

# Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol

## Application à un sol sulfaté acide salé de Basse-Casamance (Sénégal)

J.P. Montoroi

Centre ORSTOM d'Ile-de-France - Laboratoire des Formations Superficielles - 32, Avenue Henri Varagnat, 93143 BONDY Cedex

### RÉSUMÉ

Pour éviter les inconvénients liés à l'extraction de la solution du sol au laboratoire, notamment la destruction de la structure du sol et la forte dilution des extraits, nous avons utilisé la méthode de prélèvement de la solution du sol à partir de capteurs in situ en céramique poreuse, placés dans la zone saturée par la nappe.

Lorsqu'on ne peut pas utiliser cette méthode, la conductivité électrique de la solution du sol in situ ( $CE_{ss}$ ) est estimée à partir de valeurs de CE mesurées au laboratoire sur des extraits aqueux (extrait 1/5 et extrait de pâte saturée), selon une méthode de calcul présentée dans cet article. On considère une loi simple de dilution des solutions et on applique deux modèles de calcul selon que la relation liant la charge minérale dissoute (CD) d'une solution et sa conductivité électrique (CE) est linéaire (modèle linéaire) ou exponentielle (modèle non linéaire). L'influence de la densité des solutions est prise en compte dans chaque cas.

Les calculs nécessitent la connaissance de la teneur en eau au moment où on effectue une mesure de la CE de la solution du sol, que ce soit au laboratoire ou au champ. Les deux modèles ont été testés et validés à partir de données obtenues pour un sol sulfaté acide salé de Basse-Casamance qui présente une gamme de conductivité électrique comprise entre 10 et 110 dS m<sup>-1</sup>.

Le modèle non linéaire permet une meilleure estimation de la  $CE_{ss}$ , quelle que soit la méthode d'extraction de la solution du sol au laboratoire. On pourra utiliser indifféremment les deux modèles dans le domaine 0-30 dS m<sup>-1</sup>. Cependant, l'estimation de la  $CE_{ss}$  présente des incertitudes qui varient selon le mode d'extraction et dont l'origine est discutée.

- Pour l'extrait saturé, la  $CE_{ss}$  est sous-estimée avec les deux modes de calcul, pour les valeurs supérieures à 30 dS m<sup>-1</sup>. Le biais est probablement dû au mode opératoire, ce qui retirerait, en partie, à la méthode de l'extrait saturé, sa qualité de norme.

- Pour l'extrait dilué, l'estimation de la  $CE_{ss}$  est dépendante du mode de calcul. La  $CE_{ss}$  est surestimée avec le modèle linéaire, la sur-estimation augmentant avec la prise en compte de la densité des solutions. Le modèle non linéaire donne une estimation comparable à celle obtenue avec l'extrait saturé.

Les limites des modèles et la validité des hypothèses initiales sont discutées. L'expérimentation au champ n'ayant été réalisée qu'en conditions saturées, l'extrapolation de la méthode d'estimation de la  $CE_{ss}$  à la zone non saturée devra donc être envisagée avec prudence. Quoi qu'il en soit, cette méthode sera transposable à d'autres vallées inondées, salées et sulfatées acides.

### Mots clés

Conductivité électrique, solution du sol, capteur «in situ», extrait aqueux, sol sulfaté acide, sol salé, Basse-Casamance, Sénégal

## SUMMARY

## ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SOIL SOLUTION AND SOIL AQUEOUS EXTRACTS

Case of a saline acid sulphate soil in Lower Casamance (Senegal)

To avoid the disadvantages linked to laboratory soil solution extraction, especially soil structure disturbance and high diluted extracts, we have used the porous ceramic cup method to sample soil solution in field saturation conditions.

When we cannot use this method, we have estimated the electrical conductivity of field soil solution ( $EC_{ss}$ ) with EC measurements of laboratory aqueous extract (1/5 extract and saturated paste extract), according to a calculation method described in this paper. Considering a common dilution law of the solutions, two calculation models are applied and based on a solution electrical conductivity (EC) - dissolved mineral content (DC) relation. This relation is linear for linear model and exponential for non linear model. Solution density influence is also considered for each case.

Such calculations need to measure the water content when the soil solution is sampled. Calculated values are compared to values measured in field with porous ceramic cups for a saline and acid sulphate soil of Lower Casamance which has an electrical conductivity range comprised from  $10 \text{ dS m}^{-1}$  to  $110 \text{ dS m}^{-1}$ .

The non linear model is more appropriate whatever the soil solution extract method. Both models can be applied in  $0\text{-}30 \text{ dS m}^{-1}$  range. However, the  $EC_{ss}$  estimation is dependent on laboratory extraction method.

- For the saturated extract,  $EC_{ss}$  is underestimated with both models in the EC range higher than  $30 \text{ dS m}^{-1}$ . The deviation is probably due to the laboratory preparation with the soil saturation phase after air-drying. Salts are dissolved and the ion release in solution is dependent on contact time of water-soil. This assumption is no longer in accordance with the so-called norm of saturated extract method.

- For the 1/5 diluted extract, the  $EC_{ss}$  estimation is dependent on model type. It is overestimated with the linear model and the deviation increases when solution density is taken into account. The non linear model gives an  $EC_{ss}$  estimation equivalent to saturated extract case.

The model limits and the validity of initials assumptions are discussed. Although field experiment was carried out in saturated conditions,  $EC_{ss}$  estimation method must be extrapolated to unsaturated zone with caution. Nevertheless, this method is suitable to other flooded, saline and acid sulphate soils.

## Key-words

Electrical conductivity, soil solution, field technique, aqueous extract, acid sulphate soil, saline soil, Lower Casamance, Senegal

## RESUMEN

## CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO Y DE EXTRACTOS ACUOSOS DEL SUELO

Aplicación a un suelo sulfatado y ácido de "Basse Casamance" - Senegal

Para evitar los inconvenientes ligados a la extracción de la solución del suelo en laboratorio, a saber la destrucción de la estructura del suelo y la fuerte dilución de los extractos, hemos usado el método de muestreo in situ de la solución del suelo a partir de captadores de cerámica porosa, localizados en la zona saturada por el manto freático.

Cuando no se puede usar este método, la conductividad eléctrica de la solución del suelo in situ ( $CE_{SS}$ ) se estimó a partir de valores de CE medidos en el laboratorio sobre extractos acuosos (extractos 1/5 y extractos de pasta saturada), según un método de cálculo presentado en este artículo. Se considera una ley simple de dilución de las soluciones y se aplica dos modelos de cálculo según que la relación que liga la carga mineral disuelta (CD) de una solución y su conductividad eléctrica (CE) sea lineal (modelo lineal) o exponencial (modelo no lineal). La influencia de la densidad de las soluciones se toma en cuenta cada vez.

Los cálculos necesitan el conocimiento de la taza en agua cuando se efectúa una medida de la CE de la solución del suelo, sea en laboratorio o en el campo. Los dos modelos fueron probados y validados a partir de datos obtenidos para un suelo sulfatado, ácido y salado de "Basse Casamance" que presenta una gama de conductividad eléctrica entre  $10$  y  $110 \text{ dS m}^{-1}$ .

El modelo no lineal permite una mejor estimación de la  $CE_{SS}$  cualquiera que sea el método de extracción de la solución del suelo en el laboratorio. Se podría usar indiferentemente los dos modelos en el dominio  $0\text{-}30 \text{ dS m}^{-1}$ . Sin embargo, la estimación de la  $CE_{SS}$  presenta incertidumbres que varían según el modo de extracción y cuyo origen se discute.

- Para el extracto saturado, la  $CE_{SS}$  se subestima con los dos modos de cálculos, para los valores superiores a  $30 \text{ dS m}^{-1}$ . La diferencia está seguramente debida al modo operatorio, lo que quitaría en parte, al método del extracto saturado su cualidad de norma.

- Para el extracto diluido, la estimación de la  $CE_{SS}$  es dependiente del modo de cálculo. La  $CE_{SS}$  se sobrestima con el modelo linear; la sobrestimación aumenta si se toma en cuenta la densidad de la solución. El modelo no linear da una estimación comparable a la obtenida con el extracto saturado.

Los limites de los modelos y la validez de las hipótesis iniciales son discutidos. La investigación en el campo fue realizada únicamente en condiciones saturadas, así la extrapolación del método de estimación a la zona no saturada deberá ser considerada con prudencia. De todos modos este método podrá ser transferible a otros valles inundados, salados o sulfatados y ácidos .

Palabras claves

Conductividad eléctrica, solución del suelo, captor "in situ", extracto acuoso, suelo sulfatado y ácido, suelo salado, "Basse Casamance", Senegal.

**L**es sols salés naturels couvrent de grandes surfaces sur tous les continents et sous tous les climats (Szabolcs, 1989). Le développement mondial de la culture irriguée entraîne souvent une extension secondaire des terres salées liée à la dégradation chimique et physique des sols et à une mauvaise conduite de l'irrigation (Robert, 1992 ; Cheverry, 1995 ; Cheverry et Robert, 1996).

Pour croître dans les milieux salés, les espèces végétales résistent à la pression osmotique et aux contraintes chimiques (toxicité, carence...) en adaptant leur physiologie et, pour limiter les effets du sel sur les plantes et le sol, l'Homme a recours à des pratiques culturales spécifiques.

Aussi, la salinité des sols cultivés doit pouvoir être évaluée avec suffisamment de précision pour éviter ses effets négatifs sur la production agricole.

## LA MESURE DE LA SALINITÉ D'UN SOL

La détermination de la salinité d'un sol est fondée sur le principe de l'extraction d'un électrolyte dont on mesure la concentration en éléments dissous par diverses méthodes (résidus sec, bilan ionique). La physico-chimie des solutions d'électrolytes fournit les éléments nécessaires au calcul de la conductivité électrique d'une solution à partir de sa composition chimique, en considérant notamment la conductivité molaire équivalente des ions (Robinson et Stokes, 1970). Cependant, cette approche nécessite une analyse chimique complète de la solution ainsi que de nombreux calculs. On préférera mesurer

directement la capacité de l'électrolyte à conduire le courant électrique, propriété qui est d'autant mieux exprimée que la concentration ionique de l'électrolyte est plus élevée : la mesure de conductivité électrique (CE) est aisée et s'effectue grâce à une cellule de mesure que l'on plonge directement dans l'électrolyte. Un étalonnage préalable est nécessaire et la mesure est rapportée à une température standard, en général 25 °C.

### L'extraction de l'électrolyte

Les différentes méthodes d'extraction de l'électrolyte se répartissent entre le laboratoire et le terrain.

ζ Au laboratoire, l'électrolyte est extrait sous vide à partir d'un échantillon de sol préalablement séché à l'air, tamisé à 2 mm et porté à une teneur en eau donnée, celle-ci variant selon le mode de préparation de l'extrait. On distingue deux techniques d'extraction couramment utilisées :

- l'extrait dilué : le rapport entre la quantité de sol et la quantité d'eau nécessaire à la préparation de l'extrait est le même pour tous les échantillons. Ce rapport peut varier selon les laboratoires, mais il est en général de 1/5 : la masse d'eau ajoutée est égale à 5 fois la masse de sol (10 g), soit un volume d'eau d'environ 50 ml. Par conséquent, l'humidité pondérale du sol ( $H_{e1/5}$ ) est de 500 g d'eau pour 100 g de sol tamisé et séché à l'air.

- l'extrait saturé : la teneur en eau à la saturation du sol est prise comme état hydrique de référence ( $H_{es}$ , en g d'eau / 100 g de sol tamisé et séché à l'air). Elle est variable car elle dépend de la texture de l'échantillon. La méthode nécessite la fabrication d'une pâte saturée en eau qui doit présenter des caractéristiques physiques particulières (consistance, brillance...) demandant une longue préparation. La qualité opératoire

de celle-ci est primordiale car elle est source d'importantes erreurs. En fait, en détruisant la structure de l'échantillon, cette méthode porte l'échantillon à une teneur en eau qui ne correspond pas à la saturation réelle du sol en place mais plutôt à une saturation «potentielle» plus élevée.

La préparation de l'extrait de sol au laboratoire entraîne un biais méthodologique non négligeable, notamment pour les échantillons très salés. En effet, on ne prend pas en compte l'évolution géochimique de la solution du sol qui se concentre durant le séchage à l'air de l'échantillon de sol et qui se dilue durant l'humectation de celui-ci. Durant la phase de concentration, des phénomènes de sélection chimique, tels la précipitation de minéraux et l'échange ionique, se produisent. En revanche, au cours de l'humectation, la cinétique de dissolution minérale et d'échange ionique dépend de la nature des éléments participant à ces réactions chimiques, de la quantité de solvant ajouté et du temps de contact avec celui-ci.

C'est pourquoi la méthode de l'extrait saturé permet d'approcher la «solution» du sol d'une façon plus réaliste et de mieux évaluer les effets de la salinité sur la croissance des plantes (Richards, 1954). Elle est donc devenue la norme nationale (Afnor, 1987) et internationale (Mathieu, 1996). Elle est corrélée à d'autres méthodes de mesure de la salinité des sols, notamment les méthodes électriques (Halvorson et al., 1977 ; Rhoades, 1981 ; El Oumri et Vieillefon, 1983 ; Montoroi, 1992) et électromagnétiques (Job, 1993 ; Montoroi, 1996a). Comme elle est lourde et délicate à mettre en œuvre par les laboratoires, des modifications techniques ont été apportées pour réduire les délais d'analyse et conserver une bonne fiabilité de la mesure. Par exemple, la CE de l'extrait saturé est estimée à partir d'une mesure de CE réalisée directement dans la pâte saturée et du pourcentage de saturation de l'échantillon (Rhoades, 1989a et b ; Slavich et Petterson, 1990).

ζ Sur le terrain, la solution est prélevée directement dans le sol à partir de capteurs en céramique poreuse. La solution du sol est obtenue dans le capteur en exerçant une dépression par un pompage manuel. Le prélèvement de la solution du sol est réalisé à la teneur en eau du sol en place ( $H_{ss}$ , en g d'eau / 100 g de sol séché à 105 °C), donc dans les conditions réelles de croissance des plantes. Cependant, l'utilisation du capteur de solution in situ est limitée par les forces de succion du sol et n'est adaptée qu'aux états hydriques compris entre la saturation et la capacité au champ (Litaor, 1988 ; Grossmann et Udluft, 1991).

## Objectif de l'étude

Les méthodes précédentes, couramment utilisées dans les études de sols salés (Rieu et Cheverry, 1976 ; Bresler et al., 1982 ; Rhoades, 1984), donnent des valeurs difficilement exploitables dans l'absolu. Notamment, pour réaliser des bilans

de matière, une estimation de la charge dissoute (résidu sec, bilan ionique complet) doit être faite simultanément, ce qui alourdit considérablement les expérimentations.

Toutes les méthodes d'extraction, qui ont leurs propres limites, présentent l'inconvénient majeur de ne pas correspondre au même état hydrique du sol. En prenant en général la méthode de l'extrait saturé comme norme, des corrélations permettent la conversion des données obtenues par une autre méthode d'extraction. Une estimation de la CE sur extrait saturé à partir de la CE sur extrait dilué a souvent été proposée. Plusieurs relations ( $CE_{es}/CE_{e1/n}$ ) sont établies en prenant en compte l'influence de l'humidité du sol ( $H_{es}$ ), qui dépend de la teneur en argile. De telles relations ont uniquement une valeur régionale car elles dépendent du faciès chimique des solutions (Le Brusq et Loyer, 1982 ; Slavich et Petterson, 1993).

La CE de la solution du sol ( $CE_{ss}$ ) n'est pas une donnée toujours disponible, car sa mesure nécessite la mise en place d'un dispositif de terrain, parfois lourd. Aussi, un protocole de calibration des mesures de laboratoire par rapport à des mesures de terrain est proposé dans cet article. Il s'appuie sur une démarche statistique qui prend comme référence la méthode de terrain, bien adaptée aux solutions concentrées (Cheverry, 1983). Si la  $CE_{ss}$  ne peut pas être directement mesurée sur le terrain, elle pourra être estimée à partir d'une mesure de la CE réalisée au laboratoire sur un extrait dilué (rapport sol/eau de 1/5,  $CE_{e1/5}$ ) ou saturé ( $CE_{es}$ ). Ainsi, l'intérêt majeur d'une telle estimation sera de pouvoir interpréter les données de salinité du laboratoire en valeurs absolues, dans les conditions hydriques réellement observées sur le terrain.

## DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

### Site d'étude

Le bassin versant de Djuinoum est situé au nord-est de Ziguinchor, à environ 15 km, sur la rive droite du fleuve Casamance et 60 km de son embouchure (figure 1). Il est formé, dans la partie haute, par des interfluves larges de 2 km, longs de 2 à 3 km et ne dépassant pas 25 m d'altitude et, dans la partie basse, par un bas-fond quasiment plat, d'altitude inférieure à un mètre. Celui-ci présente un axe principal d'écoulement d'orientation nord-ouest sud-est. Cet axe, correspondant au lit mineur d'un affluent direct du fleuve Casamance, est appelé localement bolon ou, par abus de langage, marigot. A l'exutoire du bassin, un barrage anti-sel empêche l'intrusion des eaux marines depuis 1983 (Montoroi, 1996a et b).

En amont de ce barrage, les vasières à mangrove, auparavant ennoyées par les marées quotidiennes, ont évolué rapidement en sols sulfatés acides, suite à leur exondation sai-

sonnière. Durant cette pédogénèse, les sédiments, qui présentaient une faible consistance physique, ont progressivement subi une maturation physique<sup>(1\*)</sup>. Ce processus irréversible se caractérise par un tassement et une déshydratation du matériau (Dent, 1986).

Les sols du bas-fond présentent des manifestations de salinisation liée à l'invasion d'eaux marines sursalées au cours de la récente sécheresse<sup>(2\*)</sup> et à l'acidification des sols de mangrove (Le Brusq et al., 1987 ; Montoroi, 1995 ; Montoroi et Rieu, 1997). La salinité des sols du bas-fonds, forte au voisinage du lit du marigot, décroît à mesure que l'on s'en éloigne et que l'on se rapproche des versants du plateau environnant (Albergel et al., 1993 ; Montoroi, 1996a et b).

Pour se situer dans une gamme de variations de salinité suffisamment large, une séquence a été choisie perpendiculairement

à l'axe du marigot sur un sol sulfaté acide salé (Brunet, 1988). Cette séquence, longue d'environ 150 m, est localisée en rive droite du marigot, au nord de la piste principale (figure 1).

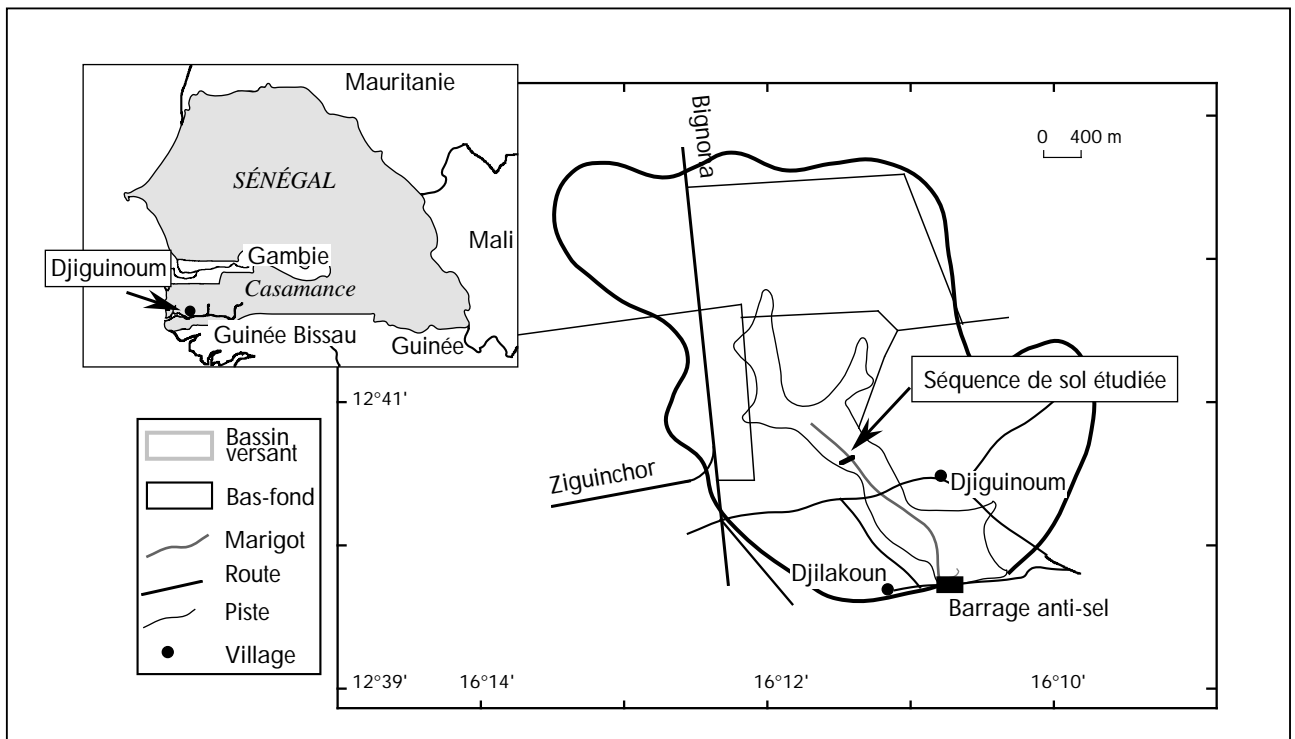
Le sol est très argileux (60-70 %) sur le premier mètre et présente une maturation physique bien développée dans les 50-60 premiers centimètres : la structure est massive et se débite en prismes de taille décimétrique. En profondeur, sa consistance physique diminue rapidement et devient faible dans la zone saturée. A proximité du marigot, des lits plus sableux sont présents en profondeur. La nappe phréatique est située entre 60 et 70 cm de profondeur au moment de l'expérimentation (Albergel et al., 1991).

### Matériel et méthodes

Deux lots de capteurs neufs en céramique poreuse (bou-

Figure 1 - Localisation du site de Djiguinoum.

Figure 1 - Site localization of Djiguinoum.



(1\*) Le degré de maturation physique s'évalue par un indice n qui est liée à la texture et aux teneurs en eau et en matière organique selon la formule (Pons et Zonneveld, 1965)

$$n = \frac{A - 0,2Z}{L + 3H} \text{ dans laquelle :}$$

- A représente la teneur en eau du sol séché à l'air
- L la teneur en argile
- H la teneur en matière organique totale
- Z la fraction minérale non colloïdale : Z = 100 - L - H

Plus n est élevé, moins le sol est développé : un indice n supérieur à 2 correspond à un matériau de consistance molle, non préhensile. Un sol est bien développé physiquement lorsque l'indice n est inférieur à 0,7 : il est très consistant et résiste à la pression manuelle.

(2\*) A Ziguinchor, la pluviométrie annuelle sur la période 1971-1990 est de 1133 mm alors qu'elle est de 1541 mm et 1524 mm sur les deux périodes précédentes (1931-1950 et 1951-1970), soit une diminution d'environ 25 %. Bien que les pluviométries des dernières années soient relativement abondantes, le climat accuse globalement un déficit de pluviométrie depuis plus de vingt cinq ans.

gies poreuses) ont été utilisés, comportant respectivement 9 cannes de 65 cm et 10 cannes de 105 cm de longueur (Nardeux-Humisol, modèle DTS 2000). Le diamètre interne de chaque canne est de 20 mm. La bougie poreuse proprement dite présente une épaisseur de 5 mm sur une longueur de 8 cm.

Avant leur installation sur le terrain, les bougies ont été rincées, au laboratoire, tout d'abord à l'eau distillée désaérée, puis à l'eau acidifiée selon le protocole décrit par Poss (1991). Plusieurs tests de conductivité hydraulique en milieu aqueux ont été effectués pour connaître l'homogénéité des lots et constater d'éventuels défauts (Cheverry, 1983). Le volume prélevé dépend du temps de la mise en dépression et de l'intensité de cette dépression. La figure 2 présente le volume d'eau recueilli au bout de 10 mn lorsque l'on applique différentes dépressions à une grande et une petite canne. L'écart augmente pour les fortes dépressions en raison du plus grand volume d'air déprimé. Pour une même dépression (500 hPa), le volume d'eau est mesuré à différents instants sur les deux lots de bougies poreuses. On constate une forte variabilité pour des temps courts de mise en dépression (5 mn). Cette variabilité diminue dans le temps, notamment pour le petit modèle et devient très faible lorsque les capteurs ont atteint leur volume maximum (figure 3). Celui-ci est acquis après 15 mn pour le petit modèle et après 30 mn pour le grand modèle. Il ne varie pratiquement plus après 36 h, la variabilité demeurant faible (tableau 1). Le lot des grandes cannes a été retenu pour l'étude en raison du plus grand volume de solution prélevé et de l'homogénéité du lot.

Les cannes de prélèvement ont été installées tous les 6 m le long de la séquence, déterminant 25 sites de mesure sur une longueur de 144 m (figure 4). Elles sont disposées verticalement à la profondeur de 75 cm, juste sous le niveau statique de la nappe. Un dispositif piézométrique aurait alors simplement suffi mais la préférence pour les bougies poreuses s'explique par leur emploi systématique dans les sols inondés du bas-fond (Montoroi et al., 1993). Une dépression de 500 hPa a été appliquée pour accélérer la mise en équilibre hydrostatique avec la nappe d'eau libre. La mesure du volume de solution prélevée a été réalisée et, sur les 25 échantillons, le volume moyen est de 214 cm<sup>3</sup> avec un écart-type de 50.

Après le prélèvement de la solution du sol, une fosse est creusée, sur chaque site, pour l'enlèvement de la canne et la prise d'un échantillon de sol autour de la céramique. Cet échantillon correspond à un volume d'environ 1 dm<sup>3</sup> et est destiné aux analyses sur extraits aqueux.

Le long de ce transect et en regard de chaque site de mesure, à une distance d'environ un mètre, un forage à la tarière a été réalisé afin de prélever l'eau de la nappe à la même profondeur que le capteur de solution. Ce prélèvement supplémentaire a pour objet de valider l'information obtenue par le capteur.

Figure 2 - Relation entre le volume d'eau extrait et la dépression appliquée pour deux lots de capteurs en céramique poreuse.

Figure 2 - Sampled water volume as related to applied suction for two sets of porous ceramic cups.

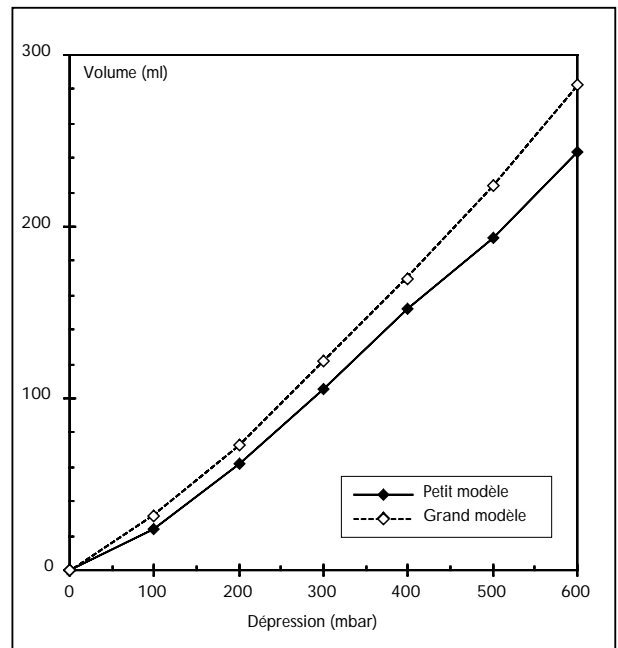


Figure 3 - Volume d'eau extrait en fonction du temps pour deux lots de capteurs en céramique poreuse.

Figure 3 - Sampled water volume versus time for two sets of porous ceramic cups.

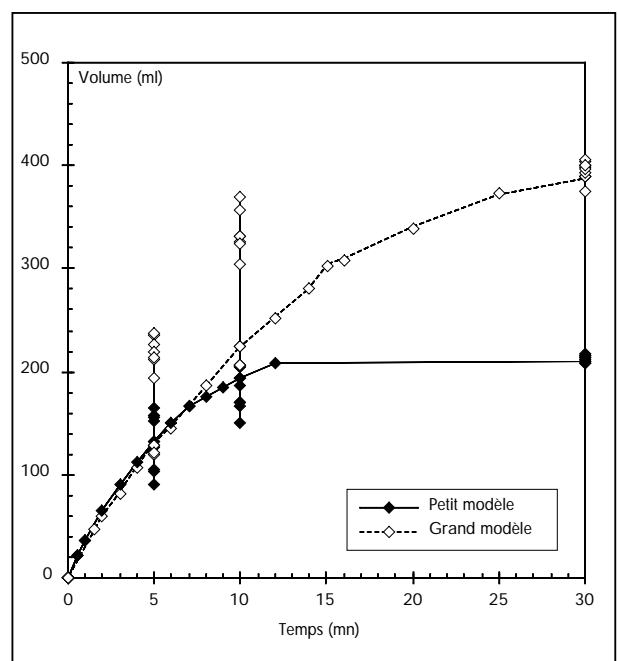


Tableau 1 - Volume d'eau prélevé en fonction du temps pour deux lots de capteurs en céramique poreuse.

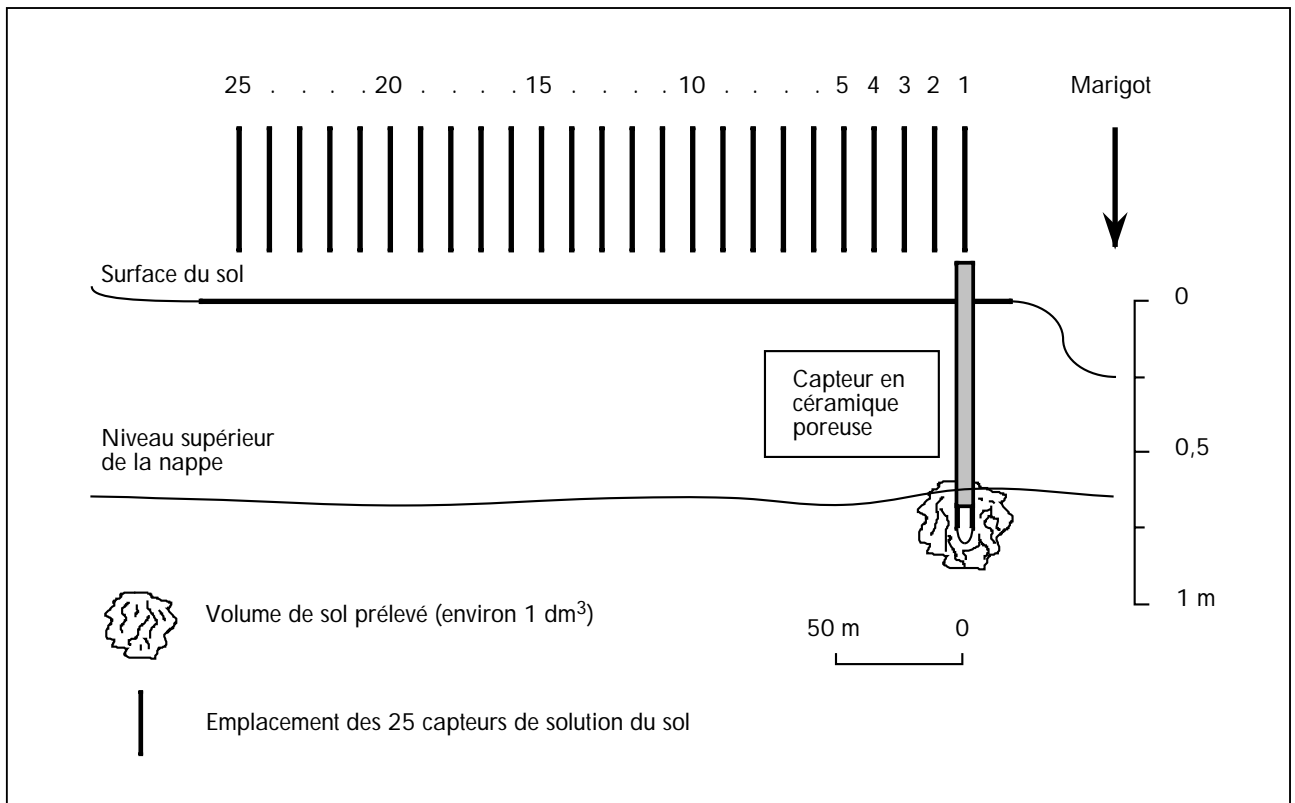
Table 1 - Sampled water volume versus time for two sets of porous ceramic cups.

Temps	Lot petit modèle (65 cm, n=9)				Lot grand modèle (105 cm, n=10)			
	V <sub>max</sub>	V <sub>min</sub> (ml)	V <sub>moy</sub>	σ	V <sub>max</sub>	V <sub>min</sub> (ml)	V <sub>moy</sub>	σ
5 mn	165	90	132	26	238	120	191	46
10 mn	206	150	184	19	370	206	298	59
30 mn	217	208	213	3	406	375	395	8
36 h	210	200	205	3	400	375	392	8

n : nombre de capteurs par lot      V<sub>max</sub> : Volume maximal      V<sub>min</sub> : Volume minimal      V<sub>moy</sub> : Volume moyen      σ : écart-type

Figure 4 - Dispositif expérimental.

Figure 4 - Experimental design.



Sur tous les échantillons d'eau prélevés (nappe et solution du sol), une mesure de pH a été faite immédiatement sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre Knick muni d'une électrode en verre.

La conductivité électrique (CE) des eaux est mesurée quelques jours après au laboratoire à l'aide d'un conductivimètre Metrohm 660 et ramenée à 25 °C. Les concentrations totales des anions (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) sont déterminées par colorimé-

trie et celles des cations (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>) par spectrophotométrie d'absorption atomique.

Le dosage de la silice dissoute est réalisé par réaction en milieu acide avec le molybdate d'ammonium pour former un complexe silico-molybdique jaune qui devient bleu en milieu réducteur.

Les valeurs de concentrations, exprimées en termes de molarité, permettent de calculer les paramètres suivants :

- la concentration ionique équivalente (C) selon la relation  $C = 1/2 \sum c_k$ , où C et  $c_k$  (concentrations de l'ion k) sont exprimées en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  (3\*);

- la charge minérale dissoute (CD) selon la relation  $CD = \sum mk$ , où CD et  $m_k$  (concentration de l'espèce chargée ou neutre k) sont exprimés en  $\text{g L}^{-1}$ ;

- la force ionique stœchiométrique (I) selon la relation  $I = 1/2 \sum c_k z_k^2$ , où I et  $c_k$  (concentration de l'ion k) sont exprimées en  $\text{mol L}^{-1}$  et  $z_k$  représente la valence de l'ion k.

Pour les eaux de la nappe, des mesures de densité ont également été réalisées à l'aide d'un densimètre flottant.

Pour cette étude, on dispose donc de deux lots de données :

- la CE et les analyses chimiques complètes de la nappe et de 3 types de solution du sol (in situ, extrait dilué et extrait saturé).

- la CE et la teneur en eau du sol relatives à chacun des 3 types de solution.

## PRINCIPE DU CALCUL DE LA $CE_{SS}$ DE LA SOLUTION DU SOL IN SITU A PARTIR DES MÉTHODES DE LABORATOIRE

Il s'agit d'estimer la CE de la solution du sol in situ ( $CE_{SS}$ ) à partir des mesures faites sur les extraits aqueux ( $CE_{es}$  ou  $CE_{e1/5}$ ).

Tout d'abord, on fera l'hypothèse que les espèces ioniques se conservent en phase aqueuse au cours d'un processus de dilution ou de concentration. On suppose donc qu'il n'y a pas d'échanges nets de matière avec la phase solide.

On rappellera que la masse en élément dissous ( $M_i$ , en g) contenus dans un volume de sol ( $V$ , en  $\text{dm}^3$ ) est fonction de la charge dissoute ( $CD_i$ , en  $\text{g L}^{-1}$ ) et du volume ( $V_i$ , en  $\text{dm}^3$ ) de la solution i contenue dans le volume de sol V. La relation s'écrit :

$$M_i = CD_i V_i$$

Or, lorsque l'on rapporte les volumes d'eau ( $V_{eau}$ ) et de solution du sol ( $V_i$ ) à une même masse de solvant, on a la relation, à une température t (en °C) et à 1 atm (pression atmosphérique normale, 1 atm = 101 325 Pa) :

$$V_i = V_{eau} / (\rho_{i(t)} / \rho_{eau(t)}) = V_{eau} D_{eau(t)} / D_{i(t)}$$

où :

$\rho_{i(t)}$  est la masse volumique de la solution du sol i et  $\rho_{eau(t)}$  celle de l'eau pure,

$D_{i(t)}$  est la densité de la solution du sol i c'est-à-dire le rapport de sa masse volumique ( $\rho_{i(t)}$ ,  $\text{kg dm}^{-3}$ ) à celle de l'eau pure à

4 °C et à 1 atm ( $\rho_{eau(4)}$ ,  $\text{kg dm}^{-3}$ ) :  $D_i = \rho_{i(t)} / \rho_{eau(4)}$ ,

$D_{eau(t)}$  est la densité de l'eau pure c'est-à-dire le rapport de sa masse volumique ( $\rho_{i(t)}$ ,  $\text{kg dm}^{-3}$ ) à celle de l'eau pure à 4 °C et à 1 atm ( $\rho_{eau(4)}$ ,  $\text{kg dm}^{-3}$ ) :  $D_{eau(t)} = \rho_{eau(t)} / \rho_{eau(4)}$

D'où :

$$M_i = (CD_i / D_{i(t)}) V_{eau} D_{eau(t)} = (CD_i / D_{i(t)}) (M_{eau} / \rho_{eau(t)}) D_{eau(t)}$$

L'usage veut que l'on exprime la masse d'eau  $M_{eau}$  en g pour 100 g de sol sec et, pour une solution extraite i, on la notera  $H_i$ .

En tenant compte des unités, on déduit la masse de sel dans 100 g de sol sec selon la relation :

$$M_i = (CD_i / D_{i(t)}) H_i 10^{-3} D_{eau(t)}$$

Comme la solution aqueuse i peut être obtenue par différentes méthodes, on aura à 25 °C et à 1 atm ( $D_{eau(25)} = \text{constante}$ ) :

$$(CD_{ss} / D_{ss}) H_{ss} = (CD_{es} / D_{es}) H_{es} = (CD_{e1/5} / D_{e1/5}) H_{e1/5} \quad (1)$$

où  $CD_{ss}$ ,  $CD_{es}$  et  $CD_{e1/5}$  représentent la charge dissoute (en  $\text{g L}^{-1}$ ) de la solution du sol in situ, de l'extrait de sol saturé et de l'extrait 1/5,  $H_{ss}$ ,  $H_{es}$  et  $H_{e1/5}$  étant les teneurs en eau pondérales du sol (en g pour 100 g de sol sec) au moment de l'extraction de la solution. Le sol sec correspond en fait, soit à un séchage à l'air (cas des extractions au laboratoire), soit à un séchage en étuve à 105 °C (cas de l'extraction in situ). On fera la seconde hypothèse qu'il n'y a pas d'influence du mode de séchage sur la teneur en eau pondérale du sol.

On considère alors deux cas selon que l'on néglige ou pas la correction de densité par rapport à l'eau pure.

### Calcul de la $CE_{SS}$ sans prise en compte de la densité de la solution du sol

On considère que la densité de la solution du sol est égale à celle de l'eau pure, quelle que soit la concentration ionique. La relation (1) s'écrit :

$$CD_{ss} H_{ss} = CD_{es} H_{es} = CD_{e1/5} H_{e1/5} \quad (2)$$

Pour exprimer cette relation en termes de conductivité, il importe de connaître le lien qui existe entre la charge dissoute (CD) et la conductivité électrique (CE). Pour cela, deux modèles de calcul seront pris en considération, l'un étant de type linéaire et l'autre de type exponentiel.

#### Modèle linéaire

La relation  $CD = f(CE)$  est considérée comme étant une expression de proportionnalité de la forme  $CD = a CE$ , que l'on admet être unique pour toutes les méthodes d'extraction de la solution du sol (Le Brusq et Loyer, 1982).

Le calcul de la CE de la solution du sol in situ ( $CE_{p_{ss}}$ ) est déduit de la relation (2) :

$$CE_{p_{ss}} = CE_e (H_e / H_{ss}) \quad (3)$$

(3\*)  $\text{mmol}_c$  signifie millimole charge et correspond au milliéquivalent (még)



où  $e$  représente l'extrait 1/5 ( $e = e_{1/5}$  et  $H_{e_{1/5}} = 500$  g/100 g) ou l'extrait saturé ( $e = es$ ).

Cette relation de proportionnalité doit être vérifiée pour chaque méthode. Le Brusq et Loyer (1982) montrent qu'elle peut être admise pour des raisons pratiques, par exemple, pour le classement des sols en fonction de leur salinité, mais qu'en théorie, il existe un biais lié à la dilution de l'extrait.

#### Modèle non linéaire

La relation  $CD = f(CE)$  correspond à une expression de type exponentielle, de la forme  $CD = b CE^c$  (Mac Neal et al., 1970).

En considérant que cette relation est unique, quelle que soit la méthode d'extraction de la solution du sol, et est valable pour chaque méthode dans des domaines de concentration différents, nous pouvons écrire, d'après (2), la relation suivante :

$$CE_{t_{ss}}^c = CE_e^c (H_e / H_{ss})$$

où  $e$  représente l'extrait 1/5 ( $e = e_{1/5}$  et  $H_{e_{1/5}} = 500$  g/100 g) ou l'extrait saturé ( $e = es$ ).

Comme la relation  $CD = b CE^c$  a été déterminée expérimentalement, le coefficient  $c$  est connu et on calculera alors la CE de la solution du sol in situ ( $CE_{t_{ss}}$ ) selon l'expression :

$$CE_{t_{ss}} = CE_e (H_e / H_{ss})^{1/c} \quad (4)$$

#### Calcul général de la $CE_{ss}$ avec prise en compte de la densité de la solution du sol

On considère la relation (1) dans sa formulation générale.

#### Modèle linéaire

La CE de la solution du sol in situ ( $CE_{pd_{ss}}$ ) est calculée selon l'expression :

$$CE_{pd_{ss}} = CE_e (H_e / H_{ss}) / (D_e / D_{ss}) \quad (5)$$

ou encore avec la relation (3) :

$$CE_{pd_{ss}} = CE_{p_{ss}} / (D_e / D_{ss})$$

où  $e$  représente l'extrait 1/5 ( $e = e_{1/5}$  et  $H_{e_{1/5}} = 500$  g/100 g) ou l'extrait saturé ( $e = es$ ).

#### Modèle non linéaire

La CE de la solution du sol in situ ( $CE_{td_{ss}}$ ) est déduite de la relation :

$$CE_{td_{ss}}^c = CE_e^c (H_e / H_{ss}) / (D_e / D_{ss})$$

où  $e$  représente l'extrait 1/5 ( $e = e_{1/5}$  et  $H_{e_{1/5}} = 500$  g/100 g) ou l'extrait saturé ( $e = es$ ).

Comme la relation  $CD = b CE^c$  est connue, on calculera alors la CE de la solution du sol in situ ( $CE_{td_{ss}}$ ) selon la relation :

$$CE_{td_{ss}} = CE_e (H_e / H_{ss})^{1/c} / (D_e / D_{ss})^{1/c} \quad (6)$$

ou encore avec la relation (4) :

$$CE_{td_{ss}} = CE_{t_{ss}} / (D_e / D_{ss})^{1/c}$$

Pour valider le modèle linéaire ou non linéaire, on compare, dans les deux cas, les valeurs calculées ( $CE_{p_{ss}}$ ,  $CE_{pd_{ss}}$ ,  $CE_{t_{ss}}$  ou  $CE_{td_{ss}}$ ) aux valeurs mesurées expérimentalement ( $CE_{m_{ss}}$ ).

## CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DE LA SOLUTION DU SOL

La composition chimique des différents types de solution du sol est donnée dans le tableau 2. Quelle que soit la méthode de prélèvement ou d'extraction de la solution du sol, le pH est très acide et le faciès ionique chloruré sodique. La gamme de variation de la conductivité électrique dépend de la méthode utilisée et s'étend globalement de 0 à 110 dS m<sup>-1</sup>.

#### Relation densité - conductivité électrique

Une relation entre la densité ( $D_n$ ) et la CE des eaux de la nappe ( $CE_n$ ) a été calculée par régression à partir de 54 couples de mesure ( $D_n$ ,  $CE_n$ ) y compris celui de l'eau pure ( $D_{eau}$ , 0). La densité de l'eau pure est le rapport de sa masse volumique  $\rho_{eau}(t)$  à celle de l'eau pure à 4 °C et à 1 atm ( $\rho_{eau(4)} = 0,999975$  kg dm<sup>-3</sup>). A 25 °C et à 1 atm, la masse volumique de l'eau pure  $\rho_{eau(25)}$  étant donnée par le rapport du poids moléculaire de l'eau (18,0153 g mol<sup>-1</sup>) au volume molaire (18,0681 cm<sup>3</sup> mol<sup>-1</sup>), soit 0,997077 kg dm<sup>-3</sup>, la densité  $D_{eau(25)}$  est égale à 0,9971.

La relation, obtenue à 25 °C et à 1 atm, est valable dans le domaine 0-110 dS m<sup>-1</sup> (figure 5) et a pour expression :

$$D_n = 0,9966 \text{ Exp}(5,505 \cdot 10^{-4} CE_n) \quad r^2 = 0,998 \quad (7)$$

En référence, on a calculé le même type de relation pour l'eau de mer en considérant l'équation d'état de l'eau de mer (Millero et al., 1976 ; Millero et Poisson, 1981), qui donne la masse volumique de l'eau de mer ( $\rho_{mer}$ , kg m<sup>-3</sup>) en fonction de la salinité pratique ( $S$ , ups<sup>(4\*)</sup>), de la température ( $t$ , °C) et de la pression hydrostatique ( $p$ , bars). A une température  $t$  et à 1 atm, la salinité pratique  $S$  est calculée à partir d'une expression faisant intervenir le rapport de la conductivité électrique d'un échantillon d'eau de mer à celle d'une eau de mer standard à 15 °C, à 1 atm et de salinité  $S = 35$  ups, soit 42,914 dS m<sup>-1</sup> (Copin-Montégut, 1996). La densité de l'eau de mer à une température  $t$  et à 1 atm ( $D_{mer(t)}$ ) est égale au rapport de sa masse volumique  $\rho_{mer(t)}$  à celle de l'eau pure à 4 °C et à 1 atm ( $\rho_{eau(4)}$ ).

L'expression de la relation densité - CE pour l'eau de mer, à 25 °C et à 1 atm, est obtenue à partir de 12 couples de mesure (Lyman et Fleming, 1940 cité dans Weast et al., 1985) et du

(4\*) unités pratiques de salinité

Tableau 2 - Composition chimique de la nappe, de la solution du sol in situ, des extraits aqueux dilué et saturé pour la séquence de sol de Djigouinoum.

a		Eau de nappe													
Site	CE (dS m <sup>-1</sup> )	pH	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	CD	I	
						(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )			(mg L <sup>-1</sup> )		(mol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )		(g L <sup>-1</sup> )		(mole L <sup>-1</sup> )
1	98,8	4,05	1239	108	50	214	934	14,0	0,74	0,14	78	1,28	74,8	1,47	
2	105,0	3,59	1330	121	39	217	998	18,0	3,22	1,54	51	1,36	80,1	1,56	
3	95,6	3,71	1193	125	30	194	902	17,0	1,89	0,29	51	1,23	72,8	1,41	
4	100,6	3,32	1265	138	32	199	952	18,0	5,45	3,76	111	1,31	77,4	1,50	
5	106,6	3,21	1352	142	46	241	1014	17,0	10,45	1,47	108	1,41	82,8	1,64	
6	94,6	3,66	1179	104	43	212	892	13,0	0,96	0,05	39	1,22	71,3	1,40	
7	90,2	3,28	1115	98	30	183	847	14,0	6,23	4,55	98	1,15	67,4	1,32	
8	65,0	3,56	763	80	23	117	594	9,6	3,67	0,39	60	0,80	46,9	0,91	
9	65,0	3,64	763	80	22	113	594	9,7	3,00	0,50	62	0,79	46,8	0,90	
10	57,8	3,54	667	73	19	95	523	8,8	3,22	0,47	15	0,70	41,1	0,79	
11	54,5	3,46	623	66	18	87	491	8,3	4,45	2,22	74	0,65	38,5	0,74	
12	48,7	3,46	547	58	16	77	434	6,9	4,89	1,29	69	0,57	33,8	0,65	
13	45,0	3,58	499	57	14	69	399	5,5	5,45	2,33	87	0,53	31,1	0,60	
14	36,9	3,48	398	43	17	67	323	3,7	3,56	0,43	53	0,43	25,0	0,50	
15	35,7	3,39	383	42	26	84	311	2,4	2,67	1,54	84	0,43	24,5	0,51	
16	35,2	3,39	376	43	27	83	306	3,0	3,22	1,90	92	0,42	24,3	0,50	
17	35,6	3,34	381	62	21	68	310	3,8	7,01	6,55	120	0,43	25,4	0,52	
18	36,0	3,39	387	56	12	54	314	5,8	3,78	1,54	77	0,42	24,9	0,48	
19	22,9	3,32	229	36	7,2	30	192	3,2	1,89	0,35	33	0,25	14,9	0,29	
20	31,2	3,36	328	47	11	45	269	5,0	2,67	1,61	76	0,35	21,2	0,41	
21	27,5	3,15	282	43	10	40	234	4,6	2,11	0,54	70	0,31	18,4	0,36	
22	24,3	3,23	246	37	11	38	205	4,0	1,67	1,18	67	0,27	16,2	0,32	
23	32,0	3,30	337	50	16	51	276	4,3	5,56	5,80	93	0,37	22,1	0,44	
24	21,6	3,32	214	36	11	34	181	2,5	4,45	0,72	67	0,24	14,3	0,29	
25	11,0	3,16	99	17	6,3	17	87	1,2	2,22	0,47	4,7	0,12	6,7	0,14	

b		Solution du sol													
Site	CE (dS m <sup>-1</sup> )	pH	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	CD	I	
						(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )			(mg L <sup>-1</sup> )		(mol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )		(g L <sup>-1</sup> )		(mole L <sup>-1</sup> )
1	106,6	3,68	1352	118	51	255	1014	15,0	0,73	1,40	74	1,40	81,8	1,62	
2	100,7	3,41	1266	122	34	206	953	16,0	4,23	2,04	50	1,30	76,6	1,49	
3	85,3	3,55	1045	107	27	181	797	14,0	1,22	0,50	48	1,09	63,9	1,25	
4	94,4	3,36	1176	129	29	202	890	16,0	4,34	4,69	89	1,23	72,3	1,41	
5	100,1	3,29	1258	147	37	210	948	15,0	10,67	10,56	130	1,32	77,9	1,54	
6	93,3	3,83	1160	108	42	218	878	13,0	0,68	0,54	42	1,21	70,6	1,40	
7	74,2	3,41	890	101	24	148	686	11,0	4,89	3,72	70	0,93	55,1	1,08	
8	58,6	3,55	678	73	20	105	531	8,3	2,22	1,25	57	0,71	41,9	0,81	
9	59,0	3,69	684	64	17	90	536	7,7	1,33	1,04	47	0,70	41,4	0,79	
10	54,2	3,62	620	61	17	89	489	8,1	2,22	1,07	58	0,64	38,0	0,73	
11	52,1	3,55	592	60	17	86	468	7,4	4,34	1,72	64	0,62	36,5	0,71	
12	45,9	3,58	511	55	15	76	408	6,3	3,45	2,33	61	0,54	31,7	0,62	
13	39,8	3,80	434	49	12	61	350	4,8	2,67	0,90	69	0,46	27,1	0,52	
14	39,6	3,50	431	46	16	69	348	4,4	3,22	0,68	67	0,46	26,9	0,53	
15	34,7	3,65	370	29	14	50	302	1,9	2,78	1,33	78	0,39	22,5	0,44	
16	33,1	3,36	351	52	18	63	287	3,7	7,01	2,90	130	0,39	23,1	0,47	
17	31,9	3,55	336	49	16	58	275	3,9	2,89	0,64	82	0,37	21,9	0,44	
18	35,6	3,55	381	52	12	53	310	5,5	3,11	2,08	83	0,41	24,4	0,47	
19	22,0	3,67	218	32	7,1	30	184	2,9	1,45	3,19	38	0,24	14,3	0,28	
20	30,9	3,53	324	41	9,7	41	266	4,4	2,11	1,65	72	0,34	20,6	0,39	
21	27,2	3,36	280	42	10	41	232	4,5	1,78	1,72	75	0,31	18,3	0,36	
22	23,1	3,55	231	35	11	35	194	3,6	1,22	1,29	69	0,26	15,2	0,30	
23	28,6	3,50	296	46	14	46	244	3,7	3,67	7,84	92	0,33	19,6	0,40	
24	23,7	3,38	238	37	13	37	199	2,7	3,89	6,45	87	0,27	15,9	0,32	
25	20,6	3,47	203	29	11	30	172	2,5	3,34	1,97	68	0,23	13,4	0,27	

Table 2 - Chemical composition of groundwater, in situ soil solution, 1/5 diluted and saturated aqueous extracts for Djiguinoum soil sequence.

c	Extrait 1/5		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	C	CD	I
	Site	CE (dS m <sup>-1</sup> )												
1	5,3	3,92	42,7	5,3	2,0	5,1	36,7	0,7	0,02	0,00	-	0,046	2,7	0,05
2	10,7	3,87	100,2	12,5	3,3	18,8	81,3	2,0	0,18	0,00	-	0,109	6,4	0,13
3	12,3	3,98	120,0	16,4	3,3	22,0	104,0	2,4	0,08	0,00	-	0,134	7,9	0,16
4	7,8	3,13	65,6	12,9	2,5	14,6	58,3	1,3	1,56	0,40	-	0,079	4,6	0,10
5	5,6	3,53	46,1	7,6	2,1	10,7	41,1	0,9	0,58	0,02	-	0,055	3,2	0,07
6	4,4	4,02	35,8	4,3	1,8	8,3	28,7	0,6	0,00	0,00	-	0,040	2,3	0,05
7	9,6	3,67	87,7	13,5	2,7	17,0	75,2	1,7	0,22	0,00	-	0,099	5,8	0,12
8	8,3	3,80	75,2	11,4	2,4	13,2	68,7	1,6	0,12	0,00	-	0,086	5,1	0,10
9	5,7	4,22	45,9	8,0	1,2	6,6	47,3	1,0	0,02	0,00	-	0,055	3,2	0,06
10	6,1	4,11	50,6	8,5	1,3	6,8	50,3	1,1	0,00	0,00	-	0,059	3,5	0,07
11	5,5	3,95	44,7	7,6	1,3	6,6	44,4	1,0	0,02	0,00	-	0,053	3,1	0,06
12	6,0	3,90	48,9	8,6	1,6	7,7	48,8	1,0	0,04	0,00	-	0,058	3,4	0,07
13	3,4	3,92	25,9	4,9	0,7	m3,7	25,4	0,5	0,00	0,00	-	0,031	1,8	0,04
14	3,3	3,99	25,0	5,0	1,0	4,3	24,1	0,5	0,00	0,00	-	0,030	1,8	0,04
15	2,5	3,65	18,5	4,0	1,6	5,1	14,9	0,3	0,06	0,00	-	0,022	1,3	0,03
16	2,4	3,61	16,8	4,5	1,4	4,2	15,0	0,4	0,08	0,00	-	0,021	1,3	0,03
17	2,5	3,91	17,5	5,3	0,8	2,8	18,9	0,4	0,00	0,00	-	0,023	1,4	0,03
18	4,3	3,83	32,6	7,8	1,0	4,4	33,9	0,9	0,00	0,00	-	0,040	2,4	0,05
19	5,1	3,74	39,4	8,7	1,4	5,8	41,1	1,0	0,16	0,00	-	0,049	2,9	0,06
20	5,0	3,71	38,3	9,0	1,5	5,9	39,9	1,0	0,18	0,00	-	0,048	2,8	0,06
21	4,1	3,77	30,4	7,8	1,2	4,7	32,2	0,9	0,12	0,02	-	0,039	2,3	0,05
22	3,5	3,77	25,9	7,0	1,6	4,3	26,3	0,8	0,06	0,00	-	0,033	2,0	0,04
23	5,5	3,51	42,5	11,3	2,5	9,1	42,0	1,0	0,74	0,02	-	0,055	3,2	0,07
24	4,4	3,47	33,1	9,4	2,6	7,9	32,7	0,7	0,62	0,00	-	0,044	2,6	0,05
25	4,0	3,42	30,0	8,3	2,3	6,8	28,7	0,7	0,62	0,02	-	0,039	2,3	0,05

d	Extrait saturé		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	C	CD	I
	Site	CE (dS m <sup>-1</sup> )												
1	71,1	3,50	828,0	92,1	42,3	183,2	627,2	11,8	2,15	0,36	-	0,894	51,8	1,05
2	87,5	3,47	1198,9	133,3	45,5	227,4	900,7	17,0	6,44	0,69	-	1,265	74,0	1,48
3	79,7	3,76	1069,1	133,5	35,2	210,7	812,4	16,0	1,55	0,17	-	1,139	66,9	1,33
4	88,3	2,47	1056,5	195,8	43,2	224,9	870,1	17,2	59,60	12,43	-	1,242	72,0	1,55
5	76,9	2,93	922,4	134,9	41,4	188,5	738,8	14,5	27,63	2,96	-	1,036	60,2	1,25
6	57,9	4,15	570,3	114,1	32,7	153,2	468,8	9,5	0,76	0,38	-	0,675	39,4	0,83
7	68,7	3,43	791,0	108,8	31,6	170,3	669,2	12,2	7,71	0,38	-	0,896	51,9	1,06
8	49,4	3,61	568,5	75,9	25,5	112,7	460,7	8,3	5,42	0,15	-	0,629	36,7	0,74
9	27,3	4,09	308,6	43,9	15,8	49,4	235,4	4,0	0,72	0,00	-	0,329	19,5	0,38
10	29,6	3,78	330,5	45,7	21,2	55,7	264,6	4,3	1,48	0,12	-	0,362	21,3	0,42
11	30,5	3,70	342,6	46,4	23,4	58,9	270,5	4,3	2,27	0,14	-	0,374	22,0	0,44
12	29,6	3,66	318,9	44,9	18,9	56,9	254,7	3,6	2,54	0,12	-	0,350	20,6	0,41
13	26,7	3,62	266,7	42,0	11,6	45,7	222,7	2,9	4,37	0,21	-	0,298	17,5	0,35
14	26,8	3,72	256,7	39,8	16,1	53,7	217,5	2,8	4,07	0,20	-	0,296	17,1	0,35
15	22,1	3,32	208,0	36,8	25,4	59,7	149,4	2,1	8,70	1,14	-	0,246	14,0	0,32
16	24,9	3,26	223,5	50,0	23,9	53,1	170,9	2,8	8,06	3,32	-	0,268	15,7	0,34
17	11,5	3,69	102,4	22,2	6,4	18,4	88,2	1,3	0,89	0,11	-	0,120	7,1	0,14
18	19,7	3,59	198,3	36,5	12,1	33,1	172,6	3,4	1,71	0,11	-	0,229	13,5	0,27
19	27,0	3,39	272,1	49,1	20,4	47,2	233,9	4,3	4,85	0,26	-	0,316	18,6	0,38
20	25,3	3,42	244,3	46,6	14,8	45,5	213,2	4,2	3,73	0,12	-	0,286	16,9	0,34
21	21,1	3,57	205,4	40,1	26,4	40,0	176,1	3,4	2,24	0,12	-	0,247	14,4	0,30
22	16,7	3,63	162,9	34,0	11,1	33,0	134,4	2,8	1,65	0,12	-	0,190	11,2	0,23
23	28,1	3,27	278,8	58,1	25,3	59,6	231,4	4,0	1,87	0,88	-	0,335	19,5	0,42
24	22,3	3,16	216,1	45,7	20,4	48,0	177,2	3,1	10,19	0,76	-	0,261	15,2	0,33
25	24,4	3,07	235,8	50,9	22,3	49,4	187,0	3,3	18,89	0,77	-	0,285	16,5	0,37

couple relatif à l'eau pure ( $D_{eau(25)}, 0$ ) :

$$D_{mer} = 0,9957 \text{ Exp } (5,825 \cdot 10^{-4} CE_{mer}) \quad r^2 = 0,998$$

Par la suite, on appliquera la relation (7) pour le calcul de la densité de la solution du sol (tableau 3).

### Relation concentration ionique - conductivité électrique

Les mesures de la concentration ionique équivalente ( $C$ , en  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ), de la charge dissoute ( $CD$ , en  $\text{g L}^{-1}$ ), de la force ionique stœchiométrique ( $I$ , en  $\text{mole L}^{-1}$ ) et de la conductivité électrique ( $CE$ , en  $\text{dS m}^{-1}$ ), relatives à la solution du sol in situ ( $C_{ss}, CD_{ss}, I_{ss}, CE_{ss}$ ), à la nappe ( $C_n, CD_n, I_n, CE_n$ ), à l'extrait 1/5 ( $C_{e1/5}, CD_{e1/5}, I_{e1/5}, CE_{e1/5}$ ) et à l'extrait saturé ( $C_{es}, CD_{es}, I_{es}, CE_{es}$ ), sont présentées dans le tableau 3.

La figure 6 visualise graphiquement les données expérimentales. Les mesures de  $CE$ , relatives à la solution du sol in situ et à la nappe, occupent le même domaine, 10-110  $\text{dS m}^{-1}$ . Les nuages de points ( $C_{ss}, CE_{ss}$ ) et ( $C_n, CE_n$ ) se superposent très bien sur ce domaine. La solution du sol prélevée en conditions saturées est donc bien en équilibre thermodynamique avec l'eau de la nappe .

Pour les deux type d'extraits, il n'y a pas juxtaposition des

nuages de points ( $C_{e1/5}, CE_{e1/5}$ ) et ( $C_{es}, CE_{es}$ ) mais plutôt continuité. L'ensemble s'écarte sensiblement de la courbe établie précédemment.

Pour chaque méthode, le meilleur ajustement statistique est de type puissance, selon les expressions  $CD = b CE^c$ ,  $C = b' CE^{c'}$  et  $I = b'' CE^{c''}$  (tableau 4).

Dans tout ce qui suit, les calculs seront établis en considérant une relation unique  $CD = f(CE)$  pour l'ensemble des eaux, à savoir  $CD = 0,478 CE^{1,104}$  (tableau 4). Cette relation est très voisine de celles obtenues pour les eaux acides et chloruré-sodiques de la retenue anti-sel de Djiguinoum : eaux naturelles, dans le domaine de  $CE$  0-65  $\text{dS m}^{-1}$ ,  $CD = 0,474 CE^{1,105}$  ; eau concentrée au laboratoire, dans le domaine de  $CE$  0-200  $\text{dS m}^{-1}$ ,  $CD = 0,482 CE^{1,106}$  (Montoroi, 1996a).

### DÉTERMINATION DE LA $CE_{ss}$

Les valeurs de la  $CE_{ss}$ , obtenues par le modèle linéaire, avec

Figure 5 - Relation entre la densité et la conductivité électrique ( $CE$ ) de l'eau de nappe acide et de l'eau de mer.  
Figure 5 - Density versus electrical conductivity ( $EC$ ) for acid groundwater and seawater.

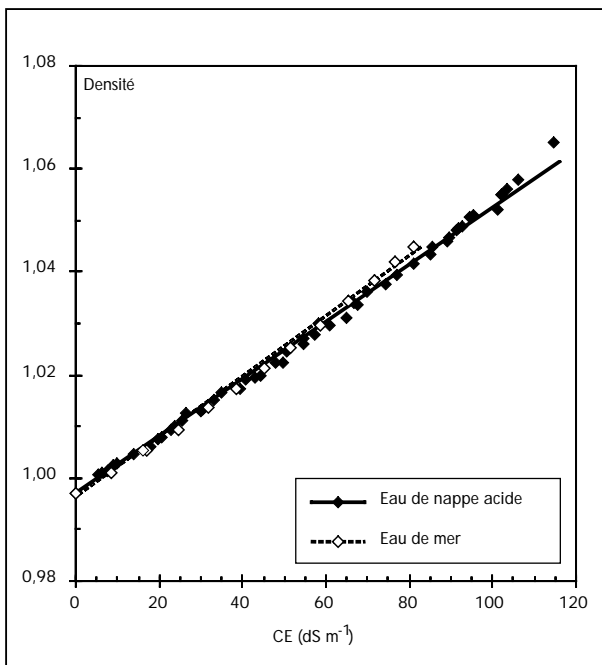


Figure 6 - Relation entre la concentration ionique ( $C$ ) et la conductivité électrique ( $CE$ ) de la nappe, de la solution du sol, des extraits aqueux dilué et saturé pour la séquence de sol de Djiguinoum. La courbe représente la relation statistique calculée pour toutes les solutions du sol.

Figure 6 - Relationship between ionic concentration ( $C$ ) and electrical conductivity ( $CE$ ) of groundwater, soil solution, diluted and saturated aqueous extracts for Djiguinoum soil sequence. Full line represents the statistical relation calculated for the whole soil solutions.

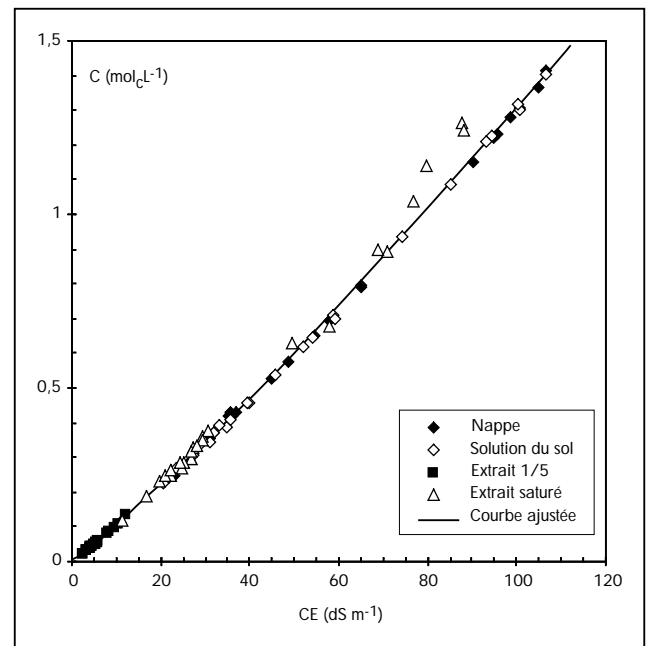


Tableau 3 - Conductivité électrique (CE, en dS m<sup>-1</sup>), concentration ionique (C, en mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>), charge minérale dissoute (CD, en g L<sup>-1</sup>) et densité (D) de la nappe (n), de la solution du sol in situ (ss), de l'extrait aqueux dilué (e1/5) et de l'extrait aqueux saturé (es) pour la séquence de sol de Djigoumoum. Les teneurs en eau (H<sub>ss</sub>, H<sub>e1/5</sub> et H<sub>es</sub>) sont exprimées en g pour 100 g.

Table 3 - Electrical conductivity (EC, in dS m<sup>-1</sup>), ionic concentration (C, in mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>), weighted concentration (CD, in g L<sup>-1</sup>) and density (D) of groundwater (n), in situ soil solution (ss), diluted aqueous extract (e1/5) and saturated aqueous extract (es) for Djigoumoum soil sequence. Water contents (H<sub>ss</sub>, H<sub>e1/5</sub> et H<sub>es</sub>) are in g per 100 g.

Site	Type de solution																		
	Nappe				Solution du sol «in situ»				Extrait1/5				Extrait saturé						
	CEm <sub>n</sub>	C <sub>n</sub>	CD <sub>n</sub>	D <sub>n</sub>	CEm <sub>ss</sub>	C <sub>ss</sub>	CD <sub>ss</sub>	H <sub>ss</sub>	D <sub>ss</sub>	CEm <sub>e1/5</sub>	C <sub>e1/5</sub>	CD <sub>e1/5</sub>	H <sub>e1/5</sub>	D <sub>e1/5</sub>	CEm <sub>es</sub>	C <sub>es</sub>	CD <sub>es</sub>	H <sub>es</sub>	D <sub>es</sub>
1	98,8	1,28	74,8		106,6	1,40	81,8	23,7	1,057	5,3	0,046	2,7	500	1,000	71,1	0,89	51,8	27,9	1,036
2	105,0	1,36	80,1		100,7	1,30	76,6	43,5	1,053	10,7	0,109	6,4	500	1,003	87,5	1,27	74,0	43,5	1,046
3	95,6	1,23	72,8		85,3	1,09	63,9	52,4	1,045	12,3	0,134	7,9	500	1,003	79,7	1,14	66,9	58,2	1,041
4	100,6	1,31	77,4		94,4	1,23	72,3	27,8	1,050	7,8	0,079	4,6	500	1,001	88,3	1,24	72,0	35,4	1,046
5	106,6	1,41	82,8		100,1	1,32	77,9	22,8	1,053	5,6	0,055	3,2	500	1,000	76,9	1,04	60,2	30,4	1,040
6	94,6	1,22	71,3		93,3	1,21	70,6	21,6	1,049	4,4	0,040	2,3	500	0,999	57,9	0,67	39,4	26,3	1,029
7	90,2	1,15	67,4		74,2	0,93	55,1	52,8	1,038	9,6	0,099	5,8	500	1,002	68,7	0,90	51,9	53,2	1,035
8	65,0	0,80	46,9		58,6	0,71	41,9	45,4	1,029	8,3	0,086	5,1	500	1,001	49,4	0,63	36,7	66,4	1,024
9	65,0	0,79	46,8		59,0	0,70	41,4	52,2	1,030	5,7	0,055	3,2	500	1,000	27,3	0,33	19,5	83,0	1,012
10	57,8	0,70	41,1		54,2	0,64	38,0	58,0	1,027	6,1	0,059	3,5	500	1,000	29,6	0,36	21,3	81,0	1,013
11	54,5	0,65	38,5		52,1	0,62	36,5	51,1	1,026	5,5	0,053	3,1	500	1,000	30,5	0,37	22,0	70,5	1,013
12	48,7	0,57	33,8		45,9	0,54	31,7	71,7	1,022	6,0	0,058	3,4	500	1,000	29,6	0,35	20,6	82,6	1,013
13	45,0	0,53	31,1		39,8	0,46	27,1	55,1	1,019	3,4	0,031	1,8	500	0,998	26,7	0,30	17,5	48,1	1,011
14	36,9	0,43	25,0		39,6	0,46	26,9	47,9	1,019	3,3	0,030	1,8	500	0,998	26,8	0,30	17,1	49,2	1,011
15	35,7	0,43	24,5		34,7	0,39	22,5	35,4	1,016	2,5	0,022	1,3	500	0,998	22,1	0,25	14,0	43,7	1,009
16	35,2	0,42	24,3		33,1	0,39	23,1	36,9	1,015	2,4	0,021	1,2	500	0,998	24,9	0,27	15,7	42,2	1,010
17	35,6	0,43	25,4		31,9	0,37	21,9	41,2	1,014	2,5	0,023	1,4	500	0,998	11,5	0,12	7,1	90,2	1,003
18	36,0	0,42	24,9		35,6	0,41	24,4	51,7	1,016	4,3	0,040	2,4	500	0,999	19,7	0,23	13,5	87,5	1,007
19	22,9	0,25	14,9		22,0	0,24	14,3	71,7	1,009	5,1	0,049	2,9	500	0,999	27,0	0,32	18,6	78,4	1,012
20	31,2	0,35	21,2		30,9	0,34	20,6	62,2	1,014	5,0	0,048	2,8	500	0,999	25,3	0,29	16,9	80,5	1,011
21	27,5	0,31	18,4		27,2	0,31	18,3	59,2	1,012	4,1	0,039	2,3	500	0,999	21,1	0,25	14,4	80,2	1,008
22	24,3	0,27	16,2		23,1	0,26	15,2	62,5	1,009	3,5	0,033	2,0	500	0,999	16,7	0,19	11,2	84,8	1,006
23	32,0	0,37	22,1		28,6	0,33	19,6	70,1	1,012	5,5	0,055	3,2	500	1,000	28,1	0,34	19,5	79,2	1,012
24	21,6	0,24	14,3		23,7	0,27	15,9	76,9	1,010	4,4	0,044	2,6	500	0,999	22,3	0,26	15,2	78,5	1,009
25	11,0	0,12	6,7		20,6	0,23	13,4	73,0	1,008	4,0	0,039	2,3	500	0,999	24,4	0,28	16,5	64,6	1,010

Tableau 4 - Relations statistiques  $C = f(CE)$ ,  $CD = f(CE)$  et  $I = f(CE)$  calculées pour la nappe, la solution du sol in situ, les extraits aqueux dilué et saturé de la séquence de sol de Djiguinoum.

Table 4 - Statistical relations  $C = f(CE)$ ,  $CD = f(CE)$  et  $I = f(CE)$  calculated for groundwater, in situ soil solution, diluted and saturated aqueous extracts of Djiguinoum soil sequence.

	$C = f(CE)$ C en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$	$CD = f(CE)$ CD en $\text{g L}^{-1}$	$I = f(CE)$ I en $\text{mole L}^{-1}$	Domaine de CE $\text{dS m}^{-1}$
Extrait dilué (n = 25 couples)	$C_{e1/5} = 7,962 CE_{e1/5}^{1,115}$ $r^2 = 0,997$	$CD_{e1/5} = 0,474 CE_{e1/5}^{1,108}$ $r^2 = 0,996$	$I_{e1/5} = 0,0099 CE_{e1/5}^{1,084}$ $r^2 = 0,991$	0-15
Extrait saturé (n = 25 couples)	$C_{es} = 7,586 CE_{es}^{1,131}$ $r^2 = 0,996$	$CD_{es} = 0,453 CE_{es}^{1,126}$ $r^2 = 0,995$	$I_{es} = 0,0097 CE_{es}^{1,115}$ $r^2 = 0,995$	0-90
Solution du sol «in situ» (n = 25 couples)	$C_{ss} = 7,848 CE_{ss}^{1,108}$ $r^2 = 0,999$	$CD_{ss} = 0,476 CE_{ss}^{1,101}$ $r^2 = 0,999$	$I_{ss} = 0,0096 CE_{ss}^{1,094}$ $r^2 = 0,997$	0-110
Eau de nappe (n = 25 couples)	$C_n = 8,173 CE_n^{1,099}$ $r^2 = 0,999$	$CD_n = 0,487 CE_n^{1,097}$ $r^2 = 0,999$	$I_n = 0,0102 CE_n^{1,080}$ $r^2 = 0,998$	0-110
Toutes les eaux (n = 100 couples)	$C = 8,092 CE^{1,105}$ $r^2 = 0,999$	$CD = 0,478 CE^{1,104}$ $r^2 = 0,999$	$I = 0,0098 CE^{1,096}$ $r^2 = 0,998$	0-110

CE est exprimé en  $\text{dS m}^{-1}$

Tableau 6 - Coefficients de régression linéaire pour la relation  $CE_{ss}(\text{calculée}) = a \times CE_{ss}(\text{mesurée}) + b$ . Les calculs sont réalisés pour les modèles linéaire et non linéaire, qui prennent en compte deux types d'extrait aqueux et l'influence de la densité des solutions.

Table 6 - Linear regression coefficients for the relation  $EC_{ss}(\text{calculated}) = a \times EC_{ss}(\text{measured}) + b$ . Calculations are made out for linear and non linear models which take into account two aqueous extract types and the influence of solution density.

	Modèle linéaire			Modèle non linéaire		
	a	b	$r^2$	a	b	$r^2$
	(n = 25 couples)			(n = 25 couples)		
Extrait 1/5						
sans densité	1,243	-3,691	0,906	0,934	-0,262	0,891
avec densité	1,322	-5,737	0,911	0,989	-1,640	0,896
Extrait saturé						
sans densité	0,924	-0,541	0,875	0,911	-0,736	0,878
avec densité	0,937	-0,814	0,881	0,922	-0,982	0,884

ou sans la prise en compte de la densité de la solution du sol ( $CE_{pd_{ss}}$  ou  $CE_{ps_{ss}}$ ), sont calculées à partir des relations (5), (3) et (7) et sont présentées dans le tableau 5.

Comme la relation  $CD = b CE^c$  a été déterminée (tableau 4), les valeurs de la  $CE_{ss}$ , obtenues par le modèle non linéaire, avec ou sans la prise en compte de la densité de la solution du sol ( $CE_{trd_{ss}}$  ou  $CE_{tr_{ss}}$ ), sont calculées à partir des relations (6), (4) et (7) et sont présentées dans le tableau 5.

### Test des modèles linéaire et non linéaire

Pour tester les deux modèles, les valeurs calculées dans le tableau 5 sont comparées aux valeurs mesurées ( $CE_{m_{ss}}$ ).

L'ajustement statistique est linéaire et de la forme :

$$CE_{ss}(\text{calculée}) = a CE_{ss}(\text{mesurée}) + b$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 6 et la figure 7.

Quelle que soit la méthode d'extraction, avec ou sans prise en

Tableau 5 - Conductivité électrique de la solution du sol in situ obtenue soit par mesure directe ( $CE_{m_{ss}}$ ), soit par calcul selon le modèle linéaire ( $CE_{p_{ss}}$ ) et le modèle non linéaire ( $CE_{tr_{ss}}$ ). Les calculs sont réalisés pour deux types d'extrait aqueux en prenant en compte l'influence de la densité des solutions. Les valeurs de CE sont exprimées en  $dS\ m^{-1}$ .

Table 5 - Electrical conductivity of in situ soil solution obtained by measurement ( $EC_{m_{ss}}$ ) or by calculation according to the linear model ( $EC_{p_{ss}}$ ) and the non linear model ( $EC_{tr_{ss}}$ ). Calculation is made for two types of aqueous extract and takes into account the influence of solution density. EC values are in  $dS\ m^{-1}$ .

$CE_{m_{ss}}$	Extrait 1/5				Extrait saturé			
	Sans densité		Avec densité		Sans densité		Avec densité	
	$CE_{p_{ss}}$	$CE_{tr_{ss}}$	$CE_{pd_{ss}}$	$CE_{trd_{ss}}$	$CE_{p_{ss}}$	$CE_{tr_{ss}}$	$CE_{pd_{ss}}$	$CE_{trd_{ss}}$
106,6	111,3	83,6	117,7	87,9	83,8	82,5	85,5	84,0
100,7	122,6	97,5	128,8	102,0	87,4	87,4	88,1	88,0
85,3	117,3	95,0	122,1	98,5	88,5	87,6	88,8	87,9
94,4	140,3	107,0	147,2	111,8	112,3	109,8	112,7	110,1
100,1	123,5	92,5	130,1	96,9	102,5	99,8	103,8	100,9
93,3	101,1	75,3	106,2	78,7	70,6	69,3	72,0	70,5
74,2	90,9	73,6	94,2	76,0	69,3	69,2	69,5	69,4
58,6	91,8	73,3	94,4	75,2	72,3	69,8	72,7	70,1
59,0	54,8	44,3	56,4	45,5	43,4	41,6	44,2	42,3
54,2	52,4	42,8	53,8	43,9	41,3	40,0	41,8	40,5
52,1	54,0	43,6	55,4	44,6	42,1	40,8	42,6	41,3
45,9	41,9	34,9	42,8	35,6	34,1	33,6	34,4	33,9
39,8	30,7	24,9	31,3	25,4	23,3	23,6	23,4	23,7
39,6	34,5	27,7	35,2	28,2	27,5	27,5	27,7	27,6
34,7	36,0	28,1	36,6	28,5	27,3	26,8	27,5	26,9
33,1	33,1	25,9	33,7	26,3	28,4	28,1	28,6	28,2
31,9	30,8	24,3	31,3	24,7	25,2	23,4	25,5	23,6
35,6	41,3	33,4	42,0	33,9	33,3	31,7	33,6	32,0
22,0	35,3	29,5	35,7	29,7	29,5	29,3	29,5	29,2
30,9	40,2	33,0	40,8	33,5	32,8	32,0	32,9	32,1
27,2	34,5	28,2	34,9	28,6	28,6	27,8	28,7	27,9
23,1	28,1	23,1	28,4	23,4	22,6	22,0	22,7	22,1
28,6	39,5	32,8	40,0	33,2	31,8	31,4	31,8	31,4
23,7	28,9	24,2	29,2	24,5	22,7	22,7	22,7	22,7
20,6	27,6	23,1	27,9	23,2	21,6	21,9	21,6	21,9

compte de la densité, on constate que l'estimation de la CE de la solution in situ ( $CE_{ss}$ ) est meilleure statistiquement lorsque l'on considère la relation puissance qui lie la charge minérale dissoute et la conductivité électrique (modèle non linéaire).

ζ Pour l'extrait saturé, les deux modèles donnent des résultats sensiblement identiques. Ils sous-estiment les valeurs de la  $CE_{ss}$ , notamment pour les valeurs supérieures à  $30\ dS\ m^{-1}$ . Cette sous-estimation est comprise entre 3 et  $11\ dS\ m^{-1}$  dans l'intervalle  $30-110\ dS\ m^{-1}$ , soit une erreur

relative d'environ 10 %. Un tel biais n'est donc pas dû au mode d'estimation de la  $CE_{ss}$  mais pourrait être attribué au mode opératoire de la méthode d'extraction. En effet, le broyage et le tamisage du sol modifient les surfaces réactives des agrégats et donc, les échanges ioniques entre le sol et la solution. De même, l'extraction s'effectuant après le séchage à l'air du sol, la saturation de celui-ci dissout les sels précipités au cours de la phase de séchage. Ces processus de dissolution et d'échange sont dépendants du

Figure 7 - Relation entre les valeurs de conductivité électrique de la solution du sol ( $CE_{SS}$ ) calculée et mesurée. Les calculs de CE sont effectués à partir des extraits aqueux dilué et saturé, selon les modèles linéaire et non linéaire. Les valeurs de CE sont exprimées en  $dS\ m^{-1}$ .  
 Figure 7 - Relationship between calculated and measured EC values of soil solution ( $EC_{SS}$ ). EC calculation is made with diluted and saturated aqueous extracts, according to linear and non linear models. EC values are in  $dS\ m^{-1}$ .

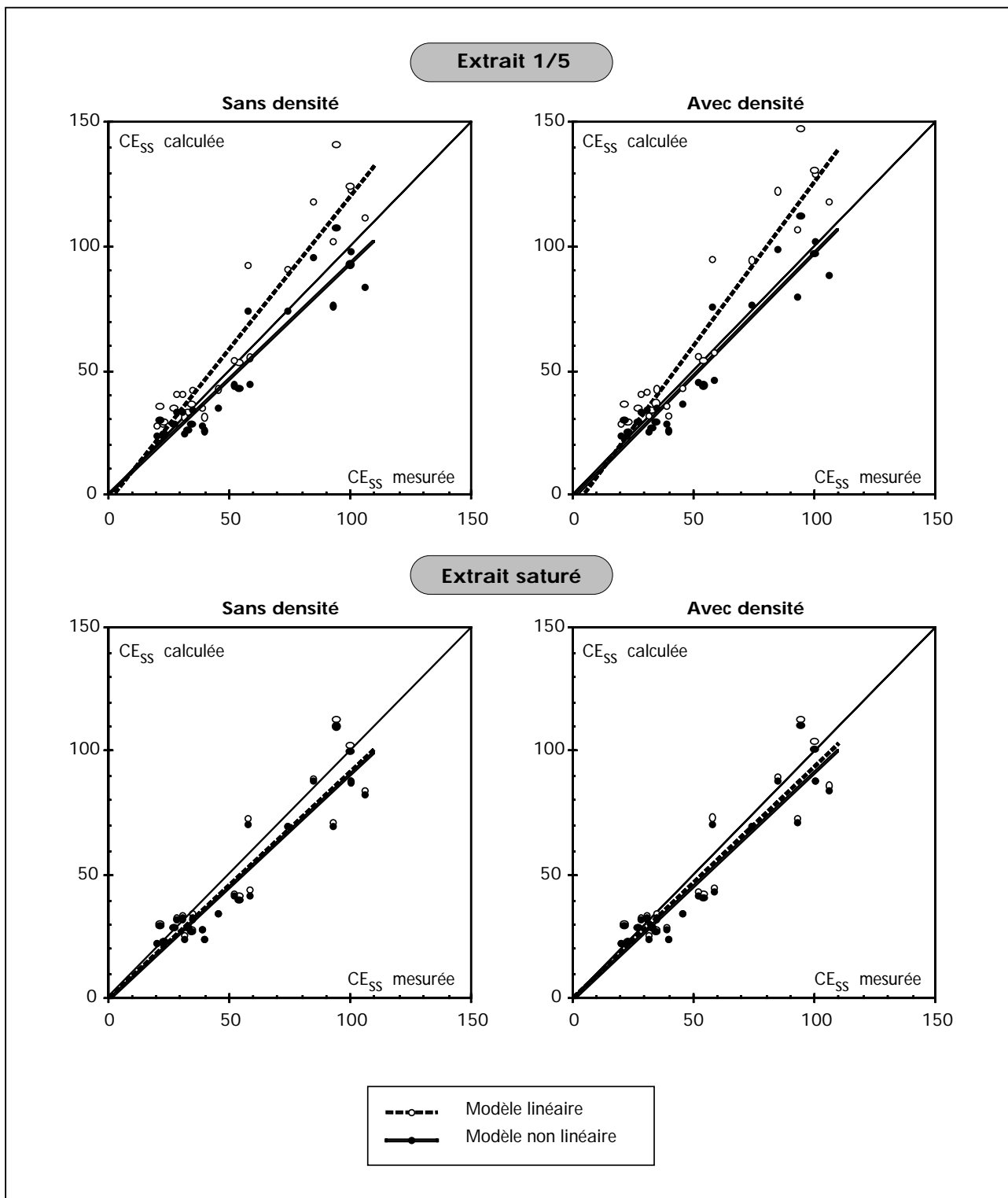




Tableau 7 - Comparaison entre les valeurs de la CE de la solution du sol in situ estimées par les modèles linéaire (a) et non linéaire (b), sans prise en compte de la densité des solutions, et les valeurs observées au champ. Les valeurs de CE sont exprimées en  $\text{dS m}^{-1}$  et les teneurs en eau H, relatives à la solution du sol in situ (ss) et à l'extrait saturé (es), en g pour 100 g.

Table 7 - Comparison between EC values of in situ soil solution estimated by the linear model (a) and the non linear model (b), without considering solution density, and the EC field values. EC values are in  $\text{dS m}^{-1}$  and water contents of in situ soil solution (ss) and saturated extract (es) are in g per 100 g.

Echantillon	CE <sub>es</sub>	H <sub>es</sub>	H <sub>ss</sub>	CE <sub>ss</sub> estimée		CE <sub>ss</sub> observée (c)	(a-c)/c	(b-c)/c
				(a)	(b)			
AM 2-90	81,5	64,2	34,6	151,4	142,8	106,6	0,42	0,34
AM 4-90	92,1	43,8	44,4	90,8	90,9	100,7	-0,10	-0,10
AM 6-90	83,5	65,7	64,1	85,6	85,4	85,3	0,00	0,00
AM 8-90	79,4	31,2	42,9	57,8	59,5	94,4	-0,39	-0,37
AM 10-90	62,4	28,2	21,7	81,1	79,1	100,1	-0,19	-0,21
AM 12-90	45,7	25,6	28,4	41,2	41,6	93,3	-0,56	-0,55
AM 14-90	77,4	48,2	42,0	88,9	87,7	74,2	0,20	0,18
AM 18-90	36,4	79,6	48,7	59,4	56,7	59,0	0,01	-0,04
AM 20-90	30,0	81,4	48,7	50,2	47,8	54,2	-0,07	-0,12
AM 22-90	31,4	71,7	47,1	47,7	45,9	52,1	-0,08	-0,12
AM 24-90	32,9	65,8	44,0	49,3	47,4	45,9	0,07	0,03
AM 28-90	30,7	46,2	41,8	33,9	33,6	39,6	-0,14	-0,15
AM 30-90	33,6	39,2	41,2	32,0	32,1	34,7	-0,08	-0,07
AM 32-90	29,0	41,9	48,3	25,2	25,5	33,1	-0,24	-0,23
AM 34-90	28,0	46,5	62,5	20,9	21,4	31,9	-0,35	-0,33
AM 38-90	25,0	76,2	71,1	26,8	26,6	22,0	0,22	0,21
AM 40-90	20,1	78,6	72,6	21,8	21,6	30,9	-0,30	-0,30
AM 42-90	23,9	71,8	74,3	23,1	23,2	27,2	-0,15	-0,15
AM 44-90	19,2	74,8	77,8	18,5	18,5	23,1	-0,20	-0,20
AM 48-90	23,5	64,7	75,2	20,2	20,5	23,7	-0,15	-0,14
AM 50-90	20,9	71,5	70,9	21,1	21,1	20,6	0,02	0,02

temps de contact eau-sol et, par conséquent, du temps de préparation de la pâte saturée. La validité de la méthode de l'extrait saturé est ainsi remise en cause en tant que norme absolue, tout au moins pour les sols très salés.

L'influence de la densité n'est pas mise en évidence de façon significative. En effet, le rapport  $D_{es} / D_{ss}$  est toujours sensiblement voisin de 1, car les valeurs de la CE de l'extrait saturé sont voisines de celles mesurées in situ.

ζ Pour l'extrait 1/5, les résultats diffèrent selon le type de modèle.

Pour les CE supérieures à  $30 \text{ dS m}^{-1}$ , les valeurs calculées avec le modèle linéaire sont nettement surestimées. Cette surestimation est comprise entre 3,5 et  $25 \text{ dS m}^{-1}$  dans l'intervalle  $30\text{-}110 \text{ dS m}^{-1}$ , soit une erreur relative comprise entre 10 et 20 %. La prise en compte de la densité accentue cette incertitude, car l'influence du rapport  $D_{e1/5} / D_{ss}$  n'est pas négligeable. Celui-ci

est variable et toujours inférieur à 1, les valeurs de la CE de l'extrait dilué étant très faibles. La surestimation est sans doute occasionnée par la forte teneur en eau du sol qui favorise la dissolution des minéraux et augmente la CE de l'extrait dilué.

En revanche, le modèle non linéaire donne une meilleure estimation de la CE<sub>ss</sub>, les résultats étant comparables à ceux de l'extrait saturé. La sous-estimation est moins élevée lorsque la densité est prise en compte : elle est comprise entre 2 et  $3 \text{ dS m}^{-1}$ .

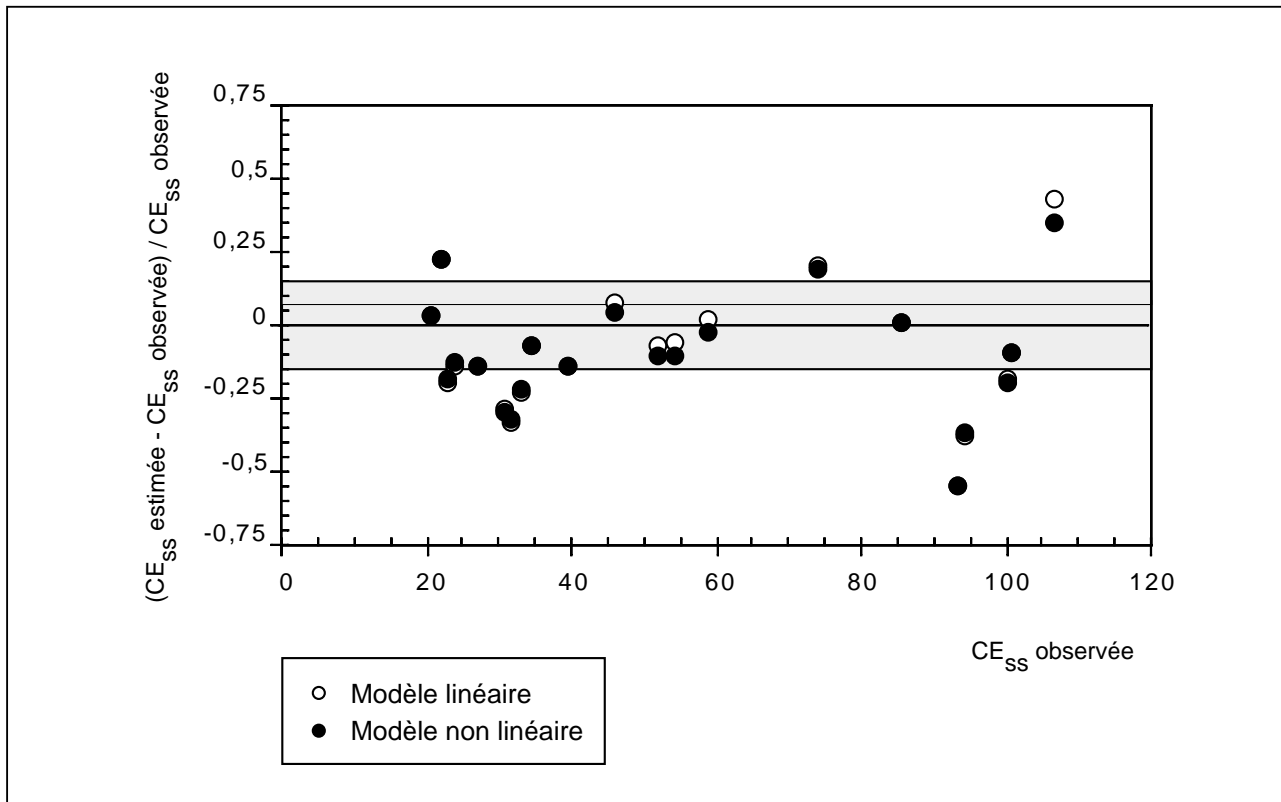
En résumé, dans le domaine  $0\text{-}30 \text{ dS m}^{-1}$ , la convergence et la quasi superposition des deux droites autorise l'emploi de l'un ou l'autre modèle. Pour des CE supérieures, le modèle non linéaire s'impose.

### Validation des modèles linéaire et non linéaire

La validation des deux modèles a été réalisée sur un lot

Figure 8 - Diagramme montrant la validité des modèles linéaire et non linéaire pour un lot de données relatif à des mesures de la solution du sol in situ ( $CE_{ss}$  observée). Les valeurs de CE sont exprimées en  $dS\ m^{-1}$ . La surface en grisé représente le domaine où la  $CE_{ss}$  est estimée avec un précision inférieure à 15 %.

Figure 8 - Diagram showing the validity of linear and non linear models for a data set of in situ soil solution measurements ( $EC_{ss}$  observed). EC values are in  $dS\ m^{-1}$ . Grey area represents the domain where  $EC_{ss}$  is estimated within 15 % accuracy.



de 21 données obtenues sur le même site au cours d'une seconde expérimentation relative à l'étalonnage d'un conductivimètre électromagnétique EM-38 (Montoroi, 1996a). Les valeurs de  $CE_{ss}$  observées sont données dans le tableau 7.

L'estimation de la  $CE_{ss}$  est faite à partir de valeurs de la CE mesurées au laboratoire sur des extraits saturés en utilisant les deux modèles proposés sans prise en compte de la densité. Les valeurs estimées, d'après les relations (3) et (4), sont comparées aux valeurs observées et sont données dans le tableau 7.

La figure 8 montre que la majorité des valeurs  $CE_{ss}$  (15 sur 21) sont sous-estimées sur le domaine 20-110  $dS\ m^{-1}$ . Cette sous-estimation peut être attribuée, comme précédemment, au protocole d'extraction en laboratoire, la variabilité observée semblant plus élevée pour les sols les plus salés.

Pour 11 valeurs sur 21, l'estimation de la  $CE_{ss}$  est obtenue avec une incertitude relative inférieure à 15 % quel que soit le modèle de calcul.

### Validité des hypothèses initiales

L'hypothèse relative à la conservation des espèces ioniques en phase aqueuse, lorsque la solution se dilue ou se concentre, est globalement vérifiée, en termes de charge minérale dissoute, pour les deux méthodes d'extraction au laboratoire. Cependant, on constate qu'il n'en va pas de même pour chacun des ions majeurs. Seuls  $Na^+$ ,  $Cl^-$  et, dans une moindre mesure,  $Mg^{2+}$  se conservent. Pour  $Ca^{2+}$ , quel que soit le degré de dilution des solutions, la masse dissoute est nettement plus élevée dans les extraits aqueux que dans la solution in situ. Des mécanismes de sélectivité ionique existent donc. Ainsi, l'hypothèse de conservation sera d'autant mieux vérifiée que le faciès chimique des solutions est chloruré sodique.

La seconde hypothèse est moins bien vérifiée lorsque les sols sont argileux. Si on considère le sol sec à 105 °C comme référence, la teneur en eau relative aux extraits est sous-estimée de quelques g pour 100 g, ce qui contribue à

sous-estimer la  $CE_{ss}$ . Cette erreur, d'autant plus grande que le sol est plus salé, pourrait expliquer en partie la sous-estimation de la  $CE_{ss}$  décrite précédemment.

## CONCLUSION

Dans tous les cas où cela est possible, il est préférable d'extraire la solution du sol, à partir de capteurs in situ (bougies de prélèvement en céramique poreuse, par exemple), et d'en mesurer directement la conductivité électrique ( $CE_{ss}$ ). Cette mesure, rapide et fiable, permet d'estimer la charge globale en sels de la solution (degré de minéralisation), sa force ionique et, éventuellement, sa composition chimique et/ou d'en suivre les variations temporelles.

Si la solution du sol ne peut pas être extraite in situ, on estime sa CE à partir d'un modèle de calcul et de valeurs de CE mesurées au laboratoire sur des extraits aqueux (extrait 1/5 et extrait de pâte saturée). En considérant une loi simple de dilution des solutions, on a appliqué deux modèles de calcul selon que la relation liant la charge minérale dissoute (CD) d'une solution et sa conductivité électrique (CE) est linéaire (modèle linéaire) ou exponentielle (modèle non linéaire). L'influence de la densité des solutions a été prise en compte dans chaque cas.

Dans un premier temps, on a montré que, pour un sol sulfaté acide et salé de Basse-Casamance, la solution extraite in situ est bien en équilibre thermodynamique avec l'eau de la nappe et l'état hydrique du sol à saturation est alors pris comme référence.

Ensuite, on a testé et validé les deux modèles par rapport à des mesures de CE in situ, obtenues ainsi en conditions saturées. Cette calibration est réalisée pour des solutions acides présentant un faciès chloruré sodique et nécessite la connaissance de leur niveau de dilution, par conséquent de la teneur en eau du sol. Le modèle non linéaire permet une meilleure estimation de la  $CE_{ss}$ , quelle que soit la méthode d'extraction de la solution du sol au laboratoire. Les modèles linéaire et non linéaire peuvent être employés indifféremment dans le domaine 0-30 dS m<sup>-1</sup>.

Le biais observé dans l'estimation de la  $CE_{ss}$  est dépendant de la méthode d'extraction de la solution au laboratoire.

- Pour l'extrait saturé, la  $CE_{ss}$  est sous-estimée avec les deux modes de calcul, pour les valeurs supérieures à 30 dS m<sup>-1</sup>. Le biais est probablement dû au mode opératoire, car, en détruisant la structure du sol et en séchant l'échantillon à l'air, on modifie l'état de saturation réel du sol, les cinétiques de dissolution minérale et celles d'échange ionique. Ceci retirerait, en partie, à la méthode de l'extrait saturé, sa qualité de norme reconnue. Aussi, on proposera plutôt une extraction après la saturation de l'échantillon non séché dont on aura mesuré sa teneur en eau.

- Pour l'extrait dilué, la  $CE_{ss}$  est surestimée avec le modèle linéaire tandis que le modèle non linéaire permet une estimation comparable à celle obtenue avec l'extrait saturé. La prise en compte de la densité accentue l'incertitude avec le modèle linéaire. La surestimation est sans doute due à la forte dilution de la solution qui favorise la dissolution des minéraux et augmente ainsi la CE de l'extrait dilué. Aussi, on préconisera plutôt une extraction avec un rapport sol/eau supérieur à 1/5 (1/2 voire 1/1).

D'une manière générale, l'estimation de la  $CE_{ss}$  sera meilleure pour des solutions chlorurées sodiques et pour des sols peu argileux.

Bien que l'expérimentation n'ait été réalisée qu'en conditions saturées, l'extrapolation à la zone non saturée devra être envisagée avec prudence. Aussi, la démarche présentée sera applicable à d'autres vallées inondables, sulfatées acides et salées. Par ailleurs, les mesures ou les estimations de la  $CE_{ss}$ , exprimées en termes de concentration saline et relatives à un volume de sol donné, permettront d'établir des bilans salins pondéraux à différentes échelles spatiales et temporelles.

## REMERCIEMENTS

L'auteur remercie G. BOURRIE pour ses critiques constructives qui ont amélioré la qualité de l'article.

## BIBLIOGRAPHIE

- Afnor, 1987 - Qualité des sols. Méthodes d'analyse. Recueil de normes françaises. Afnor, Paris, 135 p.
- Albergel J., Brunet D., Dubée G., Marieu B., Montoroï J.P., Pépin Y., Zante P., 1991- Projet pilote «Casamance». Bas-fond de Djiguinoum. Rapport de synthèse : hydrologie-hydrogéologie. Multigr., ORSTOM/ISRA/R3S/IRAT, Dakar, 42 p.
- Albergel J., Lamachère J.M., Lidon B., Mokadem A.I., van Driel W., 1993 - Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles. Rapport final du projet CORAF-R3S. CIEH, Ouagadougou, 335 p.
- Bresler E., McNeal B.L., Carter D.L., 1982 - Saline and sodic soils, principles-dynamics-modeling. Adv. Ser. in Agr. Sci., 10, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 236 p.
- Brunet D., 1988 - Etude pédologique de la vallée de Djiguinoum (Basse-Casamance), Multigr., ORSTOM, Dakar, 28 p. + annexes.
- Cheverry C., 1983 - L'extraction de la «solution du sol» par le biais de bougies poreuses : une synthèse bibliographique des problèmes méthodologiques posés par ces dispositifs. Bull. GFHN, 14 : 47-71.
- Cheverry C., 1995 - Extension et diversité des phénomènes mettant en jeu les sels solubles. C.R. Acad. Agric. Fr., 81, 2 : 42-46.
- Cheverry C. et Robert M., 1996 - Les ressources mondiales en eau et en sels : une limitation pour l'avenir. Cah. Agric., 5 : 243-248.
- Copin-Montégut G., 1996 - Chimie de l'eau de mer. Coll. Synthèses, Institut Océanographique, Paris, 319 p.

- Dent D., 1986 - Acid sulphate soils : a baseline for research and development. ILRI, Wageningen, The Netherlands, 39, 200 p.
- El Oumri M. et Vieillefont J., 1983 - Etude expérimentale de la conductivité électrique globale des sols. Application à l'estimation de leur salinité. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XX, 2, 91-108.
- Grossmann J. et Udluft P., 1991 - The extraction of soil water by the suction-cup method : a review. *J. Soil Sci.*, 42 : 83-93.
- Halvorson A.D., Rhoades J.D., Reule C.A., 1977 - Soil salinity. Four electrode conductivity relationships for soils of the northern Great Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 : 966-971.
- Job J.O., 1993 - Les sols salés de l'oasis d'El Guettar (Sud tunisien). *Trav. et Doc. Microf.*, ORSTOM, Paris, 100, 151 p.
- Le Brusq J.Y. et Loyer J.Y., 1982 - Relations entre les mesures de conductivités sur des extraits de sols de rapports sol/solution variables, dans la vallée du fleuve Sénégal. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XIX, 3 : 293-301.
- Le Brusq J.Y., Loyer J.Y., Zante P., Carn M., 1987 - Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium, et de leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. *Science du Sol*, 25, 3 : 173-184.
- Litaor M.I., 1988 - Review of soil solution samplers. *Water Resources Res.*, 24 : 727-733.
- Lyman J. et Fleming R.H., 1940 - Composition of sea water. *J. Marine Res.*, 3 : 134-146.
- 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 Sci.*, 110 : 405-415.
- Mathieu C., 1996 - Structures et programme de la normalisation «Qualité des sols». *Travaux AFNOR et ISO, liaison avec l'AFES. Et. et Gest. Sols*, 3, 2 : 125-133.
- Millero F.J. et Poisson A., 1981 - International one atmosphere equation of state of seawater. *Deep-Sea Res.*, 28 a : 625-629.
- Millero F.J., Gonzalez A., Ward G.K., 1976 - The density of seawater solutions at one atmosphere as a function of temperature and salinity. *J. Marine Res.*, 34, 1 : 61-93.
- Montoroi J.P., 1992 - Le contrôle de la salinité à l'aide de capteurs électriques. Application à un périmètre irrigué de la basse vallée de la Méjerdah (Tunisie). II- La sonde quadripôle. *Agron. Trop.*, 46, 3 : 233-240.
- Montoroi J.P., 1995 - Mise en évidence d'une séquence de précipitation des sels dans les sols sulfatés acides d'une vallée aménagée de Basse-Casamance (Sénégal). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 320, II a : 395-402.
- Montoroi J.P., 1996a - Gestion durable des sols de l'écosystème de mangrove en Casamance (Sénégal). *Dynamique de l'eau et des sels en période de sécheresse. Etudes et Thèses, ORSTOM, Paris*, 263 p.
- Montoroi J.P., 1996b - Mise en valeur rizicole des bas-fonds en Basse-Casamance (Sénégal). *Agr. et Dévelop.*, 10 : 61-73.
- Montoroi J.P. et Rieu M., 1997 - Disparition du caractère sulfato-aluminique de la nappe des sols sulfatés acides dans une vallée aménagée de Basse-Casamance (Sénégal). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 324, II a : 301-308.
- Montoroi J.P., Albergel J., Dobos A., Fall M., Sall S., Bernard A., Brunet D., Dubée G., Zante P., 1993 - A suitable water management for the rehabilitation of rice culture in the acid sulphate soils of lower Casamance (Senegal) : a successful two years experiment. In D. Dent and M.E.F. van Mensvoort (Eds.) : «Selected papers of the Ho Chi Minh Ville symposium on acid sulphate soils, Viêt-Nam, march 1992», ILRI, Wageningen, The Netherlands, 53 : 195-203.
- Pons L.J. et Zonneveld I.S., 1965 - Soil ripening and soil classification. ILRI, Wageningen, The Netherlands, 13, 128 p.
- Poss R., 1991 - Dynamique et lixiviation des éléments minéraux dans les terres de barre du Togo. *Agron. Trop.*, 45, 4 : 259-273.
- Rhoades J.D., 1981 - Predicting bulk soil electrical conductivity versus saturation paste extract electrical conductivity calibrations from soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45 : 42-44.
- Rhoades J.D., 1984 - Principles and methods of monitoring soil salinity. In I. Shainberg and J. Shalhevet (Eds.) : «Soil salinity under irrigation. Processes and management». Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, pp. 130-142.
- Rhoades J.D., Manteghi N.A., Shouse P.J., Alves W.J., 1989a - Estimating soil salinity from saturated soil paste electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53 : 428-433.
- Rhoades J.D., Manteghi N.A., Shouse P.J., Alves W.J., 1989b - Soil electrical conductivity and soil salinity : new formulations and calibrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53 : 433-439.
- Richards L.A., 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Handbook 60, U.S. Salinity Laboratory Staff. Washington*, 159 p.
- Rieu M. et Cheverry C., 1976 - Mise au point bibliographique sur quelques recherches récentes en matière de sols salés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XIV, 1 : 39-61.
- Robert M., 1992 - Le sol, ressource naturelle à préserver pour la production et l'environnement. *Cah. Agric.*, 1 : 20-34.
- Robinson R.A. et Stokes R.H., 1970 - Electrolyte solutions. The measurement and interpretation of conductance, chemical potential and diffusion in solutions of simple electrolytes. 5<sup>th</sup> edition, London Butterworths, Bath, 571 p.
- Slavich P.G. et Petterson G.H., 1990 - Estimating solution extract salinity from soil paste electrical conductivity. An evaluation of procedures. *Austr. J. Soil Res.*, 28 : 517-522.
- Slavich P.G. et Petterson G.H., 1993 - Estimating the electrical conductivity of saturated paste extracts from 1 : 5 soil : water suspensions and texture. *Austr. J. Soil Res.*, 31 : 73-81.
- Szabolcs I., 1989 - Salt-affected soils. CRC Press, Boca Raton, Florida, 274 p.
- Weast R.C., Astle M.J., Beyer W.H., 1988 - Handbook of chemistry and phy-