

ORSTOM
(INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION)

Unité de Recherche:UR2B "Transferts aux interfaces sol-eau-plante".

Mission ORSTOM à Tunis, BP 434, 1004-EI Menzah I (Tunisie).

REALISATION D'UN CONDUCTIVIMETRE ELECTROMAGNETIQUE A FAIBLE
PENETRATION

JOB J.O., TABBAGH A., LOYER J.Y.

Compte-rendu de fin d'étude d'une
recherche financée par le Ministère de
la Recherche et de la Technologie.

le 16/08/1992

Décision d'aide n° 88L0467

REALISATION D'UN CONDUCTIVIMETRE ELECTROMAGNETIQUE A FAIBLE PENETRATION.

1-INTRODUCTION.

1.1-Mesure de la salure des sols.

Dans les régions arides, l'agriculture n'est possible qu'avec l'irrigation des terres. Mais la forte évaporation, souvent combinée à un drainage topographique déficient, provoque une accumulation des sels dans les sols, une baisse des rendements et quelquefois, la dégradation des terres.

Une des caractéristiques de cette salinisation est sa grande variabilité dans l'espace, horizontalement dans une parcelle aussi bien que verticalement dans le profil. L'évaluation de la salure des sols en est d'autant plus difficile.

Il convient de faire un nombre important de mesures qui permettent des calculs statistiques et géostatistiques qui seuls permettent la discrimination des variations locales d'avec les tendances existant sur de plus grands espaces.

Un de ces moyens est la mesure de la conductivité électromagnétique du sol (CEM), technique non destructive qui permet de mesurer la conductivité globale du sol, à des profondeurs variant de deux à 40 mètres suivant l'appareil choisi. Cette propriété dépend de la salure des sols et de leur humidité.

Actuellement les conductivimètres électromagnétiques disponibles sur le marché permettent une mesure de la CEM pour une profondeur de sol minimum de deux mètres. Cette profondeur rend mal compte des situations de salure et d'humidité des sols des régions arides sous irrigation. En effet dans ces sols la tranche de mobilisation de sels se situe le plus souvent entre 0 et 100 cm.

Le but de cette étude est donc de construire un appareil permettant la mesure de la salure apparente entre 0 et 100 cm.

1.2- Participants.

La répartition des tâches a été faite ainsi:

- Conception théorique du système: MM. A. Tabbagh et R. Beaussillon, CNRS, Centre de Recherche de Géophysique de Garchy, (C.R.G.), 58150 Pouilly sur Loire.
- Réalisation et construction de l'appareil: MM. J.M., Jamot et O., Renou, Société Electronique de l'Ouest (Tronico), 85660-St Philbert de Bouaine.
- Essais sur le terrain : MM. J.Y., Loyer et J.O., Job, ORSTOM, 213 Rue La Fayette, 75480 Paris, et Mission Orstom, Tunis.

1.3- Etapes de la réalisation.

Septembre 1988: notification de la décision d'aide, prise de contact avec les partenaires déjà identifiés et élaboration des contrats particuliers. Le programme a commencé à Garchy par la conception du système émetteur-récepteur de champ magnétique constitué de deux bobines inductrices dont il a fallu calculer les caractéristiques physiques, électriques et la géométrie. C'est la phase de coopération C.R.G-Tronico.

Mars 1992: Tronico livre le prototype à l'ORSTOM et les premiers essais sont faits sur des sols salés du littoral Atlantique. Une bonne réponse aux différents profils salins a été obtenue, mais la sensibilité de l'appareil était trop faible et le système de compensation permettant de faire le zéro des mesures n'était pas assez performant.

Juin 1992: une autre série d'essais a été faite sur ce même site. La compensation du zéro ayant été jugée suffisante, des mesures complémentaires pouvaient donc commencer sur le terrain en Tunisie suivant le protocole décrit au paragraphe 4.

2- LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DES SOLS.

Les sols comme les roches présentent une conductivité électrique de nature électrolytique c'est à dire due aux déplacements d'ions. Ces ions peuvent se déplacer soit dans le volume d'eau interstitielle présente dans les pores, soit à la surface des grains, il s'agit alors presque exclusivement de cations. La conductivité de surface n'est en fait observable que si la surface spécifique est importante, c'est à dire pour les sols argileux.

En règle générale, la conductivité des sols dépend donc de la conductivité propre du sol, de la porosité, de la teneur en eau, de la teneur en sels et de la température.

2.1- Effet de la porosité.

Soit σ_x est la conductivité propre du sol et σ_1 celle du liquide remplissant les pores. On démontre que le rapport σ_1/σ_x diminue dans l'ordre pour les roches dures, les argiles, les grès, les sables, les diatomées. Plus la porosité est grande, plus l'effet de l'électrolyte interstitiel est important. Si π_0 est la porosité, on peut écrire pour un empilement régulier de sphères de rayon petit par rapport à la distance de leur centre:

$$\sigma_x/\sigma_1 = a * (\pi_0)^n \quad (\text{relation d'Archie}) \quad (1)$$

ou encore:

$$\sigma_x/\sigma_1 = 2\pi_0 / (3 - \pi_0) \quad (\text{relation de Maxwell}) \quad (2)$$

L'exposant n variant de 1,2 pour des sphères parfaites à 1,85 pour un empilement de particules plates, et a étant un paramètre empirique proche de 1. Ces deux relations ne s'appliquent qu'à des sols saturés en eau.

Si seulement une fraction de la porosité est remplie par de l'électrolyte, on remplace π_0 par $\pi_0 * \theta_v$, θ_v étant l'humidité volumique. Si $\pi_0 * \theta_v$ est petit, la conductivité mesurée peut également être très petite, dans la pratique il est donc préférable de faire les mesures à un taux d'humidité du sol assez élevé pour les sols peu ou moyennement salés en tous cas.

Pour les sols argileux, une formule plus précise a été développée (Rhoades, 1981). Il a été prouvé empiriquement que la meilleure approximation était d'ajouter la conductivité de surface à la conductivité en volume, on écrit donc:

$$\sigma_s = \sigma_1(\pi_0 \cdot \theta_v) + \sigma_s \quad (3)$$

Formule dans laquelle:

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

θ_v = humidité volumique,

La relation (3) montre qu'aux salures et humidités faibles, l'influence de l'argile est prépondérante, au contraire, aux fortes salures, le rapport σ_s/σ_1 reste faible et la conductivité du sol dépend fortement de θ et de σ_1 .

Ces remarques préliminaires nous permettent de définir les conditions de mesure sur le terrain: la salure d'un sol sera d'autant plus fidèlement mesurée que l'humidité sera proche de la capacité au champ sur la profondeur maximum. Nous interviendrons donc après irrigation quand le sol contiendra entre 20 et 35% d'eau par unité de volume sur 120 cm de profondeur.

2.2- Conductivité des argiles.

Nous donnons à titre d'indication la conductivité de quelques argiles et matériaux tirés de la littérature et de nos propres mesures:

Materiau	σ mS/m	θ_v %	réf.
60% kaolinite, 20% clastique	1	46	(1)
80% " " 20 " "	16	42	(1)
95% " " 5 " "	1	25	(1)
15% " " 65 " " , 20 montmor.	65	21	(1)
dolomies	0.2 à 3	sec	(2)
argiles	5 100	var	(4)
alluvions et sables	1 100	var	(3)
calcaires	0.5 16	var	(3)

Tab.1- Conductivités de quelques argiles et roches.

Les argiles ont une conductivité qui augmente avec leur saturation en cations et l'humidité volumique (tab.1). La conductivité apparente de la roche mère est déterminée séparément, en dehors d'une zone salée. Dans l'équation qui lie la salure vraie à la salure globale apparente, cette valeur est l'ordonnée à l'origine.

aridisols divers	CEV mS/m	θ_v . %
98% gypse lenticulaire (Sebkha Jiroud, Syrie)	6	4
98% gypse lenticulaire (Euphrate, Syrie)	12	
95% " " " (Dune Bir Tlili)		
calloutis et dolomies (Orbata, Tunisie)	16	8

Tab.2- Conductivité globale apparente de quelques formations superficielles de pays arides.

- (1) Walker J.W., & al., 1973- Observations of the Electrical Conductivity of the Tropical Soils of Western Puerto Rico. Geol., Soc., Amer., Bull., Vol. 84, p:1743-1752.
- (2) Telford W.M., & al., 1976- Applied Geophysics. Chap.5, Cambridge Univ., Press, New York.
- (3) Cutley R.W., & al., 1975- E-phase System for Detection of Buried Granular Deposits. Symposium on Modern Innovations in Subsurface Exploration, 54th annual Meeting of Transport Research Board.
- (4) Sellman P.V., 1976- Preliminary Evaluation of New LF Radio Waves and Magnetic Induction Resistivity over Permafrost Terrain. Nat., Res., Council Canada Techn. Mem n°119. Symposium on Permafrost Geophysics.

3- MESURE DE LA CONDUCTIVITE A L'AIDE D'UN CONDUCTIVIMETRE ELECTROMAGNETIQUE, DIMENSIONNEMENT DE L'APPAREIL.

Parmi les différentes méthodes permettant de mesurer la conductivité (ou son inverse, la résistivité), en terrain agricole sur une épaisseur et un volume significatif, la mesure électromagnétique avec des appareils de type Slingram dans lequel on utilise une bobine émettrice et une bobine receptrice, présente plusieurs avantages:

- c'est une méthode active, la mesure ne dépend pas d'une source extérieure non contrôlée par l'expérimentateur,

- il n'est pas nécessaire d'établir un contact électrique avec le sol, les mesures sont totalement indépendantes de l'état de surface du sol et elles peuvent être très rapides,

- elle est mieux adaptée que la prospection électrique à la mesure des conductivités élevées (ce qui est le cas des sols salés), puisqu'elle donne une réponse proportionnelle à la conductivité et non à son inverse.

Ce type d'appareil est très utilisé depuis les années trente en prospection minière superficielle. Les méthodes de calcul permettant de quantifier la réponse d'un terrain tabulaire ont été proposées par Sommerfeld (1926) et ont été largement utilisées depuis (Wait, 1958).

Si le choix de l'écartement, s , entre les bobines est directement lié à la profondeur d'investigation (cf. infra), le choix de la fréquence f est par contre plus complexe et doit être fait en recherchant la meilleure séparation entre la réponse due à la susceptibilité magnétique, tout en ayant la relation la plus simple possible entre la propriété recherchée et la grandeur mesurée.

Les études réalisées en prospection archéologique (Tabbagh, 1974), ont montré que sous la condition d'un faible nombre d'induction, soit:

$$|\sigma\mu^2\pi f| \ll 1 \quad (4)$$

le champ magnétique secondaire rétrodiffusé par le sol, en quadrature avec le champ magnétique primaire était directement proportionnel à σ et pour une conductivité suffisamment forte, bien supérieure à la réponse de la susceptibilité magnétique en quadrature qui reste négligeable. Pour un écartement de l'ordre du mètre, la condition (4) impose une fréquence qui ne doit pas dépasser 50 à 100 kHz.

Le choix de l'orientation des bobines est à priori ouvert et demande une analyse approfondie des avantages comparés de chacune des solutions possibles (Tabbagh, 1986). Néanmoins, la solution où les deux bobines sont coplanaires présente l'avantage (Mc Neill, 1980) de permettre des mesures dans deux configurations: coplanaires horizontales ou coplanaires verticales, pour lesquelles les profondeurs d'investigation sont différentes. Nous avons donc retenu cette solution qui est d'ailleurs celle utilisée pour les appareils Geonics EM-31 et EM-38.

La valeur optimale de l , distance entre les bobines, peut être déterminée en considérant le modèle à trois couches suivant:

- une première couche de résistivité $30 \Omega m$ correspondant à un sol limoneux non saturé et non salé,
- une deuxième couche à $10 \Omega m$ correspondant à un sol non saturé salé,
- une troisième couche à $3 \Omega m$ correspondant au sol salé et saturé, autrement dit à la nappe phréatique.

On suppose que le toit de cette dernière couche est à $1m$, profondeur en deçà de laquelle les remontées capillaires sont permanentes et rendent les cultures difficiles.

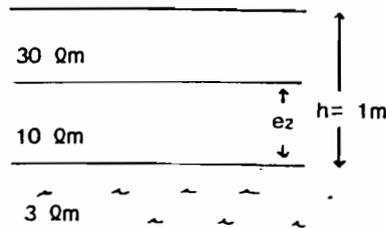


Fig.1- Modèle à trois couches servant à définir les paramètres de l'appareil Tronico.

On cherche à ce que l'appareil dont on disposera ait la meilleure sensibilité possible à l'épaisseur e_2 de la couche salée non saturée, puisque ce paramètre est déterminant pour l'utilisation agricole du sol.

La figure 2 montre la variation de la conductivité apparente en fonction de l'écartement pour différentes valeurs du paramètre e_2 en se référant au cas où la deuxième couche n'existe pas et où la couche au-dessus la nappe à une résistivité de $30 \Omega m$. Les courbes montrent que la sensibilité à e_2 est bonne pour les deux dispositifs, mais qu'elle est beaucoup plus dépendante de l'écartement pour le dispositif "coplanaires horizontales" que pour le dispositif "coplanaires verticales". Le résultat le plus marquant est que l'on a intérêt à prendre un écartement court (autour de 50 cm), plutôt qu'un écartement métrique pour mettre en évidence les variations d'épaisseur de la couche salée à l'intérieur du premier mètre. Nous avons donc adopté un écartement de 60 cm , ce qui permet en plus d'avoir un appareil court, facile à transporter.

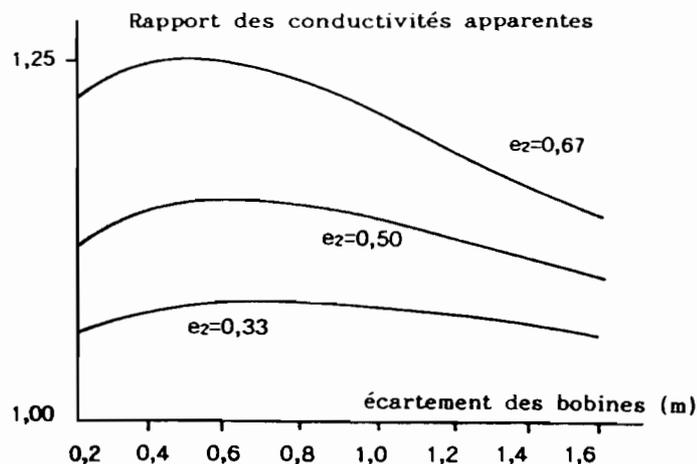


Fig.2- Rapport des conductivités apparentes en fonction de l'écartement des bobines d'induction, en position coplanaire horizontale.

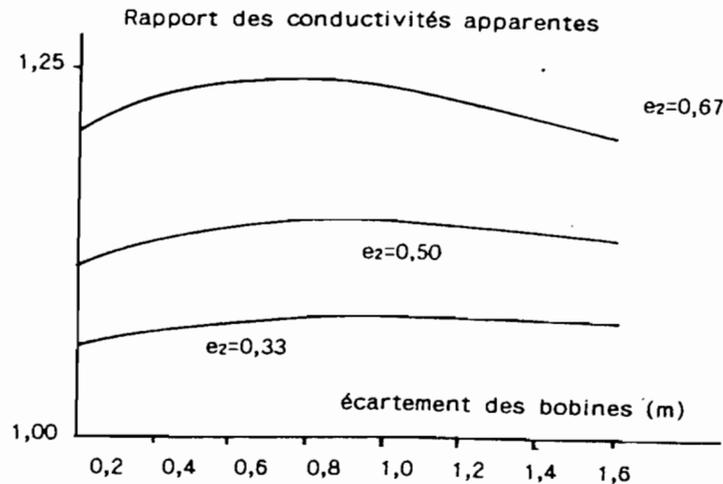


Fig.3- Rapport des conductivités apparentes en fonction de l'écartement des bobines d'induction, en position coplanaire verticale.

Les spécifications adoptées pour notre prototype sont donc les suivantes:

- dispositif des bobines: coplanaires,
- écartement : 60 cm,
- fréquence : 27,96 kHz.

Pour des raisons pratiques, nous avons ajouté le choix d'une alimentation sur batteries rechargeables.

4-REALISATION.

La réalisation du prototype a été confiée à la société Tronico, spécialisée en réalisation électronique et micro-électronique pour des appareillages de terrain, notamment en géophysique. La société Tronico a les homologations RAQ 2, AQAP 2-OTAN, SNCF et ISO 9002.

5- ESSAIS SUR LE TERRAIN

5.1- Coefficient d'humidité.

Avant que nous disposions du prototype, et pour gagner du temps, un étalonnage de précision a été fait en Tunisie avec l'appareil EM-38 dans le but de déterminer l'influence respective de l'humidité et de la salure sur la lecture finale. Les sols ayant servi à cet étalonnage sont des sols gypso-salins cultivés, à texture équilibrée, de densité apparente comprise entre 1,45 et 1,55, d'humidité pondérale comprise entre 10 et 30% avec une moyenne de 22%. Afin de couvrir avec plus de précision la gamme des salures rencontrées dans les sols cultivés et de donner une portée plus générale à nos résultats, nous y avons joint des sols prélevés au Sénégal et en Syrie (Job, 1985 a et b) dans le cadre de travaux réalisés

Tous les sols ont en commun leur texture limoneuse à limono-sableuse. Il a été vérifié que la présence de gypse ne change en rien la mesure.

On obtient, à partir de 42 sols de même salure moyenne entre 0 et 120 cm:

$$CE_{h,g}(\theta_2) = CE_{h,g}(\theta_1) + [5,4 + 6,5 \cdot 10^{-6} \cdot (CE_{h,g}(\theta_1))^2] \cdot (\theta_2 - \theta_1)$$

que l'on simplifie en:

$$CE_{h,g}(\theta_2) = CE_{h,g}(\theta_1) + 5,4 \cdot (\theta_2 - \theta_1) \quad (4)$$

Cette relation nous permettant de ramener à une humidité de référence, soit $\theta = 20\%$ en poids, toutes les mesures faites à une humidité différente, généralement comprise entre 12 et 25%.

5.2- Comparaison des performances des deux appareils.

Il s'agit de comparer les réponses respectives, ramenées à une humidité pondérale moyenne du sol de 20%, du prototype Tronico et de l'EM-38 de Geonics sur les mêmes sols.

Nous faisons l'hypothèse que l'élévation de l'humidité provoque une mise en solution des ions qui se traduit par une augmentation de la conductivité proportionnelle pour les deux appareils. On ne dispose pas en effet de suffisamment de mesures avec le prototype pour étalonner correctement l'humidité.

Le choix s'est porté sur des sols gypso-salins du chott El Guettar, en Tunisie, car ils sont en même temps assez salés, de 5 à 30 dS.m⁻¹, de texture régulière limono-sableuse à limoneuse, et que l'on peut trouver des profils hydriques constants en profondeur, car les bords de chott sont irrigués.

Ces conditions sont nécessaires pour que l'effet de l'humidité soit réduit au minimum et donc que l'effet de la salure soit maximum sur la réponse des deux appareils.

Ces sols sont cultivés et le modèle tri-couches choisi au paragraphe 3 les représente bien.

Nous avons donc choisi 14 profils. Sur chacun d'eux, on mesure la conductivité électrique de l'extrait saturé et l'humidité pondérale tous les 20 cm jusqu'à la nappe qui se trouve entre 150 cm et 280 cm au moment des mesures (juin 1992). Les résultats des mesures sont présentés en annexe A2.

- Premier traitement:

On compare les étalonnages par tranche de sol de 0 à p cm de profondeur, les valeurs de p sont 50, 100, 150, 200 et 250 cm lorsque cela est possible:

$$\text{soit } CE_{h,t} = f[a \cdot \theta(0-p), b \cdot CES(0-p)] \quad (5)$$

avec:

$CE_{m,a}$ = Conductivité électromagnétique, mesurée en mode m, soit vertical ($m=v$), soit horizontal ($m=h$) avec l'appareil a, soit Geonics ($a=g$), soit Tronico ($a=t$).

$\theta_{(0-p)}$ = Humidité pondérale moyenne du sol, de la surface à p cm de profondeur, mesurée à l'étuve à 60°C.

$CES_{(0-p)}$ = Conductivité électrique moyenne de l'extrait saturé de sol entre 0 et p cm de profondeur, à 25°C, en $dS.cm^{-1}$.

Résultats: On obtient 16 équations (annexe A.3). De la valeur de a et b on déduit que le coefficient d'humidité dépend beaucoup du mode de mesure (vertical ou horizontal) et que le coefficient de salure dépend beaucoup de l'appareil utilisé.

-Deuxième traitement:

On travaille sur les mêmes profils en opérant sur les tranches de sol comprises entre deux profondeurs données, p et p', en traitant les variables $Hum_{(p-p')}$ et $CES_{(p-p')}$. On choisit les mêmes limites de profondeur que précédemment: 0-50, 50-100, 100-150, 150-200, et 200-250 cm.

Les valeurs de $CE_{m,a}$ sont ramenées à la valeur de référence $\theta=20$, à l'aide de l'équation (4):

On obtient en mode horizontal:

pour l'appareil Tronico:

$$CE(20)_{h,t} = 13,6 * CES_{(0-50)} + 4,6 * CES_{(50-100)} + 0,6 * CES_{(100-150)}$$

avec $r^2=0,927$ (6)

et, pour l'appareil Geonics:

$$CE(20)_{h,g} = 4,5 * CES_{(0-50)} + 3,1 * CES_{(50-100)} + 1,8 * CES_{(100-150)} + 2,1 * CES_{(150-200)}$$

avec $r^2=0,967$ (7)

On voit que l'appareil Tronico rend mieux compte en mode horizontal des niveaux 0-50 cm et 50-100 cm que l'appareil Geonics. Par contre il n'y a pas de différence significative en mode vertical, en effet pour ce mode on obtient:

pour l'appareil Tronico:

$$CE(20)_{v,t} = 9,3 * CES_{(0-50)} + 7,2 * CES_{(50-100)} + 4,9 * CES_{(100-150)}$$

avec $r^2=0,967$ (8)

et, pour l'appareil Geonics::

$$CE(20)_{v,g} = 9,9 * CES_{(0-50)} + 6,1 * CES_{(50-100)} + 5,4 * CES_{(100-150)}$$

avec $r^2=0,969$ (9)

Les coefficients des différentes profondeurs sont similaires, indiquant une contribution de chaque couche de sol identique pour chaque appareil.

5.3-Essais de tenue en température

L'appareil devant être utilisé dans des zones à forte variation de température diurne, il importe que les lectures soient stables quand la température externe varie. Des essais ont été faits entre 20 et 35°C, qui sont les conditions normales d'utilisation (fig.3), l'appareil étant en équilibre avec l'air ambiant.

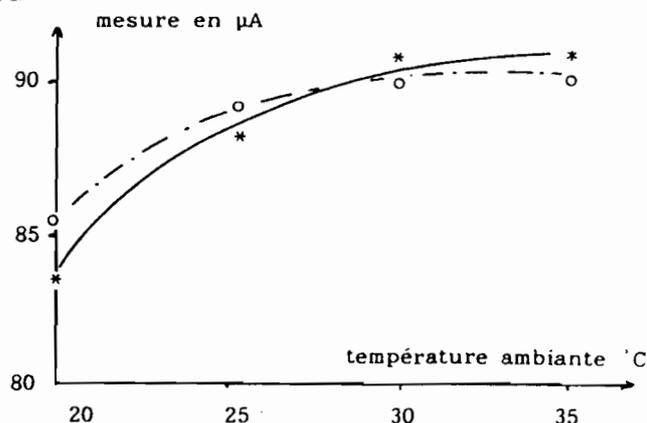


Fig.3- Variations des mesures en mode vertical (*) et en mode horizontal (o) de l'appareil Tronico, suivant la température.

Il y a une dérive non négligeable. Elle pourrait être minimisée par un revêtement blanc lisse, qu'il faudra prévoir sur les appareils de présérie.

6- CONCLUSIONS.

Compte tenu d'un budget de développement réduit de moitié au départ, nous avons pu développer un prototype fonctionnel qui, suivant les premiers essais répond au cahier des charges imposé. Les essais vont se poursuivre dans des conditions d'humidité et de texture des sols différentes. Sans modifier la configuration choisie, il est cependant indispensable de travailler à l'amélioration des performances et de la présentation de l'appareil:

- par un affichage digital des mesures,
- par un selecteur de gammes de mesures,
- par un boîtier plus isolant et plus élégant.

L'amélioration de ces spécifications fera l'objet d'une demande d'aide supplémentaire.

ANNEXES

A.1- Etalonnage sur les sols d'El Guettar.A.1.1- Principe.

L'étalonnage consiste à transformer les données brutes CE_v (mode vertical) ou CE_h (mode horizontal) prises sur le terrain en conductivité moyenne d'extrait saturé du sol au point de mesure, intégrée soit de 0 à 120 cm, soit de 0 à 200 cm suivant le mode choisi. Compte tenu des caractéristiques des lignes de courant produites dans le sol, nous utiliserons pour l'étalonnage les mesures en mode horizontal, soit: CE_h .

On mesure les conductivités électromagnétiques CE_v et CE_h du sol, les conductivités au cinquième, au dixième et à saturation: CEC, CED, CES ainsi que l'humidité pondérale θ_p d'échantillons prélevés tous les 20 cm jusqu'à 120 cm de profondeur.

Les relations linéaires entre ces paramètres sont ensuite établies et toute mesure de terrain est ainsi transformable en conductivité d'extrait, pourvu que l'humidité du sol puisse être évaluée.

Les mesures CE_v et CE_h sont dépendantes en même temps de la concentration saline dans le sol et de son humidité. Il faut donc évaluer l'influence propre de chacun de ces deux paramètres, soit par une régression multiple, soit par un calcul itératif. Les deux méthodes seront exposées.

A.1.2- Par regression multiple.

On se sert de l'extrait au cinquième qui est plus rapide à faire et permet de multiplier les sites d'étalonnage. Les valeurs des conductivités électriques des extraits au cinquième CEC sont ensuite transformées en conductivités saturées par l'équation:

$$CES = 6,61xCEC - 8,8 \quad r=0,994 \quad CEC>1,4 \quad n=91 \quad (10)$$

Pour l'interprétation des données de terrain CE_h en terme d'extrait saturé de sol moyen de 0 à 120 cm, sur toute la gamme des concentrations, on se servira des résultats obtenus à partir de tous les échantillons. La précision est moindre mais la gamme d'application beaucoup plus étendue. On trouve:

$$CE(\theta_p)_{v.g} = 70,3*CEC + 4,6*\theta_p - 136 \quad n=31 \text{ et } 1,5 < CE_h < 8 \quad (11)$$

Ces résultats sont utilisables sur une famille de sols, dans un grand domaine d'application. Pour minimiser l'erreur d'estimation, on peut opérer plus précisément:

A.1.3- Par régression itérative.

On pose d'abord:

θ_p l'humidité pondérale moyenne de 0 à 120 cm,
 $CE[n]_{h,g}$ les valeurs de $CE_{h,g}$ pour $CEC=n$ à θ_p quelconque,
 $CE(\theta_p)_{h,g}$ les valeurs de $CE_{h,g}$ à θ_p constant et CEC quelconque.

Puis on rassemble les points de mesures qui ont des valeurs de CEC voisines, par exemple autour de 2,3 dS.cm⁻¹ (tab.3):

échantillon	CEv	CEh	θ_p	CEC	Gypse
G12/DEC89	165	115	23,2	2,82	
GUE7/0889	38	23	5,0	2,00	
GUE6/0889	78	48	17,3	2,20	
GARE/0290	58	45	18,6	2,03	14,0
GAD1/0290	66	50	17,0	2,08	9,0
2262A/0290	170	105	27,6	2,14	25,0
2239A/0290	217	195	34,2	2,20	2,5
MAR1/0290	80	50	14,5	2,14	11,0
2366/DEC89	210	160	22,0	2,20	
MAN1/DEC89	140	110	15,6	2,53	20,0
RGET2	119	93	20,6	2,30	11,0

Tab.3- Profils salins utilisés pour l'étalonnage.

Ces valeurs sont centrées sur une moyenne de 2,28 dS/m avec un écart type de 0,28.

On calcule une première régression entre $CE[n]_{h,g}$ et θ_p , soit:
 $CE[2,28]_{h,g} = 5,77\theta_p - 21,7$ $r = 0,810$

Cette équation permet de ramener les valeurs de $CE_{h,g}$ à une humidité pondérale de référence de 20%, notées $CE(20)_{h,g}$, et d'établir la régression sur les concentrations à l'aide des valeurs du tab.4:

échant.	CEV	CEH	θ_p	CEcn	échant.	CEV	CEH	θ_p	CEcn
G14/DC89	200	235	21,0	4,05	G15/DC89	250	170	23,2	3,30
G22/DC89	420	300	25,0	4,20	GUE7/889	38	23	5,0	2,00
GUE6/889	78	48	17,3	2,20	GARE/290	58	45	18,6	2,03
ET490	339	304	23,0	4,35	ET590	270	230	22,1	3,90
ET690	306	260	29,2	4,10	ET790	412	426	28,2	3,12
RGET1	335	342	18,6	5,40	RGET2	119	93	20,6	2,30
SGET1	340	454	17,2	5,30	SGET2	125	107	20,3	4,21
SGET3	372	487	17,5	4,16	SGET4	463	540	22,8	8,03
GAD1/290	66	50	17,0	2,08	2262/290	170	105	27,6	2,14
239A/290	217	195	34,2	2,60	MAR1/290	80	50	14,5	2,14
SID1/290	110	70	15,3	1,84	2262/CD89	80	66	14,4	1,50
ET190	205	185	19,7	3,20	ET390	345	445	18,8	5,84

Tab.4- Echantillonnage à différentes humidités pour l'étalonnage.

$$CE(20)_{h,g} = CEH(\theta_p) + 5,77(20-\theta_p)$$

et on obtient la droite de régression suivante:

$$CE(20)_{h,g} = 35xCE_{cn} + 77,1 \quad r = 0,661$$

On se sert de cette équation pour ajuster les valeurs initiales de $CEH(\theta_p)$ à la moyenne 2,28 et calculer la régression sur les humidités :

$$CEH[2,28]_{h,g} = CEH + 35x(2,28 - CE_{cn}) \text{ et:}$$

$$CEH[2,28]_{h,g} = 4,87x\theta_p - 5,05 \quad r = 0,794$$

et on recommence le procédé. On arrive à converger au bout de cinq itérations et on obtient finalement:

$$CEH[2,28]_{h,g} = 4,00x\theta_p + 5,37 \quad r=0,862 \quad (12)$$

$$CEH(20)_{h,g} = 81xCE_{cn} - 100 \quad r=0,776 \quad (13)$$

Les équations (12) et (13) sont optimisées dans la gamme des concentrations et des humidités choisies. Elles produisent une estimation sans biais, avec une erreur minimum. On les utilisera dans leur intervalle de validité, c'est-à-dire dans notre cas de 1,8 à 3.0 dS/m de conductivité d'extrait au cinquième, soit 3 à 12 dS/m d'extrait saturé. C'est à l'intérieur de cet intervalle de concentrations que les sols salés sont cultivés normalement. Ce qui permet de donner un tableau de correspondance pratique:

CE(θ)		50	100	150	200	250	300	350	400
θ_p	15	2	7	12	16	21	26	30	35
θ_p	20	<1	5	10	14	19	23	28	33
θ_p	25	1	2	7	12	17	21	26	31

Tab.5- Correspondance entre les valeurs de $CE(\theta)_{h,g}$ ($mS.m^{-1}$) et celles de l'extrait saturé moyen ($dS.m^{-1}$) à différentes humidités du sol, pour l'appareil EM-38.

Ces dernières équations peuvent être utilisées dans toutes les formations de piémont des jebels de la région de Gafsa, dont les sols ont une composition semblable, bien que le gypse ne s'y trouve pas sous la même forme.

A.2- Mesures faites avec les deux appareils.

Conditions de mesures:

- sols gypso-salins à nappe située entre 150 et 250 cm (été) et 80 à 120 cm (hiver),
- température ambiante de 20°C (à 8 h.) à 35°C (à midi).

$CE(\theta)_{v,t}$	$CE(\theta)_{h,t}$	$CE(\theta)_{h,t}$	$CE(\theta)_{h,g}$	050	0100	0150	0200
160	40	153	88	1,0	4,2	7,8	8,8
150	30	135	78	14,3	16,3	15,6	17,0
205	70	179	98	11,0	14,5	16,3	
190	160	150	185	17,3	18,0	18,0	20,0
250	120	228	143	20,0	21,0	22,0	
305	190	209	145	17,3	18,0	18,5	19,0
330	140	255	148	8,5	10,5	13,5	23,6
400	280	280	210	20,0	21,0	22,0	
460	230	341	218	13,0	18,0	19,5	21,0
560	640	256	322	12,5	14,5	14,8	17,8
620	650	354	364	14,5	20,0	22,0	
830	850	418	461	18,3	25,0	24,5	24,0
900	830	395	438	20,3	20,3	21,2	
999	880	508	477	17,3	18,5	19,5	22,0

Tab.6- Etalonnage des appareils Geonics EM-38 et Tronico, sur quatorze profils de sols salés. Mesures brutes de conductivité électromagnétique et humidités de chaque couche de 50 cm de sol, corrigées pour une température de 25°C.

$CE(20)_{v,t}$	$CE_{h,t}$	$CE_{h,t}$	$CE_{h,g}$	CES50	CES100	CES150	CES200
226	125	219	173	2,9	7,4	10,5	13,8
174	50	159	98	4,8	7,8	11,8	15,5
225	100	199	128	7,6	10,2	13,4	20,0
201	171	161	196	7,0	6,7	6,7	8,0
239	115	217	138	4,7	5,2	6,2	
313	201	217	156	14,7	15,0	15,2	15,2
365	191	290	199	21,0	17,5	18,0	19,1
389	275	269	205	10,6	11,7	14,4	
463	241	344	229	20,5	30,6	39,7	43,0
588	670	284	352	26,7	19,0	18,0	17,7
609	650	343	364	26,0	29,0	28,0	
806	823	394	434	57,0	43,0	43,0	40,0
894	828	389	436	30,0	25,0	23,0	
999	888	511	485	42,0	42,0	41,0	

Tab.7- Etalonnage des appareils Geonics EM-38 et Tronico, sur quatorze profils de sols salés. Mesures de conductivité électromagnétique ramenées à $\theta = 20\%$ et $t = 25^\circ\text{C}$, salure de l'extrait saturé de chaque couche de 50 cm de sol.

A.3- Effet de l'humidité et de la salure des sols:

Les mesures ont été faites sur 14 profils. Les résultats sont commentés au paragraphe 5.

- Pour l'appareil Tronico en obtient:

- en mode vertical:

$$CE(\theta)_{v,t} = 10,1 * \theta_{(0-50)} + 15,1 \text{ CES}_{(0-50)} \quad r^2 = 0,948$$

$$CE(\theta)_{v,t} = 5,8 * \theta_{(0-100)} + 18,5 \text{ CES}_{(0-100)} \quad r^2 = 0,941$$

$$CE(\theta)_{v,t} = 7,2 * \theta_{(0-150)} + 16,0 \text{ CES}_{(0-150)} \quad r^2 = 0,900$$

- en mode horizontal:

$$CE(\theta)_{h,t} = 3,0 * \theta_{(0-50)} + 17,0 \text{ CES}_{(0-50)} \quad r^2 = 0,908$$

$$CE(\theta)_{h,t} = 0,6 * \theta_{(0-100)} + 19,2 \text{ CES}_{(0-100)} \quad r^2 = 0,856$$

$$CE(\theta)_{h,t} = 3,0 * \theta_{(0-150)} + 16,0 \text{ CES}_{(0-150)} \quad r^2 = 0,775$$

- Pour l'appareil Geonics:

- en mode vertical:

$$CE(\theta)_{v,g} = 9,7 * \theta_{(0-50)} + 6,2 \text{ CES}_{(0-50)} \quad r^2 = 0,950$$

$$CE(\theta)_{v,g} = 7,2 * \theta_{(0-100)} + 7,6 \text{ CES}_{(0-100)} \quad r^2 = 0,975$$

$$CE(\theta)_{v,g} = 7,4 * \theta_{(0-150)} + 6,8 \text{ CES}_{(0-150)} \quad r^2 = 0,972$$

- en mode horizontal:

$$CE(\theta)_{h,g} = 6,1 * \theta_{(0-50)} + 7,6 \text{ CES}_{(0-50)} \quad r^2 = 0,958$$

$$CE(\theta)_{h,g} = 4,6 * \theta_{(0-100)} + 8,6 \text{ CES}_{(0-100)} \quad r^2 = 0,940$$

$$CE(\theta)_{h,g} = 5,4 * \theta_{(0-150)} + 7,1 \text{ CES}_{(0-150)} \quad r^2 = 0,898$$

REFERENCES.

- JOB J.O., 1985- Conductivimétrie électromagnétique: application à la cartographie des sols salés. 25ème semaine des Sciences de Damas (Syrie).
- JOB J.O., 1985- Conductivimétrie électromagnétique: étalonnage sur les sols salés de la Basse Vallée de L'Euphrate (Syrie). Centre ORSTOM de Montpellier, 9p.
- 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.
- McNEILL J.D., 1980a- Electrical conductivity of soils and rocks. Technical note n° TN-5, Geonics Ltd, Mississauga, Canada.
- McNEILL J.D., 1980b- Electromagnetic conductivity terrain measurement at low induction numbers. Technical note n° TN-6, Geonics Ltd, Mississauga, Canada.
- RHOADES J.D., 1981.- Predicting bulk soil electrical conductivity versus saturation paste extract electrical conductivity calibrations from soil properties. Soil Sci., Soc., Am., J., Vol. 45, p: 42-44.
- SOMMERFELD A., 1926- Uber die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen telegraphic, Am., der Physik, Vol.4, n°81, p:1135-1153.
- TABBAGH A., 1974, Définition des caractéristiques d'un appareil électromagnétique classique à la prospection archéologique. Propezioni Archéologichi, vol.9, p:21-23.
- TABBAGH A., 1986- What is the best coil orientation in the Slingram electromagnetic prospection method ? Archaeometry, Vol. 28, n° 2, p: 185-196.
- WAIT J.R., 1958- Induction by an oscillatory magnetic dipole over a two layer ground. Appl, Sci., Res., n°B7, p:73-80.

Ampliation:

- MRT (c/o: Mlle Ferard, ORSTOM, Siège).
- J.Y. Loyer, Mission ORSTOM, Gomez-Palacio, Mexique.
- A. Tabbagh, CRG Garchy, France,
- J.M. Jamot, Tronico, St Philippe de Boualne, France.
- CS2, ORSTOM, Siège.