

## Relations entre les mesures de conductivités sur des extraits de sols de rapports sol/solution variables, dans la vallée du fleuve Sénégal

Jean-Yves LE BRUSQ (1), Jean-Yves LOYER (1)

(1) Pédologue O.R.S.T.O.M., Centre O.R.S.T.O.M. de Dakar, Hann, B.P. 1386, Dakar (Sénégal)

### RÉSUMÉ

*L'estimation du niveau de salinité du sol se fait le plus souvent par la mesure de la conductivité électrique d'un extrait aqueux.*

*Pour simplifier le mode opératoire, nous avons recherché une relation entre conductivité de l'extrait de pâte saturée (méthode de référence) et conductivité d'un extrait 1/n, plus facile à obtenir. L'approche théorique conduit à proposer des relations du type :  $\log (\text{Clé E.S.}) = \log (\text{Clé } 1/n) + a \log (\text{H.S.}) + b$  où H.S. est l'humidité à saturation, en %.*

*Les valeurs a et b ont été obtenues par calcul statistique, pour des sols de la vallée du fleuve Sénégal. Les relations proposées sont suffisamment précises pour les applications pratiques (carte de salinité des sols...).*

*Une étude expérimentale a montré que le rapport des conductivités de 2 extraits différents dépend fortement du rapport sel soluble (NaCl) / sel peu soluble (gypse) dans l'extrait. Les paramètres a et b dans (1) dépendent donc du type de salure rencontrée dans le sol.*

MOTS-CLÉS : Sols salés — Conductivité — Extraits de sols — Fleuve Sénégal.

### SUMMARY

RELATIONS BETWEEN CONDUCTIVITY MEASURES ON SOIL-EXTRACTS WITH DIFFERENTS SOIL/SOLUTION RATIOS, IN SENEGAL VALLEY

*The estimation of the salinity level of soils is usually obtained by the measurement of the electrical conductivity of an aqueous extract.*

*To simplify the experimental procedure, we tried to establish a relation between the conductivity of an extract out of a saturated paste (reference method) and the conductivity of an 1/n extract (more easily obtained). The theoretical approach lead to relations of the form :  $\log (\text{Clé E.S.}) = \log (\text{Clé } 1/n) + a \log (\text{H.S.}) + b$ .*

*Where Clé E.S. is the conductivity of the extract out of the saturated paste, H.S. is the percentage of water of the saturated paste.*

*a and b are obtained by a statistical method, for soils of the Senegal Valley. The relations obtained are sufficiently accurate for practical purposes (mapping of saline soils...).*

*An experimental study has show that the ratio of conductivities of 2 differents extracts depend strongly on the ratio soluble salt (NaCl) / less soluble salt (gypsum) in the extract. So, the parameters a and b in (1) depend on the kind of salts encountered in the soil.*

KEY WORDS : Saline soils — Conductivity — Soil extracts — Senegal valley.

## INTRODUCTION

La mesure de la conductivité électrique et le dosage des sels solubles dans un extrait de sol sont des données fondamentales dans l'étude des sols salés. La méthode de préparation de cet extrait de sol consiste à mettre en contact un volume variable de solution d'extraction par rapport au poids de sol; les rapports les plus couramment employés sont l'extrait saturé et différents extraits aqueux de plus ou moins grande dilution (1/1 - 1/2 - 1/5 - 1/10). Parmi ceux-ci, l'extrait de pâte saturée est la méthode la plus conventionnelle; il correspond à l'humidité à saturation qui est fonction de la texture du sol, donc de sa capacité de rétention alors que pour les autres extraits aqueux, le volume d'eau apporté est indépendant de la texture et identique quel que soit le type de sol. Cette méthode de l'extrait saturé, outre le fait qu'elle est la méthode internationale de référence, présente de nombreux avantages, dont celui de représenter le mieux la solution du sol et donc de serrer de plus près une réalité agronomique, l'humidité étant à proximité de la capacité de rétention la plus efficiente pour la plante.

Néanmoins, dans les programmes de suivi de l'évolution de la salinité du sol qui nécessitent par les méthodes traditionnelles un très grand nombre d'analyses, cette méthode apparaît techniquement très longue à mettre en œuvre, la préparation de la pâte elle-même délicate, et l'extraction de la solution difficile.

Dans le but de pallier ces complications techniques, nous avons cherché, dans le cadre du programme de suivi de l'évolution des sels de la vallée du Fleuve Sénégal, à nous orienter au niveau des analyses de série vers les extraits aqueux plus faciles à réaliser. Ceux-ci présentent entre autres avantages par rapport à l'extrait saturé celui d'extraire le maximum des sels contenus dans l'échantillon, ceci nous rapprochant mieux des conditions d'utilisation de ces sols en riziculture submergée où la solution du sol est nettement plus diluée qu'à la capacité de rétention.

Dans le souci d'établir la correspondance exacte entre ces différentes données, nous avons cherché la relation existant entre les conductivités mesurées sur ces différents extraits et la conductivité de référence de l'extrait saturé.

## 1. RECHERCHE D'UNE RELATION ENTRE CONDUCTIVITÉ D'UNE PÂTE SATURÉE ET CONDUCTIVITÉ D'UN EXTRAIT 1/n

### 1.1. Approche pratique

Une des conséquences de la dilution est que les conductivités des extraits aqueux plus ou moins dilués sont théoriquement inférieures à celles mesurées sur l'extrait saturé. Théoriquement, la relation avec l'extrait saturé s'écrit :

$$C_{1/n} = \frac{CES \times HS}{100 n} \quad (1)$$

où  $C_{1/n}$  est la concentration totale en ions dissous de l'extrait de rapport pondéral sol/n eau,

CES est la concentration totale en ions dissous de l'extrait saturé,

HS l'humidité à saturation en %.

Si on admet que la conductivité et la concentration d'un extrait aqueux sont proportionnelles, on peut écrire :

$$C_{té} \frac{1}{n} = \frac{C_{té} ES \times HS}{100 n} \quad (2)$$

En première approximation, on pourrait donc s'attendre à ce que le facteur multiplicatif nécessaire pour passer de l'une à l'autre des différentes mesures soit inversement proportionnel à la dilution. Or on constate souvent que la conductivité mesurée sur les extraits dilués est supérieure à la conductivité calculée théoriquement à partir de la mesure sur l'extrait saturé (cf. tabl. I); ceci tient au fait que certains extraits, surtout l'extrait salin 1/10, apportent une importante redissolution de sels par rapport à l'extrait saturé. L'expérience montre en outre que les différentes tentatives de correspondance faites entre les mêmes extraits font apparaître des différences importantes.

Pour notre part, sur les sols de la Vallée du Fleuve Sénégal, les tentatives que nous avons effectuées ont montré des variations liées d'une part au niveau de salinité, d'autre part à l'humidité à saturation donc à la texture de l'échantillon. A titre indicatif, les chiffres suivants ont été obtenus :

— Pour des Classes de salinité faibles (<10 mmhos sur l'ES) :

HS < 40 %	Cté ES = Cté E 1/5 × 8,08
	Cté ES = Cté E 1/2 × 3,98
40 % < HS < 60 %	Cté ES = Cté E 1/5 × 7 à 9
	Cté ES = Cté E 1/2 × 3,5
HS > 60 %	Cté ES = Cté E 1/5 × 5 à 5,8
	Cté ES = Cté E 1/2 × 2,5.

— Pour des Classes de salinité élevées (> 10 mmhos/ES) :

40 % < HS < 60 %	Cté ES = Cté E 1/5 × 14
	Cté ES = Cté E 1/2 × 6

Il s'avère donc que la relation entre les conductivités des différents extraits n'est pas directement proportionnelle au volume d'eau mais que pratiquement elle varie en fonction de différents facteurs dont la texture des sols, le niveau de salinité et la composition ionique; ceci bien que les sols étudiés soient riches en sels très solubles (Na Cl) par rapport aux sulfates moins solubles (le rapport Cl/SO<sub>4</sub> étant souvent très élevé), ce qui semblait *a priori* pouvoir atténuer cette disproportionnalité liée à la dilution.

Il ressort de cette analyse que les extraits dilués sont surtout utilisables dans le cas de solutions peu concentrées (et avec une proportion de gypse peu élevée). Sur le plan pratique et dans le cas d'une analyse systématique de nombreux échantillons, on peut préconiser avec B. DABIN, de commencer par faire rapidement tous les extraits 1/2 et en prendre la conductivité; ceux qui par le calcul donnent des valeurs ES > 10 mmhos peuvent alors être recommencés par pâte saturée d'une part et par extrait très dilué pour le gypse total, d'autre part. Pour ceux dont ES < 10 mmhos, l'extrait 1/2 suffit. L'intérêt de l'extrait 1/2 sur le 1/5 et le 1/10 étant que l'équilibre anion/cation du premier est peu ou pas modifié, alors que pour les autres il y a des phénomènes annexes d'hydrolyse du Na et d'échange avec le Ca dans la solution d'extraction d'où des modifications dans l'équilibre des sels.

## 1.2 Approche statistique

Nous pouvons tenter d'établir une relation mathématiquement plus exacte entre les conductivités des extraits saturés et de rapport pondéral 1/n en établissant au préalable une relation entre conductivité et concentration ionique de l'extrait.

MAC NEAL B. L., OSTER J. O. et HATCHER J. T. (1970) proposent une relation du type  $C = \alpha (Cté)^\gamma$  (3), où C est la concentration d'un ion donné,  $\alpha$  et  $\gamma$  deux coefficients dépendant de l'ion, Cté la conductivité de la solution ne contenant que ce cation. Les coefficients  $\alpha$  et  $\gamma$  étant peu différents pour les différents ions en présence dans les extraits, nous avons tenté d'établir une relation de type statistique entre la conductivité d'une solution d'ions (en mmhos/cm) et sa concentration totale en ions (en mé/1).

La relation (3) peut s'écrire :  $\log C = \log \alpha + \gamma \log Cté$ .

En utilisant les résultats analytiques obtenus sur 90 extraits de sols de la Vallée du Fleuve Sénégal, nous avons déterminé l'équation de la droite de régression :

$$\log C = \log 8,9 + 1,075 \log Cté, \text{ avec un coefficient de corrélation } r = 0,97$$

Nous avons testé et rejeté, comme étant moins précises, des relations de la forme :  $C = \alpha Cté + \beta$ , ou  $C = \alpha (Cté)^\gamma + \beta$ .

La relation entre force ionique I et conductivité, proposée par PONNAMPERUMA *et al.* (1966), ne peut être utilisée ici car il n'existe pas de relation entre concentration totale en ions ( $\sum_i m_i |Z_i|$ ) et force ionique de la solution ( $1/2 \sum_i m_i Z_i^2$ ,  $m_i$  étant la molalité de l'ion i de charge  $Z_i$ ).

Nous pouvons alors écrire, d'après (1) :

$$(Cté \ 1/n)^\gamma = \frac{(Cté \ Es)^\gamma \times HS}{100 \ n}$$

En prenant les logarithmes des 2 termes, et en réarrangeant, il vient :

$$\log (Cté \ Es) = \log (Cté \ 1/n) - \frac{1}{\gamma} \log HS + \log \frac{100 \ n}{\gamma} \quad (4)$$

Si on pose  $X_1 = \log \text{ Cté } 1/n$ ,  $X_2 = \log \text{ HS}$ ,  $Y = \log \text{ Cté ES}$ , cette relation est de la forme :

$$(5) \quad Y = b_1 X_1 - b_2 X_2 + a, \text{ où } b_1, b_2, a, \text{ sont des constantes}$$

(5) est l'équation d'un plan, et connaissant les valeurs de  $N$  triplets de valeurs  $(Y, X_1, X_2)$ , il est possible de déterminer les constantes  $b_1, b_2, a$ , par la méthode d'analyse d'une régression multiple. On établit ainsi une équation de prédiction de :

$$Y = \log \text{ Cté ES connaissant } X_1 = \log \text{ Cté } 1/n \text{ et } X_2 = \log \text{ HS}$$

Un programme de calcul, disponible sur demande, a été mis au point sur calculatrice TI 59 pour la détermination des valeurs de  $a, b_1, b_2$  et de leurs intervalles de confiance.

Si on pose  $x_1 = X_1 - \bar{X}_1$ ,  $x_2 = X_2 - \bar{X}_2$ ,  $y = Y - \bar{Y}$ , où  $\bar{X}_1, \bar{X}_2$  et  $\bar{Y}$  sont les moyennes respectives de  $X_1, X_2, Y$ , on a :

$$b_1 = \frac{(\sum x_2^2) (\sum x_1 y) - (\sum x_1 x_2) (\sum x_2 y)}{D}$$

$$b_2 = \frac{(\sum x_1^2) (\sum x_2 y) - (\sum x_1 x_2) (\sum x_1 y)}{D}$$

$$\text{avec } D = (\sum x_1^2) (\sum x_2^2) - (\sum x_1 x_2)$$

$$\text{et } a = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2$$

Le calcul des limites de confiance pour  $B_1$  et  $B_2$ , qui sont les valeurs vraies inconnues de  $b_1$  et  $b_2$ , demande le calcul des écarts-types  $sb_1$  et  $sb_2$  de  $b_1$  et  $b_2$  : si le carré moyen des écarts résiduels (carré moyen des écarts de  $Y$  par rapport au plan de régression d'équation (5)) est :

$$s^2 = \frac{\sum y^2 - b_1 \sum x_1 y - b_2 \sum x_2 y}{N - 3}$$

$$sb_1 = s \sqrt{\frac{\sum x_2^2}{D}} \text{ et } sb_2 = s \sqrt{\frac{\sum x_1^2}{D}}$$

Les limites de confiance pour  $B_1$  et  $B_2$  sont données par :

$$B_1 = b_1 \pm t\alpha sb_1$$

$$B_2 = b_2 \pm t\alpha sb_2$$

$t\alpha$  est donné par une table de la loi de Student

Enfin, le carré moyen total des  $Y$  étant  $\text{CMT} = \frac{\sum y^2}{N-1}$ , on peut estimer la fraction de la variance de  $Y$  non expliquée par la régression en  $X_1$  et  $X_2$  par le rapport  $\frac{s^2}{\text{CMT}}$  appelé variance résiduelle.

### 1.3 Résultats

Les équations de prédiction de  $\log \text{ Cté ES}$ , connaissant  $\log \text{ Cté } 1/n$  et  $\log \text{ HS}$ , ont été établies pour les extraits 1/2, 1/5, 1/10. Les conductivités sont exprimées en  $\mu\text{mhos/cm}$ , à  $25^\circ$ .

— *Extrait 1/2 :*

$$(6) \quad \log \text{ Cté ES} = 1,61 - 0,564 \log \text{ HS} + 0,991 \log \text{ Cté } 1/2$$

$$N = 64 \text{ triplets } (Y, X_1, X_2) \text{ variance résiduelle} = 0,03$$

$$B_1 = 0,991 \pm 0,044 \quad (\text{à } 95 \%)$$

$$B_2 = 0,56 \pm 0,38 \quad (\text{à } 95 \%)$$

— *Extrait 1/5 :*

$$(7) \quad \log \text{ Cté ES} = 2,171 - 0,841 \log \text{ HS} + 1,068 \log \text{ Cté } 1/5$$

$$N = 60 \text{ triplets } (Y, X_1, X_2) \text{ variance résiduelle} = 0,03$$

$$B_1 = 1,068 \pm 0,046 \quad (\text{à } 95 \%)$$

$$B_2 = 0,84 \pm 0,36 \quad (\text{à } 95 \%)$$

— Extrait 1/10 :

$$(8) \log \text{Cté ES} = 2,553 - 0,92 \log \text{HS} + 1,077 \log \text{Cté 1/10}$$

$$N = 60 \text{ triplets } (Y, X_1, X_2) \text{ variance résiduelle} = 0,002$$

$$B_1 = 1,077 \pm 0,044 \quad (\text{à } 95 \%)$$

$$B_2 = 0,92 \pm 0,28 \quad (\text{à } 95 \%)$$

L'humidité à saturation étant corrélée avec la texture et essentiellement avec la teneur en argile, on peut modifier les formules (6), (7), (8) ci-dessus en écrivant  $\text{HS} = 0,91 A + 20,38$  où A est le pourcentage d'argile du sol considéré. Cette relation a été établie sur 60 couples de valeurs (HS, A) le coefficient de corrélation étant de 0,795. Il suffit donc de connaître soit A, soit HS pour utiliser les relations (6), (7), (8).

Nous constatons que :

- le coefficient  $B_1$ , aux incertitudes près, est très proche de 1, comme on s'y attendait d'après (4);
- l'incertitude sur  $B_2$  est plus forte que sur  $B_1$ ;
- la constante  $\gamma$  de l'équation (3) peut être déterminée par  $\gamma \approx \frac{1}{B_2} \approx \frac{\log 100 n}{a}$ .

Les incertitudes sur  $B_2$  et a entraînent une incertitude sur  $\gamma$

La relation (6) donne  $\gamma \approx 1,78 \approx 1,42$ .

La relation (7) donne  $\gamma \approx 1,19 \approx 1,24$ .

La relation (8) donne  $\gamma \approx 1,09 \approx 1,17$ .

Les valeurs de  $\gamma$  obtenues décroissent lorsque la dilution de l'extrait augmente mais sont supérieures à la valeur de 1,075 obtenue par régression entre concentration et conductivité sur 90 extraits. Ceci montre que, en moyenne, le rapport  $\frac{\text{Cté Es}}{\text{Cté } 1/n}$  est plus faible que ce qu'il serait si on avait simplement dilution de l'extrait sans dissolution supplémentaire de sels, et confirme ce qui a été dit ci-dessus.

Nous donnons ci-dessous (tabl. 1) quelques exemples de valeurs de la conductivité de l'extrait de pâte

TABLEAU I

Valeurs mesurées et valeurs calculées par les relations (6), (7), (8), (2) de la conductivité de l'extrait de pâte saturée, en  $\mu\text{mhos/cm}$  à 25 °

Extrait 1/2			Extrait 1/5			Extrait 1/10		
Valeur mesurée	Valeur calculée par (6)	Valeur calculée par (2)	Valeur mesurée	Valeur calculée par (7)	Valeur calculée par (2)	Valeur mesurée	Valeur calculée par (8)	Valeur calculée par (2)
300	540	564	410	900	1234	410	530	914
480	481	486	480	515	729	480	737	1148
700	474	428	600	1026	1403	870	1115	1714
870	1149	1257	610	811	1014	940	1078	1626
1200	915	888	1400	1690	1714	1020	1125	1735
1310	1846	1852	1800	2137	2751	1130	1525	2292
1400	1847	1755	1850	2210	2627	1200	640	967
1800	2253	2296	4090	5582	6153	1600	1019	1528
3700	4288	4123	10000	8250	9750	2140	3175	4519
13000	10912	11500	13000	11426	12903	4090	4608	5846
60800	47339	55736	21000	18350	20316	13000	10184	12298
129750	142930	137142	60800	44649	50156	31759	24928	30792
331600	359700	444666	331600	394000	391660	60800	41721	50157

Note : Les résultats sur une même horizontale ne correspondent pas toujours au même échantillon.

saturée, calculées par les relations (6), (7), (8) ainsi que les valeurs mesurées. Nous donnons également les valeurs calculées par la relation (2), écrite sous la forme :

$$\text{Cté ES} = \frac{100 n}{\text{HS}} \text{ Cté } 1/n$$

La figure 1 représente les droites de régression des relations  $\log \text{ Cté } 1/n = a \log \text{ Cté ES} + b$  en prenant, pour Cté 1/n, soit la valeur mesurée (droites 1, 3, 5), soit la valeur théorique calculée par la relation (2) (droites 2, 4, 6). Le fait que les droites 1, 3, 5 soient au-dessus, respectivement, des droites 2, 4, 6, montre la dissolution supplémentaire de sels quand on dilue la pâte saturée. Les droites convergeant 2 à 2 pour les fortes conductivités, on peut penser que cette dissolution supplémentaire devient négligeable dans le cas des sols très salés.

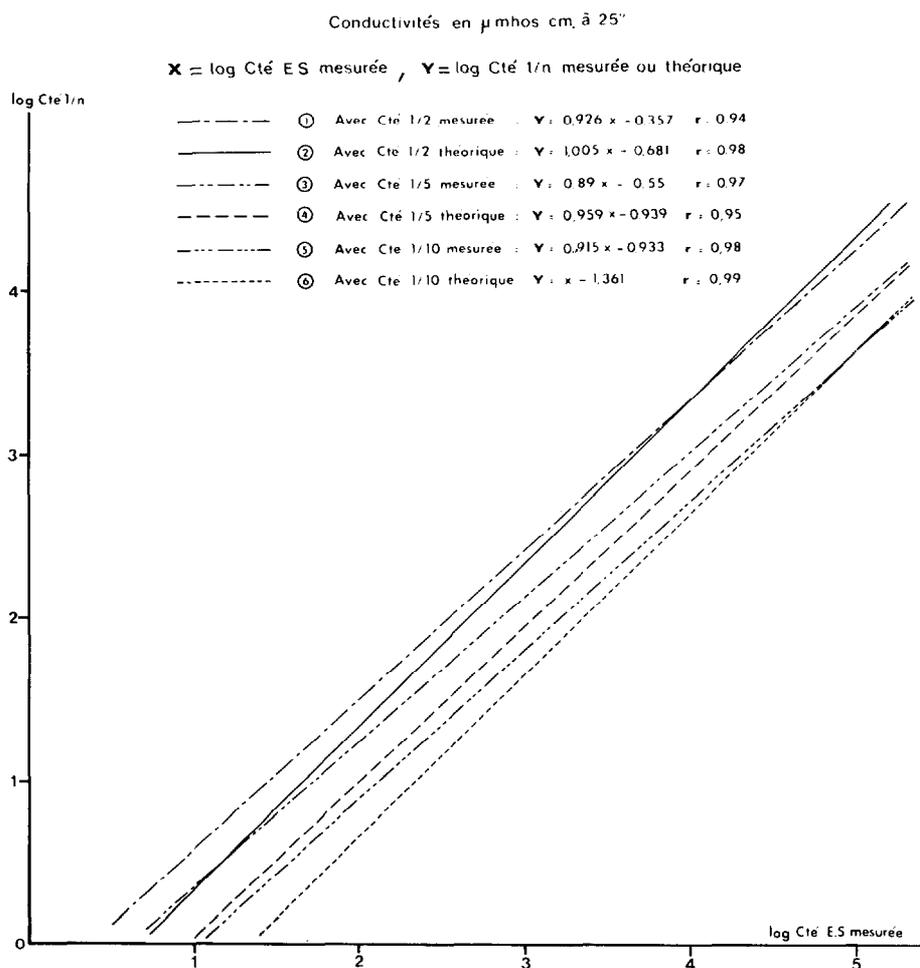


FIG. 1. — Relations  $\log \text{ Cté ES} - \log \text{ Cté } 1/n$  mesurée et  $\log \text{ Cté ES} - \log \text{ Cté } 1/n$  théorique

Nous constatons que les valeurs calculées par les relations statistiques (6), (7) et (8) ou calculées par la relation théorique simplifiée (2) sont en général proches des valeurs mesurées. La relation simplifiée (2) est d'un usage plus commode, mais les relations (6), (7), (8) mettent mieux en évidence les influences respectives de la conductivité et de l'humidité à saturation sur le rapport conductivité ES/conductivité 1/n.

En fait, compte tenu des incertitudes sur la toxicité réelle d'une solution de conductivité donnée vis-à-vis des plantes, des incertitudes sur la valeur moyenne de la salinité des sols dans une zone définie (parcelle, unité

cartographique, etc.), compte tenu des variations souvent rapides de la salinité dans le temps et dans l'espace, la précision donnée par les relations (6) à (8) et (2) paraît suffisante pour un classement des sols en fonction de leur salure et des normes de conductivité pour l'extrait de pâte saturée. Il faut remarquer cependant que les relations (6) à (8) ne sont valables que pour une région définie (la basse vallée du fleuve Sénégal). Pour tenter d'expliquer les écarts entre valeurs calculées et valeurs mesurées de la conductivité, nous avons essayé de mettre en évidence l'influence du rapport sel soluble (Na Cl)/sel peu soluble (gypse) présents dans le sol, sur les rapports des conductivités de divers extraits.

## 2. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'INFLUENCE DU RAPPORT Na Cl/GYPSE PRESENTS DANS UN SOL SUR LES CONDUCTIVITÉS DE DIFFÉRENTS EXTRAITS

### 2.1 Plan expérimental

Nous avons préparé des doses variables de chlorure de sodium et de gypse, calculées de façon à avoir 5 rapports NaCl/gypse différents, croissants en progression géométrique, et pour chaque rapport, 4 quantités totales de sels, croissant aussi en progression géométrique. Nous avons ajouté à ces doses de sels des volumes d'eau distillée croissants (50 ml, 100 ml, 200 ml, 400 ml, 800 ml) et mesuré, après agitation pendant 4 heures, la conductivité à 20 °C (conductivimètre Tacussel type CD 6 N).

Les doses de sel utilisées sont données ci-dessous, où  $q_1 = 78$  mg de gypse et  $q_2 = 26$  mg de NaCl.

TABLEAU II  
Doses de sels utilisées

Dose de gypse constante, de NaCl croissante

	$q_1$ 0,25 $q_2$	$q_1$ 0,5 $q_2$	$q_1$ $q_2$	$q_1$ 2 $q_2$	$q_1$ 4 $q_2$
Dose totale de sels croissante	2 $q_1$ 0,5 $q_2$	2 $q_1$ $q_2$	2 $q_1$ 2 $q_2$	2 $q_1$ 4 $q_2$	2 $q_1$ 8 $q_2$
	4 $q_1$ $q_2$	4 $q_1$ 2 $q_2$	4 $q_1$ 4 $q_2$	4 $q_1$ 8 $q_2$	4 $q_1$ 16 $q_2$
	8 $q_1$ 2 $q_2$	8 $q_1$ 4 $q_2$	8 $q_1$ 8 $q_2$	8 $q_1$ 16 $q_2$	8 $q_1$ 32 $q_2$
Rapport $\frac{\text{Gypse}}{\text{NaCl}}$	$\frac{4 q_1}{q_2}$	$\frac{2 q_1}{q_2}$	$\frac{q_1}{q_2}$	$\frac{1 q_1}{2 q_2}$	$\frac{1 q_1}{4 q_2}$

### 2.2 Résultats

Nous avons calculé, pour chaque dose de sel et 2 volumes d'eau différents, le rapport des conductivités mesurées. Les résultats, pour les différents rapports entre volumes d'eau ajoutés, se sont révélés varier de façon similaire en fonction des doses de sel présentes. Nous donnons, en exemple, les conductivités mesurées après addition de 50 ml d'eau (au numérateur dans le tableau ci-dessus) puis de 400 ml d'eau (au dénominateur), en  $\mu\text{mhos}$ , et le rapport de ces 2 valeurs. Les résultats sont disposés sur le tableau III selon le même ordre que les doses de sels sur le tableau II.

Nous constatons les faits suivants :

— pour un rapport NaCl/gypse faible (1<sup>re</sup> colonne du tabl. III), le rapport des conductivités diminue lorsque la quantité totale de sels croît. Ceci peut s'expliquer ainsi : une fraction du gypse n'est pas dissoute dans 50 ml d'eau, mais se dissout dans 400 ml d'eau. Le rapport des conductivités, qui serait théoriquement de 8 (400/50), est donc inférieur à 8. La fraction non dissoute dans 50 ml est d'autant plus grande que la quantité de gypse présente est élevée. Les rapports des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> colonnes évoluent de même;

TABLEAU III

Conductivités des solutions obtenues avec 50 ml (au numérateur) et 400 ml d'eau (au dénominateur) sur les doses de sel du tableau II et rapport de ces conductivités (conductivité en  $\mu\text{mhos/cm}$ , à 20 °)

Dose de gypse constante, de NaCl croissante

$\frac{1575}{277} = 5,69$	$\frac{1749}{292} = 5,99$	$\frac{2184}{347} = 6,29$	$\frac{2916}{445} = 6,55$	$\frac{4548}{660} = 6,89$	Dose totale de sels croissante
$\frac{2427}{439} = 5,52$	$\frac{2877}{513} = 5,61$	$\frac{3628}{585} = 6,20$	$\frac{5341}{798} = 6,69$	$\frac{8758}{1179} = 7,43$	
$\frac{2968}{825} = 3,60$	$\frac{3729}{924} = 4,04$	$\frac{5397}{1115} = 4,84$	$\frac{9221}{1516} = 6,08$	$\frac{17570}{2268} = 7,75$	
$\frac{3693}{1365} = 2,71$	$\frac{4941}{1611} = 3,07$	$\frac{8379}{2023} = 4,14$	$\frac{18437}{2715} = 6,79$	$\frac{35694}{4079} = 8,75$	
$\frac{4 q^1}{q^2}$	$\frac{2 q^1}{q^2}$	$\frac{q^1}{q^2}$	$\frac{1 q^1}{2 q^2}$	$\frac{1 q^1}{4 q^2}$	Rapport Gypse NaCl

— par contre, pour un rapport NaCl/gypse élevé (5<sup>e</sup> colonne), le rapport des conductivités s'élève lorsque la quantité totale de sel croît et dépasse même la valeur théorique de 8. Ceci peut s'expliquer ainsi : la solubilité du gypse augmente avec la force ionique de la solution, donc avec une dose de NaCl croissante. Ceci est attesté par le fait que le rapport des conductivités augmente avec la dose de NaCl (selon une ligne horizontale du tableau). Cependant, lorsque l'on dilue la solution, et donc que l'on diminue la force ionique, le produit de solubilité du gypse peut être dépassé, et donc une partie du gypse précipiterait après dilution, augmentant ainsi le rapport des conductivités;

— les valeurs extrêmes du rapport sont de 2,71 à 8,75 pour un même rapport entre les volumes d'eau ajoutés. Ceci suffit à expliquer pourquoi il n'existe pas de relation exacte, fonction seulement du rapport des volumes d'eau apportés, entre la conductivité d'une pâte saturée et d'un extrait 1/n.

## CONCLUSION

La conductivité d'un extrait de sol dépend donc de plusieurs facteurs, parmi lesquels les rapports entre les quantités des différents sels présents. Il en résulte que l'utilisation de la conductivité d'un extrait, pour juger de la toxicité des sels, doit être prudente. Ainsi, nous avons mesuré des conductivités allant de 445 à 1 360  $\mu\text{mhos/cm}$ , pour une même dose de NaCl, en présence de quantités croissantes de gypse. Par ailleurs, les variations de la conductivité *in situ*, selon l'état hydrique du sol, ne peuvent être prédites simplement à partir de la teneur en eau du sol. La dilution de la solution peut être suivie soit de la dissolution, soit de la précipitation d'une partie du gypse présent. Ce problème de la solubilité des minéraux dans une solution ionique, qui exige la connaissance des activités des ions et a déjà fait l'objet de nombreux travaux (DROUBI A., FRITZ B., TARDY Y., 1976; WOOD J.R. 1975; ADAMS F., 1971; OSTER J. D., MAC NEAL B. L., 1971; HARVIE C. E., WEARE J. H., 1980; HARDIE L. A., EUGSTER H. P., 1980), doit donc retenir notre attention dans l'étude de la salinité des sols. La conductivité d'un extrait de sol ne représente donc que très partiellement la salinité de ce sol.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M. le 28 juillet 1982.

## BIBLIOGRAPHIE

- MAC NEAL (B. L.), OSTER (J. D.), HATCHER (J. T.), 1970. — Calculation of electrical conductivity from solution composition Data as an aid to in-situ estimation of soil salinity. *Soil Sc.*, vol. 110 : 405-415.
- PONNAMPERUMA (P. N.), TIANGO (E. M.), LOY (T. A.), 1966. — Ionic strengths of the solution of flooded soils and others natural aqueous solutions from specific conductance. *Soil Sc.*, vol. 102 : 408-413.
- DROUBI (A.), FRITZ (B.), TARDY (Y.), 1976. — Equilibres entre minéraux et solutions. Programme de calcul appliqué à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. — *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.* vol. XIV, n° 1 : 13-38.
- WOOD (J. D.), 1975. — Thermodynamics of brine-salt equilibria — I. The systems  $\text{NaCl-KCl-MgCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  and  $\text{NaCl-MgSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  at 25 °C. *Geochimica et Cosmochimica acta*, vol. 39 : 1147-1163.
- ADAMS (F.), 1971. — Ionic concentrations and activities in soil solutions. *Soil Sci. Soc. of Am. Proceed.*, vol. 35 : 420-426.
- OSTER (J. D.), MAC NEAL (B. L.), 1971. — Computation of soil solution composition variation with water content for desaturated soils. *Soil Sci. Soc. of Am. Proceed.*, vol. 35 : 436-445.
- HARVIE (C. E.), WEARE (J. H.), 1980. — The prediction of mineral solubilities in natural waters : the Na-K-Mg-Ca-Cl-SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O system from zero to high concentration at 25 °C. *Geochimica et Cosmochimica acta*, 1980.
- HARDIE (L. A.), EUGSTER (H. P.), 1980. — Evaporation of sea water : Calculated mineral sequences. *Science*, vol. 208 : 498-500.