une méthode combinant l'emploi d'un conductivimètre électromagnétique de terrain et d'un logiciel de cartographie assistée rédigé pour micro-ordinateur compatible IBM-PC. Nous nous attacherons à montrer l'intérêt de cette méthode

vis-à-vis des exigences d'une cartographie, que nous avons énumérées ci-avant.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les études que nous présentons ont été réalisées sur différents sites salés, au Sénégal et en Syrie. Pour le Sénégal, il s'agit de sols sulfatés acides du domaine fluvio-marin de basse Casamance. Ces sols ont subi une très importante dégradation (BOIVIN *et al.* ; 1986, LE BRUSQ *et al.* ; 1987) à la suite de la sécheresse que connaît ce pays depuis deux décennies : hypersalure des sols et développement d'une pédogenèse sulfatée acide, cette dernière atteignant des stades extrêmes où les pH « *in situ* » peuvent être inférieurs à 2. En Syrie, ce sont des sols de terrasse de l'Euphrate. Ils correspondent à des alluvions subrécentes de texture équilibrée.

Les études ont été réalisées à différentes échelles, allant du 1/250^e au 1/10 000^e.

Les mesures de CE ont été réalisées sur extrait 1/5 de sol.

Les mesures de conductivimétrie électromagnétique (CEM) ont été réalisées à l'aide de l'appareil décrit par JOB *et al.* (1987).

1.1. Traitements numériques

Les traitements numériques des données (variabilité spatiale et cartographie assistée) ont été réalisés à partir du logiciel GEOSTAT-PC (BOIVIN, 1988).

Ce logiciel se base sur la théorie des variables aléatoires régionalisées (MATHERON, 1965). Cette théorie est bien adaptée aux problèmes de variabilité spatiale et d'estimation dans les sols (BURGESS et WEBSTER 1980a, b, c, VAUCLIN 1982, GASCUEL 1984, GASCUEL 1987). GEOSTAT-PC offre entre autres deux fonctions à l'utilisateur :

— un module de variographie permet d'étudier la variabilité spatiale d'un lot de données, plus particulièrement la corrélation existant entre deux points de mesure comme fonction de la distance qui les sépare. Cette fonction est appelée variogramme ;

— un deuxième module permet de cartographier par krigage une variable donnée, et de restituer le résultat de l'interpolation sous forme de carte d'isovaleurs, sur table traçante ou sur imprimante.

L'intérêt de ce logiciel est d'être implantable sur tout micro-ordinateur compatible IBM-PC muni d'une carte graphique. Ceci permet de travailler rapidement en toute circonstance, notamment en utilisant un micro-ordinateur portable.

L'estimation d'une carte par krigage présente une nette supériorité sur les autres méthodes d'interpolation, particulièrement :

— en réalisant une interpolation sans biais (l'erreur moyenne est nulle) ;

— en fournissant, outre la carte estimée de la variable étudiée, une carte de variance (ou d'écart type) d'estimation.

1.2. Milieux étudiés

CASAMANCE

Les données que nous utilisons figurent dans les rapports de BOIVIN (1984) (sols de Koubalan) et BOIVIN et LOYER (1985) (sols de Soukouta).

Les sols prospectés sont des sols sulfatés acides de basse Casamance, situés sur des affluents secondaires du fleuve Casamance. Ces affluents sont appelés localement des Bolongs. Le cours de la Casamance et de ses affluents est très fortement salé depuis qu'un déficit pluviométrique persiste sur la région (BOIVIN *et al.*, 1986). Cette salure des eaux de surface a induit à son tour une salure importante des sols des bas fonds aboutissant à la disparition de la végétation de Mangrove qui colonisait naturellement les vasières.

L'abaissement du niveau des nappes a également provoqué une acidification des sols de Mangrove. En conséquence, les sols de bas fonds de cette région sont généralement acidifiés. Le profil est peu évolué, le plus souvent argileux, la teneur en matière organique est élevée, la densité est faible, proche de 1 à 1.2. Le profil contient souvent de la jarosite et son pH « *in situ* » excède rarement 4. Les sols sont généralement très humides sur la totalité du profil, seuls les 20 premiers centimètres de sol étant desséchés. On note alors la formation d'une croûte salée en surface, pouvant évoluer en un horizon pulvérulent appelé moquette.

En raison des teneurs élevées en sels, les mesures de conductivité électrique ont été réalisées sur extrait 1/5^e de sol.

SYRIE

La parcelle étudiée se situe dans une ferme expérimentale irriguée depuis quinze ans. Les paramètres analytiques sont décrits par OSMAN (1980). La parcelle est munie de drains enterrés à 1 m 75 cm de profondeur, espacés de 40 m. Avant la mise en irrigation, la CE atteignait 30 mS/cm. Elle varie actuellement entre 0.5 et 8 mS/cm selon la position dans le profil et dans la parcelle. L'eau d'irrigation n'est pas salée, et la présence d'un peu de gypse et de 20 % de carbonates de calcium finement divisé maintient le taux de sodium échangeable à un niveau satisfaisant.

2. RÉSULTATS

2.1. Variabilité spatiale de la CE

Cette variable a été étudiée sur sept sites différents, répartis dans le domaine fluvio-marin de la basse Casamance. La taille des parcelles varie de 0.12 ha à 16 ha. Le nombre de points de mesure varie de 50 à 100 selon les parcelles. Les prélèvements ont été réalisés à la tarière ou à la pelle à vase.

La CE a toujours une fonction de répartition suivant une loi normale. La variable est faiblement structurée ou purement aléatoire. L'effet de pépité (ou variance à faible distance) a été évalué jusqu'à des distances de 50 cm. Il correspond toujours à des coefficients de varia-

tion de 20 à 50 %. Le palier, ou variance à grande distance, observé correspond à des coefficients de variation supérieurs à 50 %.

Ces valeurs sont très élevées et impliquent qu'un très grand nombre de prélèvements, de 100 à plus de 1000 selon VAUCLIN (1982), doivent être réalisés pour estimer une valeur moyenne à 10 % près sur une parcelle.

A titre d'exemple, la figure 1 présente le variogramme moyen des valeurs de CE mesurées sur une parcelle de 0.12 ha. La structure observée est très faible, même à courte distance. Ceci signifie que la variabilité de la mesure est presque la même, que l'on se place à 50 cm ou à 15 m de distance. Les autres parcelles confirment ce résultat pour des distances de 3 à 400 m.

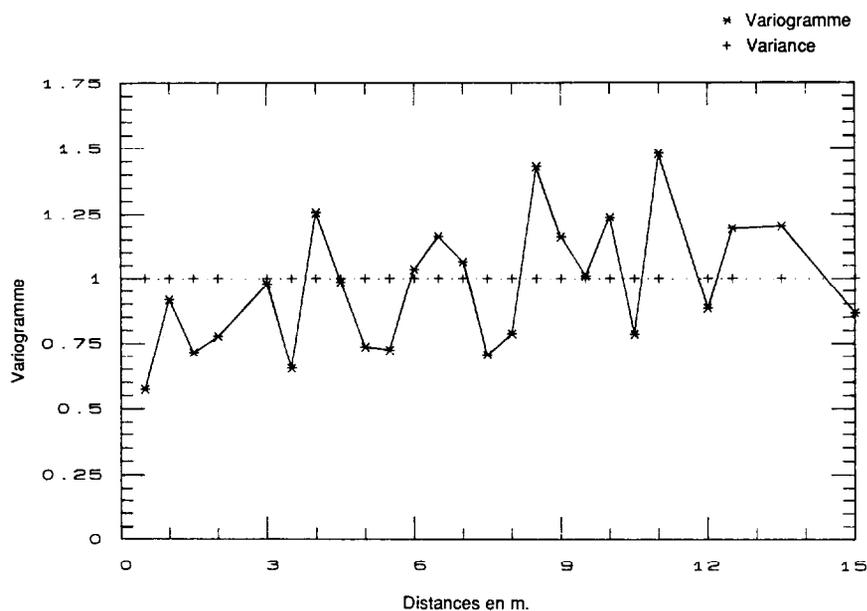


FIG. 1. — Variogramme moyen des données de CE (abscisses en m). *Variogram of CE experimental data*

Dans ces conditions, on peut suspecter la méthode de mesure d'être à l'origine de cette absence de structure. En effet, l'expérience du terrain et les mesures de CEM contredisent ce résultat.

Pour quatre des sept parcelles étudiées, l'humidité pondérale (Hp) a également été mesurée. Dans chaque cas, on constate que le coefficient de corrélation entre Hp et CE est de l'ordre de 0.8 à 0.9. Par contre, le coefficient de corrélation entre CE mesurée sur deux niveaux séparés, dans un même horizon, par une profondeur de 20 cm est de 0.5. La valeur CE obtenue semble donc dépendre étroitement de Hp.

Ce résultat n'est pas surprenant pour ce type de sol. En effet, le sol est proche de la saturation sur la quasi-totalité du profil. Dans ces conditions, on peut penser

que l'essentiel des sels se trouve sous forme dissoute dans l'eau du sol. Or le protocole expérimental prévoit de faire la mesure d'extrait sur une masse constante de sol séché, broyé et tamisé. Il n'est plus alors possible de savoir si les volumes d'eau initialement présents dans les échantillons collectés sont les mêmes. La mesure est en réalité effectuée sur des volumes d'eau et de sol différents, et se trouve donc biaisée.

Nous ne disposons pas de données équivalentes pour les sols de Syrie, qui ne seront donc pas évoqués dans ce paragraphe. Il serait intéressant de réaliser sur ces sites les mêmes expérimentations. En effet les sols y sont moins salés et ont une humidité pondérale plus faible. De ce point de vue, les sols sulfatés acides de basse Casamance représentent des cas extrêmes. Pour ces

raisons, les résultats que nous venons de présenter ne peuvent pas être à priori généralisés à d'autres types de sols.

CONCLUSION

La qualité de l'information apportée dans notre cas par la mesure de CE est donc apparue douteuse.

La présence d'un fort effet de pépîte rend hasardeuse la comparaison des valeurs obtenues au cours de deux campagnes de mesures successives : car en réalisant un prélèvement à 50 cm du précédent, on risque d'interpréter en termes de variation temporelle ce qui est en réalité variation spatiale.

Le fort coefficient de variation observé et l'absence de structure font que le document cartographique obtenu sera entaché d'un écart type d'estimation très élevé.

Enfin, la multiplication des points expérimentaux est difficile, en raison du coût et du temps de réalisation de l'opération : prélèvements comme analyses.

On constate donc que la mesure de CE apparaît peu attrayante pour la réalisation d'une cartographie dans le cas étudié, à plus forte raison si cette cartographie est destinée à être renouvelée au cours du temps.

2.2. Emploi du conductivimètre électromagnétique

INTRODUCTION

La conductivimétrie électromagnétique mesure une conductivité apparente globale du sol jusqu'à une profondeur voisine de deux mètres. C'est une mesure non destructrice qui se fait en soumettant le sol à un champ magnétique de haute fréquence. Ce champ induit des courants d'autant plus intenses que le sol

est conducteur. La salinité et l'humidité du sol sont donc les deux paramètres fondamentaux de la mesure.

Les modes d'étalonnage (RHOADES et CORWIN, 1981) et les possibilités d'utilisation (JOB *et al.*, 1987) sont multiples.

Nous avons choisi pour cette étude de travailler en mode différentiel. Les mesures sont faites à des périodes où l'humidité du sol est comparable, l'objectif étant de faire apparaître par la cartographie une évolution plutôt que des valeurs absolues de salinité. C'est pourquoi nous ne présenterons pas d'étalonnage.

CAS DES SOLS DE CASAMANCE

L'exemple que nous présentons est celui d'une vallée d'une centaine d'hectares de sols sulfatés acides et salés. Cette vallée a été équipée d'une digue anti-sel en 1986, et nous avons donc choisi de suivre l'évolution de la salinité des sols aménagés par mesure de CEM.

Nous disposons de trois campagnes de mesures effectuées en fin de saison sèche : 1986, 1987 et 1988 respectivement.

Notre objectif était ici de montrer qu'en absence de gestion et d'évacuation de la lame d'eau retenue en saison des pluies, le désalement ne pouvait pas s'effectuer.

En 1986, les mesures ont été faites tous les 40 m sur des transects espacés de 150 à 300 m.

En 1987 et 1988, les mesures ont été placées sur une grille régulière de 100 mètres de côté.

La figure 2 illustre le variogramme moyen des valeurs de CEM mesurées en 1986. Seuls les classes de distance réunissant au moins 80 couples de points ont été affi-

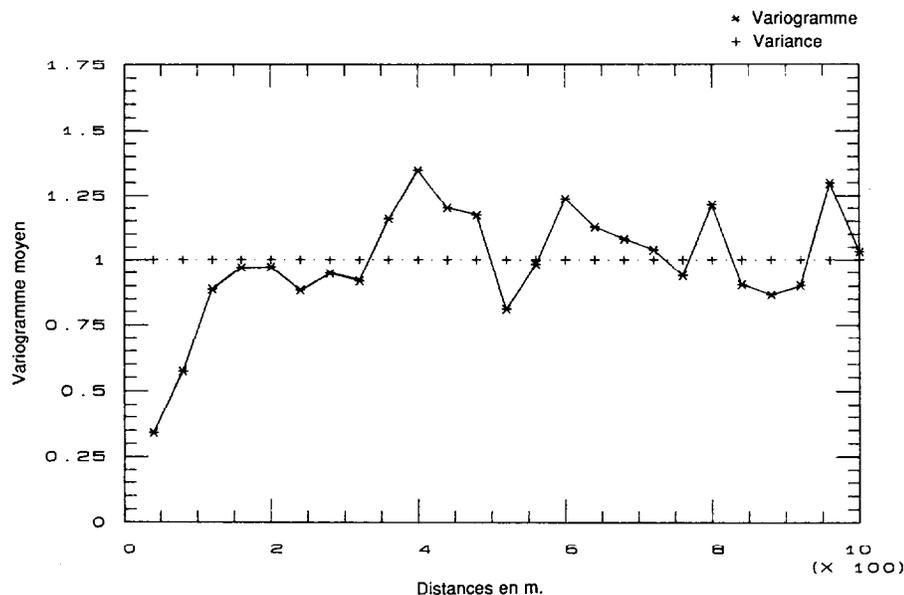


FIG. 2. — Casamance, 1986 : Variogramme moyen des données CEM (distances en m). *Casamance, 1986 : Variogram of CEM experimental data*

chées. On constate que CEM est fortement structurée, de structure sphérique, d'effet de pépité nul et de portée 200 m.

La figure 3 représente le variogramme moyen des valeurs de CEM mesurées en 1987 sur le maillage. Le variogramme présente exactement la même structure, mais son aspect est plus lissé car chaque classe de dis-

tance contient au moins 100 couples de points, et plus de 300 pour les premières.

La structure est également conservée en 1988 et apparaît donc comme remarquablement stable. L'effet de pépité nul est confirmé par le fait qu'une mesure répétée en un même point est rigoureusement constante.

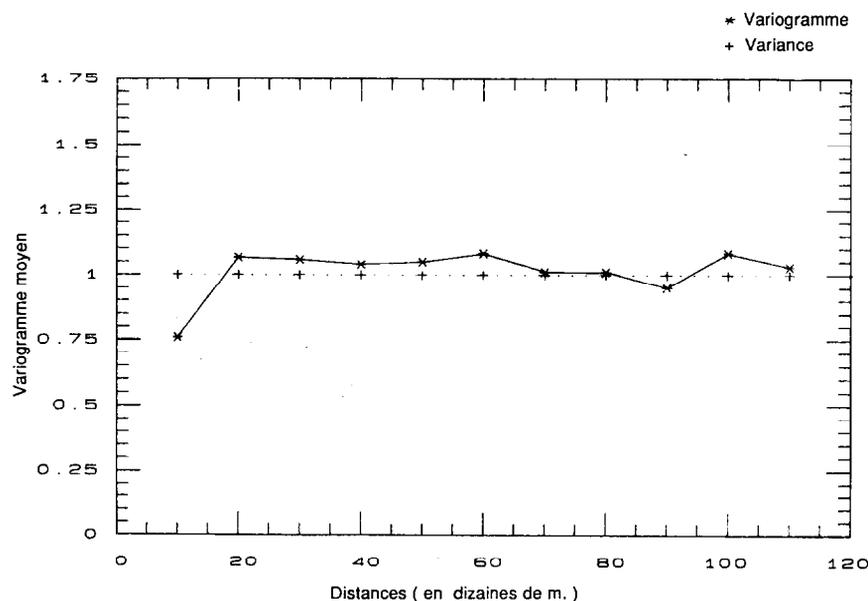


FIG. 3. — Casamance, 1987 : Variogramme moyen des mesures CEM (distances en m \times 10). *Casamance, 1987 : Variogram of CEM experimental data*

Les figures 4 et 5 illustrent les cartes de CEM calculées pour les années 1987 et 1988. On constate que la salure n'a pas du tout évolué dans la partie nord du bassin, tandis qu'elle s'est déplacée dans sa partie sud. Ce résultat confirme l'inefficacité du système de gestion de l'eau, puisque 1200 mm de précipitations sont tombés pendant la saison des pluies séparant les deux campagnes de mesure.

Il confirme l'excellente reproductibilité de la méthode, tant au niveau de la mesure de terrain que du traitement numérique.

Précisons enfin qu'il suffit de deux jours de travail d'une personne pour réaliser les mesures sur le terrain et le traitement informatique aboutissant au tracé de la carte.

CAS DES SOLS DE SYRIE

Nous présentons ici les résultats obtenus lors de la cartographie d'une parcelle irriguée, pour les années 1986 et 1987. Les plans d'échantillonnage sont les mêmes pour les deux campagnes de mesure.

Les valeurs CEM, réparties selon une loi lognormale, permettent de calculer un variogramme moyen pour les années mesurées. Ces variogrammes sont illustrés respectivement par les figures 6 et 7.

Avant irrigation, CEM se présente comme une variable nettement structurée, de structure sphérique. L'effet de pépité paraît très faible. La valeur 0.05 (5 % de la variance calculée sur l'ensemble des mesures) donne les meilleurs résultats au test de validation croisée du variogramme.

Le modèle ajusté permet de calculer une carte par krigeage, présentée en figure 8.

Après irrigation, le variogramme des valeurs de CEM (fig. 7) semble plat, ce qui correspond à une variable purement aléatoire. En réalité, la valeur moyenne et la variance ont fortement chuté. L'irrigation a donc lessivé la parcelle, en laissant une salinité résiduelle désorganisée spatialement. La carte estimée par krigeage de CEM apparaît en figure 9.

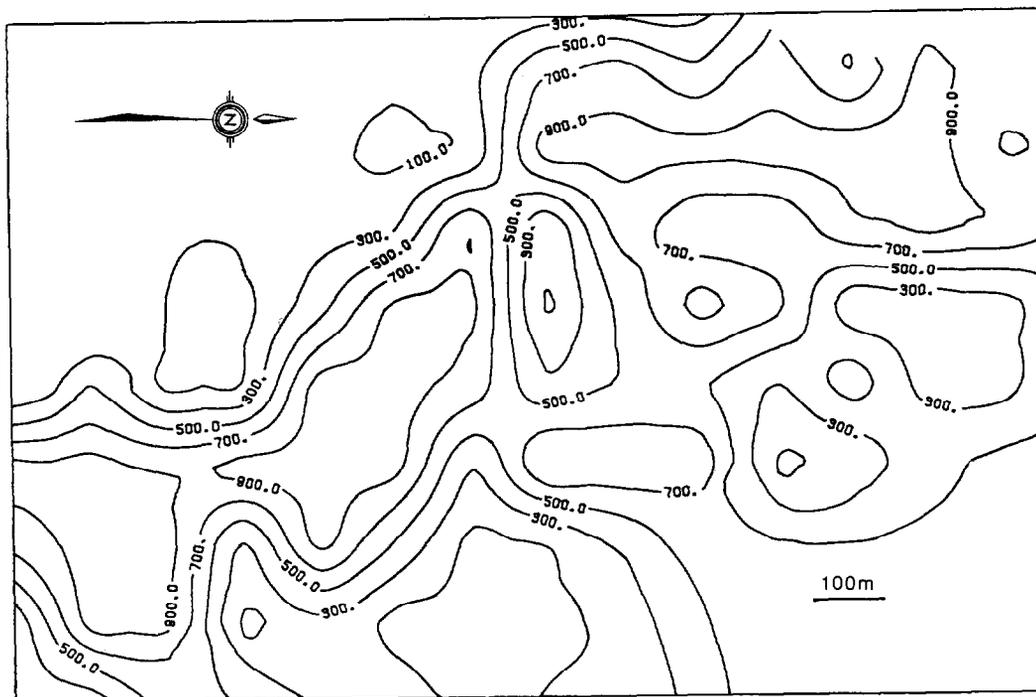


FIG. 4. — Casamance, 1987, carte des isovaleurs de CEM (mS/m). *Casamance, 1987, mapping of CEM isocontours (mS/m)*

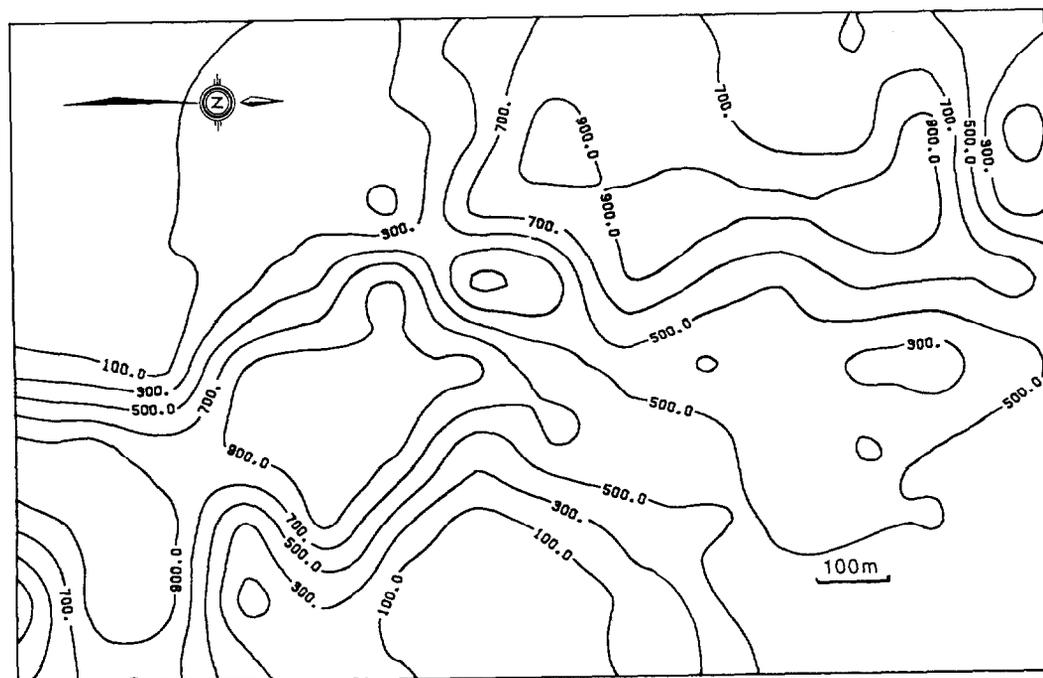


FIG. 5. — Casamance, 1988, carte des isovaleurs de CEM (mS/m). *Casamance, 1988, mapping of CEM isocontours (mS/m)*

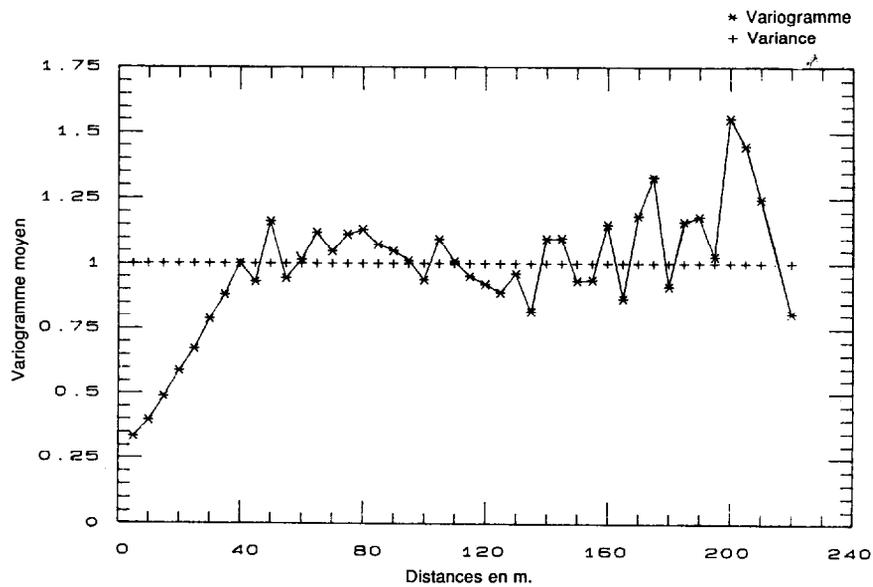


FIG. 6. — Syrie, 1986 : Variogramme moyen des mesures CEM (distances en m). *Syria, 1986 : Variogram of CEM experimental data*

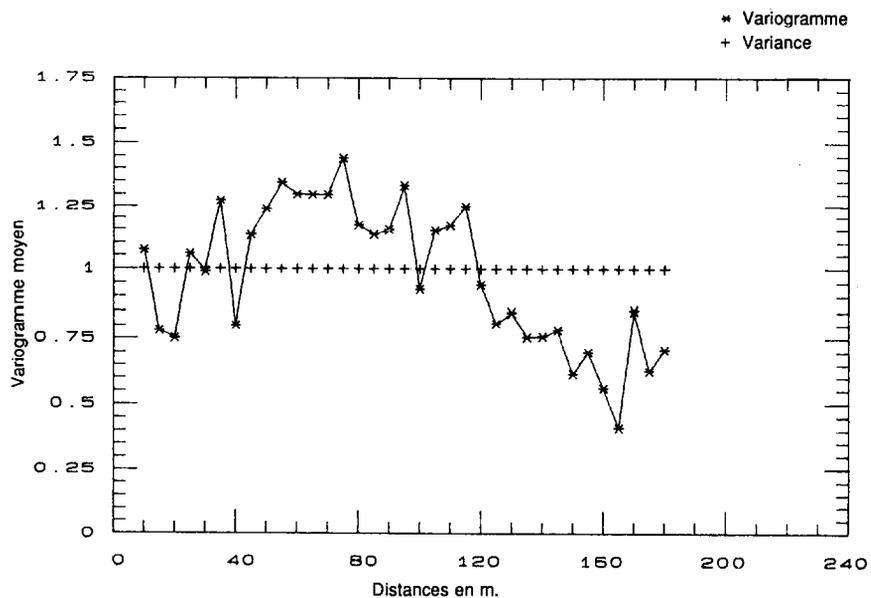


FIG. 7. — Syrie, 1987 : Variogramme moyen des mesures CEM (distances en m). *Syria, 1987 : Variogram of CEM experimental data*

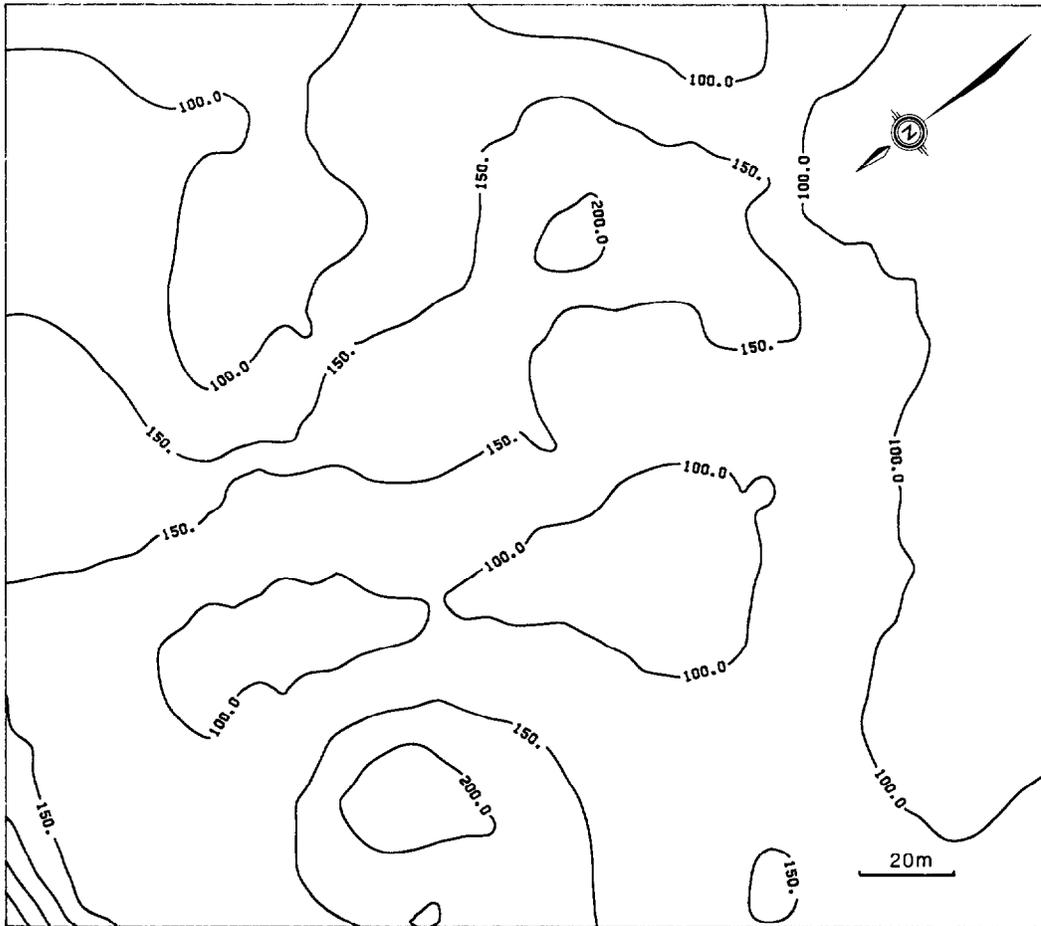


FIG. 8. — Syrie, 1986, carte des isovaleurs de CEM (mS/m). Syria, 1986, mapping of CEM isocontours (mS/m)

CONCLUSION

Dans le cas de la mesure de CEM, lorsqu'une forte salinité est présente, elle apparaît comme structurée, avec un effet de pépite nul. Il est donc possible de choisir a priori l'erreur d'estimation de la carte calculée, en choisissant un pas d'échantillonnage approprié. La multiplication des points de mesure n'entraîne pas de surcoût ou de perte de temps pour la cartographie.

La reproductibilité des mesures apparaît comme excellente, enfin, la résolution du document dépend elle aussi du nombre de points expérimentaux, que l'on peut aisément faire varier.

Le fait que le volume de mesure ne soit pas absolument constant ne semble pas nuire à la qualité du résultat.

La variable CEM se comporte bien comme une variable régionalisée présentant une structure dans l'espace, et l'emploi des techniques de krigeage est donc justifié.

Le recours à un logiciel conversationnel implantable sur un matériel portable permet de travailler dans des délais très courts, ce qui peut s'avérer intéressant dans le cas de missions de courte durée ou d'un suivi en temps réel.

Nous avons travaillé sur des sites où l'humidité, proche de la capacité de rétention, varie peu : topographie plane, même type de sol pour l'ensemble du site, irrigation (Syrie) ou nappe à profondeur constante (Casamance) tandis que la salure est élevée. Dans ces conditions, les mesures réalisées sont particulièrement sensibles à la salure et peu à l'humidité (JOB *et al.*, 1987), ce qui ne serait peut-être pas le cas pour des sols secs.

On peut aussi reprocher à la méthode le volume de mesure important et théoriquement variable : problème similaire à celui que pose l'utilisation d'une sonde à neutrons. La conception d'un appareil ne prospectant que les premiers centimètres de sol satisferait sans doute davantage l'agronome.

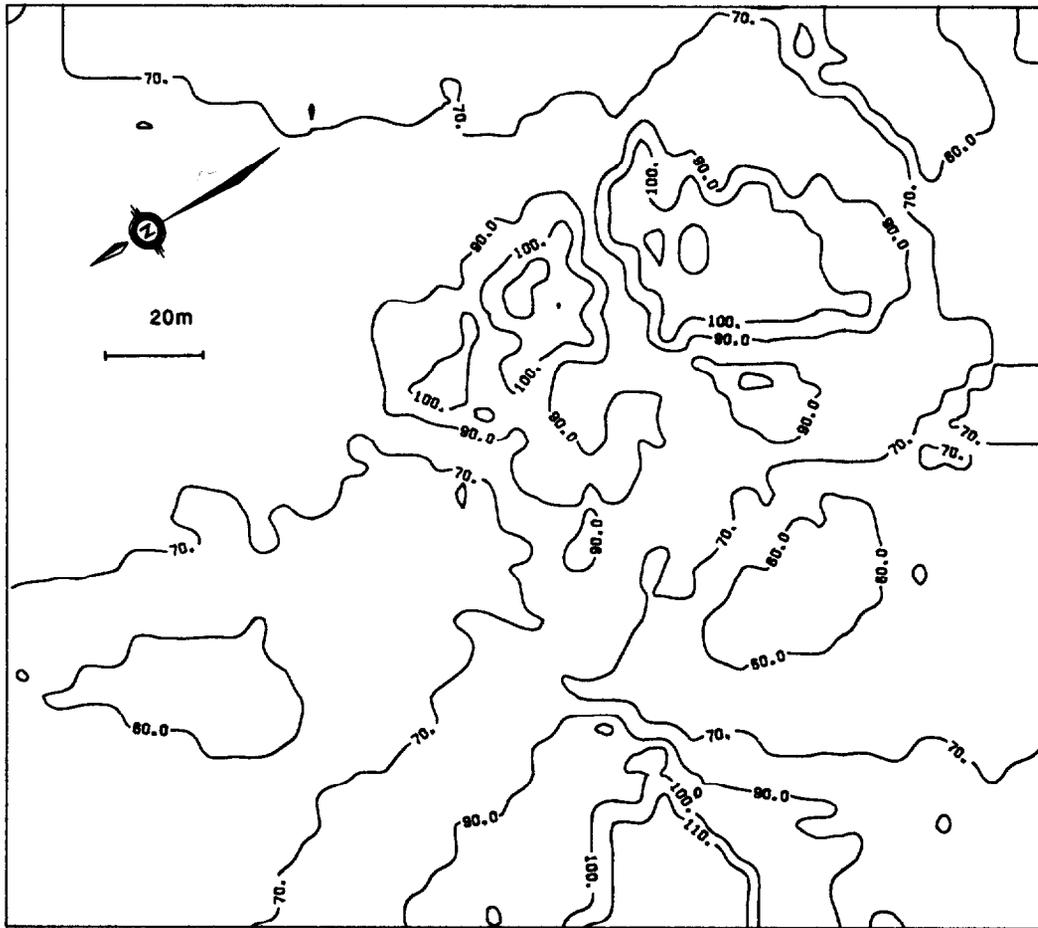


FIG. 9. — Syrie, 1987, carte des isovaleurs de CEM (mS/m). *Syria, 1987, mapping of CEM isocontours (mS/m)*

La mesure de CE paraît difficilement utilisable dans les conditions où nous l'avons testée. Une ex-

périmentation complémentaire serait à conduire sur sol à humidité et salure faibles.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 28 juin 1988

BIBLIOGRAPHIE

- BOIVIN (P.), 1984. — Etude pédologique des Kalounayes, carte des sols du marigot de Koubalan, rapport d'élève. *Multigr.* ORSTOM Dakar, 70 p.
- BOIVIN (P.) et LOYER (J.Y.), 1985. — Etude des sols du périmètre de Soukouta, *multigr.* ORSTOM Dakar, 45 p.
- BOIVIN (P.), LOYER (J.Y.), MOUGENOT (B.) et ZANTE (P.), 1986. — Sécheresse et évolution des sédiments marins au Sénégal, cas de la basse Casamance. Actes du Symposium INQUA, Dakar, 1986 : 43-49.
- BOIVIN (P.), 1988. — GEOSTAT-PC, logiciel conversationnel de calcul géostatistique pour micro-ordinateur. *Bull. GFHN*, juin 1988, à paraître.
- BURGESS (T.M.) and WEBSTER (R.), 1980a. — Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I the semi-variogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*, 31 : 315-331.
- BURGESS (T.M.) and WEBSTER (R.), 1980b. — Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II Bloc kriging. *Journal of Soil Science*, 31 : 333-341.
- GASCUEL-ODOUX (C.), 1984. — Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol. Thèse de Doc.Ing. ENSMP Fontainebleau, 235 pp.
- GASCUEL-ODOUX (C.), 1987. — Variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol, cas d'une seule variable : *revue bibliographique, Agronomie*, 7 (1) : 61-71.
- JOB (J.O.), LOYER (J.Y.) et AILOUL (M.), 1987. — Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol.XXIII, n° 2, 1987 : 123-131.
- LE BRUSQ (J.Y.) et LOYER (J.Y.), 1982. — Relations entre les mesures de conductivité sur des extraits de sol de rapports sol/solution variables, dans la vallée du fleuve Sénégal. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol.XIX, n° 3 : 293-301.
- LE BRUSQ (J.Y.), LOYER (J.Y.), MOUGENOT (B.), CARN (M.), 1987. — Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de magnésium et de fer, et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal, *Science du sol*, 1987, 3, Vol.5 : 173-184.
- MATHERON (G.), 1965. — Les variables régionalisées et leur estimation, Ed. Masson, Paris, 305 pp.
- OSMAN (A.), 1980. — Soil Classification Workshop, tour guide, ACSAD Pub. n° SS/R28/80, 6 cartes, 180 pp.
- RHOADES (J.D.) et CORWIN (D.L.), 1981. — Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter, *Soil Sci. Am. J.*, 45 : 225-260.
- VAUCLIN (M.), 1982. — Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol, Colloque S.H.F.-I.N.R.A., Avignon, juin 1982 : 9-45.
- WEBSTER (R.) and BURGESS (T.M.), 1980c. — Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III Changing drift and universal kriging. *Journal of Soil Science*, 31 : 505-524.