# Étude expérimentale de la conductivité électrique globale des sols

Application à l'estimation de leur salinité (1)

Mohamed EL OUMRI (2), Jacques VIEILLEFON (3)

(2) Pédologue au Service d'Écologie (INRA-Rabat)
(3) Pédologue à la Mission O.R.S.T.O.M. à Tunis

### Résumé

Après avoir discuté de la représentativité de la conductivité électrique globale comme mesure indirecte de la conductivité de la solution du sol, il est montré à travers diverses expériences, portant sur des sols variés salés, alcalins et gypseux de différentes textures, que ce type de mesure peut également renseigner sur la teneur pondérale en sels du sol, dans une assez large gamme d'humidité, variable selon la nature du sol et la composition de sa solution.

Mots-clés : Conductivité électrique — Sols salés — Méthodologie.

#### Abstract

### EXPERIMENTAL STUDY OF GLOBAL ELECTRICAL CONDUCTIVITY FOR DETERMINING SOIL SALINITY

To test the suitability of surveying the soil-salinity evolution in the field, firstly on the soil solution conductivity, and secondly on the salt percentage, by the bulk electrical conductivity, we demonstrate, across a lot of laboratory experiments using several types of saline, alkali and gypsiferous soils, with differents textures, that there is some possibilities of controling simply the net total dissolved salts, providing the measures are made in selected moisture ranges.

KEY WORDS : Electrical conductivity — Saline soils — Methodology.

# INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années la conductivité électrique des extraits de sol par l'eau est utilisée comme diagnostic de la salinité des sols, ainsi que pour le classement d'aptitude des eaux pour l'irrigation. L'extrait de pâte saturée, ou *extrait saturé*, sert de référence générale (USSL 1954), alors que les extraits obtenus avec des rapports eau/sol plus élevés, plus faciles d'emploi, restent sujets à caution et doivent être étalonnés par l'extrait saturé (SERVANT, 1975).

Bien que parfaitement au point pour les analyses de séries cette technique est très lourde par suite des nombreux prélèvements à effectuer, aléatoire en raison de l'hétérogénéité spatiale des sols et de plus destructive, ce qui interdit de l'employer dans certains essais en place.

Certains chercheurs ont donc fait appel à des techniques plus maniables et plus répétitives, parmi

<sup>(1)</sup> Cet article résume une partie des résultats obtenus par le premier auteur au cours de recherches menées dans le cadre d'une thèse de 3° Cycle soutenue à l'Université de PARIS VII le 29 octobre 1981.

lesquelles la mesure de la conductivité apparente (EC<sub>a</sub> de RHOADES & al., 1971) (1) par la méthode des sondages électriques s'est beaucoup développée dans la dernière décennie.

# 1. MESURE ET SIGNIFICATION DE LA CON-DUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE GLOBALE

On doit à l'équipe de chercheurs de Riverside (USA), sous la direction de J. D. RHOADES, l'extension de cette méthode bien connue des géophysiciens à l'étude de la salure des sols. En géophysique, elle est en effet employée à grande échelle pour la détermination de la profondeur et de la nature des couches géologiques de résistivité différente ou leurs altérations (ALBOUY *et al.*, 1970), en hydrogéologie pour la détermination de la profondeur et de la salure des nappes. On peut citer également quelques applications antérieures dans les sols pour la mesure de la teneur en eau (SHEA & LUTHIN, 1961).

La méthode des sondages électriques, que nous avons mise en œuvre, est donc basée sur les mêmes principes que ceux qui sont à l'origine des sondages électriques réalisée en géophysique par la méthode du quadripôle dite : « Wenner » ou « Schlumberger ».

RHOADES et INGVALSON (1971), ont adapté cette méthode à l'étude des sols halomorphes en utilisant des dispositifs miniaturisés de « Wenner » que nous appelerons « Mélhode horizontale ».

En 1975, les mêmes auteurs ont proposé une autre technique de mesure électrique de terrain, utilisant une sonde électrique et dénommée « Méthode verlicale ».

En 1977, un nouveau dispositif était conçu par l'équipe du laboratoire de Riverside, pour mesurer la conductivité électrique apparente au laboratoire. Il a été appelé « *Cellule cylindrique* ».

Ces trois dispositifs ont été testés sur plusieurs types de sols halomorphes en Tunisie et au Maroc. Avant de présenter les résultats de ces mesures, il est nécessaire de préciser les principales caractéristiques de chacune de ces méthodes, ainsi que les conditions de leur utilisation sur le terrain et au laboratoire.

# 1.1. Principe de la mesure

La résistivité globale (ou « apparente ») d'un volume de sol est le produit de la résistance apparente  $\begin{pmatrix} V \\ I \end{pmatrix}$ par un facteur géométrique (k), qui dépend de l'espacement et de la disposition des électrodes dans le cas de la méthode du « quadripôle horizontal », ou d'une constante prédéterminée dans le cas de l'utilisation d'une « sonde électrique » (quadripôle vertical) ou d'une « cellule cylindrique ».

### 1.2. Réalisation

# 1.2.1. Méthode horizontale (Wenner)

# Méthodologie

Pour mesurer la résistance apparente avec le quadripôle horizontal, on injecte un courant électrique d'intensité I à l'aide de deux électrodes extérieures (A, B) symétriques par rapport au centre du dispositif (O), et on mesure la différence de potentiel (V) entre les deux électrodes intérieures (M, N), également symétriques par rapport au centre (O) de telle façon que AB = 3 MN (fig. 1).

On estime selon RHOADES (1975), que la profondeur de prospection est pour le dispositif Wenner de AB/3.



<sup>(1)</sup> Nous avons préféré à ce vocable le terme de « conductivité électrique globale », puisqu'il s'agit bien d'une véritable conductivité électrique et qu'elle intègre les différentes contributions des phases liquide et solide du sol.







FIG. 3. - Schéma de la profondeur d'investigation

Le volume de sol prospecté est fonction de l'espacement des électrodes, il est égal à :

 $V = \pi a^3.$ a = AB/3.

D'après la formule précédente, le volume prospecté augmente au fur et à mesure que (a) augmente. Ainsi, lorsque les électrodes d'injection du courant sont proches l'une de l'autre, les lignes équipotentielles du champ électrique sont également proches, et les couches du sol prospectées sont celles de surface. Par contre quand l'espacement des électrodes augmente, la circulation du courant se réalise de plus en plus profondément et le volume prospecté est plus grand (fig. 2 et 3).

La résistivité apparente (pa) est exprimée par la formule suivante : (les grandeurs sont données en système CGS).

 $\begin{array}{ll} \rho a = 2 \ \pi \ {\rm R} \ {\rm a}. \\ {\rm a} &= {\rm R} \acute{\rm s} {\rm is stivit} \acute{\rm e} \ {\rm apparente} \ {\rm en} \ \Omega / {\rm m}. \\ {\rm R} &= {\rm R} \acute{\rm s} {\rm is stance} \ {\rm en} \ \Omega. \end{array}$ 

a = AB/3 en m.

Posons :

 $K = 2 \pi a$  (facteur géométrique), il vient  $\rho a = KR$ .

A partir de la mesure de la résistance (R), il est commode d'exprimer la résistivité apparente ( $\rho a$ ) en terme de conductivité électrique globale (CEG) par la relation suivante :

$$CEG = \frac{10}{22} = \frac{10}{KB}$$

CEG = conductivité électrique globale en mmhos/ cm.

 $\rho a$  = résistivité électrique apparente en  $\Omega/m$ .

Cette méthode permet donc de mesurer, pour chaque écartement « a » des électrodes, une CEG cumulée entre la surface et une profondeur supposée égale à « a ». On notera cependant que l'hypothèse selon laquelle la profondeur prospectée par le sondage électrique correspond à l'écartement des électrodes s'avère très controversée, par suite de l'influence probable de la croissance rapide du volume prospecté par le courant (fig. 3) et de l'hétérogénéité verticale et aussi horizontale des matériaux (NADLER, 1980). Ce problème ne sera pas traité ici.

### Calcul de la conductivité par tranches de sol

Dans la méthodologie classique des sondages électriques l'interprétation de la courbe de variation de la résistivité cumulée en fonction de l'écartement des électrodes d'injection de courant (méthode Schlumberger) se fait à l'aide d'abaques précalculées ou selon une méthode graphique qui s'en déduit (MEYER DE STADELHOFEN, 1979), pour obtenir l'épaisseur et la résistivité propre des diverses couches traversées.

Dans l'application à la salure des sols, la rapidité et la relative continuité des variations exclut l'emploi de telles méthodes. Aussi, pour estimer la conductivité propre d'une tranche de sol donnée, à partir des mesures avec la méthode du quadripôle « horizontal », on pourrait, en s'inspirant des travaux de BARNES (1954), considérer que les strates traversées par le courant réagissent comme des résistances « en parallèle ». Ainsi, pour connaître la conductivité de la tranche 10-20 cm, connaissant les valeurs de la résistivité pour les tranches 0-10 cm et 0-20 cm, on pourrait écrire :

 $1/R_{0-20} = 1/R_{0-10} + 1/R_{10-20}$ 

 $R_{0-10}$  et  $R_{0-20}$  étant les résistances mesurées aux profondeurs estimées 10 et 20, donc avec un écartement correspondant des électrodes (méthode Wenner).

D'où l'on tire, puisque  $K = 2 \pi a$  :

 $2 \pi \times 20/\rho_{0-20} = 2 \pi \times 10/\rho_{0-10} = 2 \pi \times 10/\rho_{10-20}.$ 

et  $2 CE_{0-20} = CE_{0-10} + CE_{10-20}$ .

ou  $CE_{10-20} = 2 CE_{0-20} - CE_{0-10}$ .

Pour toute tranche de sol située entre les niveaux  $n.a_{cm}$  et (n+1)  $a_{cm}$ , il vient :

$$CE_{na/(n+1)a} = (n+1) CE_{(n+1)a} - n.CE_{n.a}$$

ou encore, d'une manière plus générale :

$$CE_{z/z'} = \frac{z'.CE_{z'} - z.CE_z}{z' - z}$$

Malheureusement ce mode de calcul s'avère inutilisable dès que la profondeur dépasse quelques dizaines de cm, pour des raisons semblables à l'objection présentée plus haut (NADLER, op. cit.).

Il s'avère donc que la méthode du quadripôle « vertical », bien que plus laborieuse d'emploi, peut seule renseigner utilement sur la conductivité globale de tranches successives (EL OUMRI, 1978)

### 1.2.2. Méthode verticale

Une sonde verticale a été réalisée d'après les normes fournies par RHOADES *et al.* (1977). La prospection électrique que l'on réalise avec cette sonde est appelée « *Méthode verticale* », du fait qu'on enfonce progressivement la sonde dans le sol suivant une verticale. Le principe de la mesure est le même que pour «*la méthode horizontale*», mais au lieu d'employer des électrodes sous forme de piquets en acier inoxydable ou en bronze, on utilise quatre « anneaux » (en bronze), d'un diamètre de 2,9 à 3 cm, d'une hauteur de 0,4 cm, ces électrodes en anneaux sont fixées sur la tête d'une « canne », et sur chaque anneau est soudé un fil électrique de faible diamètre.

Par cette méthode, on mesure la résistance apparente de différentes couches du sol puis on multiplie cette résistance apparente par une constante (K'), appelée constante de la sonde, et qui est déterminée empiriquement au laboratoire, en plongeant la sonde dans différentes solutions salines de conductivité électrique connue, et en mesurant la résistance de chacune de ces solutions.

Connaissant la conductivité et la résistance apparente d'une solution, on a :  $K' = CE_{25^{\circ}} \times R_{25^{\circ}}$ .

Dans notre cas, cette constante K' est égale à 20, valeur proche de celle qui avait été déterminée au laboratoire de Riverside par RHOADES (1975) (K' = 19,5).

Une fois la constante K' ainsi déterminée, la conductivité électrique globale ramenée à 25 °C est donné par la formule suivante :  $CEG_{25^\circ} = K' \times ft$ .

- $CEG_{25^{\circ}} = conductivité électrique globale à 25 °C en mmhos/cm.$
- ft = facteur de correction de la température.
- K' = constante de la sonde électrique.

### 1.2.3. Cellule cylindrique

« La cellule cylindrique » est un troisième dispositif de mesure de la conductivité électrique apparente, qui est utilisé au laboratoire.

Elle est constituée d'un cylindre de 8,5 cm de diamètre et de 4 cm de hauteur, fermé à sa base par un fond amovible. Les électrodes sont alors fixées de deux manières :

— soit à mi-hauteur du cylindre, elles sont dans ce cas régulièrement espacées suivant un angle de 45°, donc 8 électrodes autour du cylindre (fig. 4); pour chaque mesure on utilise 4 électrodes, ce qui permet de réaliser 8 déterminations de la résistance apparente pour un même échantillon, dont on calcule la moyenne;

— soit sur le seul couvercle (4 électrodes), pour réaliser la mesure on place le couvercle sur le cylindre de façon à ce que les quatre électrodes soient enfoncées dans le sol.



FIG. 4. - Cellule cylindrique à huit électrodes

La constante (K') de ces cellules cylindriques est déterminée comme précédemment (cas de la sonde verticale), et les valeurs obtenues pour différents types de cylindres se situent entre 13 et 15.

# 1.3. Rapports entre la CEG et la conductivité de la solution du sol

Comme on l'a vu dans l'introduction, le principal objectif de la nouvelle méthode était de substituer à la mesure de la conductivité électrique de l'extrait de saturation, procédure longue et coûteuse, une procédure rapide utilisable « in situ ». L'établissement des relations entre ces deux types de mesures constitue en quelque sorte un étalonnage de la nouvelle méthode.

Les résultats obtenus sur divers sols halomorphes de Tunisie montrent que dans une gamme d'humidité allant de la saturation à la capacité au champ, on obtient généralement de bonnes relations. Par exemple sur le site d'El Habibia (sol salé légèrement alcalin de la basse vallée de la Medjerdah), l'étalonnage avec des solutions de concentrations différentes, à saturation, a donné, pour l'horizon superficiel (0-20 cm) :

 $CE_{es} = 2,16 CEG - 1,92 r = 0,980.$ 

Pour le même sol, sur un profil voisin, étalonné à l'aide de plusieurs campagnes de mesures à différentes humidités, on a obtenu :

 $CE_{es} = 2,15 CEG - 1,30 r = 0,897.$ 

à condition de ne retenir que les mesures faites en sol suffisamment humide.

La différenciation due à la texture et à l'alcalinité des sols est illustrée par les valeurs que prennent la pente et l'ordonnée à l'origine des droites de régression obtenues, par exemple :  $\rm CE_{es}=4,8~\rm CEG \longrightarrow 1,27~(r=0,978)$  pour un sol salin sableux.  $\rm CE_{es}=2,15~\rm CEG \longrightarrow 1,30~(r=0,897)$  pour un sol salin argileux.  $\rm CE_{es}=1,34~\rm CEG \longrightarrow 14,45~(r=0,920)$  pour un sol à alcali argileux.

Nous voyons que la pente décroît quand on passe des sols sableux aux sols argileux et que l'ordonnée à l'origine n'est importante que pour le sol à alcali. Cette dernière serait en relation avec la garniture cationique ou la surface d'échange du sol.

Ces relations ne sont pas spécifiquement améliorées si l'on remplace la conductivité de l'extrait de saturation¶par la conductivité de la solution du sol calculée à partir du rapport entre la teneur en eau correspondant à l'instant de la mesure de la CEG et le pourcentage de saturation de la pâte. Par contre les résultats sont moins bons si l'on utilise un extrait au 1/5 (EL OUMRI 1981). La cause pourrait en être la solubilisation de sels peu solubles, comme le gypse, dans les extraits dilués, phénomène qui peut déjà se produire dans la pâte saturée d'ailleurs.

### 1.4. Interprétation de la conductivité électrique globale

Les études de GUPTA et HANKS (1972) ayant montré que la conductivité globale variait en fonction de la teneur en eau, suivant une relation de la forme

 $\begin{array}{ll} (1) \ CEG/CE_{ss} = a.\theta + b \ CEG = conductivité globale. \\ CE_{ss} = conductivité de la solution \\ du sol. \\ \theta = teneur en eau. \end{array}$ 

RHOADES & al. (1976) recherchèrent la signification physique des facteurs a et b. Le facteur b étant indépendant de la teneur en eau dans la relation (1) fut attribué à une conductivité de surface et donc caractéristique de la phase solide, liée à la garniture du complexe. La conductivité électrique globale est donc présentée comme la somme de la conductivité due à la phase liquide, dépendant de la teneur en eau et de sa conductivité, et de cette conductivité de surface :

(2) 
$$CEG = CE_1 + CE_s$$
.

Prenant en compte que la conductivité de la phase liquide est non seulement proportionnelle à la teneur en eau ( $\theta$ ) et à sa conductivité, mais probablement à la répartition de cette eau dans des pores de formes et de dimensions différentes, on écrit :

(3) 
$$CEG = CE_{ss}.\theta.T + CE_{s}.$$

où « T » est un coefficient empirique de transmissivité.

Assimilant la porosité ouverte à un système de conducteurs où la teneur en eau à saturation est égale au rapport des volumes des pores au volume total soit

Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., vol. XX, nº 2, 1983: 91-108.

 $\theta_{\text{sat}} = \S^{\text{p}} . 1_{\text{p}} / \S . 1.$ 

- avec  $\S_p$  = section des pores.
  - $1_p = longueur des pores.$
  - $\S =$  section du sol.
  - 1 =longueur de l'échantillon de sol.

ils trouvent pour la résistivité de la phase liquide :

 $R_1=\rho_1.1\rho/\S_p.1/\gamma=1/CE_{ss}.1_p/\S_p.1/\gamma$  où  $\gamma$  est la viscosité.

D'où, par réarrangement.

 $\begin{array}{ll} (4) \ \ CE_{ss} \,=\, (1/\gamma) \,.\, (1_p/\$_p) \,.\, (1/R_1) . \\ &=\, 1/\theta \,.\, [(1/A \,.\, (1_p/1)^2] \,.\, 1/A(1/R_1) . \end{array}$ 

où  $1_p/1$  représente la tortuosité, 1/A un coefficient géométrique lié au volume de sol et l'expression  $1/A \cdot (1_p/1)^2 l$ , inverse du coefficient «T».

D'où l'on tire pour la phase liquide  $1/R_1 = CE_{ss}.\theta.T$ et pour la conductivité globale :  $CEG = CE_{ss}.\theta.T + CE_s$ .

On peut donc déterminer  $CE_s$  en extrapolant une telle relation pour  $CE_{ss} = 0$ , sur une courbe  $CEG = f(CE_{ss})$ , à  $\theta$  constant.

De même on calcule T en étudiant la variation du rapport  $CE_1/CE_{ss}$ . en fonction de  $\theta$ , soit  $(CEG - CE_s)/CE_{ss}$ . $\theta = T = a.\theta + b.$ 

ce qui donne la forme générale de l'équation

(5) 
$$CEG = CE_{ss} \cdot \theta(a \theta + b) + CE_{s}$$
.

Les valeurs trouvées par les chercheurs de Riverside pour différents sols sont telles que « a » varie de 1,3 pour un sol sableux à 2,1 pour un sol argileux, « b » restant légèrement supérieur à -- 0,2.

On remarquera cependant que cette expression n'est valable au départ que pour un état proche de la saturation, où  $\theta$  varie peu.

### 1.5. Relation entre la CEG et la teneur pondérale en sels du sol

Si l'on reprend l'équation générale de la CEG selon RHOADES & al, on voit que, d'une manière rigoureuse, la différence entre la CEG et la conductivité des surfaces d'échange ( $CE_s$ ) est proportionnelle entre autres au produit ( $CE_{ss} \times \theta$ ). Or ce dernier produit est, dans certaines conditions, directement proportionnel à la teneur en sels calculée du sol, par exemple avec un coefficient multiplicateur moyen de 0,64 (USSL 1954).

Si donc on néglige l'effet du facteur de transmission « T », dont on verra plus loin qu'il ne faut pas trop s'en exagérer l'importance, on peut s'attendre à ce que la mesure de la CEG, au moins pour les sols où la CE<sub>s</sub> est faible, où donc la contribution de la phase liquide est prépondérante, donne une estimation valable de la teneur en sels du sol. En effet, sur une longue série de mesures à El Habibia (EL OUMRI, 1978), la comparaison de la CEG avec le produit ( $PS \times GE_{es}$ ), soit pourcentage de saturation de la pâte par conductivité de l'extrait, fournit une corrélation très significative exprimée par :

TSC % = 0,1004 CEG - 0,034 r = 0,902avec TSC % = Teneur en sels calculée.

Il en a été de même pour un sol plus alcalin de la station de Cherfech, peu éloigné d'El Habibia, étudié sur un monolithe, où l'on a obtenu (VIEILLE-FON-1982) :

TSC % = 0.0652 CEG + 0.854 r = 0.984,

et pour un sol de périmètre gypseux du sud (moyenne de 8 stations), avec

TSC % = 0.113 CEG+0.090 r = 0.934.

On voit que le terme résiduel n'est important que pour le sol alcalin. En l'absence de traitements particuliers ayant pour but de combattre cette alcalinité, on voit que la méthode peut encore être efficace pour rendre compte des variations éventuelles du stock de sel du sol.

Les relations présentées ci-dessous entre la CEG et la teneur (pondérale) en sels semblent légèrement en contradiction avec l'interprétation de RHOADES el al.

En effet, cette teneur en sels semble être uniquement proportionnelle au produit ( $CE_{ss}$ . $\theta$ ), ceci n'étant bien sûr valable que dans le cas où tous les sels aisément solubles sont dissous, et où la porosité n'est pas fortement modifiée par des phénomènes de gonflement-retrait, notamment quand la teneur en eau du sol tombe au-dessous d'un seuil à définir.

On sait par ailleurs que RHOADES *et al.* font intervenir dans l'expression de la CEG, non seulement ce produit, mais également un facteur de transmissivité (T) variable avec la teneur en eau, sous la forme de la relation empirique :  $T = a.\theta+b$ .

Or, si l'on reprend l'expression physique de ce facteur T (cf. I-D), on remarque qu'il varie en fonction du rapport entre la longueur des pores et l'épaisseur de la couche de sol prospectée par le courant de la mesure électrique.

La longueur des pores est naturellement, hors les cas de gonflement-retrait important, une valeur constante et caractéristique du type de sol et de sa porosité. En réalité, le facteur qui devrait entrer en ligne de compte est plutôt la proportion relative de pores remplis d'eau  $(1_p^*)$ , qui par conséquent sont susceptibles de conduire le courant électrique, à la porosité totale. On conçoit donc que lorsque  $\theta$  diminue, ce rapport  $1^{p^*}/1$  diminue aussi, ce qui, selon la relation (4) établie par RHOADES *et al.*, entraînerait une augmentation de T, évidemment contraire à la relation empirique précédente.

On peut donc tirer de ceci et des résultats précédents deux conclusions :

— la première est que la formulation de T est inexacte;

— la seconde est que probablement des effets plus complexes entrent en jeu, prenant en compte non seulement les variations de la teneur en eau et de sa conductivité mais aussi des transformations structurales ainsi que des échanges avec le complexe absorbant, modifiant la garniture cationique et donc la conductivité de surface  $CE_s$ ; on peut alors penser que ces effets complexes sont très fortement influencés par les variations de  $\theta$  et se trouvent modulés en sein d'un facteur global, caractéristique de chaque sol, et gouvernant la relation entre le produit ( $CE_{ss}$ . $\theta$ ), que l'on sait proportionnel à la teneur en sels du sol, et la CEG, ainsi qu'on l'a vu précédemment. Les expérimentations présentées ci-après sont venu appuyer ce point de vue.

### 2. EXPÉRIMENTATION

### 2.1. Procédure

Partant de l'hypothèse selon laquelle le produit  $(\theta, CE_{ss})$  reste constant au cours de la concentration des solutions du sol sous l'influence de l'évaporation, entre la saturation et un seuil d'humidité minimale à définir, il fallait vérifier que dans le même temps la CEG restait constante. En effet dans ce cas l'échantillon perd exclusivement de l'eau pure, ce qui provoque corrélativement l'augmentation de la conductivité de la solution du sol. On fait bien sûr dans un premier temps abstraction de phénomènes d'échange avec le complexe ou de précipitation différentielle des sels. C'est l'objet de la première série d'expériences.

Partant ensuite du même état initial, le sol n'est plus soumis à l'évaporation, mais à des pressions croissantes visant à expulser progressivement la solution du sol, dont la composition doit rester théoriquement constante. Donc, si alors  $CE_{ss}$  reste constante, le produit ( $\theta$ . $CE_{ss}$ ) diminue et l'on doit s'attendre à une diminution de la CEG.

# 2.1.1. Évaporation contrôlée

On utilise « la cellule cylindrique » décrite dans le premier chapitre. Chaque « cellule » est fermée à sa base pour que l'eau d'imprégnation ne s'écoule pas au cours de la préparation de la pâte saturée, et ceci plus particulièrement pour les sols filtrants à texture légère. Le poids de terre fine utilisée et le poids du cylindre sont déterminés. On sature cette terre par une solution saline *(la saturation correspond à la limite de liquidité)* et on note le volume de la solution utilisée.

Après la saturation du sol, on pèse le cylindre et le sol saturé. Une heure après (temps estimé nécessaire pour obtenir un contact suffisant entre le sol et l'eau d'imprégnation), on effectue la première mesure de la conductivité électrique apparente aux bornes de la cellule cylindrique.

L'évaporation se fait à l'air libre à la température du laboratoire (25 à 30 °C) et chaque matin et soir on note la perte en poids d'eau par pesée, et on mesure la conductivité électrique apparente jusqu'au moment où le sol est intensément desséché.

La durée de desséchement est variable selon la texture de l'échantillon utilisé : elle est courte pour les sols sableux et plus longue pour les sols argileux.

A la fin de la manipulation, on retire la terre du cylindre. On la sèche de nouveau pour déterminer la conductivité électrique de l'extrait au 1/5, le bilan ionique et le complexe absorbant.

# 2.1.2. Extractions successives de l'eau saturante à la presse à membrane

La cellule cylindrique utilisée dans cette seconde procédure est de même diamètre que celle utilisée pour l'évaporation contrôlée. Mais la hauteur a été diminuée de moitié, pour qu'elle soit adaptée à la hauteur disponible dans la presse à membrane. (hauteur entre les deux plateaux en céramique de la presse).

Une fois que la cellule cylindrique est placée sur le plateau de la presse, on sature le sol par une solution saline de composition ionique connue.

Après un contact suffisant entre le sol et la solution saturante, on note le volume utilisé pour la saturation de l'échantillon et on procède à la première mesure de conductivité électrique apparente.

Les extractions successives sont réalisées à des pressions différentes. Généralement on applique une première pression d'une atmosphère, on recueille l'extrait, dont on mesure le volume, puis on retire le plateau de la presse et on mesure la conductivité électrique apparente après cette diminution de la teneur en eau, sous une pression de l'atmosphère.

On remet ensuite le plateau dans la presse et on applique une pression de 16 atmosphères. On recueille l'extrait comme dans la première extraction, et on effectue la mesure de la CEG à ce taux d'humidité correspondant au pF 4, 2.

A la fin des extractions on retire la terre des cellules cylindriques : une partie est séchée à l'étuve à la température de 105 °C pour contrôler le pour-

Echantillons	Sol.1	Sol.2	Sol.3	So1.4	Sol.5
El Habibia (10-35 cm)	χ*	X*	X*	Х*	x
Zagora I (0-5 cm)	-	-	X*	X*	x*
Zagora II (50-90 cm)	X	X*	-	-	-
Isen (0-10 cm)	-	χ*	*	*	X*
Soukra (10-30 cm)	X	X	-	-	-
Tetouan I (60-90 cm)	-	X*	-	-	-
Tetouan II (90-120 cm)	X¥	-	-	+	-
Haouz (60-70 cm)	-	- 1	X*	x*	-
Mateur (20-40 cm)	-	x*	-	-	X¥.

TABLEAU I

Nesume des experiences reansee	Résumé	des	expériences	réalisées
--------------------------------	--------	-----	-------------	-----------

\* Extraction à la presse.

X Évaporation contrôlée.

TABLEAU II									
Caractéristiques	physico-chimiques	des	sols	ėtudi <b>és</b>					

N°	Anal	yse gra	nulométi	ique :	: Cations échangeables en mé /100, et pH						Bilan ionique (mé /100) et conductivité électrique(mmhos/cm)								
ľ	A %	L%	SF %	SG %	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	к+	т	<sup>pH</sup> eau	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	C1-	\$04	HC03	CE 1/5	CE pâte	CEG
1	48,0	43,9	7,8	0,2	22,6	8,3	3,2	0,3	34,3	8,1	1,6	0,9	8,9	7,4	2,8	0,5	1,6	12,1	4,2
2	51,1	42,1	5,6	0,2	18	8,6	3,2	0,8	30,7	8,1	1,1	1,0	10,5	10,2	2,2	0,6	1,9	15,0	5,3
3	19,7	33,6	39,6	7,0	12,5	6,0	0,4	0,2	19,1	8,4	1,3	1,8	9,3	8,9	4,4	0,4	1,9	12,0	1,8
4	5,0	29,4	62,7	3,4	10,1	2,7	1,1	0,4	14,2	9,1	0,0	0,5	0,8	0,7	0,1	0,4	0,2	4,5	0,5
5	42,1	30,6	26,7	0,5	16	6,0	1,1	1,22	24,1	8,4	16,3	3,5	17	12	24,3	0,3	4,3	16,3	3,1
6	45,6	37,0	16,6	0,5	18,2	6,0	0,45	0,8	25,5	7,9	12,9	3,0	5,7	5,0	14,5	0,5	2,4	4,5	0,7
7	48,0	42,0	8,0	1,0	23,7	8,5	5,9	0,9	39,0	8,7	6,5	2,5	6,2	8,3	6,2	0,5	-	13,2	20,6
8	37,0	21,0	35,5	2,0	10,1	3,9	3,0	0,9	16,9	8,0	1,7	1,9	3,7	4,1	2,2	0,4	-	10,4	2,8
9	2,0	25,3	44,8	25,3	8,9	3,0	1,0	0,2	10,1	7,2	3,4	1,8	9,4	9,1	4,2	0,4	-	12,0	2,3

Ec	har	iti]	110	ns

1	: Tetouan	60-90 cm
2	: Tetouan	90-120 cm
3	: Haouz	60-70 cm
4	: Isen	0-10 cm
5	: Zagora	0-5 cm
6	: Zagora	50 <b>-90 cm</b>
7	: Mateur	20-40 cm
8	: El Habibi	ia 10-35 cm
9	: Soukra	10-30 cm

CE 1/5 : conductivité électrique de l'extrait 1/5 Ce<sub>pāte</sub> : conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée CEG : conductivité électrique globale moyenne

centage d'eau de chaque échantillon à pF 4, 2, après traitement. L'autre partie est séchée à l'air libre pour déterminer la conductivité électrique de l'extrait au 1/5, le bilan ionique et le complexe absorbant.

# 2.1.3. Solutions salines utilisées

Les solutions salines utilisées sont des chlorures et des sulfates, à différentes concentrations : Solution 1 : Chlorure de sodium à 35 mé/litre.

- Solution 2 : Mélange de chlorure de sodium (100 mé/ litre) et de chlorure de calcium (50 mé/ litre).
- Solution 3 : Mélange de chlorure de sodium (50 mé/ litre), de chlorure de calcium (50 mé/ litre) et de sulfate de magnésium (50 mé/ litre), soit Cl/SO<sub>4</sub> = 2.



Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., vol. XX, nº 2, 1983: 91-108.



Solution 4 : Mélange de chlorure de sodium (50 mé/ litre), de chlorure de calcium (50 mé/ litre) et de sulfate de magnésium (100 mé/ litre), soit  $Cl/SO_4 = 1$ .

Solution 5 : Sulfate de magnésium à 100 mé/litre.

### 2.2. Évaporation contrôlée

# 2.2.1. Résultats obtenus

Nous avons suivi l'évolution de la CEG en fonction de la teneur en eau sur des échantillons provenant de 9 horizons appartenant à 7 profils du Maroc et de Tunisie, étudiés par ailleurs (EL OUMRI, 1981) (tabl. II). On a porté sur les figures 5 à 8 la représentation de l'évolution de la CEG en fonction de la teneur en eau.

Il apparaît que pour de nombreux échantillons, on observe une relative *constance* de la CEG au cours de l'évaporation, jusqu'à ce que le sol soit suffisam-

ment désséché. A ce moment la teneur en eau est proche de la valeur du pF 4,2 et on observe une chute brutale de la CEG. Pour certains échantillons cependant, notamment ceux qui sont saturés par des solutions riches en sulfates, la diminution de le CEG se produit plus précocement, avant le pF 4, 2. La forte diminution de la CEG pour les faibles humidités, qui correspond donc à une forte augmentation de la résistance mesurée par les électrodes, s'explique par la création d'un réseau de fentes qui forment obstacle à la circulation du courant. Ce phénomène est identique à ce qui se produit sur le terrain quand l'eau du sol s'est progressivement vidée, d'abord en abandonnant les plus gros pores puis en ne se maintenant qu'en film mince sur les agrégats.

Par contre les faibles variations qui affectent la CEG pendant la plus grande partie de la phase d'évaporation prouvent que celle-ci est bien proportionnelle au produit (conductivité de l'eau du sol $\times$ teneur en eau) donc à la teneur pondérale en sels.



Dans les expérimentations précédentes un certain nombre de courbes ont montré une diminution progressive de la conductivité électrique apparente en fonction de la teneur en eau, pour des échantillons suffisamment humides. Cette diminution est fréquente dans le cas des imprégnations avec une solution de sulfate de magnésium (100 mé/litre). On pense alors qu'une partie des sels cristallise, ce qui provoque le maintien de la conductivité de l'eau du sol à une valeur seuil maximum. Et, comme la teneur en eau diminue, la diminution de CEG peut être liée à la diminution du produit  $CE_{ss} x \theta$ . Il nous a donc paru opportun d'étudier l'influence du type de traitement sur la variation de CEG. Et dans ce but, il est plus aisé de comparer pour un même échantillon de sol, l'allure de plusieurs courbes  $CEG = f(\theta)$  concernant divers traitements, à celle de la courbe obtenue avec le sulfate de magnésium.

Les échantillons d'El Habibia et de Mateur ont été choisis pour établir les différentes courbes, qui sont présentées dans la figure 7.

Le premier échantillon a donc été imprégné par les cinq solutions salines différentes.

L'analyse et la comparaison des courbes obtenues ont été faites en se basant sur l'examen du bilan ionique avant et après imprégnation, et en utilisant des paramètres ioniques tels que les rapports :

$$\frac{\text{Cl}}{\text{SO}_4}; \ \frac{\text{Na}}{\text{Mg}}; \ \frac{\text{Ca}}{\text{Mg}}; \ \text{et SAR.}$$

Enfin nous complétons cette analyse en calculant le pourcentage relatif de chaque type de sel, qui est susceptible de se former à partir de ces extraits.

Le tableau III nous indique que la composition ionique présente des différences entre l'extrait de

TABLEAU	ш
LABLEAU	

Solution utilisée	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	К+	Na <sup>+</sup>	C1 <sup>-</sup>	504	нсо3_
NaC1	26,3	9,8	6,3	62,5	61,4	35,9	2,2
NaC1-CaC12	37,5	11,0	1,0	50,4	70,4	27,1	2,3
$C1/S0_4 = 1$	35,6	11,4	1,0	57,1	59,5	37,0	3,3
$C1/S0_4 = 2$	32,3	9,8	0,9	57,8	56,9	39,8	3,0
Mg SO <sub>4</sub>	28,7	19,2	1,2	60,7	42,8	45,8	1,4
Eau distillée	22,2	9,6	0,7	67,2	57,2	39,3	3,4

Composition des bilans ioniques de l'échantillon d'El Habibia suivant les différents traitements. La composition ionique est exprimée en mé/100 g



FIG. 9. — Traitement 1 (NaCl) et 2 (NaCl-CaCl<sub>2</sub>), comparaison de différents sols

l'échantillon imprégné par le sulfate de magnésium et les extraits des autres échantillons.

Dans le cas du traitement avec le sulfate de magnésium, la solution du sol est enrichie en ion sulfate. Le produit  $(CE_{ss} \times \theta)$  diminue progressivement avant que la teneur en eau de l'échantillon atteigne le point de flétrissement.

En effet, dans une telle solution et au cours de l'évaporation, le produit de solubilité de  $CaSO_4$   $(2H_2O)$  est vite atteint, et près de 60 % des ions  $SO_4$  de l'extrait se trouvent sous forme de gypse.

Cette précipitation de gypse a donc une influence certaine sur les mesures électriques, dans le sens de la diminution de la CEG. Plusieurs auteurs, RUELLAN (1964), SERVANT (1975) ont signalé que la conductivité électrique augmente avec le dissolution du gypse en fonction des dilutions. On pourrait admettre un processus inverse avec la concentration liée à l'évaporation. Ceci peut rendre compte dans notre cas, de la diminution progressive de la CEG d'autant plus que les sels de sulfate (sous différentes formes) représentent près de 60 % des sels totaux de l'extrait de l'échantillon imprégné par le sulfate de magnésium, contre 40 % de chlorure de sodium, alors que nous observons l'inverse pour les autres extraits.

### 2.2.2. Discussion

A l'examen des figures 9 et 10 on peut faire les constatations suivantes :

### Traitement par les solutions 1 et 2

Les solutions chlorurées se concentrent en maintenant la CEG constante jusqu'à une valeur de la teneur en eau voisine de pF 4,2 pour l'ensemble des échantillons non gypseux (40 % pour El Habibia, 20 % pour Tetouan et Haouz, 48 % pour Mateur, 3-4 % pour la Soukra, etc.). Par contre, pour l'échantillon gypseux de Zagora très salé en surface mais très riche en gypse, la chute de la CEG se situe avant. Notons par ailleurs que Ca est largement dominant dans la garniture du complexe.

### Traitement par les solutions 3, 4 et 5

Dans tous les cas on observe une diminution progressive après cependant une phase constante plus ou moins développée suivant les sols.

Pour Zagora cette diminution lente se situe pour une teneur en eau variant entre 55 et 25 %, pour Mateur entre 69 et 46 %. On observe également l'existence d'un palier plus ou moins marqué pour les échantillons Mateur, Isen, La Soukra et Haouz après une première phase de diminution précoce.

On notera que l'effet est d'autant plus net que

l'on passe du traitement le moins riche en  $MgSO_4$ au plus riche (ex. El Habibia, Haouz), sauf encore pour le sol de Zagora, fortement gypseux au départ et où le gypse ne semble plus précipiter pendant l'évaporation.

Cette expérimentation par évaporation contrôlée met donc en évidence la sensibilité des mesures électriques en fonction de la teneur en eau et du type de traitement.

Plus précisément, la salure à dominante chlorurée provoque une relative constante de la CEG au cours du déssèchement jusqu'à une teneur en eau voisine de pF 4,2. L'existence de gypse cristallisé dans certains échantillons entraîne, par dilution dans la pâte saturée, la mise en solution d'une certaine quantité d'ions  $SO_4$  qui modifient les équilibres et précipitent ensuite au cours du déssèchement.

L'addition de CaCl<sub>2</sub> (traitement 2) peut entraîner une précipitation de gypse plus forte (ex. : Zag I-2). Dans tous les autres cas, une salure *sulfatée* entraîne une diminution progressive de la CEG, parfois interrompue par des paliers, et ceci avant d'atteindre pF 4,2. Ce phénomène est particulièrement net pour les sols non sulfatés au départ. Par ailleurs, des échanges Ca-Mg au niveau des sulfates semblent responsables de la légère augmentation de la CEG au début de l'évaporation.

L'examen de la composition des solutions extraites après évaporation montre une évolution différente, par rapport aux témoins, pour les différents couples sol-traitement.

L'échantillon d'El Habibia montre clairement l'existence d'échanges entre la solution et le complexe pour le couple Ca-Na. Cet échange est encore plus net dans l'échantillon de Mateur, alcalinisé à l'origine. Les variations de  $SO_4$  et Ca dans l'échantillon de Zagora peuvent être attribuées à une solubilisation précoce du gypse.

Nous pouvons donc conclure que la mesure de la CEG peut être considérée comme une estimation valable de la teneur pondérale en sels du sol dans le cas de salinisation chlorurée, et ce dans une large gamme de teneur en eau.

Pour les sols contenant une dominance de sulfates, soit par les solutions utilisées pour l'humectation, soit, plus fréquemment, du fait de la présence de gypse, cette estimation n'est valable que pour une gamme plus réduite, approximativement comprise entre la saturation et la capacité de rétention, soit sensiblement deux fois la teneur en eau à pF 4,2.

### 2.3. Extractions à la presse à membrane

#### 2.3.1. Évolution de la CEG

Suivant une technique expérimentale déjà décrite on a utilisé un certain volume de solution saline



F16. 10. — Traitement 5 (MgSO<sub>4</sub>) et 4 (Cl/SO<sub>4</sub> = 1), comparaison de différents sols

pour saturer le sol, après un temps de contact entre l'eau et le sol on a effectué la première mesure électrique. A chacun des pF obtenus, on a mesuré la CEG et le volume de solution extrait de l'échantillon.

Ceci nous a permis d'étudier la variation de la conductivité électrique en fonction de la teneur en eau à chaque pF, ainsi que la variation concomitente du stock en sel.

Les résultats expérimentaux sont représentés par le tableau IV : L'examen de ce tableau montre que la conductivité électrique globale de tous les échantillons diminue avec les extractions. Ces extractions sont réalisées à des pressions de 1 et 16 atmosphères. Les variations de la CEG peuvent donc être analysés dans deux gammes d'humidité :

- Entre la saturation et pF 3.

— Entre pF 3 et pF 4,2.

Dans la première gamme d'humidité, la CEG des échantillons testés est de 5 à 30 mmhos/cm. Les valeurs les plus élevées sont observées dans les sols

Echantillons	ZAG: 0-5cm	ZAG: 0-5cm	ZAG: 0-5cm	ZAG:10-20cm	ZAG:50-90cm	ZAG: 50-90cm	
Solutions	Mg SO <sub>4</sub>	C1/SO <sub>4</sub> =1	C1/S04=2	NaC1	NaC1	NaCl-CaCl <sub>2</sub>	
a saturation	15,9	13,8	12,5	5,17	12,8	7,8	
àpF=3	2,2	4,5	6,5	3,12	4,0	4,2	
å pF = 4,2	0,7	1,3	2,2	0,52	1,7	1,9	
Echantillons	IS:0-10cm	IS:0-10cm	IS:0-10cm	IS:0-10cm	IS:0-10cm	-	
Solutions	NaCl-CaCl <sub>2</sub>	C1/S0 <sub>4</sub> = 2	$1/50_4 = 1$	NaC1	MgS04	-	
à saturation	5,9	5,9	5,4	4,7	5,4	-	
à pF = 3	2,6	1,9	2,01	1,86	1,5	-	
à pF = 4,2	0,8	0,6	0,8	0,96	0,1	-	
Echantilions	EL HABIBIA	EL HABIBIA	EL HABIBI	EL HABIBIA	MATEUR	MATEUR	
Solutions	NaC1	NaC1-CaC12	C1/SO <sub>4</sub> = 2	C1/SO <sub>4</sub> ≖1	NaC1-CaC12	Mg SO4	
å saturation	23,1	8,0	9,8	8,2	30,2	30,2	
à pF = 3	12,2	1,6	4	3,0	21,4	10,3	
å pF = 4,2	3,6	0,9	1,9	0,8	4,8	5,3	
Echantillons	HAO	: 60-70 cm	HAO :	60-70 cm	TET :	90-120 cm	
Solutions	]						
ā saturation		8,3	1:	3,5	12,36		
à pF = 3		3,8	:	3,90	6,24		
å pF = 4,2		0,9	:	L <b>.</b> 35	1,39		

### TABLEAU IV

Variation de la conductivité électrique globale en fonction des extractions à différentes pressions

CEG : conductivité électrique globale en mmhos/cm.  $\rm MgSO_4$  : solution saline utilisée.

alcalins de Mateur. Les sols salins sableux d'Isen ont des conductivités assez faibles par rapport aux premiers. Et, entre ces deux groupes se situent les sols salins argileux ou argilo-limoneux de Zagora et d'El Habibia. Il est à noter que les résultats de CEG sont en fonction de la salinité initiale de l'échantillon et de la solution saline utilisée.

Après application de la pression d'une atmosphère, on constate une baisse brutale de la CEG. Dans les sols salins d'Isen elle a diminué de 3 mmhos/cm. Dans les sols salins argileux cette diminution est de 5 à 12 mmhos cm suivant les traitements. Et enfin dans les sols alcalins la baisse est de 9 mmhos/cm dans le cas du traitement à NaC1-CaC1<sub>2</sub> et de 20 mmhos/cm avec l'imprégnation à MgSO<sub>4</sub>.

Ces exemples montrent les grandes variations de la CEG dès la première extraction à une atmosphère. Les échantillons ont encore une humidité assez forte, ce qui signifie que cette diminution dans cette gamme d'humidité peut être attribuée à la variation du stock en sel. Car dans les essais à évaporation contrôlée la CEG varie peu dans la gamme d'humidité mentionnée ci-dessus. Après les extractions à la pression de 16 atmosphères l'humidité des échantillons est au point de flétrissement, limite près de laquelle la CEG diminue avec la teneur en eau. Les valeurs obtenues sont très faibles. Elles varient de 0,1 mmhos/cm à 5 mmhos/cm. Et, par analogie avec les résultats de l'évaporation contrôlée, cette diminution de la CEG est surtout liée à la faible teneur en eau.

### 2.3.2. Évolution de la composition des extraits SUCCESSIFS

La composition des bilans ionique (cf. tabl. V) des différentes extractions peut confirmer ces conclusions. Il s'agit dans cet exemple de deux échantillons du site de Zagora. Le premier de 10 à 20 cm est traité avec 35 mé/l de NaCl. Le second de 20 à 50 cm est imprégné par les cinq solutions salines. Pour chaque traitement l'échantillon est soumis à trois ou deux extractions successives. La dernière extraction correspond à la pression de 16 atmosphères.

Si on considère l'ion sodium dans la première extraction des cinq traitements de ZAG : 20-50 cm,

Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédoi., vol. XX, nº 2, 1983: 91-108.

### TABLEAU V

Composition ionique des extraits successifs réalisés à la presse à membrane, avec différentes, solutions (exprimée en mé/100)

Echantillons	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	к⁺	Na <sup>+</sup>	C1 <sup>-</sup>	504	нсоз_
ZAG : 10-20cm	0.29	1.83	0,03	2,80	2,70	2,21	0,02
(1) 2	0,37	1,40	0,03	2,76	2,80	1,93	0,02
3	0,38	1,63	0,03	2,52	2,94	1,80	0,02
$\frac{ZAG : 20-50cm}{(1)}$	0,32	1,36	0,02	2,20	2,53	1,53	0,03
	0,42	0,93	0,02	2,54	2,63	1,25	0,01
	0,35	0,93	0,03	2,61	2,56	1,25	0,02
(2) 1/2	0,45	0,32	0,01	1,08	1,56	0,36	0,02
	0,33	0,30	0,01	1,18	1,59	0,29	0,01
(4) 1/2	0,85	0,63	0,01	1,92	2,86	0,61	0,02
	1,32	0,17	0,02	0,04	3,32	0,95	0,03
(5) <sup>1</sup> <sub>2</sub>	0,37 0,33	0,40 0,54	0,02 0,02	1,11 1,42	1,09 1,57	0,95 0,83	0,01

1 = Première extraction après saturation

2 = Deuxième extraction après pression 1 atmosphère

3 = Troisième extraction après pression 16 atmosphères

(1) = Solution saline utilisée.

il varie entre 2,20 mé/100 et 1,08 mé/100. Et, pour les trois extractions d'un même traitement par exemple NaC1, l'ion sodium connaît une faible variation. Dans la première extraction on a 2,20 mé/ 100 et dans la troisième extraction à pF = 4,2 on a 2,61 mé/100.

Les résultats d'analyse montrent que :

- Le bilan ionique diffère d'un traitement à l'autre pour un même échantillon.

--- La composition ionique de deux ou trois extractions successives varie peu dans chaque traitement.

Cette comparaison des bilans ioniques montre qu'à pF 4,2, les faibles valeurs de CEG doivent être attribuées principalement à la faible teneur en eau. Elles ne correspondent pas à la salinité de l'échantillon. Par contre, la diminution de CEG après la première extraction est due à la variation du stock en sels. Dans les deux cas, la méthode électrique est sensible aux variations des pourcentages en eau et en sels des sols.

### 2.3.3. Comparaison des bilans ioniques après différents traitements

On peut aussi examiner les effets des imprégnations sur la composition ionique. Sous l'évaporation contrôlée le stock de sel reste constant en fonction de la solution saline utilisée. Par contre dans la deuxième procédure, ce stock de sels diminue avec les extractions, et certains ions sont plus évacués que les autres.

Trois échantillons ont été choisis pour cette comparaison :

— Le premier est un sol salin, (El Habibia).

- Le second est un sol gypseux, (Zagora).

- Le dernier est un sol alcalin, (Mateur).

A la fin de chaque expérience, le sol a été séché et tamisé. La composition ionique est celle de l'extrait 1/5 (tabl. VI).

Le témoin est représenté par la composition ionique de chaque échantillon non traité.

Les extraits obtenus après traitement par évaporation sont évidemment plus concentrés que le témoin, ce que traduit l'augmentation de la somme des cations et des anions. Mais le comportement est différent suivant les ions. En effet, si l'augmentation de Cl semble directement liée à la concentration de la solution employée, l'effet sur Na est atténué, tandis que l'on remarque une augmentation de Ca même quand la solution de traitement n'en comporte pas. Des échanges Na-Ca ont donc vraisemblablement lieu entre solution et complexe.

On observe corrélativement que le Cl est plus nettement évacué que le Na lors des extractions à la presse.

Enfin, dans le cas des traitements par les solutions 4 et 5, apportant des sulfates, ces échanges semblent conduire à la précipitation de gypse, ce qui expliquerait bien les paliers observés dans la décroissance de la CEG, au cours de l'évaporation.

#### TABLEAU VI

Echantillon et solution utilisée	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	к+	Na <sup>+</sup>	Somme des cations	c1-	s0 <sub>4</sub>	нсо <sub>з</sub> -	°3 <sup></sup>	Somme des anions
EL         HABIBIA           Témoin         (T)           NaC1         (E)           MgS0         (E)           MgS0         (P)           NaC1-CaC12         (P)           NaC1-CaC12         (E)           C1/S04         =1           C1/S04         =1           C1/S04         =2           C1/S04         =2           C1/S04         =2	3,94 5,10 1,85 6,40 2,72 8,15 4,34 7,28 7,08 6,62 2,72	1,70 1,90 0,82 4,29 2,00 2,39 1,58 2,34 1,2 2,01 1,25	0,14 0,26 0,12 0,27 0,14 0,22 0,14 0,22 0,14 0,22 0,14	11,89 12,11 6,46 11,29 5,21 10,93 5,70 11,68 6,44 11,84 5,25	17,67 19,37 9,25 22,26 10,06 21,68 11,54 20,24 14,84 20,46 9,33	10,11 11,89 3,16 9,69 1,58 15,38 4,63 12,44 2,52 12,11 3,05	6,95 6,95 5,68 12,64 7,92 5,93 6,67 7,73 8,39 8,47 6,68	0,61 0,48 0,60 0,32 0,47 0,51 0,46 0,71 0,46 0,65 0,46	0,02 - - 0,02 0,02	17,67 19,34 9,46 22,64 10,61 21,82 11,70 20,89 11,37 21,25 10,19
$\begin{array}{c} \frac{ZAG : 0-5 \text{ cm}}{T\text{emoin}} & (T) \\ MgSO_4 & (E) \\ MgSO_4 & (P) \\ C1/SO_4 = 2 & (E) \\ C1/SO_4 = 2 & (P) \end{array}$	16,32 15,87 15,55 27,05 15,60	3,56 4,55 3,89 2,19 3,56	0,43 0,64 0,34 0,56 0,82	16,97 18,62 4,60 16,75 5,42	37,28 40,02 24,40 46,54 25,40	12,94 11,48 1,49 13,80 23,19	24,29 30,41 24,69 30,77 22,99	0,33 0,21 0,36 0,64 0,24		37,56 42,09 26,54 45,21 26,42
Mateur           Témoin         (T)           MgSO4         (P)           MgSO4         (P)           NaC1-CaC12         (E)           NaC1-CaC12         (P)	18,60 18,83 14,55 40,41 14,55	2,16 5,45 3,35 1,87 3,95	0,1 0,47 0,14 0,18 0,14	37,99 32,81 10,27 30,54 10,27	58,88 57,55 28,33 72,98 28,33	32,69 30,06 3,83 34,08 3,83	26,21 27,02 24,49 38,32 24,49	0,33 0,34 0,34 0,55 0,34		58,68 57,42 28,66 72,95 28,66

Comparaison des bilans ioniques de l'extrait 1/5 d'un même échantillon soumis à l'évaporation et aux extractions à la presse à membrane (en mé/100)

(T) = Témoin ou échantillon non traité.

(E) = Évaporation contrôlée.

(P) = Extraction à la presse à membrane.

 $MgSO_4 = Solution$  utilisée.

### CONCLUSION

L'intérêt porté, notamment dans les pays en voie de développement, sur la prospection et la valorisation des potentialités agricoles, a suscité la recherche et la mise au point de méthodes d'investigation rapides et de faible coût.

Pour ce qui concerne plus spécialement le domaine des sols salés, il importait de disposer de moyens d'estimation de la salure moins lourds que ceux qui impliquent le prélèvement de nombreux échantillons et de multiples manipulations au laboratoire.

C'est dans cette optique que la méthode des sondages électriques a été développée aux USA, puisque sous certaines conditions de teneur en eau, des relations valables entre la conductivité électrique globale (CEG) et la conductivité de l'extrait saturé (CE<sub>es</sub>) paramètre bien connu pour le classement des sols et des eaux, ont pu être vérifiées.

La validité de ces relations a été testée par nous au cours de différentes études en Tunisie et au Maroc. Cependant, si la méthode peut jouer un rôle de substitut à la mesure de la conductivité de l'extrait saturé, ce qui a pu être ainsi confirmé, moyennant les précautions d'usage (humidité voisine de la capacité au champ notamment), son utilité a été amplifiée à l'estimation directe, entachée de moins de contraintes que la précédente, de la salure globale du sol, ainsi que l'ont montré les expériences rapportées ci-dessus.

On retiendra notamment que dans un grand nombre de cas, la CEG, mesurée à l'aide de différentes méthodes comme la sonde quadripôle verticale ou la cellule multipôle cylindrique, sur le terrain ou au laboratoire, s'avère être proportionnelle, à des facteurs près dépendants du type de sol et de sa garniture cationique, au produit (teneur en eau — conductivité de l'eau), lui-même proportionnel à la teneur pondérale en sels.

Son domaine d'application n'est restreint que pour des humidités inférieures au point de flétrissement (cas courant des salures chlorurées), ou un peu supérieures par suite des précipitations possibles de sels peu solubles, comme le gypse (cas des salures à sulfates dominants).

Par ailleurs la méthode suppose, dans un cas comme dans l'autre (relations  $CEG/CE_{es}$  ou CEG/% sels), un étalonnage par rapport à la méthode classique. Elle peut cependant, sous cette forme, être un moyen de contrôle particulièrement sensible et très peu onéreux, de la salure des sols irrigués.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M le 13 juillet 1983

### BIBLIOGRAPHIE

- ALBOUY (Y.), PION (J. C.), WACKERMANN (J. M.), 1970. Application de la prospection électrique à l'étude des niveaux d'altération. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. géol., vol. II, nº 2.
- BARNES, 1954. Electrical subsurface exploration simplified. Roads and streets, 140 : 81-84.
- EL IDRISSI, 1977. Diagnostic de la salure des sols par mesure de la résistivité électrique *in situ*. DRES/O.R.S.T.O.M., *multigr*.
- EL OUMRI (M.), 1978. Application de la méthode électrique à l'étude de la salure des sols. DRES/O.R.S.T.O.M., multigr.
- EL OUMRI (M.), 1981. Conditions d'utilisation de la méthode des sondages électriques pour l'étude des sols halomorphes. Thèse 3<sup>e</sup> cycle Paris VII.
- HALVORSON (A. D.), and REULE (C. A.), 1976. Estimating water salinity with geo-physical earth resistivity equipment. Soil Sci. Soc. Amer. J. 40: 152-153.
- HALVORSON (A. D.), RHOADES (J. D.), and REULE (C. A.), 1977. — Soil salinity-Four-electrode conductivity relation ships for soils of the Northen Greatp lains. Soil Sci. Soc. Amer. J., vol. 41: 966-72.
- MEYER DE STADELHOFEN (C.), 1979. L'interprétation graphique des sondages électriques. Institut de Géophysique appliquée Lausanne, n° 2, 36 p.
- NADLER (A.), 1980. Determining the volume of sampled soil when using the four-electrode Technique. Soil Sci. Soc. Am. J., 44 : 1186-1190.
- RHOADES (J. D.) and INGVALSON (R. D.), 1969. Macroscopie swelling and hydraulic conductivity properties of four vermiculite soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 33: 389.

- RHOADES (J. D.) and INGVALSON (R. D.), 1971. Determining salinity in field soils with soil resistance mesurements. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35: 54-60.
- RHOADES (J. D.), 1975. Measuring, mapping and monitoring field salinity and water table depths with soil resistance measurements. FAO. Soil Bulletin 31 : 159-186.
- RHOADES (J. D.), and SCHILFGAARDE (J. van), 1976. An electrical conductivity probe for determining soil salinity. Soil Sci. Soc. Amer. J., 40: 647-651.
- RHOADES (J. D.), RAATS (P. A. C.), and PRATHER (R. J.), 1976. — Effects of liquid-phase electrical conductivity water content, and surface conductivity. Soil Sci. Soc. Amer. J., 40: 651-655.
- RHOADES (J. D.), KADDAH (M. T.), HALVORSON (A. D.), and PRATHER (R. J.), 1977. — Etablishing soil electrical conductivit-salinity calibrations using Four-electrode celle containing undisturbed soil cores. Soil Science. Vol. 23, nº 3 : 136-141.
- SERVANT (J.), 1975. Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du sud et du sud-ouest de la France. Thèse. INRA-ENSA Montpellier, tome I, 194 p. et tome II, planches, figures et annexes.
- SHEA (P. F.), LUTHIN (J. N.), 1961. An investigation of the four-electrode probe for measuring soil-salinity in situ. Soil, 92: 331-339.
- U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agr. Hand Book nº 60, 160 p.
- VIEILLEFON (J.), 1982. Étude méthodologique des transferts d'eau et de sels dans un monolithe de sol argileux. ES 198. DRES/O.R.S.T.O.M.