

Ministère de l' Agriculture
Direction des Sols
Tunis

Centre ORSTOM de Tunis
7 rue Taimour
Tunis

CONDUCTIVIMETRIE ELECTROMAGNETIQUE ET
CARTOGRAPHIE DE LA SALINITE DES SOLS

JOB J.O.[°], HACHICHA M.^{°°}, LOYER J.Y.^{°°°},

Tunis, le 23 Avril 1990.

- ° Pédologue ORSTOM, Mission ORSTOM, Tunis
- °° Pédologue, Direction des sols, Tunis
- °°° Pédologue, Centre ORSTOM, Montpellier.

1

07 FEV. 1991

ORSTOM Fonds Documentaire
N° : 31.297-ex 1
Cote : B

M P29

CONDUCTIVIMETRIE ELECTROMAGNETIQUE
ET CARTOGRAPHIE DE LA SALINITE DES SOLS

Chapitre I : APPAREILLAGE ET METHODES

- 1-1. Note liminaire.
- 1-2. Appareillage.
- 1-3. Propagation des lignes de champ dans le sol.
- 1-4. Mode d'utilisation principal.
- 1-5. Validité de la mesure.

Chapitre II : CONDUCTIVITE ELECTROMAGNETIQUE DES SOLS

- 2-1. Représentation du sol comme matériau conducteur.
- 2-2. Facteurs modifiant dans la conductivité électromagnétique des sols.
- 2-3. Relation entre salinité et conductivité électromagnétique.

Chapitre III : UTILISATION PRATIQUE

- 3-1. Etalonnage par rapport aux propriétés texturales des sols.
- 3-2. Correction pour une humidité de référence.

Chapitre IV : CARTOGRAPHIE DE LA SALINITE DES SOLS

- 4-1. Objectifs.
- 4-2. Principes de base et mode opératoire.
- 4-3. Influence de l'humidité.
- 4-4. Prospection et choix de la cartographie.

ANNEXES

- Annexe 1. Instructions d'utilisation.
- Annexe 2. Pratique de la mesure.
- Annexe 2. Choix du maillage.
- Annexe 4. Saisie informatique des données.
- Annexe 5. Mode opératoire pour le tracé des cartes.
- Annexe 6. Etalonnage par différenciation des horizons.
- Annexe 7. Différenciation des profils salins.
- Annexe 8. Fiche de parcelle.
- Annexe 9. Récapitulation du protocole d'étalonnage.
- Annexe 10. Données numériques.
- Annexe 11. Comparaison avec les méthodes classiques.

BIBLIOGRAPHIE

Dans la suite du texte on adoptera les notations suivantes:

variables électromagnétiques et électriques:

CE : conductivité électrique (dS/m anciens mmhos/cm).
CEM : conductivité électromagnétique en général (mS/m).
CEV : mesure CEM en mode vertical à la surface du sol.
CEH : ditto en mode horizontal.
CEsat : CE de l'extrait de sol à saturation.
CEDix : CE de l'extrait de sol au dixième.
CEDix(o-p) : moyenne arithmétique de CEDIX de 0 à p cm.
CEcin : CE de l'extrait de sol au cinquième.
CEcin(o-p) : moyenne arithmétique de CECIN de 0 à p cm.
CEVh : mesure de CEV à la hauteur h.
CEV(θ_e) : mesure de CEV corrigée pour l'humidité θ_e .

variables physiques:

$\theta_j(o-p)$: humidité pondérale moyenne du sol au point j.
 θ_{jp} : humidité du sol à la profondeur p au point j.
 θ_{par} : moyenne des θ_j sur la parcelle.
 θ_i : moyenne des θ_j pour les parties irriguées de PAR.
 θ_s : ditto pour les parties non irriguées de PAR.
 θ_e : humidité d'étalonnage.

fichiers dBASE:

v : variable dont on étudie la répartition spatiale .
n : nombre de mesures sur la parcelle PAR.
L , l : longueur et largeur de la parcelle en mètres.
X , Y : coordonnées cartésiennes des points de mesure.
Cul : cultures dans la parcelle au moment de la mesure.
PAR : nom de la parcelle.
PAR.dbf : fichier groupant les résultats de la parcelle PAR.

fichiers ASCII

PARx : abscisses des mesures .
PARy : ordonnées des mesures.
PARv : valeurs de la variable V.
PARrens : paramètres géométriques de la parcelle.

fichiers GEOSTAT:

GEOSTn.EXE : fichiers exécutables du logiciel GEOSTAT ($0 \leq n \leq 32$).
IMPRIM.INI : fichier de configuration de l'imprimante.
TABLET.INI : configuration de la table tracante HP.
ECRAN.INI : configuration de l'écran.

CHAPITRE I : GENERALITES : APPAREILLAGE ET METHODES

1-1. NOTE LIMINAIRE

Ce manuel fournit aux utilisateurs de la conductivimétrie électromagnétique la méthode opératoire et un aperçu sur le dépouillement des résultats. C'est une initiation aux campagnes de reconnaissance et de cartographie de la salinité globale des sols par prospection géophysique.

1-2. APPAREILLAGE

La conductivité électromagnétique (CEM) est une technique de géophysique récemment adaptée à l'étude des sols (De JONC et al., 1979). Elle permet entre autres d'évaluer la salinité globale apparente des sols intégrée sur une profondeur d' à peu près deux mètres.

L'appareil utilisé pour les mesures décrites ci-après est un EM-38 de Geonics. Il est composé de deux solénoïdes verticaux distants de un mètre (Fig.1). Le premier envoie dans le sol un champ magnétique constant induisant des courants qui s'y propagent d'autant mieux que le milieu est plus conducteur. Ces courants créent à leur tour, suivant la loi d'Ampère un champ magnétique proportionnel à la surface des lignes de courant, donc à la conductivité électrique du sol. Ce champ est capté par un solénoïde récepteur qui le transforme en réponse galvanométrique.

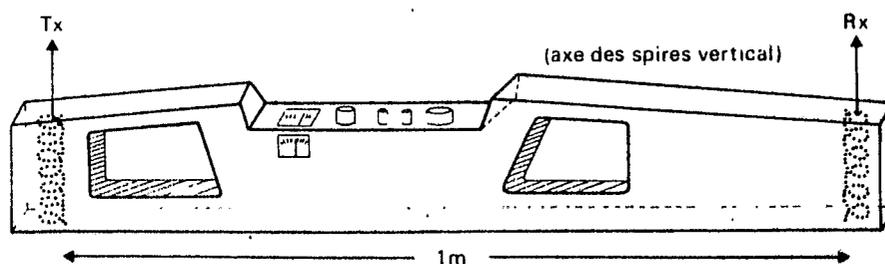


Fig.1 : appareillage utilisé pour les mesures (EM-38).

1-3. PROPAGATION DES LIGNES DE CHAMP DANS LE SOL

L'utilisation de l'appareil dans l'étude des sols salés a été possible quand on est parvenu à obtenir un champ secondaire proportionnel à la conductivité du matériau traversé sous certaines conditions de fréquence du courant inducteur et de distance entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice (Fig.2).

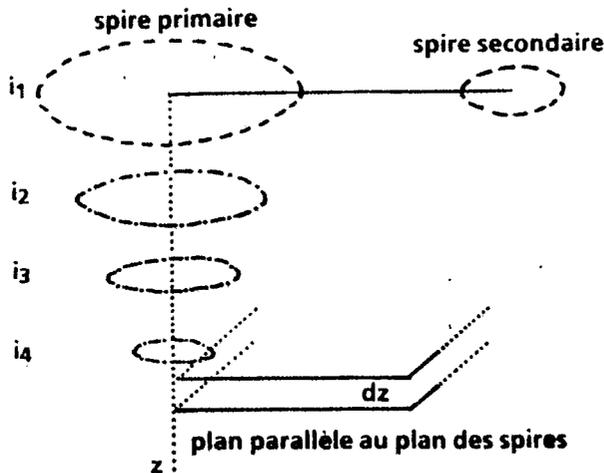


Fig.2 : principe de la mesure de CEM (d'après McNeill 1980).

Chaque couche de sol apporte une contribution différente au champ secondaire capté par le récepteur (Fig.3). Cette configuration dépend de l'appareillage utilisé, de la forme, des caractéristiques des bobines, de leur position relative, de la fréquence du courant inducteur (Tabbagh, 1986). La représentation montrée ici est celle de l'EM-38 qui a deux bobines parallèles, distantes de 1 mètre, excitées par un courant de 14,6 KHz.

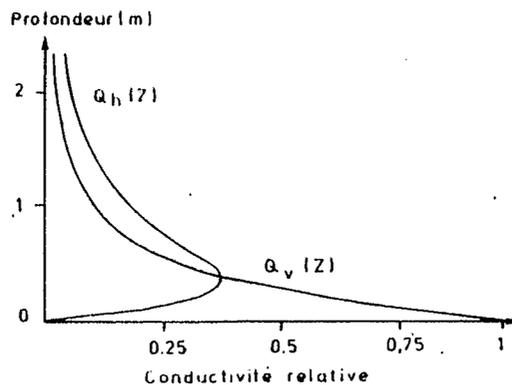


Fig.3 : contribution relative d'une couche de sol au champ secondaire suivant sa profondeur dans le sol: Φ_v en mode vertical Φ_h en mode horizontal

1-4. MODE D' UTILISATION PRINCIPAL

Pour la mesure, on peut orienter les grands axes des solénoïdes de départ, soit perpendiculairement à la surface du sol, mesure notée CEV, soit parallèlement à celui-ci (CEH), l'appareil étant alors horizontal. La géométrie des lignes de courants, donc des lignes de champ, est alors différente ainsi que la contribution d'une couche de sol située à une profondeur h. Dans chaque cas la conductivité lue est une image différente de la conductivité vraie du sol.

Toutes choses étant égales par ailleurs, en particulier l'humidité le long du profil, une lecture CEV supérieure à CEH indiquera un profil salin croissant avec la profondeur et vice versa (voir annexe 7).

A chaque point de mesure, on dispose donc de deux valeurs: CEV et CEH, qui représentent une salinité apparente globale. Pour chaque type de sol, on peut relier l'une ou l'autre de ces valeurs, soit avec la moyenne globale des conductivités des extraits, soit avec leur moyenne pondérée suivant la profondeur (McNEILL, 1984). C'est l'étalonnage de la réponse de l'appareil, développé en annexe 9.

Cet étalonnage étant fait, on pourra transformer la lecture de l'appareil en conductivité de l'extrait saturé moyen du sol entre 0 et 2 mètres au prix de quelques précautions. On pourra ainsi estimer la salinité de n'importe quelle étendue de sol à une échelle quelconque à condition de respecter les conditions de validité de l'analyse géostatistique.

1-5 VALIDITE DE LA MESURE

La mesure faite en un point donné représente une conductivité apparente, intégrée sur un volume de sol de quelques mètres cubes, étalonnée par rapport aux méthodes de laboratoire. Mais ceci est vrai aussi pour les méthodes électriques. Cet étalonnage peut se faire simplement.

Il est valable pour une région géographique donnée, affectée d'un certain type de faciès salin de composition ionique donnée. (Loyer et al., 1898). Certains résultats que nous présentons ici ont été acquis à partir des sols suivants:

- Sols sulfatés acides et salés de Basse-Casamance (Sénégal), à salinité chloruro-sulfatée acide, issue de mangroves fluvio-marines,

- Alluvions gypso-salines de la Basse Vallée de l'Euphrate en Syrie, à salinité chloruro-sulfatée neutre,

- Sols argileux des anciens marais du Guadalquivir en Espagne, à salinité chloruro-sulfatée neutre d'origine marine,

- Alluvions de la Lagunera de Torreon (Mexique) et à salinité chloruro-sulfatée neutre d'origine continentale,

- Sols de texture variée à dominance limoneuse, plus ou moins gypseux de Tunisie, à salinité chloruro-sulfatée neutre.

Les mesures que nous avons faites nous permettent d'obtenir des résultats provisoires, susceptibles d'être améliorées. En particulier, les équations présentées n'ont donc pas de caractère définitif, mais elles permettent de bien cerner le problème.

CHAPITRE II : LA CONDUCTIVITE ELECTROMAGNETIQUE DES SOLS

2-1. MODELISATION DU SOL COMME MATERIAU CONDUCTEUR

On peut imaginer que le sol se compose de quatre matériaux constituant autant de chemins par lesquels le courant peut passer:

a-le matériau constitutif lui-même non altéré: la roche-mère, les indurations diverses, les matériaux détritiques, galets, sables, limons et le réseau cristallin des argiles. Sauf dans le cas de cuirasses ferralitiques, c'est un milieu peu conducteur en général. Dans un environnement petrographique homogène sa conductivité C_a sera pratiquement constante.

b-Les altérations et produits d'altération dans lesquels des ions métalliques ont perdu leur appartenance à un réseau cristallin stable et sont de ce fait conducteurs: c'est le cas également de la surface des argiles. C'est un milieu moyennement à peu conducteur. Sa conductivité C_b dépend des conditions d'humidité du sol.

c-La solution du sol: c'est le liquide interstitiel plus ou moins lié aux argiles, mais dans lequel les ions ont un comportement électrique individuel (JOB 1985). C'est un milieu dont la conductivité électrique C_c peut varier de 0,1 dans les grès à plus de 60 dS/m dans les sols très salés.

d-Les sels cristallisés: ce sont les cristaux d'halite, de thénardite, mirabilite, gypse etc., que l'on trouve sous forme plus ou moins cristallisée dans les sols ou à leur surface. Leur conductivité propre C_d est très variable, mais le plus souvent élevée.

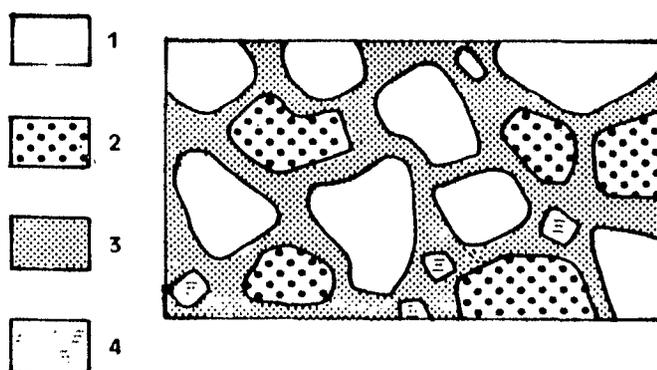


Fig.4- modèle de sol comme conducteur du courant.

$$\text{On a : } Ca < Cb \ll Cc \ll Cd \quad (1)$$

Sur un modèle un peu plus simple à trois chemins, Rhoades et al 1988, proposent une formule qui permet de calculer la conductivité globale apparente à partir de la conductivité de l'eau circulant dans les macropores du sol et des caractéristiques hydriques du sol (micro et macro-porosité).

Dans notre cas, on se contente de considérer que la conductivité globale apparente est une fonction de Cc et Cd essentiellement:

$$CEM = f(Cc, Cd) \quad (2)$$

Il faut savoir que quand il existe des horizons d'accumulation de sels, efflorescences en saison sèche ou accumulation dans la frange capillaire de la nappe, les lignes de courant du conductivimètre auront tendance à se concentrer dans ces horizons et à délaisser les autres. Quand on examine par conductivimétrie électromagnétique des horizons salins très différenciés, on aura tendance à surestimer l'effet "croûte de sels".

En d'autres termes, on pourra d'autant mieux se servir des graphes et tableaux précédemment montrés que les profils salins dans une parcelle auront le même gradient vertical. D'où l'intérêt d'étudier le rapport CEV/CEH avant de faire les calculs géostatistiques (JOB et al. 1986).

2-2. FACTEURS MODIFIANT LA CONDUCTIVITE ELECTROMAGNETIQUE DES SOLS

Pour un sol salé cultivé ou cultivable, dans lequel il n'y a pas d'accumulations de sels, on peut se servir des courbes décrites Fig.4. L'interprétation des mesures se fait alors en tenant compte des facteurs suivants :

- la salinité moyenne du sol mesurée en laboratoire (s),
- l'humidité du sol au moment de la mesure (θ),
- la texture (tex),
- sa température (t°),
- la stratification des horizons salins.

L'influence des deux premiers facteurs sera discutée plus en détail ci-après. Nous manquons actuellement de données pour cerner avec précision l'influence de la texture et de la température car nous opérons dans des conditions dans lesquelles ces deux paramètres restent constants. Des essais de différenciation de stratifications salines sont en cours.

2-3. RELATION ENTRE SALINITÉ ET CONDUCTIVITE ELECTROMAGNETIQUE

Si on ne tient pas compte de la stratification horizontale, et que l'on considère le milieu homogène en texture, porosité et température, on peut écrire:

$$\text{CEM} = f(\theta, s) \quad (3)$$

La mesure faite devra alors être interprétée en fonction de la salinité du sol et de son humidité. Chaque mesure devra donc être ramenée à une humidité de référence choisie en fonction des caractéristiques texturales du sol et agro-climatiques de la région considérée (entre 10 et 25% en humidité pondérale).

Pour comparer deux mesures de CEM faites sur des sols ayant même profil hydrique, il faudra ramener la mesure soit à la valeur de la conductivité électrique de la pâte saturée, soit à celle d'un autre extrait aqueux. Nous avons choisi l'extrait au dixième pour les sols très salés (soit $\text{CEsat} > 10 \text{ dS/m}$) et l'extrait au cinquième pour les autres.

CHAPITRE III : UTILISATION PRATIQUE

3-1. ETALONNAGE POUR TOUS TYPES DE SOL

L'étalonnage consiste à trouver les droites :

$$CE_{dix}(p) = a * CEM + b \quad (4a) \quad \text{ou:} \quad CE_{cin}(p) = a' * CEM + b' \quad (4b)$$

On choisit dans le domaine à étudier cinq ou six points de salinité variée où l'on prélève le sol à la tarière tous les 20 ou 30 cm pour $p=120$ cm ou $p=200$ cm.

On mesure en laboratoire la conductivité de l'extrait aqueux et l'humidité pondérale par rapport au sol séché à $105^{\circ}C$, notée $\theta(o-p)$. En général a est compris entre 0,004 et 0,008 et b entre -0,4 et + 0,1 (voir annexe 10). Dans chaque étude on essaiera de développer l'équation adaptée aux sols considérés. Les équations que nous présentons ci-dessous représentent l'effet de la salinité seule, elles ont été obtenues à partir des mesures faites dans les sols dont nous avons parlé au Chapitre I.

En prenant tous les résultats ensemble, on obtient:

$$CE_{dix} = 0,0087 * CEH - 0,169 \quad \text{avec: } r = 0,83 \quad \text{et } n = 88 \quad (5)$$

avec: $1 < CE_{sat} < 30$ centré sur 5 dS/m

$10 < \theta_p < 30$ centré sur 15,6 %

CE_{dix} étant la moyenne non pondérée jusqu'à 120 cm.

3-2. CORRECTION POUR UNE HUMIDITE DE REFERENCE

Pour toutes les mesures faites sur ces 88 sols, de salinité variant de 2 à 30 dS/m de conductivité d'extrait saturé, l'effet de l'humidité peut se traduire par:

$$CEH(\theta_2) = CEH(\theta_1) + (\theta_2 - \theta_1)(5,4 + c * CEH^2(\theta_1)) \quad (8)$$

avec $c = 6,5/10^6$

Cette formule a été établie pour θ_p compris entre 12 et 25 %. Des essais tendent à montrer qu'au dessus de ces valeurs l'effet de l'humidité est moindre, mais cela reste à prouver.

On peut utiliser ces formules pour corriger les mesures CEV et CEH prises sur le terrain par rapport à une humidité pondérale de référence de 15%. C'est l'humidité moyenne des 88 profils prélevés ayant servi à établir la régression multiple (8). Des expériences sont en cours pour améliorer cette formule, en particulier dans la gamme des humidités faibles.

CHAPITRE IV : CARTOGRAPHIE DE LA SALINITE DES SOLS

4-1. OBJECTIFS

A travers une cartographie de la salinité des sols on cherche entre autres à:

- représenter schématiquement la répartition spatiale, horizontale et verticale des sels.
- relier les tendances de salinité à d' autres facteurs, climatiques, pédologiques ou aux pratiques culturales.
- suivre leur évolution temporelle à travers des cartes répétées de temps en temps.

La carte ne constitue qu'un aspect d'une étude plus complète. Le passage des informations contenues dans la prospection à l'esquisse cartographique s'accompagne d'une perte évidente d'informations et de leur degré de précision.

4-2. PRINCIPES DE BASE ET MODE OPERATOIRE

Dans la réalisation de cartes de salure des sols, deux démarches sont généralement employées:

La démarche purement pédologique qui consiste à faire des prélèvements dans des unités que l'on sait être homogènes à cause de leur géomorphologie, de leur position topographique ou pour caractère pédologique visible sur le terrain. Dans cette approche, les limites cartographiques sont choisies par le pédologue.

La démarche purement géostatistique qui consiste à interpréter les résultats d'un grand nombre de mesures prises systématiquement dans une région dont les limites sont imposées à priori (périmètre irrigué, département, région administrative). Dans ce cas les limites de classe de salinité obtenues par calcul sont des artefacts mathématiques.

Cette dernière démarche présente deux variantes suivant que l'on veut reproduire le suivi dans le temps ou non :

a-Cartographie descriptive des variations spatiales

Il s'agit de mettre en évidence des tendances générales qui existent au moment de la mesure (aspect statique). Du point de vue pratique, les mesures se font sur une grille à peu près régulière en relevant les coordonnées de chaque point.

L'interpolation (ou le krigeage) ne pourra se faire que pour deux points entre lesquels la variation de la salinité est continuellement croissante ou décroissante. Il faudra multiplier les mesures aux points de forte variabilité pour rendre possible l'interprétation des variogrammes.

b-Cartographie des variations spatio-temporelles

Dans ce cas, l'étude porte sur la variation de la salinité dans le temps (aspect dynamique). Il devient alors indispensable de repérer chaque point de mesure sur le terrain au temps t , $t+1..$, particulièrement lorsque l'étude est réalisée à une petite échelle (cartographie de grandes surfaces).

Il faut faire suffisamment de mesures pour pouvoir sauter des points devenus entre temps aberrants pour une raison quelconque. Un maillage régulier n'est pas obligatoire. On pourra faire une interpolation pour deux points entre lesquels la variation de salinité n'est pas linéaire à condition de ne pas reprendre ces mêmes points de mesure lors d'une campagne suivante, mais dans ce cas il ne sera pas possible d'interpréter l'ensemble des mesures pour un bilan quantitatif.

Dans les deux méthodes cartographiques, on ne fera pas de mesure aux points n'obéissant pas à la loi de distribution générale du domaine considéré (accidents, artéfacts, points singuliers).

La meilleure démarche est celle qui combine les deux car les différences morpho-pédologiques du terrain correspondent toujours à des comportements hydrodynamiques donc à des transferts de sels différents.

note: Dans les climats à saisons contrastées, il est recommandé de répéter les mesures aux mêmes moments de l'année, pour limiter l'effet des différences de température et d'humidité du sol.

4-3. INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ

La difficulté d'interprétation des mesures CEM reside dans l'influence de l'humidité du sol sur ces mesures. Trois sources de variation interviennent :

- la répartition verticale de l'humidité,
- sa répartition latérale ou spatiale,
- sa variation dans le temps.

Il faut pouvoir évaluer à chaque point de mesure le profil hydrique moyen. C'est facile dans le cas d'irrigations régulières, bien conduites avec une quantité d'eau suffisante pour humecter le profil jusqu'à 120 cm. Si l'irrigation est menée par aspersion, il faut veiller à éliminer les variations dues à des répartitions irrégulières d'eau à la surface.

Quand on prospecte une mosaïque de parcelles de cultures et d'état hydrique très différent, il est préférable de ne faire des mesures que dans les parcelles fraîchement irriguées.

En zone irriguée, il est souvent impossible de juger de l'état hydrique d'un profil de visu. La meilleure méthode consiste à intervenir après des pluies importantes qui homogénéisent les profils hydriques des sols.

Par ailleurs, on préconise d'effectuer un certain nombre de prélèvements et de mesures CEM sur une gamme d'humidité du sol allant du plus sec au plus humide. Cela devrait permettre d'estimer la contribution du degré d'humidité sur les mesures (voir supra).

4-4. PROSPECTION ET CHOIX DE LA CARTOGRAPHIE

La cartographie de la salinité des sols n'est pas forcément une bonne méthode de représentation ou de suivi. Elle n'est intéressante que si la salinité est structurée dans l'espace: gradients piemonts-sebkhas, taches de salinité liées à la microtopographie, zones de drainage déficient etc. Si une rapide prospection préliminaire montre que la distribution est aléatoire, la cartographie n'apporte rien. Au contraire elle crée des artéfacts dans la représentation. Une simple moyenne de mesures prises de manière aléatoire est dans ce cas une solution plus précise et plus juste.

Si une structure spatiale apparaît clairement dans la distribution des sels, il faudra soigneusement choisir un maillage de mesures en fonction de l'échelle d'étude et de la nature des informations que l'on veut mettre en évidence.

ANNEXES

ANNEXE 1- Instructions d'utilisation de l'appareil EM-38

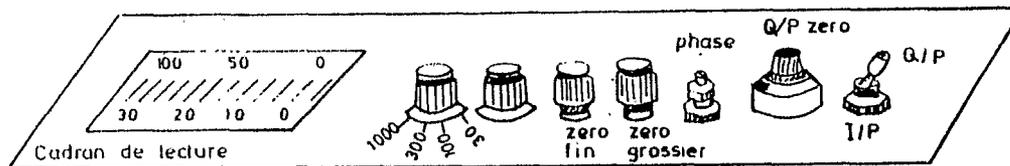


Fig.1 Panneau de réglage du EM-38

Certaines procédures sont nécessaires pour une bonne utilisation de l'appareil:

a) Examen de la batterie:

Le contrôle de la batterie est effectué chaque fois qu'on suspecte une baisse du voltage (sur n'importe quel calibre).

b) Ajustement du déphasage (Initial Inphase Nulling):

Cette opération est effectuée au début de la journée à la première station à prospector. Il est conseillé d'éloigner tout objet métallique (montre, pièces de monnaies etc..). La sensibilité aux objets métalliques est plus grande près des bobines qu'aux autres endroits de l'appareil.

Procédure:

- mettre le bouton de sélection de calibre sur 1000 mS/m ,
- lever l'appareil à 1,5 m en position horizontale,
- ajuster à zero en mode I/P par le réglage grossier, puis le contrôle fin,
- répéter l'opération pour les calibres 300, 100 et 30 mS/m ,
- réajuster le contrôle du zéro, autant de fois qu'il faut pour ces échelles successivement plus sensibles.

c) Le zéro de l'appareil (Zero Instrument) :

Cet ajustement est réalisé au début de chaque jour à la première station à prospector. Il peut être vérifié plusieurs fois au cours de la journée, surtout quand les mesures sont effectuées sur un sol de faible conductivité. L'ajustement est effectué pour avoir le zéro exact de l'appareil.

Procédure :

- élever l'appareil à 1.5 m en mode horizontal, en position Q/P,
- mettre le bouton de sélection du calibre sur 30 mS/m,
- ajuster le bouton Q/P Zero jusqu'à obtention d'une lecture correspondante à la mi-échelle soit: CEH
- faire une lecture en mode vertical: CEV
- Si $CEV = 2*CEH$ le réglage est correct,
- calculer $C = CEV - 2*CEH$
- ajouter à CEH la valeur algébrique de C par le bouton Q/P. (soit: Si $C > 0$ on augmente CEH, si $C < 0$, on diminue CEH).
- vérifier de nouveau que $CEV = 2*CEH$ et recommencer si besoin.

Exemple 1 :

l' EM38 est placé à 1.5 m du sol: CEH = 12 et CEV = 35 mS/m.
 $C = CEV - 2*CEH = +11$ mS/m . On augmente CEH de 11 mS/m (bouton Q/P Zero), on obtient:
 $CEH' = 12 + 11 = 23$ mS/m . En mode vertical, CEV doit être plus ou moins égale à 46 mS/m (le double de 23), seule la valeur de 35 a augmenté de 11 mS/m. Le zéro est bien positionné.

Exemple 2 :

CEH=15 et CEV = 17 mS/m .
 $C = 17 - 2*15 = -13$ mS/m , donc on abaisse CEH de 13 mS/m, on obtient $CEH' = 2$ mS/m.
CEV' doit alors être égale à 4 mS/m .

en effet: Soit CEH, CEV et CEH', CEV' les lectures avant et après l'ajustement. Si la correction C affecte d'une manière identique CEH et CEV, on doit avoir:

$$CEV' = CEV + C \text{ et } CEH' = CEH + C$$

$$CEV' = 2 * CEH',$$

$$\text{d'où: } (CEV'/CEH') = ((CEV+C)/(CEH+C)) = 2$$

ANNEXE 2- Pratique de la mesure

Pour suivre une évolution de la salinité, on compare deux mesures de CEM faites à des périodes différentes. Il convient donc de vérifier le zéro électrique de l'appareil avant chaque série de mesures. On cherchera avant tout un zéro précis sur la gamme de mesure qui sera utilisée le plus fréquemment pour la prospection considérée. Les mesures de l'EM-38 sont données en mS/m de salinité apparente globale.

Pour une humidité moyenne du sol, soit 15% pondéral pour se fixer les idées, on a à peu près les valeurs suivantes de la moyenne de CEV et CEH:

0 - 30 mS/m:	sols anthropisés non salés ou sols squelettiques.
30 - 100	: sols cultivés salés supportant des cultures.
100 - 200	: sols salés cultivés avec baisse des rendements.
200 -1000	: sols à croûte ou accumulation de sels.

On fait d'abord une prospection pour se rendre compte de la variabilité de la salure, de l'humidité et les gradients de salinité rencontrés. On ajuste ensuite plus précisément le zéro au niveau le plus fréquemment rencontré.

On décide ensuite si l'on opère par mesures aléatoires suivies du calcul de la moyenne des mesures, ou par maillage régulier. Faire un maillage régulier n'est vraiment intéressant que si l'on soupçonne la salinité d'être structurée dans l'espace (voir partie cartographie).

Le cas de structures emboîtées, que l'on rencontre dans les mosaïques de petites parcelles irriguées des zones de cultures vivrières se traite en faisant pour chaque parcelle la moyenne de quelques mesures.

Si l'on décide de faire un maillage régulier pour dresser ensuite une carte, on choisit deux axes orthonormés O_x et O_y tels que le Nord soit dans le premier quadrant et que la valeur maximum de X soit supérieure à la valeur maximum de Y . C'est toujours possible.

La parcelle choisie doit être rectangulaire et la longueur au plus égale à deux fois le largeur. Au delà les effets de bord deviennent trop importants.

A chaque point faire systématiquement la mesure en mode vertical et en mode horizontal au niveau du sol (sols cultivés). Dégager légèrement la surface du sol pour la rendre à peu près plane. Noter l'état de la surface et des cultures ainsi que l'état hydrique que l'on étalonne en fonction du temps écoulé depuis la dernière irrigation, ou la dernière pluie.

ANNEXE 3- Choix du maillage

Tout dépend de l'utilisation que l'on veut faire des résultats et de la manière dont varie la salinité d'un point à un autre de la région considérée. Voici quelques indications à caractère général qui peuvent être modifiées si besoin:

Parcelles cultivées :

0	à	100 m ² :	maillage	1x1	minimum ou 2x2 mètres.
100	à	10000 m ² :		5x5	ou 10x10
1	à	10 ha :		10x10	ou 20x20
5	à	20 ha :		25x25	ou 50x50
20	à	100 ha :		100x100	

Il est rare de trouver des parcelles cultivées homogènes de plus de 100 ha. Pour les zones vierges, il faut faire autant de mesures que la variabilité du phénomène sur le terrain l'exige, un maillage régulier n'ayant pas beaucoup de sens.

La règle à respecter est de ne pas faire d'interpolation pour deux points entre lesquels la salinité n'est pas continuellement croissante ou continuellement décroissante. L'exception est la représentation de zones partiellement anthropisées (constructions, routes, etc.) que l'on veut cartographier. Pour éviter les effets de bordure, on ne fait pas de mesures dans ces zones, mais on les inclut dans l'interpolation, pour les supprimer ensuite dans la représentation définitive.

ANNEXE 4 - SAISIE INFORMATIQUE DES DONNÉES

Les données de terrain sont toutes stockées à l'aide d'un gestionnaire de fichier qui permet de les mettre en forme et de les conserver. Elles sont ensuite transférées en format ASCII et traitées par un logiciel de cartographie par krigeage ou interpolation si une représentation cartographique est souhaitable, sinon on fait les calculs directement si une moyenne suffit.

Les exemples suivants sont destinés aux possesseurs de dBASEIII ou de FoxBASE, il peuvent être adaptés, mutis mutandis, à n'importe quel logiciel de gestion de base de données.

a) création d'un fichier

Soient: PAR le nom de la parcelle.

CEV, CEH les mesures électromagnétiques brutes en mS/m.

CEV(θ), CEH(θ) les données ramenées à une humidité θ .

X, Y les coordonnées des points de mesure en mètres.

n le nombre de mesures. N leur numéro.

L, l la longueur et la largeur de la parcelle en mètres.

Procédure:

(quand une ligne commence par un mot en majuscule cela signifie qu'il faut taper cette ligne au clavier).

- rentrer sous FoxBase
- CREATE (puis créer les champs NUM ,X,Y,CEV,CEH ,CEVN,CEHN numériques à trois chiffres, puis les champs CUL, HUM, TEX, alphanumériques à trois caractères seulement dans la version actuelle de GEOSTAT).
- APPEND (on peut commencer la saisie des données).

Le fichier sera sauvegardé sous le nom PAR.DBF avec une structure particulière au logiciel de gestion de base de données. On peut à ce stade rentrer des données supplémentaires, faire des corrections ou des traitements statistiques. Les données brutes CEH, CEV peuvent être corrigées pour une humidité uniforme, mais il faut veiller à conserver les données d'origine CEV et CEH brutes. Exemple de correction d'humidité:

- USE PAR
- REPLACE ALL CEHN WITH (CEH + 5.4*(15 - HUM))
- CLOSE DATAB ou bien QUIT

Dans cet exemple on remplit le champ CEHN avec les données corrigées pour une humidité moyenne de 15% pondéral. Il faut que le champ HUM soit rempli avec les valeurs estimées de l'humidité moyenne.

b) transfert des fichiers en ASCII

Ce transfert est nécessaire pour pouvoir utiliser les logiciels divers de cartographie, de statistique ou de géostatistique qui reconnaissent tous le format ASCII. L'exemple ci-dessous est destiné aux utilisateurs de GEOSTAT.

- USE PAR
- COPY TO PARX FIELD X
- COPY TO PARY FIELD Y
- COPY TO PARCEVN FIELD CEVN etc....

puis:

- USE PARX
- COPY TO PARX SDF
- (idem pour PARY , PARCEVN, PARCEHN)
- QUIT

Les fichiers auront une extension .TXT caractéristique des fichiers ASCII. Le logiciel GEOSTAT ne lisant pas les extensions, on les supprime de la manière suivante, sous DOS:

- REN PAR*.TXT PAR A ce stade les fichiers ASCII sont prêts.

Ils portent alors les noms: PARX, PARY, PARCEVN, PARCEHN. Tous ces fichiers sont indispensables à GEOSTAT.

c) création du fichier de renseignement de la parcelle

- COPY CON: PARRENS
L 1 n 2 0 CEVN CEHN ^Z (en MAJUSCULES)

Ce fichier transmet au logiciel GEOSTAT les informations nécessaires au traitement des données.

d) enregistrement des données d'étalonnage

On consigne toutes les valeurs d'étalonnage du profil, soient:

PAR: nom de la parcelle. CEV : mesure en mode vertical.
PNT: nom du point. CEH : mesure en mode horizontal.
PRf: profondeur. CE_{dix}(120): moyenne de CEDIX sur 120 cm.
HUM: humidité pond. CE_{dix}(200): moyenne de CEDIX sur 200 cm.
Tex: texture. NOTE : remarques.

On peut ainsi au cours du temps compléter ce fichier et améliorer la corrélation $CEM=f(CE_{dix})$, ou $CEM=f(CE_{cin})$.

ANNEXE 5 - mode opératoire pour le traçé des cartes

Les données de CEM, soit CEV et CEH sont repérées dans un système orthonormé et stockées dans un fichier ASCII comme écrit précédemment.

a) mise en oeuvre du logiciel GEOSTAT

On se reportera au manuel du logiciel. Il est recommandé de garder les données de terrain sur une disquette séparée, une seule disquette par parcelle ou périmètre, car le nombre des fichiers est rapidement multiplié par les traitements informatiques que l'on fait subir aux données initiales.

On notera PR1 la parcelle au temps t1, PR2 la même parcelle au temps t2 etc.

On gardera les éléments permettant de qualifier l'évolution des structures salines (variogrammes, variances, humidités etc.) dans un fichier PAR.DOC réalisé sous DOS, que l'on pourra visualiser dès la mise en service des calculs (TYPE PAR.DOC par exemple).

On cherche laquelle des deux mesures est la plus pertinente dans le cas considéré: généralement CEH si la nappe est proche et que la salinité entre 0 et 120 cm est suffisante, ou CEV si la connaissance de la salinité jusqu'à deux mètres est nécessaire. On la soumet à un krigeage ou à une interpolation linéaire de type $1/x^2$.

Pour que les données soient comparables d'une période à une autre, il est essentiel que la même équation d'étalonnage soit utilisée et que les valeurs soit ramenées à la même humidité moyenne par l'équation (8) par exemple. Pour le krigeage proprement dit, on peut utiliser le mode d'emploi suivant:

b) krigeage

- vérifier que les fichiers ASCII sont complets, que la valeur maximum de x est supérieure à celle de y.
- mettre la disquette données en A et taper "GEOSTINI".
- statistiques: histogramme essayer d'obtenir une distribution aussi gaussienne que possible. Sauvegarder par copie d'écran.
- variogramme: noter les paramètres, sauver en PARV1.
- modélisation du variogramme: garder l'équation.
- krigeage ponctuel: noter les paramètres, zoom etc., sauver en PARK1.
- cartographie: attention le fichier des contours est temporaire.

important: on gardera les caractéristiques du traitement informatique, le pas du variogramme, l'équation d'ajustement et surtout l'allure du variogramme qui sont autant d'informations nécessaires à l'interprétation d'évolutions éventuelles.

Note: le logiciel Geostat ne conserve pas, dans son état actuel les dimensions relatives des parcelles (longueur/largeur). Il convient donc d'indiquer sur la carte la valeur des échelles X et Y.

ANNEXE 6 - méthode d'étalonnage par différenciation des horizons

A chaque point de prélèvement on fait deux mesures de conductivité apparente globale du sol:

une mesure en mode vertical : CEV
une mesure en mode horizontal : CEH

L'influence de chaque horizon salin sur la mesure finale n'est pas la même dans les deux cas. En supposant que la salinité et l'humidité du sol soient uniformément répartie de 0 à 200 cm de profondeur, on aura:

$$CEV = a (47,5 * DIX(0-60) + 34 * DIX(60-120) + 18,5 * DIX(120-200)) + b \quad (9)$$

$$CEH = a' (72,5 * DIX(0-60) + 19 * DIX(60-120) + 9,5 * DIX(120-200)) + b' \quad (10)$$

si l'on néglige l'influence des couches de sol plus profondes que 120 cm, on obtient:

$$CEV = a (47,5 * CE_{dix}(0-60) + 34 * CE_{dix}(60-120)) + b \quad (11)$$

$$CEH = a' (72,5 * CE_{dix}(0-60) + 19 * CE_{dix}(60-120)) + b' \quad (12)$$

Les coefficients a, a', b, et b' s'obtiennent en choisissant plusieurs points d'étalonnage, cinq à dix, en général. Ils dépendent de la texture du sol, de sa porosité, de son humidité au moment de la mesure.

On peut alors résoudre les équations (11) et (12) et on obtient, en négligeant les termes en b et b', qui représentent la conductivité du matériau brut :

$$CE_{dix}(0-60) = (34 * CEH - 19 * CEV) / (2465 * a' - 902 * a) \quad (13)$$

$$\text{et : } CE_{dix}(60-120) = (47 * CEH - 72 * CEV) / (893 * a' - 2448 * a) \quad (14)$$

important:

Cette résolution n'a de sens que si les profils salins et hydriques des points mesurés ont la même allure que ceux des points d'étalonnage et si les profils salins sont sensiblement identiques au cours de la prospection (voir Wollenhaupt 1986).

ANNEXE 7. - différenciation des profils salins

Dans les pays arides et en régime naturel les profils salins verticaux sont en ascendants, c'est à dire que les sels se concentrent à la surface des sols sous l'effet conjugué des remontées capillaires et de l'évaporation. Sous irrigation au contraire, les sels sont drainés vers le bas du profil. Entre ces deux extrêmes, toutes les situations intermédiaires peuvent exister. Elles sont caractéristiques d'une situation agropédologique ou d'un itinéraire technique donné.

Il est donc de première importance de pouvoir différencier les profils salins pour représenter la dynamique des sels. On peut le faire en utilisant les propriétés spécifiques des champs magnétiques verticaux et horizontaux (§ Chap.I). Dans chacun des cas, la géométrie des lignes de courants est différente et la réponse comparée des valeurs CEV et CEH permet de d'estimer l'allure du profil salin, en effet:

Si $\Phi_v(z)$ et $\Phi_h(z)$ sont les contributions respectives à la mesure CEM d'une couche élémentaire de sol située à une profondeur normalisée z , la théorie montre que dans un milieu homogène:

$$\Phi_v(z) = 4z / (4z^2 + 1)^{\frac{3}{2}} \quad (15)$$

et: $\Phi_h(z) = 2 - 4z / (4z^2 + 1)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$

En intégrant sur le demi-espace $0-z$, on obtient :

$$\Phi_v(z) dz = Hsv \quad (17)$$

et: $\Phi_h(z) dz = Hsh \quad (18)$

z étant une variable adimensionnelle (rapport de la profondeur à la distance interspire e), Hsv étant proportionnel à CEV et Hsh à CEH par construction.

Les valeurs des intégrales (17) et (18) sont données pour différentes profondeurs dans le tableau n°2.

L'intégrale (17) est plus grande entre les bornes 0 et 0,5 qu'entre 0,8 et ∞ . 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 (18) est sensiblement identique pour les deux régions séparées par $z = 0,8$. Ce qui signifie qu'en mode vertical les couches superficielles de 0 à 80 cm (si $e=1$) auront la même réponse relative que le reste du demi-espace.

prof :	0-20	0-40	0-60	0-80	0-100	0-120	0-200	0-300 [∞]
CEV:	8	23	37	48	58	63	77	84	100
CEH:	33	53	65	73	78	81	88	92	100

ab.1- Contribution en % d'une épaisseur de sol située entre 0 et cm à la lecture de CEM en mode vertical (CEV) et horizontal (CEH). Pour l'appareil EM-38 de Geonics.

En mode horizontal, 81% de la mesure provient des premiers 20 cm de sol. Donc si on étalonne la réponse de l'appareil par rapport à des prélèvements tarières faits de zero à 120 cm c'est la mesure CEH qu'il faudra utiliser dans la corrélation avec la salinité vraie du sol.

Si le profil salin est homogène, la salinité est alors systématiquement sous-estimée de 19%. Sinon CEH est surestimé par rapport à CEDIX(0-120) lorsque le profil salin est croissant et sous-estimé dans le cas contraire. D'où la nécessité de faire des mesures différentielles pour éliminer ce biais.

Le tableau 1 n'est valable que pour un milieu homogène et de conductivité verticale constante. Ce n'est que rarement le cas dans les sols. Dans la pratique, les lignes de courant tendent à se concentrer dans les couches de conductivité élevée. Mais à profil hydrique pas trop différencié, par exemple en fin de ressuyage, on peut différencier les profils salins ascendants et descendants directement sur le terrain en se basant sur la valeur du rapport CEV/CEH:

si $CEV > CEH$ le profil salin est descendant et vice versa.

L'appareil EM-38 ne permet pas de différencier les salinités de deux couches de sol comprises entre 0 et 50 cm. Ce sont pourtant celles qui subissent le plus de variation d'état hydrique et salin sous irrigation en milieu aride, d'où l'intérêt de faire des mesures en mode horizontal.

Parce qu'il est difficile d'apprécier les profils hydriques en tout point du sol, et que la répartition des sels est rarement homogène, l'interprétation basée sur les courbes théoriques données Chap.I est hasardeuse. On s'efforcera d'utiliser des méthodes d'interprétation par différence de deux mesures pour supprimer les biais éventuels.

ANNEXE 8 - fiche de parcelle

Pour chacune des parcelles on rempli une fiche permettant de connaître les caractéristiques du traitement opéré.

PARCELLE:	Date:
-----------	-------

Pays:	Périmètre :
Réf. cartes:	Taille parcelle:

0 sec:	Etat hydrique:
0 hum:	
0 de référence	correction:

Courbe humidité:

CEV/CEVmoy:	Hum :
CEH/CEHmoy:	Cult:

CEM=f(CEDIX) :

parRENS:		pas hist:	
variog:	pas/mini:	zoom:	
modèle:	a=	b=	pal= pep= zoom:
krigeage:	validité:	dist:	nb.de pts:
contours:	ech:	niveaux:	

CEDIX)=f(CESAT):

ANNEXE 9- récapitulation du protocole d'étalonnage

- préparer l'appareil: régler le déphasage initial et le zéro.
- choisir un point de référence d'humidité et de salinité constante sous une construction légère en bois, par exemple.
- délimiter la parcelle par des repères reconnaissables.
- choisir une maille pour les mesures CEV/CEH.
- sélectionner un minimum de 5 points dont les valeurs CEM sont réparties de la plus faible à la plus élevée.
- prélever le sol au niveau de ces points tous les 20 cm jusqu'à 120 ou 200 cm de profondeur.
- déterminer l'humidité et la conductivité électrique sur extrait 1/5 ou 1/10 pour chaque échantillon.
- calculer l'humidité et la salinité moyenne de 0 à 120 ou 200 cm pour chaque point d'étalonnage.
- pour chaque point on aura ainsi au moins 4 variables: CEV, CEH, CEDix(moyen) ou Cecin(moyen), θ_p (moyen). On peut éventuellement déterminer CESat(moyen).
- on ramène les valeurs de CEM à une humidité de référence par la formule (8).
- on établira ensuite les courbes suivantes :
CEM = f(θ) ; CEM = f(CEcin) ou CEM= f(CEDix) ; Cedix=f(Cesat)
- on calcule si besoin les rapports CEV/CEH

annexe 10 - données numériques

Nous présentons (Tab.2.) à titre indicatif quelques données numériques d'équations d'étalonnage tirées de la littérature ou effectuées par nos soins.

CE	a(x1000)	b	n	r	θm	v	Tex	References
CEdix	6,9	-0,83	19	0,88	14,0	CEV	moy	Job, Loyer, Syrie
CEdix	4,2	0,11	6	0,96	15,6	CEH	str	B. Hassine, Tunisie
CEdix	4,8	-0,36	7	0,99		CEV	moy	Job, Sénégal
Cedix	7,4	0,74	4	0,99	38,0	CEH	fin	Job, Loyer Espagne
Cedix	4,0	-0,24	19	0,92		CEV	fin	Job, Sénégal
Cedix	5,2	0,10	19	0,82	11 3	CEV	moy	B.Hassine, S-Saad°
Cedix	5,8	0,09	9	0,91	9 7	CEH	fin	B.Hassine, Zelba°
CEdix	6,9	0,07	52	0,89	var	CEH	fin	Job, Divers sols
" "	12,5	0,32	40	0,92	var	CEH	moy	" "
" "	8,7	-0,17	88	0,83	var	CEH	var	" "
CEsat	5,2	-0,60	12	0,93	-	CEH	-	Cameron & al.
CEsatm	8,2	-2,22	40	0,91	-	CEH	fin	Wollenhaupt
Cesatm	8,4	-2,64	40	0,92	-	CEV	fin	" " "
CEcin°	5,6	-0,22	80	0,88	-	CEH	-	Slavich in McNeill
CEsat	5,2	-0,60	-	0,93	-	CEH	-	Cameron, Canada
NaCl%	20,0	-0,94	16	0,93	23	CEV	-	Job, Sénégal

Tab.2. Valeurs des coefficients A et b dans la formule:
 $CE_{ext} = a \cdot CEM + b$ pour différents extraits.

avec:

$$CE_{satm} = CE_{sats} + CE_{satp}$$

$$CE_{sats} = 0,54 \cdot CE_{sat}(0-30) + 0,26 \cdot CE_{sat}(30-60)$$

$$CE_{satp} = 0,13 \cdot CE_{sat}(60-90) + 0,54 \cdot CE_{sat}(90-120)$$

$$CE_{cin}^{\circ} = CE_{cin} \text{ des } 30 \text{ premiers cm de sol.}$$

$$CE_{sat}^{\circ} = CE_{sat} \text{ des } 30 \text{ premiers cm de sol.}$$

ANNEXE 11- comparaison avec les méthodes classiques

L'étude de la distribution des sels dans le sol s' est faite classiquement en prélevant des échantillons en différents points et à différentes profondeurs . La quantité de sels est ensuite estimée par extraction des échantillons à l'eau, soit sous forme de pâte saturée soit sous forme d'extraits aqueux divers. Le nombre de prélèvements est limité par la lourdeur du procédé (trous de tarière), qui par ailleurs fournit en un point des résultats très précis, mais très localisés.

Au contraire, les mesures de CEM peuvent être multipliées ad libitum avec une fréquence spatiale et une étendue quelconque. On peut donc suivre une variation spatiale continue sans craindre d'avoir effectué un échantillonnage incomplet, défaut majeur dans la méthode par prélèvement.

Mais il ne faut pas perdre de vue que l'on mesure toujours un effet de la salinité conjugué à un état d' humidité du sol. Il faut donc veiller particulièrement à connaître l'état hydrique du sol.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- Albouy Y., 1987- La prospection électromagnétique. Cours multigr., ORSTOM, 70 pp.
- Albouy M., Delmas R., 1986- Applications de la Géophysique à l'Archéologie. Rapport Supelec, 22p.
- Ben Hassine H., Hachicha M., Job J.O., Loyer J.Y., 1988- La conductivimétrie électromagnétique: application au suivi de la salinité des sols des périmètres irrigués de Tunisie. Rapport multigr., ORSTOM/DS, Montpellier, 22 pp.
- Boivin P., 1988- Programmes conversationnels de calcul géostatistiques pour micro-ordinateurs: Geostat-PC. Bull. GFHN, France, n° 23 p:77-92.
- Boivin P., Hachicha M., Job J.O., Loyer J.Y., 1989- Une méthode de cartographie de la salinité des sols. Conductivité électromagnétique et interpolation par krigeage. Science du sol, vol.25, n°1, p:69-73.
- Boivin P., Brunet D., Job J.O., 1988- Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIV, N° 1 p:39-48.
- Cameron D.R., De Jonc E., Read D.W., Oosterveld M., 1979- Mapping salinity using resistivity and electromagnetic inductive techniques. Canadian J., Soil Sci., vol. 61, p: 67-71.
- Corwin D.L., Rhoades J.D., 1981- Determining Soil Electrical Conductivity Using an Inductive Electromagnetic Soil Conductivimeter. Soil Sci., Soc., Amer., J., Vol.45, n° 2 p:255-260.
- De Jonc E., Ballantyne A.K., Cameron D.R., Read D.W., 1979- Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic probe to aid salinity surveys. Soil Sci. Soc. Am. J. 43: 810-812.
- Hachicha M., Job J.O., Loyer J.Y., 1990- Contrôle de la salinité des sols du périmètre de Gafsa-Sud-Ouest par conductivimétrie électromagnétique. Direction des Sols/ORSTOM, (sous-presse).
- JOB J.O., 1985- Conductivimétrie électromagnétique: application à la cartographie des sols salés. 25ème semaine des Sciences de Damas (Syrie).

- Job J.O., Ecoutin M., 1986- Utilisation scientifique de dBASEIII. Centre ORSTOM de Montpellier , 24 pp.
- Job J.O., Hachicha M., 1989- Logiciels de base de données et cartographie automatique de la salure globale des sols. Journées sur l'informatique appliquée à l'étude des sols salés, 28 juin-6 juillet, Direction des Sols, Tunis.
- Job J.O., Loyer J.Y., 1988- Variations spatiales de la salinité globale dans la parcelle 2049 des marismas du Guadalquivir. Projet CEE rehabilitation des Marismas du Guadalquivir. ORSTOM, centre de Montpellier, 10 pp.
- Job J.O., Loyer J.Y., Ailoul M., 1987- Utilisation de la conductivimétrie électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol.XXIII, n°2 p:123-131.
- Job J.O., Maraï M., 1990- Etude de la salinité des sols de l'Oasis d' El Guettar. Direction des Sols/ORSTOM ,(sous presse).
- Job J.O., Mohdi M., Hachicha M., 1989- Suivi de l'évolution des terres dans le périmètre de Sidi-Saad (Kairouannais). Premiers résultats de mesure électromagnétique. Direction des Sols/ORSTOM, pub., n° E-S 255, 10 pp.
- Loyer J.Y., Gonzalez Barrios J.L., Job J.O., 1989- Les principaux faciès salins et leur expression dans les sols des régions chaudes. Séminaire Mapimi, Oct.89, Mexique.
- McNeill J.D., 1980- Electromagnetic measurement at low induction numbers. Techn., note TN-6 , Geonics Ltd , Ontario , Canada.
- McNeill J.D., 1980- Electrical Conductivity of Soils and Rocks. Techn., note TN-6 , Geonics Ltd , Ontario , Canada.
- Tabbagh A.,- What is the best coil orientation in the Slingram electromagnetic prospecting method? Archaeometry, Vol. 28, N° 2, p: 185-196.
- 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. Canadian J., Soil Sci., Vol.66, p:315-321.
