

***Estimation quantitative de la salinité d'un bas-fond
par conductivimétrie électromagnétique :
application aux sols salés de Basse-Casamance
(Sénégal)***

J.P. Montoroi

IRD (ex ORSTOM), Laboratoire des Formations Superficielles,
32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy, France.

ABSTRACT

Salinity assessment of a bottomland using electromagnetic induction: application to saline soils of lower Casamance (Senegal).

The EM-38 is a useful instrument for making rapid field identification and mapping of soil salinity. Interpretation of measurements in terms of meaningful parameters of soil salinity is difficult, mainly due to the non-uniform response distribution with depth. The aim of this paper is to propose a method leading to interpret the salinity maps in terms of soil salinity by calculating (i) the areas of the soil volumes defined by salinity mapping, (ii) the salt content of these volumes using the calibration of EM-38. Applied to the acid and saline soils of a southern Senegal bottomland, the results show that the soils annually desalinized. However, this desalinization is mainly dependant of annual rainfall. The salt losses at the dam outlet are partly compensated by a groundwater table connected to highly saline seawater.

INTRODUCTION

Le conductivimètre électromagnétique EM-38 (Geonics Ltd., Canada) est un outil de diagnostic et de cartographie très utile pour l'étude des sols salés (De Jong *et al.*, 1979 ; Cameron *et al.*, 1981 ; Williams et Hoey, 1987 ; Job *et al.*, 1987 ; Boivin *et al.*, 1988 ; Lesch *et al.*, 1992 ; Rhoades, 1992 ; Cannon *et al.*, 1994). Cependant, l'interprétation des mesures en termes de salinité de sol pose quelques difficultés, largement due à la distribution non-uniforme de la réponse avec la profondeur (McNeill, 1980). Plusieurs méthodes permettent de calibrer l'EM-38 et de convertir les valeurs mesurées en valeurs de salinité (Corwin et Rhoades, 1984, 1990 ; McKenzie *et al.*, 1989 ; Wollenhaupt *et al.*, 1986). Johnston *et al.* (1997) ont récemment montré que ces méthodes présentent certains biais qui sont principalement dus aux variations de teneur en eau et de texture.

De 1989 à 1991, les sols salés et sulfatés acides du bas-fond de Djiguinoum (Basse-Casamance) ont été remis en riziculture au cours d'une expérimentation agronomique. Celle-ci a nécessité la gestion hydraulique optimisée d'un petit barrage villageois qui empêche l'intrusion d'eaux marines sursalées (Montoroi, 1996). Pour évaluer l'impact de cette gestion sur le dessalement des sols, la salinité du bas-fond a été cartographiée annuellement, en fin de saison sèche, lorsque les sols étaient totalement exondés (Boivin et Brunet, 1990).

L'objet de la présente étude est de proposer une méthode permettant d'interpréter les cartes de salinité, établies à l'aide d'un EM-38, en termes de stock salin après une calibration *in situ* de l'appareil.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Calcul du stock salin

Il s'agit de calculer, à un instant t donné, la masse de sel ($M_S(t)$) contenu dans la solution d'un volume de sol ($V(t)$). La relation s'écrit :

$$M_S(t) = CD_{SS}(t) H_V(t) V(t) \quad (1)$$

où $M_S(t)$ est exprimé en g et V en dm^3 ;

$CD_{SS}(t)$ représente la concentration de la solution du sol (en $g L^{-1}$) et $H_V(t)$ l'humidité volumique (en $dm^3 dm^{-3}$).

En considérant une couche de sol d'épaisseur h (en dm) et la surface s (en dm^2) relative à une classe de salinité, on définit, à un instant t donné, un volume de sol $V(t)$ (en dm^3) dont l'expression s'écrit :

$$V(t) = h s(t)$$

La relation (1) devient alors :

$$M_S(t) = CD_{SS}(t) H_V(t) h s(t)$$

Le volume de sol ($V(t)$) considéré est donné par les cartes de salinité d'un bas-fond obtenues à partir des mesures de l'EM-38 traitées géostatistiquement. Les mesures sont réalisées, chaque année (fin saison sèche), lorsque le sol présente les mêmes conditions d'humidité ($H_V = 0,55 dm^3 dm^{-3}$ en moyenne, profondeur de la nappe ≈ 1 m, teneur en argile comprise entre 60 et 70 $g 100g^{-1}$). Les cartes définissent plusieurs classes de salinité dans le bas-fond (Boivin et Brunet, 1990), la salinité étant exprimée en termes de conductivité électrique apparente (CE_a). Les aires $s(t)$ occupées par chaque classe ont été calculées annuellement par planimétrie de 1987 à 1989 et en 1990 (tabl. 1). La couche de sol a une épaisseur h égale à 18 dm, soit un stock hydrique ($H_V h$) de 990 mm. Chaque volume de sol considéré est caractérisé par une valeur de CE_a moyenne.

Classe de salinité (mS m ⁻¹)	Surface			
	1987*	1988*	1989*	1991**
0-300	46,4	43,9	59,0	50,6
300-500	25,8	28,5	25,8	34,7
500-700	23,1	29,1	23,8	27,8
700-900	22,5	17,7	16,6	16,9
900-1000	14,0	12,6	6,8	1,7
Surface totale (ha)	132,0	132,0	132,0	132,0

* d'après Boivin et Brunet, 1990 Système d'ouverture au barrage : 1987 : àatardeaux

** d'après Boivin et Brunet
(données non publiées) 1988 : 1 porte à crémaillère
1989 : 3 portes à crémaillère

Tabl. 1 - Distribution spatiale annuelle des classes de salinité définies à partir des mesures de EM-38 dans le bas-fond de Djiguinoum.

On établit le stock salin annuel (M_{sT}) du bas-fond en sommant les masses de sel (M_s) calculées pour chaque classe de salinité. Le bilan salin a été calculé pour deux années consécutives (ΔM_{sT}) et par rapport à l'année 1987 (ΔM_{s1987}).

La concentration de la solution du sol (CD_{SS}) est calculée en calibrant l'EM-38.

Calibration de l'EM-38

Les mesures de CE_a ont été effectuées en mode vertical pour 35 sites d'une séquence de sols sulfatés acides et salés présentant un gradient de salinité. Les sites sont espacés de 10 m.

Pour chaque site, des échantillons de sol ont été prélevés à 0,15 m, 0,45 m, 0,75 m et 1,05 m de profondeur. Ces prélèvements sont supposés être représentatifs d'une couche de sol de 30 cm. Pour chaque échantillon, la solution du sol a été extraite à saturation et sa conductivité électrique mesurée (CE_{ES}). La teneur en eau pondérale mesurée au moment de l'extraction de la solution du sol (H_{ES}) et celle mesurée au moment du prélèvement *in situ* (H_{SS}) permettent de déduire la conductivité électrique de la solution du sol *in situ* (CE_{SS}).

La méthode de calibration utilisée se réfère à celle de Wollenhaupt *et al.* (1986) qui définissent pour chaque site une valeur unique de CE_{SS} . Cette valeur est la combinaison linéaire des CE_{SS} calculées pour chaque profondeur et pondérées selon la réponse de l'instrument avec la profondeur. Les valeurs de CE_{SS} ont été ajustées à la profondeur prospectée par l'EM-38, soit 1,8 m, en considérant que $CE_{ES}(90-120) = CE_{ES}(120-180)$. Cette hypothèse est vérifiée car le sol est saturé par la nappe phréatique.

Les valeurs de CE_{SS} sont converties en termes de concentration (ou de charge minérale dissoute, CD_{SS}) par la relation statistique $CD_{SS} = 0,476 CE_{SS}^{1,101}$ ($r^2 = 0,99$) établie pour le site d'étude dans le domaine de CE_{SS} 0-110 dS m⁻¹ (Montoroi, 1997).

RÉSULTATS

Pour les 35 sites de mesure, la calibration de l'EM 38 en mode vertical donne la relation suivante qui permet de convertir les mesures de CE_a (en $dS\ m^{-1}$) en concentration de la solution du sol (en $g\ L^{-1}$) :

$$CD_{ss} = 1,10 \cdot 10^{-3} CE_a^{1,562} \quad r^2 = 0,85$$

D'après le tableau 2, on constate que, d'année en année, des redistributions salines ont lieu entre les volumes de sol considérés, le stock salin (M_{sT}) du bas-fond diminuant globalement. De 1987 à 1991, le bas-fond a perdu environ 5700 T. La diminution relative est de l'ordre de 3,1 % entre 1987 et 1988 et de 18,3 % entre 1988 et 1989. Elle est moins importante sur la période 1989-1991, environ 1,1 % par an.

Volume de sol j	CE_a ($dS\ m^{-1}$)	CD_{ss} ($g\ L^{-1}$)	Année i				
			1987	1988	(T)	1989	1991
Stock salin sur 1.80 m			<i>(stock hydrique = 990 mm)</i>				
1	150	2,8	1 266,4	1 199,7		1 610,2	1 383,5
2	400	12,8	3 264,6	3 605,1		3 263,7	4 392,0
3	600	24,0	5 506,4	6 926,1		5 654,7	6 618,1
4	800	37,6	8 394,3	6 613,2		6 191,2	6 297,0
5	950	49,2	6 850,4	6 146,4		3 292,5	872,0
		M_{sT}	25 282,1	24 490,5		20 012,3	19 562,6
		ΔM_{sT}		-791,6		-4 478,2	-449,7
		ΔM_{s1987}	0	-791,6		-5 269,8	-5 719,5

$$M_{sT} = \sum_{j=1}^5 M_{S(i,j)} \quad M_{S(i,j)} \text{ masse de sel pour une année } i \text{ et un volume de sol } j \text{ donnés}$$

$$\Delta M_{sT} = \sum_{j=1}^5 M_{S(i+1,j)} - \sum_{j=1}^5 M_{S(i,j)} \quad \Delta M_{s1987} = \sum_{j=1}^5 M_{S(i,j)} - \sum_{j=1}^5 M_{S(1987,j)}$$

Tabl. 2 - Bilan salin annuel du bas-fond de Djiguinoum sur la période 1987-1991.

La forte diminution enregistrée entre 1988 et 1989 peut s'expliquer par la pluviométrie de 1988 qui est proche de la pluviosité moyenne avant la sécheresse (1 410 mm), tandis que les deux années suivantes sont très déficitaires (1 147 mm et 1 008 mm).

Etant donné les approximations faites dans les calculs, notamment en prenant des valeurs moyennes de la teneur en eau et de la salinité à l'intérieur des volumes de sol, les bilans de masse n'ont qu'une valeur indicatrice. Ils montrent que le dessalement du bas-fond est effectif mais qu'il est très dépendant des apports météoriques.

D'importantes quantités de sel ont été exportées par le barrage en 1989 et 1990. Pour la période 1989-1991, le total s'élève à 3643 T. Or, cette valeur ne se retrouve pas dans notre estimation du dessalement du bas-fond, à savoir environ 450 T sur une épaisseur de sol d'1,80 m. Cette différence ne peut s'expliquer que par des apports de matières dans le bas-fond au cours de l'année.

CONCLUSION

L'application des méthodes géophysiques aux sols salés d'un bas-fond présente plusieurs intérêts. L'EM-38 permet une spatialisation de l'information et la restitution des données

sous forme de cartes 2D. L'étude diachronique de ces restitutions conduit à évaluer qualitativement la mobilisation des sels dans le bas-fond. La calibration de l'EM-38 par rapport à la CE de la solution du sol complète l'interprétation des données cartographiques en quantifiant le stock salin de volumes de sol préalablement identifiés comme homogènes.

En appliquant cette méthode au bas-fond de Djiguinoum, qui est aménagé par un barrage anti-sel, on constate que globalement, le bas-fond se dessale d'année en année, mais que ce dessalement est très dépendant des apports météoriques. Les exportations de sel au barrage sont en partie compensées par des apports de matière provenant principalement de la nappe salée qui circule sous le barrage. Ces intrusions d'eau marine très concentrée montrent que le bas-fond n'est pas complètement indépendant du réseau hydrographique. Une certaine prudence dans les possibilités de réhabilitation des sols salés en condition de forte sécheresse sera de mise.

La quantification des transferts salins constitue donc une démarche intéressante pour évaluer l'impact d'aménagements agricoles et expliquer le fonctionnement du système sol défini dans le temps et l'espace. Cependant, les teneurs pondérales en sel restent indicatrices car la méthode de calibration est perfectible, notamment en prenant en compte la variabilité de la salinité et de l'humidité à l'intérieur des volumes de sol considérés.

BIBLIOGRAPHIE

- Boivin P., Brunet D. (1990) - Bilan de quatre années de suivi de la salure d'une vallée aménagée anti-sel par conductivimétrie électromagnétique et krigeage. *Multi-gr.*, ORSTOM, Bondy, 12 p.
- Boivin P., Brunet D., Job J.O. (1988) - Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés : une méthode rapide et fiable. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol XXIV, 1, 39-48.
- 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.
- Cannon M.E., McKenzie R.C., Lachapelle G. (1994) - Soil salinity mapping with electromagnetic induction and satellite-based navigational methods. *Can. J. Soil Sci.*, 74, 335-343.
- Corwin D.L., Rhoades J.D. (1984) - Measurement of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 810-812.
- Corwin D.L., Rhoades J.D. (1990) - Establishing soil electrical conductivity-depth relations from electromagnetic induction measurements. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 21, 871-901.
- De Jong E., Ballantyne 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.
- Job J.O., Loyer J.Y., Ailoul M. (1987) - Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure de la salinité des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol XXIII, 2, 123-131.
- Johnston M.A., Savage M.J., Moolman J.H., du Plessis H.M. (1997) - Evaluation of calibration methods for interpreting soil salinity from electromagnetic induction measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 1627-1633.
- Lesch S.M., Rhoades J.D., Lund L.J., Corwin D.L. (1992) - Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 540-548.
- McKenzie R.C., Chomistek W., Clark N.F. (1989) - Conversion of electromagnetic inductance readings to saturated paste extract values in soils for different temperature, texture, and moisture conditions. *Can. J. Soil Sci.*, 69, 25-32.
- McNeill J.D. (1980) - Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Tech. Note TN-6. Geonics Limited, Mississauga, ON, Canada.

Montoroi J.P. (1996) - Gestion durable des sols de l'écosystème de mangrove en Casamance (Sénégal). Dynamique de l'eau et des sels en période de sécheresse. *Etudes et Thèses, ORSTOM*, Paris, 263 p.

Montoroi J.P. (1997) - Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol. Application à un sol sulfaté acide salé de Basse-Casamance (Sénégal). *Etude et Gestion des Sols*, 4, 4, 279-298.

Rhoades J.D. (1992) - Instrumental field methods of salinity appraisal. In G.C. *Topp et al.* (ed.) Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice. SSSA Spec. Publ. 30, SSSA, Madison, WI, 231-248.

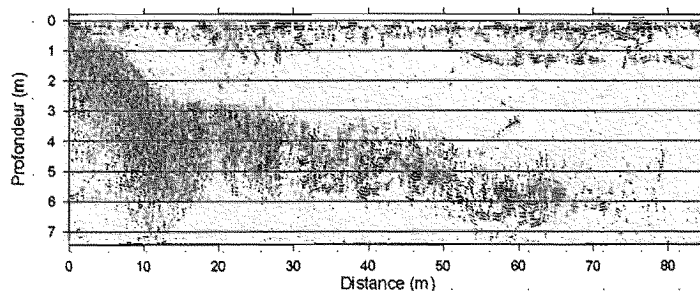
Williams B.G., Hoey D. (1987) - The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability in the salt and clay content of soils. *Austr. J. Soil Res.*, 25, 21-27.

Wollenhaupt N.C., Richardson J.L., Foss J.E., Doll E.C. (1986) - A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an aboveground electromagnetic induction meter. *Can. J. Soil Sci.*, 66, 315-321.

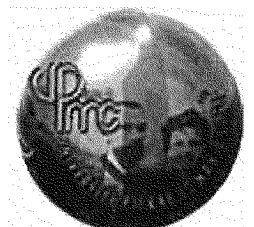
ACTES DU 2^{ème} COLLOQUE DE GÉOPHYSIQUE DES SOLS ET DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

GEOFCAN

21-22 septembre 1999
BRGM - Orléans, France



Section radar du toit d'une induration argileuse au Sénégal (mesures BRGM)



*2^{ème} colloque de Géophysique des sols
et des formations superficielles*

Résumés étendus

*21-22 septembre 1999
BRGM - Orléans, France*

*Organisé par :
BRGM
INRA
IRD
Université Pierre et Marie Curie*