

LE POINT SUR... *synthèses, notes techniques et actualités*

Cette rubrique est consacrée à des articles qui offrent au lecteur des mises au point, des notes techniques, des travaux de synthèse, dans le domaine de l'agronomie tropicale, s'ajoutant aux travaux originaux de recherche publiés par la revue.

Le contrôle de la salinité à l'aide de capteurs électriques : application à un périmètre irrigué en Tunisie

I — Le capteur électrique de salure

J.-P. MONTOROI (1)

RÉSUMÉ – Sur le territoire tunisien, la mise en valeur des terres agricoles doit prendre en compte les risques grandissants de salinisation, notamment avec le développement de l'irrigation estivale. Celle-ci doit être pratiquée avec discernement et nécessite un contrôle régulier. Les capteurs électriques, *in situ* ou mobiles, sont un bon moyen pour y parvenir. Une expérimentation, menée sur une parcelle traditionnellement exploitée, permet de tester le capteur électrique de salure en conditions naturelles et sous irrigation. Cet instrument est adapté au contrôle de la salinité lorsque les apports d'eau sont réguliers et maintiennent le sol au voisinage de la capacité de rétention. Il indique des valeurs fiables de la température du sol. Son coût limite son emploi systématique. Cependant, une utilisation localisée — au niveau de la nappe ou dans la zone racinaire — est particulièrement conseillée pour évaluer et limiter les risques de salinisation.

Mots clés : salinité, irrigation, sol, conductivité électrique, résistivité, température, Tunisie.

Le développement des périmètres irrigués dans la basse vallée de la Medjerda s'est accompagné d'une recrudescence des risques de salinisation secondaire des sols par une nappe phréatique salée peu

profonde. Il s'avère donc important de pouvoir diagnostiquer l'ampleur du phénomène, et de mieux le contrôler.

De nombreuses méthodes existent pour mesurer la salinité d'un sol (RHOADES et CORWIN, 1984). Certaines sont fondées sur des procédures analytiques lorsqu'il s'agit de connaître la concentration d'un élément soluble, ce qui implique des prélèvements d'échantillons de sol, ou de solution du sol. Diverses formulations, plus ou moins empiriques et conventionnelles, permettent d'apprécier le degré de salinité ainsi que l'évolution de la composition chimique.

(1) ORSTOM, BP 1386, Dakar-Hann, Sénégal.

Adresse actuelle : ORSTOM, 72, route d'Aulnay, 93143 Bondy Cedex, France.

D'autres utilisent les propriétés électriques du sol soit par propagation de signaux (induction électromagnétique, résistivité, réflectométrie), soit par capteurs *in situ* (conductivité). Il s'agit surtout d'une détermination globale de la salinité, particulièrement appropriée pour le diagnostic, l'inventaire et le contrôle des terres salées, irriguées ou non.

La mise en œuvre de ces dernières techniques demande moins d'investissements financiers et humains que les méthodes analytiques, notamment en matière d'échantillons. Cependant, une combinaison de ces deux catégories méthodologiques est souhaitable pour minimiser le nombre de prélèvements, caractériser de plus grandes surfaces et suivre des évolutions temporelles (RHOADES, 1984).

Nous allons présenter les résultats d'une expérimentation destinée à tester sur le terrain plusieurs capteurs électriques, en conditions naturelles et sous irrigation.

Le présent article traitera des résultats obtenus avec le capteur électrique de salure (*salinity sensor*) et montrera les limites de son utilisation. Un second article sera consacré à la sonde quadripôle.

Matériel et méthode

La parcelle d'étude choisie est située à 20 kilomètres à l'ouest de Tunis dans le domaine des périmètres irrigués de la basse vallée de la Medjerda, dans le secteur d'El Habibia.

La région tunisoise se caractérise par un climat où prédominent les pluies automnales et hivernales, avec une période sèche bien tranchée de juin à août. La pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 450 mm.

Le sol est peu évolué, d'apport alluvial, vertique, présentant une nappe d'eau salée (environ 8 mS cm^{-1}) dont le niveau fluctue entre 1 et 1,50 m (MONTOROI, 1981).

Dispositif expérimental

Une expérimentation neutro-tensiométrique, sur quatre stations disposées en séquence le long d'un drain en poterie — ST0 en amont à ST3 en aval —, a été entreprise pour une étude de caractérisation hydrodynamique (MONTOROI, 1983, 1984).

En complément de ce dispositif, des capteurs électriques de salure (figure 1) et des sondes

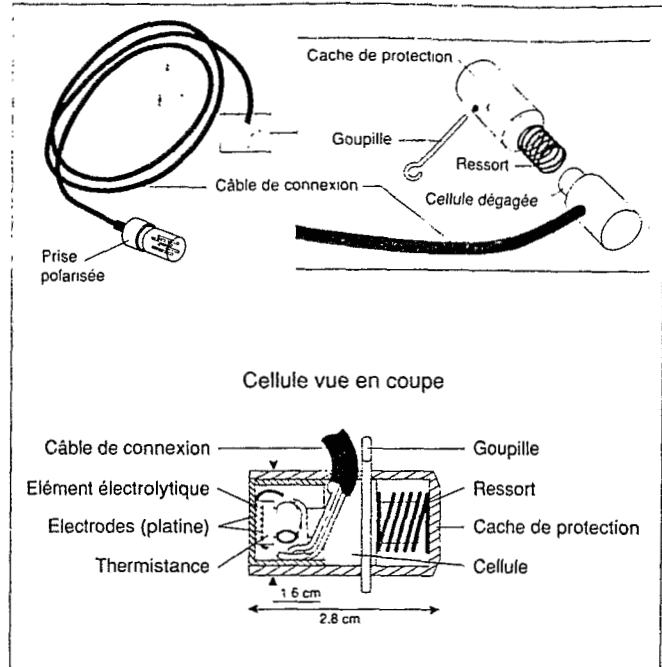


Figure 1. Le capteur électrique de salure (*salinity sensor*) de Soil Moisture Equipment Corp. (extrait de la notice d'utilisation).

quadripôles ont été ajoutés au niveau des stations ST1, ST2 et ST3. Les capteurs sont placés verticalement, à 30, 60 et 90 cm (MONTOROI, 1985). En ST0, une ancienne implantation horizontale de ces capteurs a été conservée (figure 2). Les mesures sont au moins bihebdomadaires au cours des périodes de pluie ou d'irrigation, et hebdomadaires pendant les périodes sèches.

Le matériel

Le capteur électrique de salure fournit deux types d'information (RICHARDS, 1966) : la conductivité électrique de la solution du sol à 25 °C (CEss), lue directement, et la température du sol, indiquée indirectement.

Mesure de la conductivité

Le capteur, implanté dans le sol, est branché sur un conductivimètre (le *salinity bridge* de Soil Moisture Equipment Corporation). La mesure de la conductivité électrique de la solution du sol à la température conventionnelle de 25 °C est obtenue par simple lecture, après affichage des deux paramètres caractérisant l'étalonnage du capteur. Cet étalonnage — établi à partir de plusieurs solutions dont la conductivité, comprise entre 2 et 16 mS cm^{-1} , est

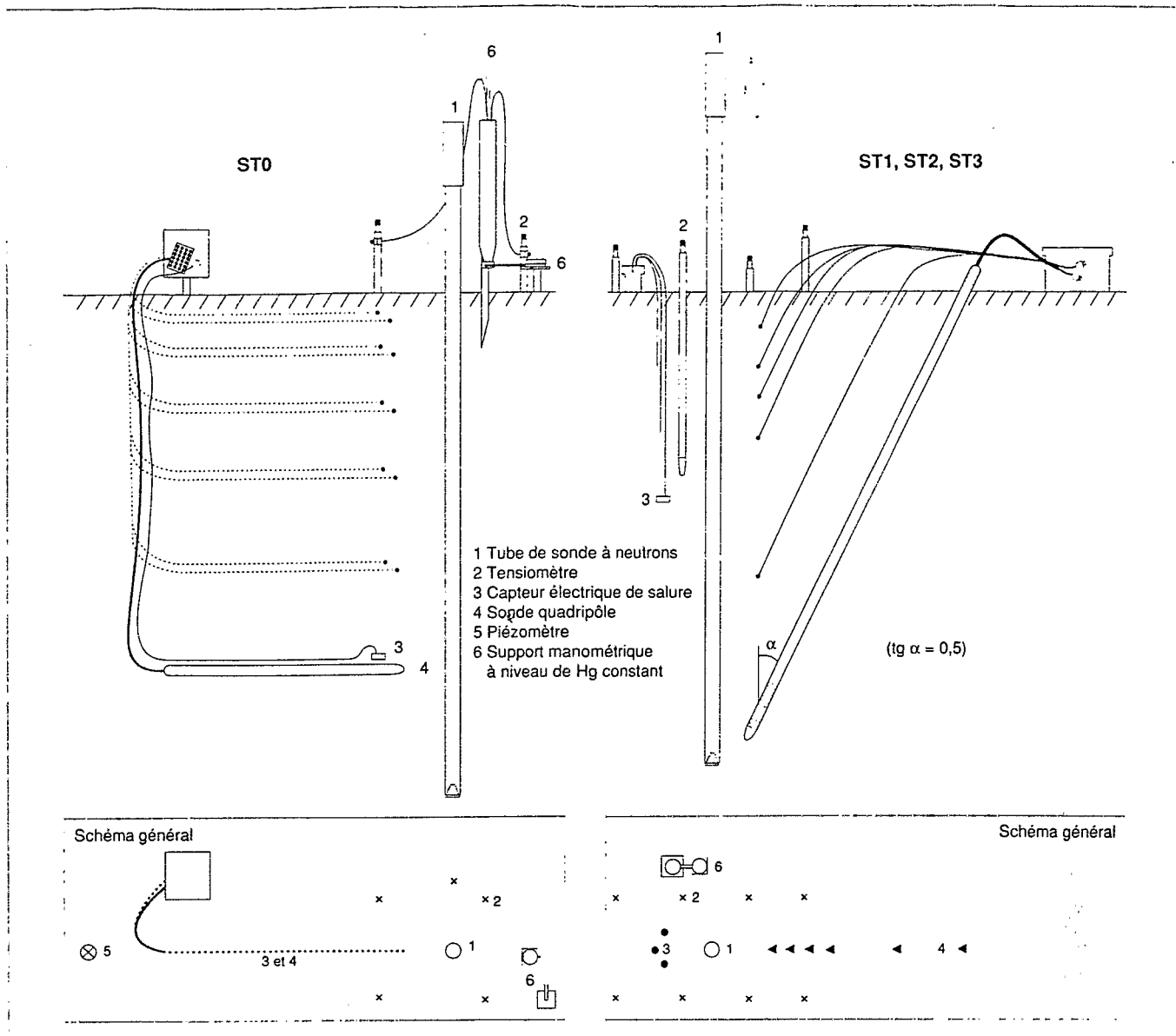


Figure 2. Implantation des équipements dans les stations ST0, ST1, ST2, ST3.

connue — est réalisé par le fabricant. Il a été contrôlé au laboratoire pour la plupart des capteurs électriques de salure.

Le conductivimètre employé ne donne que des valeurs supérieures à $1,5 \text{ mS cm}^{-1}$.

Détermination de la température du sol

La température du sol est déterminée après lecture préalable de la résistance d'une petite thermistance électrique incluse dans le capteur. Cette mesure, qui varie selon la température ambiante du sol, doit être rapportée à la valeur caractéristique du capteur à 25 °C . On lit alors la température du sol correspondant à ce rapport sur un abaque fourni par le fabricant.

Résultats expérimentaux

La mesure de la conductivité électrique

Evolution de la CEss

Les mesures réalisées sont reportées dans la figure 3.

● En conditions naturelles, trois périodes principales peuvent être distinguées au cours de l'année :

— de juillet à octobre, une période de sécheresse estivale sans irrigation. Les horizons inférieurs, situés à 90 cm , soumis à l'influence d'une nappe phréatique

salée — entre 7 et 10 mS cm⁻¹ selon l'époque de l'année —, se salinise par remontée capillaire et concentration des sels solubles. Sur ST3, la CEss s'élève régulièrement et se stabilise en septembre-octobre à environ 13 mS cm⁻¹. L'évolution est moins sensible en ST2, car, compte tenu de la dénivellée de 20 cm entre les deux stations, le capteur est plus éloigné de la nappe ;

— de novembre à février, une période de pluies hivernales à répartition de plus en plus irrégulière, inférieures à 30 mm. L'influence de la nappe s'estompe progressivement, car la percolation des eaux météoriques, quoique lente, devient prépondérante. A 90 cm, la CEss diminue de 6 mS cm⁻¹ sur ST2 et de 8 mS cm⁻¹ sur ST3, puis se stabilise à 2,5 et à 5 mS cm⁻¹. A l'inverse, les horizons supérieurs subissent une légère élévation de la CEss. La resaturation du sol provoque d'abord la dissolution des sels précipités durant la saison sèche puis leur mobilisation vers la nappe, d'où une décroissance lente de la CEss. Ces deux processus interviennent en concomitance, le premier prédominant au début, le second ensuite ;

— de mars à mi-juin, un printemps sec, avec un seul épisode pluvieux d'environ 50 mm, en début mars. On retrouve, pour les horizons inférieurs, le processus de salinisation vers le haut à partir de la nappe. Sur ST3, la CEss augmente encore pour atteindre 16,5 mS cm⁻¹ à la mi-juin. Dans les horizons supérieurs, la dessiccation du sol devient de plus en plus intense. Les sels solubles précipitent et la CEss, inférieure à 1,5 mS cm⁻¹ ne peut plus être mesurée.

● En période d'irrigation, de mi-juin à septembre, on a procédé à cinq apports d'eau, espacés de quinze jours environ, le premier par submersion de la parcelle, les suivants grâce à un réseau de canaux pour irrigation à la raie. Les eaux utilisées sont de même qualité (CE = 2 mS cm⁻¹, SAR, *sodium adsorption ratio* = 4). Au voisinage de la nappe — à 90 cm en ST3 —, la CEss chute dès les premiers apports et se stabilise à 5 mS cm⁻¹. Cette désalinisation est analogue à celle observée avec les pluies hivernales. A chaque irrigation, la réhumectation des horizons supérieurs facilite la redissolution des sels précipités, et la CEss augmente, tandis que chaque nouvelle période d'évaporation favorise la lixiviation vers le haut et la reprécipitation, et la CEss se stabilise ou diminue. Au cours des irrigations successives, la CEss s'élève ainsi par petits paliers.

Fiabilité et validité des mesures

Le capteur électrique de salure fonctionne dans des conditions satisfaisantes tant que le sol est en contact étroit avec l'élément électrolytique poreux. Les échanges entre la solution qui l'imprègne et la solution du sol sont alors possibles et l'équilibre ionique entre

ces deux solutions s'établit d'autant plus vite. Une fissure importante et profonde du sol en période de dessèchement est, à ce titre, préjudiciable à son bon fonctionnement. Il en résulte un décrochage du capteur, sans doute sous l'effet conjugué de l'entrée d'air et de la précipitation de cristaux de sels dans la pastille poreuse. Ce décrochage peut se prolonger durablement et devenir irréversible à la réhumectation du sol, car le dégazage et la resolubilisation des sels sont lents, voire impossibles. Le capteur ne peut plus être utilisé normalement. Par exemple, on s'est très vite rendu compte que les capteurs électriques de salure de la station ST0, remis en service après deux ans de séjour dans le sol, fonctionnaient très mal.

Indépendamment de ces considérations liées aux conditions de l'expérimentation, Wood (1978) signale que l'étalonnage du capteur est susceptible de se modifier après trois à cinq ans d'utilisation *in situ*. Il est donc recommandé de le contrôler au bout de trois ans.

La mesure de la CEss à l'aide du capteur électrique de salure permet de s'affranchir de la méthode de la pâte saturée — évitant ainsi les fréquents prélèvements qui perturbent le sol — et a l'avantage de faciliter le suivi des mesures. L'étalonnage préalable du capteur établit la correspondance entre ces deux méthodes. VIEILLEFON *et al.* (1983) montrent également, lors d'expérimentations diverses sur un monolithe de sol argileux, que l'évaluation de la CEss grâce à ce type de capteur s'accorde bien avec des mesures de la CEss faites sur des prélèvements directs de la solution du sol à l'aide de bougies poreuses.

Lorsque la salinité de la solution du sol change rapidement — après une irrigation, par exemple —, la réponse du capteur peut être relativement longue, car elle dépend du temps nécessaire pour l'équilibre ionique de la solution de la pastille poreuse (WESSELING et OSTER, 1973). Les auteurs proposent la correction des mesures de la CEss si la salinité subit des variations rapides durant un laps de temps inférieur à cinq jours.

Au cours de plusieurs cycles d'irrigation sur colonnes de sol, OSTER et INGVALSON (1967) estiment la précision des mesures à $\pm 0,5$ mS cm⁻¹. OSTER et WILLARDSON (1971) confirment ces valeurs au champ, mais ne sont pas certains que la conductivité électrique mesurée avec un capteur électrique de salure soit représentative de la conductivité électrique d'un sol en place. Il semblerait que ce soit le cas, bien que les auteurs aient parfois relevé des valeurs plus faibles, en partie à cause de l'accroissement de la perméabilité du sol perturbé par l'implantation verticale du capteur.

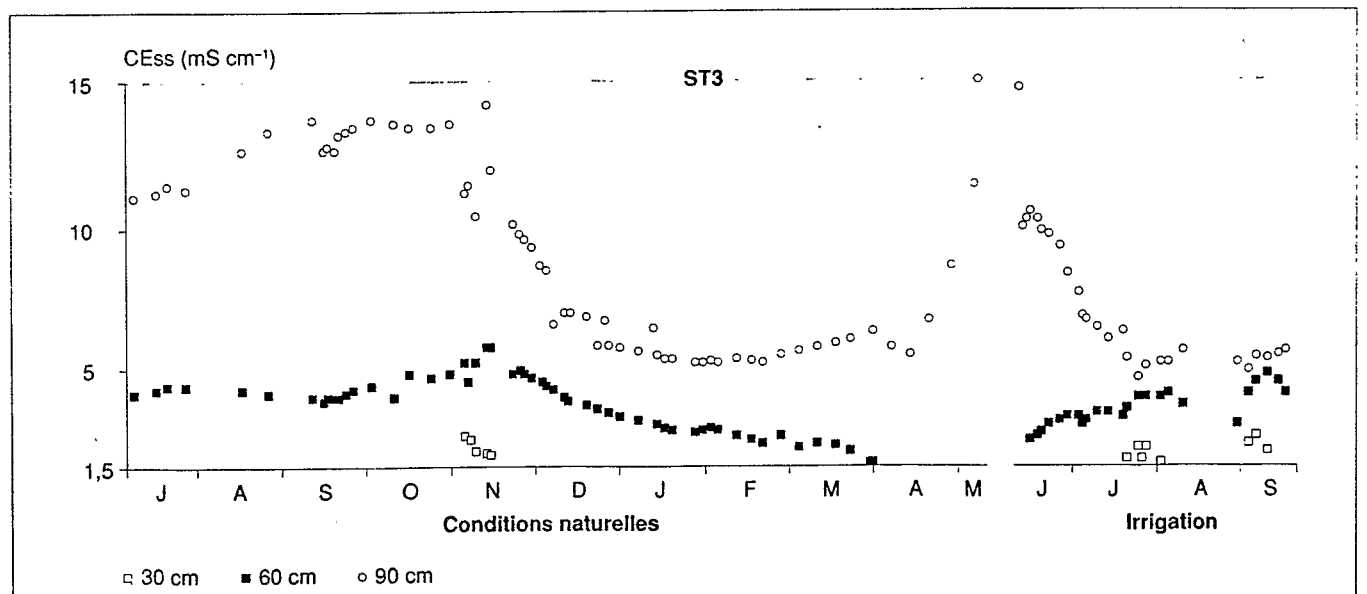
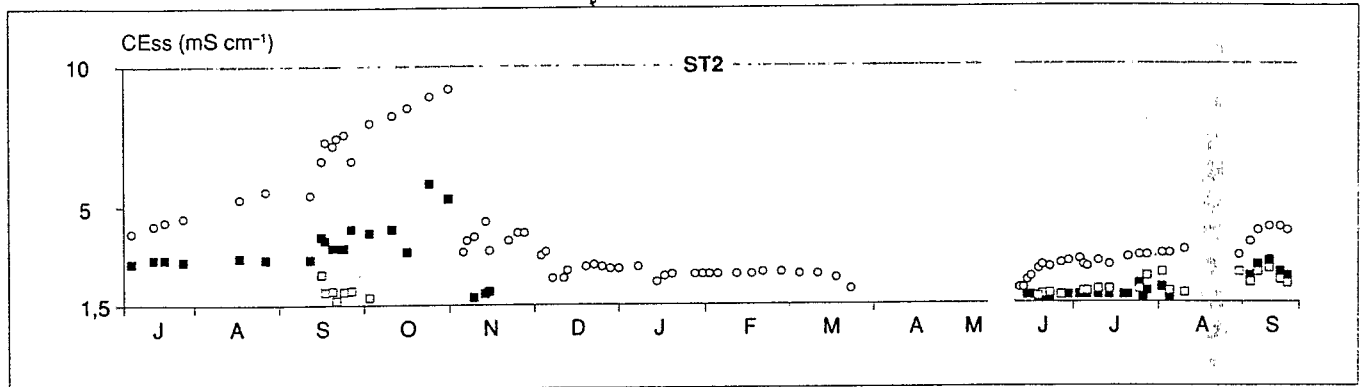
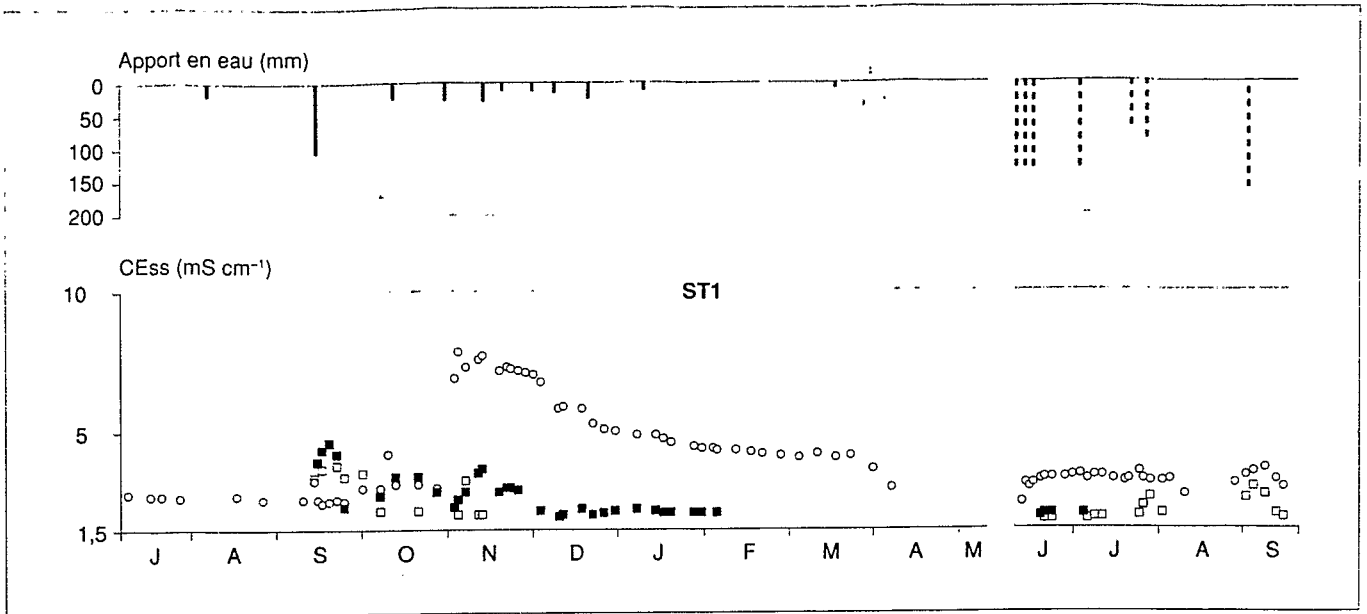


Figure 3. Evolution de la conductivité électrique de la solution du sol (CEss à 25 °C) à différentes profondeurs sur les stations ST1, ST2 et ST3, en conditions naturelles et avec irrigation.

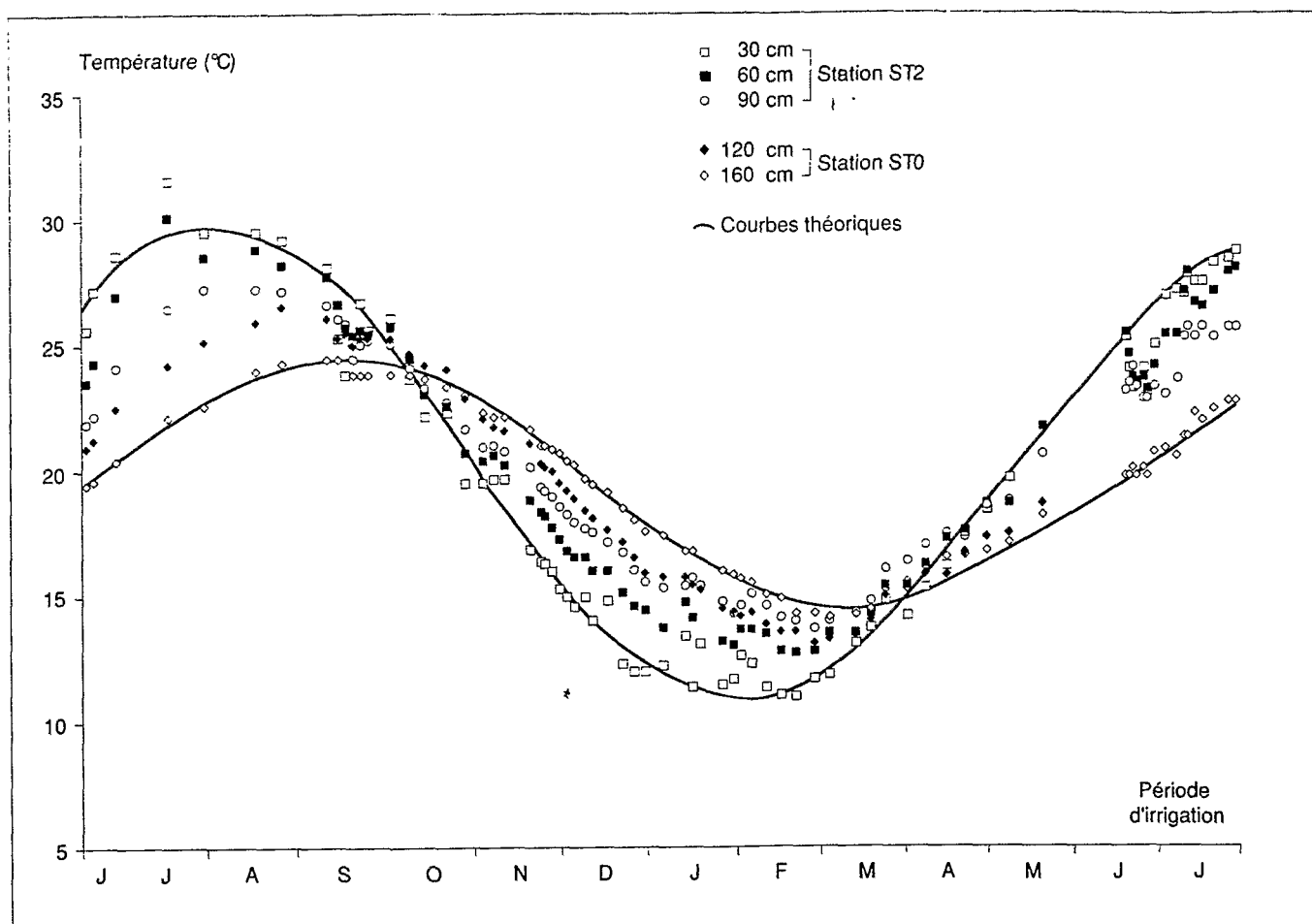


Figure 4. Evolution dans le temps de la température à différentes cotes, mesurée avec un capteur électrique de salure.

BRESLER *et al.* (1982) signalent, d'autre part, qu'au-delà d'une teneur en eau correspondant à un potentiel matriciel de 2 bars, le capteur électrique offre beaucoup moins de sensibilité aux variations de la CEss, ce qui limiterait donc son emploi aux sols bien humectés.

La mesure de la température du sol

Les résultats montrent l'amortissement et le déphasage croissant des oscillations avec la profondeur (figure 4). Les profils de température s'inversent deux fois au cours de l'année, en octobre (24,2 °C) et en avril (17,2 °C). Dans les couches supérieures, les pluies hivernales et les irrigations ont une influence très sensible. On n'observe pas de microvariations journalières, les mesures se faisant toujours aux mêmes heures. On a représenté analytiquement les courbes sinusoïdales $T_z(t)$ par une relation empirique de la forme :

$$T_z = a + b \cos(2\pi(t + \theta)/365)$$

où :

– a et b sont les coefficients d'ajustement, exprimés en degrés Celsius ;

– θ est le déphasage, exprimé en jours, par rapport à l'origine des temps, que l'on fixe arbitrairement au 1^{er} août 1982 ($\theta < 0$ car il y a retard de phase) ;

– t est exprimé en jours et T_z en degrés Celsius. La période est de 365 jours.

Pour chaque cote z , les coefficients a et b sont calculés à partir des températures minimale et maximale :

$$a = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} ; \quad b = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$$

où a représente la température moyenne et b , la demi-amplitude.

Les dates correspondant à ces deux températures extrêmes permettent de déterminer approximativement le déphasage θ (tableau I).

Tableau I. Calcul des paramètres de la relation Tz (f).

Profondeur z (cm)	Températures extrêmes (°C)		Amplitude thermique (°C)		Coefficients (°C)		Déphasage (jours) θ	
	Minimale	Date	Maximale	Date	a	b		
30	10,9	1-02-1983	29,6	1-08-1982	18,7	20,25	9,35	0
60	12,3	18-02-1983	29,0	16-08-1982	16,7	20,65	8,35	-17
90	13,7	18-02-1983	27,2	16-08-1982	13,5	20,45	6,75	-17
120	13,0	25-02-1983	26,5	28-08-1982	13,5	19,75	6,75	-26
160	14,0	7-03-1983	24,7	12-09-1982	10,7	19,35	5,35	-40

$Tz(t) = a + b \cos(2\pi \times (t + \theta) / 365)$. Pour chaque cote z, les coefficients a et b sont calculés à partir des températures minimale et maximale.

En réalité, des oscillations journalières se surimposent au cycle thermique annuel (HILLEL, 1982). Pour les sols les plus communs, elles sont totalement amorties dans les cinquante premiers centimètres (VAN WIJK et DE VRIES, 1963).

Les valeurs absolues de températures ont été comparées à celles obtenues à l'aide de thermomètres classiques sur la station météorologique de

Saïda (figure 5). Les paramètres d'ajustement linéaire sont donnés dans le tableau II, pour les profondeurs 50 cm et 90 cm.

L'analyse statistique montre que :

— l'hypothèse de l'égalité des variances résiduelles est admise avec une probabilité de réalisation de 97,5 % ;

— les pentes, en revanche, présentent une différence significative au même niveau de probabilité.

Le regroupement de ces deux droites n'est statistiquement pas envisageable.

La précision des deux méthodes de mesure n'est pas tout à fait identique : la température est obtenue au dixième de degré Celsius avec le capteur électrique, tandis que les valeurs fournies par l'Institut météorologique de Tunis sont systématiquement entières. On peut donc considérer que le capteur électrique mesure la température avec une fiabilité suffisante.

Wood (1978) montre que la précision de mesure diminue avec le temps, notamment après trois ans d'utilisation au champ, entraînant ainsi des erreurs allant de 1 à 3 °C sur l'intervalle 13-35 °C.

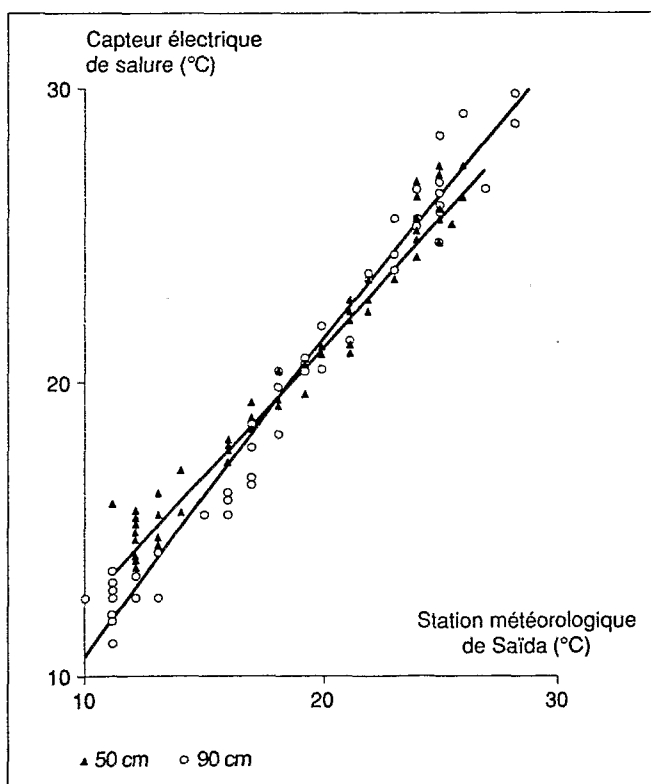


Figure 5. Relation entre les mesures de température du sol à 50 cm et 90 cm obtenues par capteur électrique et les températures relevées par la station météorologique de Saïda.

Tableau II. Paramètres d'ajustement linéaire de la relation $T_{ss} = a \times T_{stm} + b$.

Profondeur (cm)	a	b	Ecart-type résiduel	r	Nombre de couples
50	1,049	0,14	0,976	0,987	53
90	0,875	3,81	0,802	0,982	53

Tss : température mesurée au capteur de salure.

Tstm : température mesurée à la station météorologique.

Conclusion

Le capteur électrique de salure permet des mesures sur le terrain en continu, sans perturber le milieu. Néanmoins, certaines contraintes limitent son emploi systématique.

Le capteur électrique présente surtout l'inconvénient d'avoir un temps de réponse assez long lorsque la salinité varie rapidement. Des problèmes de calibrage surviennent fréquemment après plusieurs années d'implantation dans le sol. Il y a décrochage du capteur lorsque le matériau, à un stade avancé de dessèchement, développe des fentes de retrait importantes. De plus, il est particulièrement onéreux.

Une utilisation localisée de ce type de capteur — par exemple, au-dessus d'une nappe salée ou dans la zone racinaire — pourrait être envisagée, afin de prévenir tout risque de salinisation et d'adapter l'irrigation en conséquence.

En outre, le capteur électrique offre la possibilité de mesurer la température du sol. L'étude des variations de ce paramètre au cours d'un cycle annuel et à des profondeurs différentes est indispensable sur une grande partie de l'année, pour obtenir des mesures de conductivité électrique *in situ* exploitables. Les relations empiriques $T_z(t)$, qui donnent une estimation satisfaisante de la température du sol, n'ont de valeur que sur la période considérée. La variabilité interannuelle de ces courbes n'a pas été abordée, mais il est souhaitable d'en tenir compte pour étudier d'autres cycles annuels. La connaissance du paramètre température peut se révéler également intéressante pour l'étude géochimique de la solution du sol.

Reçu le 11 juin 1991.

Accepté le 20 juin 1991.

Références bibliographiques

BRESLER E., MCNEAL B.L., CARTER D.L., 1982. Saline and sodic soils. Principles, dynamics, modeling. Berlin, Springer-Verlag, 236 p.

HILLEL D., 1982. Introduction to soil physics. New-York, Academic Press, 364 p.

MONTOROI J.-P., 1981. Etude de deux séquences de sols salés dans le Nord et le Sud tunisien (basse vallée de la Medjerda et région de Gabès). Tunis, DRES-ORSTOM, 101 p.

MONTOROI J.-P., 1983. Etude de la dynamique de l'eau et des sels sur une séquence de sol argileux de la basse vallée de la Medjerda (secteur d'El Habibia). Rapport de campagne. Tunis, DRES-ORSTOM, 49 p. (Etudes spéciales, n° 207.)

MONTOROI J.-P., 1984. Etude de la dynamique de l'eau et des sels sur une séquence de sol argileux de la basse vallée de la Medjerda (secteur d'El Habibia). I. Caractérisation hydrodynamique. Tunis, DRES-ORSTOM, 83 p. (Etudes spéciales, n° 213.)

MONTOROI J.-P., 1985. Etude de la dynamique de l'eau et des sels sur une séquence de sol argileux de la basse vallée de la Medjerda (secteur d'El Habibia). II. Suivi de la salure à l'aide de capteurs électriques. Tunis, DRES-ORSTOM, 45 p. (Etudes spéciales, n° 229.)

OSTER J.D., INGVALSON R.D., 1967. In situ measurement of soil salinity with a sensor. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 31: 572-574.

OSTER J.D., WILLARDSON L.S., 1971. Reliability of salinity sensors for the management of soil salinity. Agron. J., 63 : 695-698.

RHOADES J.D., 1984. Principles and methods of monitoring soil salinity. In : Soil salinity and irrigation: Processes and management, Shainberg and Shalhevet Edit., Berlin, Springer-Verlag, p. 130-142.

RHOADES J.D., CORWIN D.L., 1984. Monitoring soil salinity. J. Soil Water Conserv., 39 : 172-175.

RICHARDS L.A., 1966. A soil salinity sensor of improved design. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 30 : 333-337.

VAN WIJK W.R., DE VRIES D.A., 1963. Periodic temperature variations in a homogeneous soil. In : Physics of Plant Environment, Van Wijk Edit., Amsterdam, North-Holland Publ., p. 102-143.

VIEILLEFON J., VALLES V., VALLES A.-M., 1983. Etude méthodologique des transferts d'eau et de sels dans un monolithe de sol argileux. III. Suivi de la salure par capteur et caractérisation chimique des solutés. Tunis, DRES-ORSTOM, 70 p. (Etudes spéciales, n° 203.)

WESSELING J., OSTER J.D., 1973. Response of salinity sensors to rapidly changing salinity. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 37 : 553-557.

WOOD J.D., 1978. Calibration stability and response time for salinity sensors. Soil Sci. Soc. Am. J., 42 (2) : 248-250.

Summary

J.-P. MONTOROI – Salinity control by means of electric sensors: application to an irrigation scheme in Tunisia.
I – The salinity sensor.

In Tunisia, the development of agricultural lands must take account of the increasing risks of salinization, more particularly with the development of summer irrigation. Irrigation must be practised with discrimination and regularly monitored. *In situ* or mobile electric sensors are good means to achieve it. The salinity sensor was tested under conditions of natural rains and irrigation in a trial conducted on a traditionally exploited plot. This device is adapted to salinity control when watering is regular and maintains the soil near the moisture storage capacity. It gives reliable values of the soil temperature. Its systematic use is limited by the cost. Yet a localized use (at the watertable level, in the root area) is particularly recommended to limit salinization.

Key words: salinity, irrigation, soil, electrical conductivity, resistivity, temperature, Mejerdah, Tunisia.

Resumen

J.-P. MONTOROI – Control de la salinidad con captadores eléctricos : aplicación a un perímetro de regadío en Túnez. I – El captador eléctrico de salinidad. *

En territorio tunecino, el cultivo de las tierras agrícolas debe tomar en cuenta los riesgos cada vez mayores de salinización, sobre todo desde que se ha generalizado el riego estival, que debe aplicarse con discernimiento y requiere un control regular. Los captadores eléctricos *in situ* o móviles son un medio de control eficaz. Una experimentación realizada en una parcela tradicionalmente cultivada permite probar el captador eléctrico de salinidad bajo lluvia natural y en condiciones de riego. Es un instrumento adaptado para el control de la salinidad cuando el suministro de agua es regular y mantiene el suelo alrededor de la capacidad de retención. Indica valores fidedignos de temperatura del suelo. Aunque su costo limita su empleo sistemático, se aconseja utilizarlo sobre todo de forma localizada (a la altura de la capa freática, en la zona radicular) para limitar los riesgos de salinización.

Palabras-clave : salinidad, riego, suelo, conductividad eléctrica, resistividad, temperatura, Mejerdah, Túnez.