

Détermination par méthode électromagnétique de la concentration en sel d'un sol irrigué

J. O. Job, A. Tabbagh, et M. Hachicha

Orstom, BP 434, 1004 Tunis El Menzah, Tunisie; Département de Géophysique Appliquée, Université Paris 6 et Centre de Recherches Géophysique, 58150 Garchy, France; et Ministère de l'Agriculture, Direction des Sols, rue Hedi Karray, 2049 Ariana, Tunisie. Reçue le 18 octobre 1994, accepté le 2 mai 1995.

Job, J. A., Tabbagh, A. et Hachicha, M. 1995. **Détermination par méthode électromagnétique de la concentration en sel d'un sol irrigué.** *Can. J. Soil Sci.* **75**: 463–469. Pour contrôler la salinisation d'un sol, il est impératif de déterminer la salure du premier mètre avec une bonne précision, sans modifier les caractéristiques physiques et hydrauliques et de disposer d'une maille suffisamment serrée par rapport à la taille des parcelles. En s'appuyant sur le cas expérimental de l'oasis d'El Guettar (Tunisie) où prédomine un sol gypseux de texture limoneuse, on établit les relations qui existent entre la conductivité électrique (CE) obtenue avec deux appareils électromagnétiques de type Slingram et la salure des différentes tranches de profondeur. Cet exemple, confirmé par l'étude théorique, permet d'établir qu'un appareil de faible écartement entre les bobines (60 cm), est moins sensible à la présence de la nappe salée sous-jacente et mieux adapté à la mesure de la salure du premier mètre qu'un appareil d'écartement métrique.

Mots clés: Sols salés, conductivité électrique, appareillage électromagnétique

Job, J. A., Tabbagh, A. et Hachicha, M. 1995. **determination of the salinity of an irrigated soil by electromagnetic conductivity.** *Can. J. Soil Sci.* **75**: 463–469. A prerequisite for the control of salinity in soils is the determination of the salinity of the upper first metre of the soil with the greatest accuracy. This is commonly done from saturated paste extracts but on too small a volume and too restricted a number of samples. This must be done without modification of the soil structure and on a sufficiently narrow grid. Electromagnetic conductivity meters of Slingram type are convenient to indirectly determine the salinity by measurement of electrical conductivity. However the depth of investigation commonly exceeds the first metre and the saturated salted zone beneath significantly influences the results. A theoretical study together with a complete calibration test on the border of Chott El Guettar (Tunisia) confirms that short coil separation (60 cm) increases the sensitivity of the apparatus to conductivity variations in the first metre of soil.

Key words: Saline soils, electrical conductivity, electromagnetic apparatus

Les sols salés continentaux couvrent près de 900 millions de km² dans le monde (Szabolcs 1979). On les trouve principalement dans les parties basses des paysages, souvent situés dans des zones densément peuplées et fortement exploitées pour l'agriculture. Il importe donc d'y contrôler la salinisation, cause primaire de la dégradation de la production végétale.

Pour améliorer les rendements des cultures irriguées, il faut lessiver les sels hors du volume racinaire avec le minimum d'eau, pour ne pas contaminer les nappes. Or on connaît la grande variabilité spatio-temporelle de nombreuses propriétés hydrodynamiques des sols telles: la piezométrie (Darricau-Beucher 1981), la teneur en eau (Gascuel-Odoux 1984), les remontées capillaires (Job 1992). Tous ces paramètres influencent la distribution des sels dans les sols. Il faut donc pouvoir évaluer la distribution spatiale des sels. L'intérêt des mesures de salinité globale pour la cartographie des sols irrigués a déjà été montré (Job et al. 1987; Boivin et al. 1988). Mais connaître la distribution spatiale ne suffit pas, on a besoin de disposer de variables dynamiques, capables d'expliquer la localisation des sels dans le profil à tout instant (Vachaud 1993).

L'objectif de cet article est double: d'abord montrer l'intérêt de la conductivimétrie électromagnétique pour représenter la

dynamique du fonctionnement salin des sols, ensuite proposer un appareil qui permette de faire des mesures sur le premier mètre du sol, siège des dynamiques rapides en milieu aride irrigué.

Mesure électromagnétique de la conductivité électrique

La mesure de la CE a été abondamment utilisée par les géophysiciens en prospection minière peu profonde (Wait 1958), mais ce n'est qu'en 1979 que son application à l'étude des sols a été envisagée avec un appareillage permettant des mesures sur une profondeur compatible avec les exigences des pédologues, soit deux mètres environ (De Jong et al. 1979). Par rapport aux mesures en prospection électrique par quadripôle, elle présente l'avantage de ne pas nécessiter un contact avec le sol, donc d'être utilisable sur des sols dont la surface est très sèche et de correspondre à des appareillages très légers et faciles à transporter.

Le principe en est le suivant: une variation du flux de champ magnétique créé par une bobine émettrice induit dans le sol des courants de Foucault dont l'intensité dépend de la CE du sol. Ces courants produisent à leur tour un champ magnétique secondaire qui peut être mesuré par une bobine réceptrice associée à un galvanomètre. Cette méthode a été

appelée Slingram dans les années trente par les géophysiciens en contractant l'expression "à deux bobines" en Suédois.

Dans la gamme des fréquences permettant la mesure directe de la conductivité d'un sol, le volume pris en compte dépend de l'écartement, d , entre les bobines d'émission et de réception. Dans un sol homogène et isotrope, et pour une valeur $d = 1$ m, la profondeur théorique de pénétration est de deux mètres à peu près si les bobines sont parallèles et verticales. Si les axes des bobines émettrices et réceptrices sont dans un même plan et parallèles, on peut les positionner horizontalement ou verticalement. Le champ primaire produit dans les deux cas étant différent, le sol réagit différemment, et l'on obtient en un même point deux mesures distinctes de la conductivité apparente, notées CE_V et CE_H . Dans chacun de ces deux modes, la réponse d'une épaisseur de sol dz située à la profondeur z est spécifique et dépend de la salure, de la texture et de la teneur en eau. On peut donc différencier les profils salins, mais la démarche empirique est indispensable pour définir, pour un sol donné, la relation conductivité-salure.

MATERIEL ET METHODES

Salure du sol en milieu naturel

Pour illustrer la dynamique des sels dans les sols irrigués, nous avons choisi le site d'El Guettar dans le Sud tunisien, car on y trouve des sols très homogènes, une profondeur de nappe phréatique variable de façon continue, et des dynamiques très rapides couvrant toute la gamme des salures et tous les stades d'utilisation de l'eau. La faible pluviométrie, 150 mm par an, permet d'y suivre les remontées capillaires des sels à partir de la nappe sans perturbation.

C'est une oasis irriguée traditionnelle de 500 ha, constituée de 2543 parcelles individuelles. L'irrigation se fait par canalisations enterrées et seguias bétonnées à partir d'un forage débitant 120 L s^{-1} et par des puits de surface. Les sols sont composés principalement de gypse lenticulaire éolien submillimétrique, de texture limoneuse.

Les argiles, à dominante illitique, sont peu abondantes et souvent en quantité inférieure à 15%. La variation spatiale des propriétés physiques du sol y est faible, en particulier la composition minéralogique (Sassi 1965), mais aussi la texture, la perméabilité et la masse volumique apparente, (Job 1992). La profondeur de nappe (Ben Marzouk 1982), sa salure et celle du sol sont les seuls facteurs naturels pertinents de notre étude ayant une variation notable dans l'espace.

La taille moyenne des parcelles est petite, 800 m^2 pour la fréquence maximum et on observe des variations importantes de teneur en eau du sol d'un endroit à l'autre, chaque propriétaire irriguant avec la fréquence et la quantité qui lui convient. A tout moment de l'année, sauf après une forte pluie, les planches irriguées peuvent présenter une teneur pondérale moyenne en eau, intégrée sur 120 cm de sol, comprise entre 8 et 28%.

Conductivité électrique d'un échantillon de sol

Les sols salés d'El Guettar contiennent surtout des composés du sodium, du magnésium et à un moindre degré, du calcium. Ce sont principalement des chlorures et des sulfates, très peu

de carbonates car le pH reste voisin de 7,5 (Job 1992). En présence d'eau, ces sels se dissocient en ions qui peuvent se déplacer soit directement dans les pores du sol, soit à la surface des grains. Ainsi, les sols sont-ils d'autant plus conducteurs qu'ils contiennent des sels solubles, mais chaque espèce ionique possède une mobilité et une charge, donc une CE, qui lui est propre (Robinson et Stokes 1959).

En théorie, la loi d'Archie (1942), modifiée par Rhoades et al. (1976), permet de calculer la conductivité d'un volume de sol: $\sigma = \sigma_e (nS)^m + \sigma_s$ où σ_e est la conductivité de la solution interstitielle, σ_s celle de la surface des grains, S le pourcentage de saturation en eau, n la porosité, et m un paramètre expérimental proche de 2, dépendant de la forme des grains du sol.

Cette relation explique partiellement les phénomènes physiques mis en jeu. Mais dans la mesure où les grandeurs σ_e et σ_s ne sont pas facilement déterminables, elles ne permettent pas d'évaluer la salure du sol in situ. On opère donc par prélèvement d'échantillon, dont on détermine ensuite la salinité en laboratoire, en saturant d'eau un échantillon d'une centaine de grammes jusqu'à obtention d'une pâte qui ne peut plus absorber d'eau. On laisse l'équilibre sol-eau se faire, et on extrait l'eau absorbée dont on mesure la CE, CE_{sat} (Richards 1954).

La CE de l'extrait à saturation est une valeur très reproductible et précise (Pleijzier 1990). Pour cette raison, elle est adoptée comme méthode de référence pour mesurer la salure d'un sol. Et pourtant cette manière de procéder n'a pas que des avantages. En particulier, la mesure est faite sur un faible volume de sol, de l'ordre du dm^3 , qui ne constitue pas un volume élémentaire représentatif (Voltz 1986) du point de vue du fonctionnement hydrique. Cette contrainte limite son interprétation du point de vue de la dynamique des sels dans les sols.

Conductivité électrique d'un profil de sol

Aux problèmes liés à la mesure sur un échantillon, s'ajoutent ceux qui viennent de la variabilité spatiale des concentrations dans le paysage. Pour une irrigation traditionnelle par planches de 100 à 200 mètres carrés seulement, sur les sols limono-sableux perméables (perméabilité = $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm h}^{-1}$) d'El Guettar, on décèle trois échelles à l'intérieur desquelles on ne peut pas appréhender la salure du sol de la même manière:

- le profil de sol en un point quelconque,
- la planche d'irrigation,
- le périmètre irrigué en entier.

Dans les parties cultivées régulièrement, le maraîchage irrigué provoque la désalinisation des horizons de surface, sans que le lessivage des sels hors du profil soit possible à cause de la faiblesse des apports et, dans les parties basses, de l'absence de pente. Les profils salins sont donc croissants en profondeur. Dans les parties non cultivées, les sels se concentrent en surface sous l'effet conjugué de la capillarité et de l'évaporation. Tous les cas intermédiaires entre ces deux situations sont possibles (Fig. 1). Deux constatations s'imposent: d'abord une mesure sur un seul échantillon n'est pas suffisante pour rendre compte de la salure du sol en un point donné. Ensuite, et ceci est fréquent en zone aride

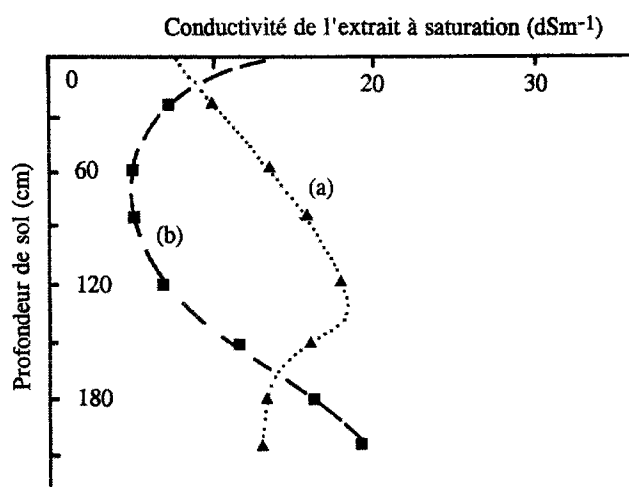


Fig. 1. Profils salins de deux parcelles voisines d'oasis: (a) Oliviers et luzerne, irrigués par tour d'eau de un mois, avec plus de 2000 mm d'eau par an. (b) petit maraîchage diversifié, avec 1000 mm an⁻¹, mais une irrigation fréquente et régulière (El Guettar, Tunisie).

où la quantité d'eau d'irrigation est limitée, il y a deux zones de dynamique saline différente, le premier mètre de profondeur à peu près qui subit les effets de l'irrigation et de l'évaporation, le deuxième qui subit l'influence dominante de la nappe phréatique. Pouvoir différencier ces deux domaines permettrait de mieux contrôler l'irrigation et le drainage. Le faire en analysant des échantillons prélevés sur place ne permet pas d'obtenir simplement les profils salins, car cela nécessiterait de trop nombreux prélèvements. Il faut donc trouver une méthode non destructive. La conductivimétrie électromagnétique est une solution dont nous allons montrer l'utilité.

Utilisation pratique de la mesure électromagnétique de la conductivité électrique

Pour utiliser les mesures *in situ*, il faut étalonner les mesures prises en chaque point, CE_V et CE_H par rapport à la salure globale du sol en ce point. La forme générale de l'équation d'étalonnage est:

$$CE = \alpha (\text{salure globale du sol}) + \beta (\text{teneur en eau du sol}) + \gamma (\text{porosité})$$

Dans les tentatives d'étalonnage faites jusqu'à présent, les facteurs et ont toujours été considérés comme constants. Les efforts ont porté sur ce qui devait représenter le mieux la salure du sol. Rhoades et Corwin, (1981) comparent la méthode électromagnétique avec la méthode électrique quadripôle. Dans les autres publications (De Jong et al. 1979; Job et al. 1987; Herrero et Bercero 1991) des valeurs de rapports d'extraction sol/eau variés ont été employés, sans qu'un jugement soit porté sur la meilleure méthode.

Ce qui importe dans les milieux arides cultivés, où toutes les parcelles ne sont pas irriguées en même temps, c'est de connaître β , car les variations de teneur en eau d'un point à un autre sont grandes. C'est pourquoi nous avons procédé de la manière suivante:

1. Sur 100 points de l'oasis, on mesure CE_V et CE_H , on prélève des échantillons de sol tous les 20 cm de profondeur jusqu'à 120 cm. On mesure sur chacun d'eux la conductivité de l'extrait saturé, CE_{sat} , et la teneur en eau pondérale.

2. On classe ensuite les profils de sol suivant leur salure globale moyenne, la classe centrale ($n = 43$), étant: $CE_{sat(0-120)} = 3,1 \pm 0,1 \text{ dS m}^{-1}$. On trouve en tout cinq classes d'au moins dix profils chacune, pour lesquels θ varie de 13 à 25%. Pour chaque classe, on fait une corrélation simple: $CE_{sat(0-120)} = aCE_H(\theta) + b$. En comparant les valeurs trouvées pour le coefficient a dans chaque classe, on obtient pour deux valeurs différentes θ_1 et θ_2 de la teneur en eau:

$$CE_H(\theta_2) = CE_H(\theta_1) + (\theta_2 - \theta_1) [5,4 + 6,5 \cdot 10^{-6} CE_H^2(\theta_1)] \quad (1)$$

équation qui donne pour β la valeur 5,4 si l'on néglige le terme en CE_H^2 .

3. A l'aide de cette équation, on ramène toutes les mesures de CE_H , faites sur les 100 points d'étalonnage différents, à $\theta = 20\%$, valeur que nous avons prise comme référence car c'est la plus probable au cours de l'année dans ces sols.

On peut alors calculer la droite de régression entre $CE_H(20)$ et $CE_{sat(0-120)}$. Pour les valeurs de $CE_{sat(0-120)}$ comprises entre 1 et 30 dS m^{-1} , en éliminant les profils comprenant une nappe à moins de deux mètres, on trouve:

$$CE_{sat(0-120)} = 0,084 CE_H(20) - 0,64, n = 88, r = 0,974 \quad (2)$$

Cette équation permet de calculer la salure apparente globale de tous les sols limono-sableux d'El Guettar après estimation de la teneur en eau moyenne du profil. Elle s'applique aussi à tous les sols limono-sableux du Sud tunisien. L'effet de la texture du sol a été testé sur des sols gypseux, salés mais non alcalins, à NaCl dominant, dans neuf stations expérimentales (Hachicha et Job 1994). La gamme des teneurs en argile, principalement de la Montmorillonite, allait de 5 à 75%. Le coefficient obtenu augmente de 5,4 à 7,7 quand on passe des sols limono-gypseux du Sud aux sols argilo-limoneux du Nord (Fig. 2), sans que le nombre d'équations d'étalonnage soit suffisant pour modéliser l'effet de la texture. Il faudrait faire la part de la mobilité des sels en surface de particules et à l'intérieur des pores en mesurant la taille et la distribution des pores, ce qui n'a pas été possible dans les conditions de notre étude. Pour tous ces sols, si la profondeur d'investigation de l'appareil avoisine 2 m, on ne peut appliquer ces relations que quand la salinité du sol est à peu près constante entre 120 cm et 200 cm, c'est à dire quand il n'y a pas de nappe phréatique en deçà de 200 cm.

Définition des caractéristiques optimales du conductivimètre

Dans la méthode de mesure adoptée, on emploie comme source un dipôle magnétique et l'on mesure une composante

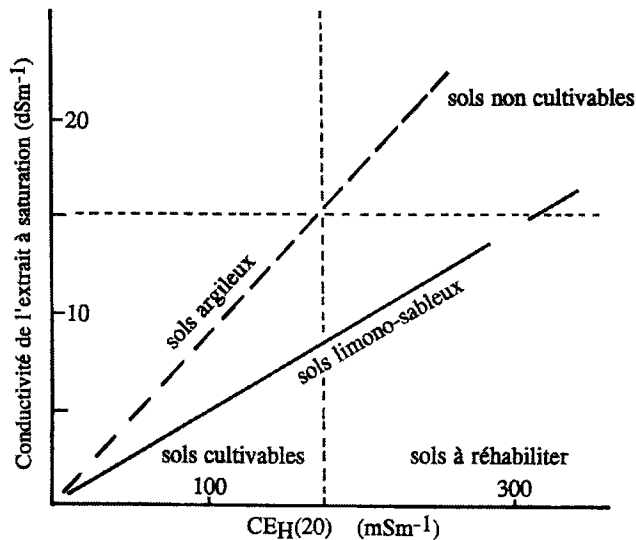


Fig. 2. Effet de la texture des sols sur la pente de la droite d'étalonnage pour quelques sols gypseux et salés de Tunisie.

du champ magnétique à une distance de la source qui dépend de la profondeur d'investigation recherchée. On utilise donc deux bobines. Ce choix permet de bénéficier des avantages suivants:

1. la source est intégrée à l'appareil de mesure,
2. l'appareil peut-être petit, léger et portable, et complètement indépendant de tout contact électrique avec le sol,
3. il donne une réponse, appelée conductivité apparente, croissante avec la CE du sol, mieux adaptée aux fortes salures qu'une méthode où les réponses sont proportionnelles à la résistivité, comme les méthodes électriques qui utilisent l'injection d'un courant dans le sol.

Le seul inconvénient de cette méthode de mesure est sa sensibilité aux objets perturbateurs métalliques (véhicules, parties métalliques des systèmes d'irrigation, etc.).

Pour minimiser l'influence de la nappe phréatique tout en augmentant la sensibilité à la conductivité du premier mètre de sol, il faut diminuer la profondeur d'investigation. Actuellement le seul appareil disponible (EM-38 de Geonics), a une profondeur d'investigation d'environ 2 mètres dans les sols à conductivité croissante en profondeur. Pour la diminuer, les spécifications que l'on doit considérer sont la fréquence du champ inducteur, l'orientation respective des bobines et leur écartement.

La fréquence f est choisie pour obtenir la dépendance la plus simple possible entre la conductivité du milieu et le champ magnétique secondaire qui est la grandeur mesurée. Ce champ est croissant en amplitude avec σ . On peut établir une dépendance simple si la quantité $B = 2\pi\sigma$ if $\mu_0 d^2$, dite nombre d'induction, est beaucoup plus petite que 1 (dans cette relation: $i^2 = -1$, μ_0 est la permittivité de l'air, constante, f est la fréquence d'excitation du champ induit, et d est l'écartement des bobines). Dans ce cas, le champ secondaire, en quadrature de phase avec le champ émis, est

directement proportionnel à σ . La partie de la réponse qui est en phase avec le champ émis permet de plus de déterminer la susceptibilité magnétique du sol (Tabbagh 1974). Pour un écartement d de l'ordre du mètre, la condition de faible nombre d'induction est réalisée tant que la fréquence f est inférieure à 50 kHz.

- Le choix de l'orientation respectives des bobines repose sur l'analyse approfondie des avantages comparés de chacune des solutions (Tabbagh 1986). Elle montre, entre autres, que si les deux bobines sont coplanaires, leurs axes étant parallèles, on peut faire des mesures dans chacune des deux configurations avec le même appareil. Nous avons vu que cela permettait de connaître le gradient de salure avec la profondeur. C'est cette information que nous cherchons à optimiser car il s'agit d'une variable dynamique représentant le mouvement des sels dans le sol. Cette configuration est celle de l'EM-38 (McNeill 1980).

- Le choix de l'écartement, d , entre les bobines est directement lié à la profondeur d'investigation recherchée. Il doit être inférieur à 1 m, pour satisfaire nos conditions.

Le modèle

Pour calculer les spécifications théoriques de notre appareil (appelé par la suite CS-60), nous avons conçu un modèle de sol hypothétique à trois couches. Nous nous sommes placés dans les conditions limites d'une nappe située à 1 mètre de profondeur, avec:

- une première couche de conductivité $0,33 \text{ dS m}^{-1}$ (résistivité $30 \Omega\text{m}$) correspondant à un sol non saturé et non salé,
- une deuxième couche de conductivité 1 dS m^{-1} (résistivité $10 \Omega\text{m}$) correspondant à un sol non saturé salé,
- une troisième couche de conductivité $3,3 \text{ dS m}^{-1}$ (résistivité $3 \Omega\text{m}$), correspondant à un sol saturé salé, dans la zone de battement de la nappe phréatique.

Ces trois valeurs définissent pour les sols argileux un seuil à partir duquel les rendements des plantes sensibles aux sels sont affectés. Elles ont été choisies pour tester les possibilités de l'appareil à mesurer une faible salure du sol et à ignorer une nappe peu profonde. Des valeurs de salure plus fortes sont fréquentes dans les sols irrigués, surtout pour les sols sableux.

On cherche à ce que l'appareil ait la meilleure sensibilité à l'épaisseur e_2 de la couche salée non saturée puisque ce paramètre est déterminant pour l'utilisation agricole du sol et sa réhabilitation. Dans notre modèle, nous ferons varier la profondeur de la nappe pour voir son effet sur la CE mesurée en fonction de l'écartement des bobines.

Les figures 3a et 3b montrent 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 de la nappe a une conductivité de $3,3 \text{ dS m}^{-1}$ sur 1 m d'épaisseur.

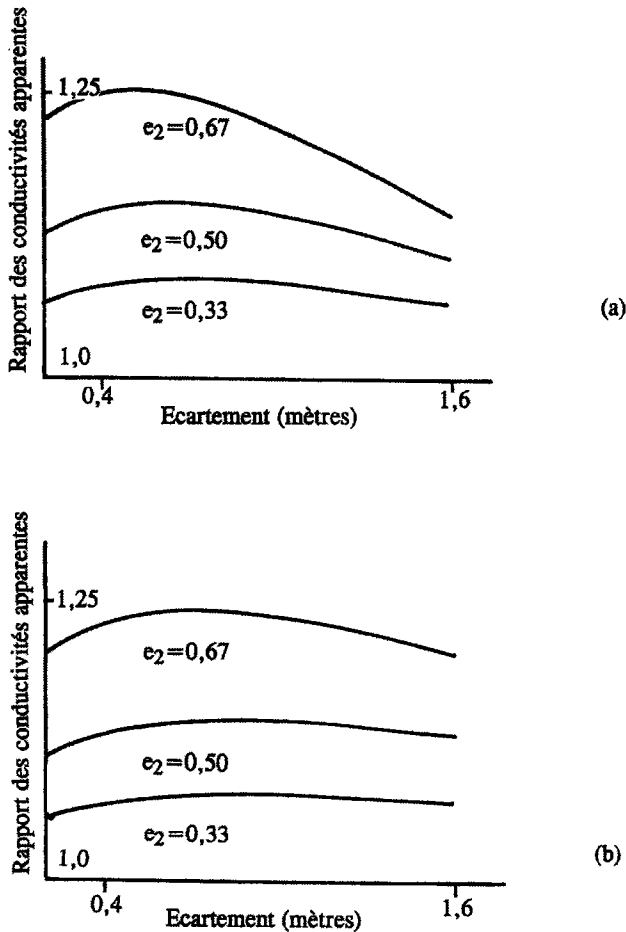


Fig. 3. Rapport des conductivités apparentes en fonction de l'écartement des bobines d'induction: a) mesure CE_V . b) mesure CE_H .

Les courbes montrent que la sensibilité à e_2 est bonne et du même ordre de grandeur pour les deux dispositifs. Elle est toutefois plus dépendante de l'écartement lorsque les axes sont verticaux (CE_V). Dans les deux cas, mais surtout pour CE_V , on a intérêt à prendre un écartement faible, autour de 50 cm, plutôt qu'un écartement métrique pour mettre en évidence les variations de salure à l'intérieur du premier mètre.

Ce type d'appareil étant sensible à la présence d'un bon conducteur même profond, on doit chercher à limiter le poids de la réponse de l'aquifère salé quand son toit est à plus d'un mètre. Les figures 4a et 4b montrent la variation relative de la résistivité apparente en fonction de l'écartement d des bobines.

La conductivité apparente CE_V est plus forte que CE_H , indiquant que le premier mode est plus sensible aux conducteurs profonds. On voit aussi qu'il est impossible d'éliminer complètement la réponse de l'aquifère salé.

Pour $d = 0,60$ m, la mesure CE_V passe de 56 mS m^{-1} pour $h = 1,8$ m à 87 mS m^{-1} pour $h = 1$ m, les 80 cm d'aquifère salé compris entre 1 m et 1,80 m de profondeur contribuent pour 31 mS m^{-1} , soit 36% de la réponse totale. Pour $d = 1$ m (cas de l'EM-38) cette contribution est de 44 mS m^{-1} , soit 39% de la

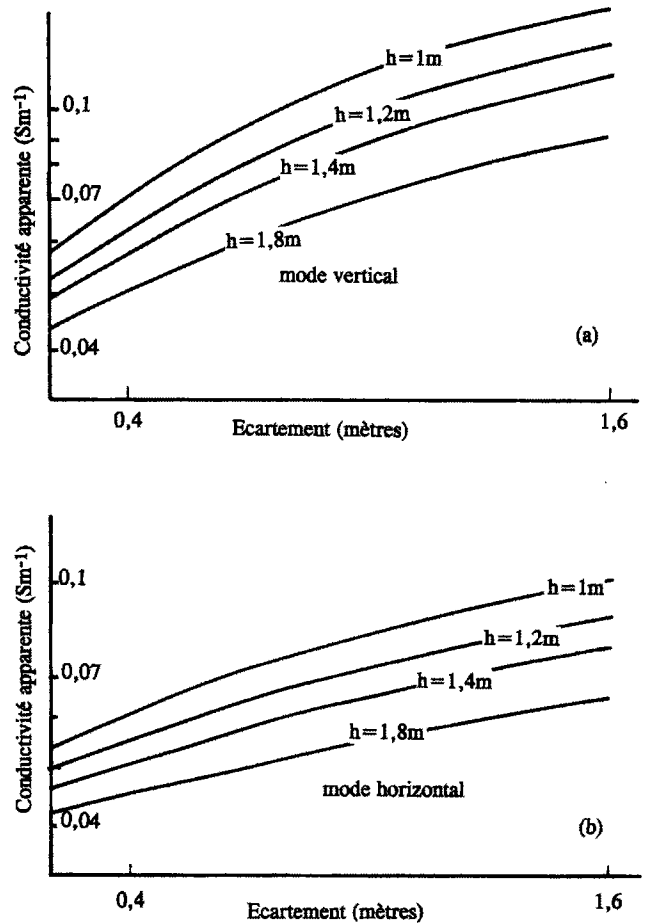


Fig. 4. Conductivité apparente du sol en fonction de l'écartement des bobines: a) mesures CE_V . b) mesures CE_H .

réponse totale. Elle est plus forte, mais pas considérablement.

En mode CE_H , la contribution approximative de l'aquifère salé entre 1 m et 1,80 m est de 20 mS m^{-1} (30% de la réponse totale), pour $d = 0,60$ m et de 28 mS m^{-1} (34% de la réponse totale) pour $d = 1$ m.

En adoptant un écartement court de 60 cm de préférence à un écartement de 1 m, on aura donc une plus grande sensibilité aux variations d'épaisseur de la couche salée à l'intérieur du premier mètre et une réduction légère, mais réelle de l'influence de la nappe phréatique qui est presque toujours présente dans les sols salés.

Les spécifications retenues pour notre appareil sont donc: $d = 0,60$ m et $f = 27,96$ kHz et une configuration coplanaire des bobines émettrices et réceptrices. Un prototype a été construit suivant ces spécifications. L'appareil a été testé sur le terrain pour vérifier la bonne correspondance entre les spécifications théoriques et les mesures en milieu naturel.

RESULTATS ET DISCUSSION

Mesures comparatives

Pour comparer les performances relatives du prototype que

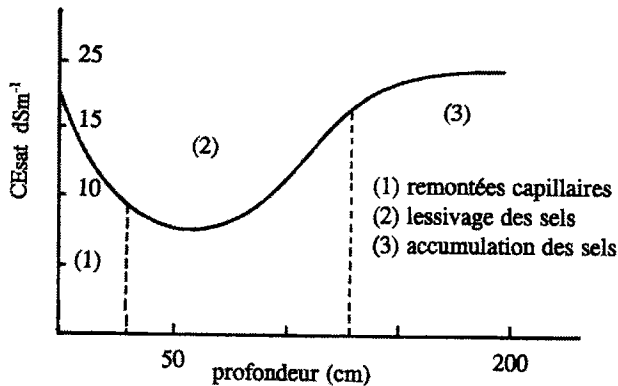


Fig. 5. Profils salins moyens des sols utilisés pour l'étalonnage des mesures de CE à El Guettar.

nous proposons et de l'appareil EM-38, nous avons fait des mesures avec les deux appareils sur 14 profils de sols de bordure de chott, à El Guettar, dont le profil moyen est représenté sur la figure 5. Toutes les mesures CE_H ont été rapportées à une teneur en eau de référence de 20%, comme décrit précédemment.

Ensuite nous avons établi les relations entre $CE_H(\theta)$ et $CE_V(\theta)$ respectivement et la salure moyenne du sol, mesurée sur l'extait saturé entre 0 et 120 cm sur une vingtaine de points de mesure de salure échelonnée entre 1 et 2,5 $S\ m^{-1}$ et de teneur en eau connue (Job 1985; Diaz et Herrero 1992).

Sous réserve qu'une analyse géostatistique élémentaire le justifie, on peut représenter une parcelle soumise à l'irrigation par un profil moyen. Ce profil, le plus probable au sens statistique du terme, est utilisé comme modèle permettant de représenter la dynamique verticale des sels (Webster et Oliver 1990; Job et Hachicha 1991) au sein d'une population de profils homogènes.

Sur la moyenne de 14 profils, situés tous en bordure de chott, et prélevés en mai 1992, on observe la dynamique des sels suivante:

0–50 cm: évaporation et accumulation des sels en surface,

50–100 cm: lessivage interne des sels,

100–150 cm: évacuation des sels dans la nappe phréatique.

En notant CE_T la mesure de conductivité électromagnétique obtenue avec le prototype CS-60 (Tronico), et CE_G la même mesure faite avec l'appareil EM-38 (Geonics) et en gardant leur signification aux indices H et V , on obtient:

$$CE_{H,T}(20) = 20,4\ CE_{sat}(1-100),\ r^2 = 0,940 \quad (3)$$

$$CE_{H,G}(20) = 12,1\ CE_{sat}(1-100),\ r^2 = 0,940 \quad (4)$$

La corrélation a été faite en forçant le terme constant à 0, car la conductivité du gypse seul, principal composant des sols, est négligeable. La différence des coefficients des équations (3) et (4) traduit simplement la sensibilité différente des échelles de lecture de chaque appareil. Ces relations permettent, par une simple mesure de CE de connaître en n'importe quel point dont on peut estimer la teneur en eau, la salure moyenne du premier mètre de sol. La mesure prend moins d'une minute. Il n'y a aucune différence à ce stade entre les deux appareils.

La différenciation des profils salins

Pour l'étude de la dynamique des sels, nous avons comparé l'aptitude respective des deux appareils à différencier les trois couches 0–50 cm, 50–100 cm et 100–150 cm. Pour ce faire, on utilise la propriété, déjà évoquée, qu'à la mesure finale d'être dépendante de la salure propre de chaque couche de sol en fonction de la profondeur. Si nous gardons les limites de 50, 100 et 150 cm que nous nous sommes fixés au début de ce travail, les corrélations entre les mesures et les salures correspondantes sont de la forme:

$$CE_H(20) = aCE_{sat}(0-50) + bCE_{sat}(50-100) + cCE_{sat}(100-150) \quad (5)$$

Plus les rapports b/a et c/a seront faibles, plus importante sera la contribution des premiers 50 centimètres à la mesure. Ces rapports sont indépendants de la sensibilité propre à chaque appareil, mais fortement liés aux paramètres d . Les mesures faites sur les 14 profils permettent d'établir les regressions multiples suivantes:

$$CE_{H,T}(20) = 13,6CE_{sat}(0-50) + 4,6CE_{sat}(50-100) + 0,6CE_{sat}(100-150),\ r^2 = 0,927 \quad (6)$$

$$CE_{H,G}(20) = 4,5CE_{sat}(0-50) + 3,1CE_{sat}(50-100) + 1,8CE_{sat}(100-150),\ r^2 = 0,967 \quad (7)$$

En mode horizontal donc, les rapports b/a et c/a sont respectivement 2 et 10 fois plus petits pour le CS-60 que pour l'EM-38. L'appareil CS-60 rend mieux compte en mode horizontal des niveaux 0–50 cm et 50–100 cm, relativement au niveau plus profond 100–150 cm que l'appareil Geonics. C'était le but recherché dans notre travail. Par contre, nous n'avons pas obtenu de différence significative en mode vertical, pour lequel on obtient:

$$CE_{V,T}(20) = 9,3CE_{sat}(0-50) + 7,2CE_{sat}(50-100) + 4,9CE_{sat}(100-150),\ r^2 = 0,967 \quad (8)$$

$$CE_{V,G}(20) = 9,9CE_{sat}(0-50) + 6,1CE_{sat}(50-100) + 5,4CE_{sat}(100-150),\ r^2 = 0,969 \quad (9)$$

Pour les deux appareils, les coefficients affectés à chaque profondeur diffèrent de moins de 10%, valeur inférieure à l'erreur moyenne de 18% faite dans l'estimation de CE_{sat} à partir de CE pour les sols d'El Guettar (Job 1992). On peut donc considérer que dans ce cas, la contribution de chaque couche de sol est identique pour chaque appareil et qu'en mode vertical les deux appareils ont des profondeurs d'investigation comparables.

CONCLUSIONS

Nous avons d'abord montré dans notre étude que dans la représentation de la salure des sols irrigués, le choix de la

méthode n'était pas indépendant du choix de l'échelle de mesure. L'étude de la dynamique des sels à l'échelle de la parcelle ou du périmètre irrigué requiert l'usage d'une variable permettant de séparer la salure du premier mètre de la salure sous-jacente. Nous avons formalisé partiellement la réponse du conductivimètre en fonction de la salure du sol intégrée sur 120 cm, de la teneur en eau des sols et, partiellement de la texture. L'effet de la texture reste à modéliser en fonction de la porosité et de la surface de contact sol-solution du sol.

Nous avons défini les spécifications, fabriqué et testé sur le terrain un prototype d'appareil de mesure de la salure globale du sol, basé sur le principe de la conductivité électromagnétique, avec des bobines écartées de 0.6 m seulement, plus petit et plus maniable que les appareils existants. L'étude théorique montre qu'il doit être plus sensible à la salure de la tranche 0-100 cm, tout en étant un peu moins sensible à la salure de la nappe phréatique.

L'étude expérimentale des sols de l'oasis d'El Guettar en Tunisie confirme qu'en mode horizontal au moins, la sensibilité aux couches profondes est réduite. Cette propriété permet de suivre la désalinisation des sols salés sous irrigation, mode de réhabilitation important des sols irrigués des zones semi-arides et arides.

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cet article ont été rendus possibles grâce à l'aide du Ministère de la Recherche et de la Technologie (Décision d'aide n° 88 LO467), de l'aimable collaboration de R.D. Beaussillon (Centre de Recherches de Garchy, CNRS) pour la conception de l'appareil, de J.Y. Loyer (ORSTOM) pour les essais de terrain, de Mrs J.M. Jamot et O. Renou (Sté Tronico, 85660 St Philbert de Bouaine, France) pour la réalisation et la construction de l'appareil. Que tous soient remerciés.

La rédaction de l'article a été réalisée dans le cadre du protocole d'accord GEOFCAN entre l'INRA, l'ORSTOM, le BRGM et l'Université Paris 6.

Archie, G. E. 1942. Electrical resistivity as an aid in core analysis determination. *Trans AIME* **146**: 54–62.

Ben Marzouk, M. 1982. Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de Gafsa Sud et d'El Guettar. Thèse de 3ème cycle, Univ., Paris-Sud, 2 tomes, 7 cartes, 364p.

Boivin, P., Brunet, D. et Job, J. O. 1988. Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés: une méthode rapide et fiable. *Cahiers Orstom, série Pédologie*, Vol. XXIV, 1: 39–47.

Darricau-Beucher, H. 1981. Approche géostatistique du passage des données de terrain aux paramètres des modèles en hydrogéologie. Thèse doc., Ing., ENSP, Toulouse, 119 p.

De Jong, E., Ballantyne, A.K., Cameron, D.R. et Read W.L. 1979. Measurement of Electric Conductivity of Soils Using an Electrical Induction Probe to Aid in Salinity Survey. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **48**: 288–291.

Diaz, L. et Herrero, J. 1992. Salinity estimates in irrigated soils using electromagnetic induction. *Soil Sci.* **2**: 151–157.

Gascuel-Oudou, Ch. 1984. Applications de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol. Thèse doc., Ing., ENSM, Paris, 235 p.

Hachicha, M. et Job, J.O. 1994. Suivi de la salure des périmètres irrigués de Tunisie par conductivimétrie électromagnétique. Rapport final, Direction des Sols/Orstom, 87 p.

Herrero, J. et Bercero, A., 1991. La salinidad en el nuevo regadio de Quinto (Zaragoza). *Suelo y planta* **1**: 585–602.

Job, J. O. 1985. Conductivimétrie électromagnétique: étalonnage sur les sols salés de la Basse Vallée de L'Euphrate (Syrie). Centre ORSTOM de Montpellier, 9 p.

Job, J. O. 1992. Les sols salés de l'oasis d'El Guettar (Sud tunisien). Thèse, Univ., Montpellier II, 150 p.

Job, J.O. et Hachicha, M. 1991. Notion d'échelle et variabilité spatiale de la salure des sols. Séminaire ORSTOM/IFREMER, "Séminfor 4", 11–13 Sept., Brest, 3p.

Job, J. O., Loyer, J. Y. et Ailoul, M. 1987. Utilisation de la conductivimétrie électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. XXIII, **2**: 123–131.

McNeill, J. D. 1980. Electrical conductivity of soils and rocks, Technical note n° TN-5, Geonics Ltd, Mississauga, ON. 15 p.

Pleijzier, L. K. 1990. Proceedings of an International Workshop on the Laboratory Methods and Data Exchange Programme. Tech. paper n° 13, ISRIC, Wageningen. 150 p.

Rhoades, J. D. et Corwin, D. L. 1981. Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **45**: 255–260.

Rhoades, J. D., Raats, P. A. C. et Prather, R.-J. 1976. Effects of liquid phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **40**: 651–655

Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture handbook n°60*, US Department of Agriculture, Washington, DC. 159 p.

Robinson, R. A. et Stokes, R. H. 1959. Electrolytes solutions. Butterworth ed., Londres.

Sassi, B. M. 1965. Contribution à l'étude de la Sebkhia Tejimane et du Chott El Guettar. Thèse, Univ., Paris, 117 p.

Szabolcs, I. 1979. The limitation of potential yield by salinity and alkalinity of soils with particular reference to mediterranean region. *Proc 14th colloq. of the Int. Potash Institute*, Sevilla, 101–123

Tabbagh, A. 1974. Définition des caractéristiques d'un appareil électromagnétique classique à la prospection archéologique. *Propezioni Archéologichi* **9**: 21–23.

Tabbagh, A. 1986. What is the best coil orientation in the Slingram electromagnetic prospection method? *Archaeometry* **28**: 185–196.

Vachaud, G. 1993. Quelques réflexions sur la caractérisation et le fonctionnement hydrique des sols. Actes des journées du Programme Environnement du CNRS. CNRS/ORSTOM, Lyon 13–15 Janvier.

Voltz, M. 1986. Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en milieu alluvial. Thèse Doc. Ing., ENSA, Montpellier, 198 p.

Wait, J. R. 1958. Induction by an oscillatory magnetic dipole over a two layer ground. *Appl. Sci. Res.* **87**: 73–80.

Webster, R. et Oliver, M. A. 1990. Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford University press, New York, NY. 316 p.

Job Jean-Olivier, Tabbagh A., Hachicha M.

Détermination par méthode électromagnétique de la concentration en sel d'un sol irrigué.

Canadian Journal of Soil Science, 1995, 75 (4), p. 463-469. ISSN 0008-4271