

# D

## étermination de la relation résistivité électrique - teneur en eau au laboratoire. Application aux sols de Tunisie centrale

**Jean-Pierre Montoroi<sup>1</sup>, Gérard Bellier<sup>1</sup>, Jean Larvy Delarivière<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ORSTOM, Laboratoire des Formations Superficielles, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

<sup>2</sup> ORSTOM, Laboratoire de Pédologie, B.P. 1386, Dakar, Sénégal

### Abstract

A laboratory experiment is carried out in order to determine the relationship electrical conductivity (R) versus water content (Hp) for 13 soils sampled in a central Tunisia watershed. As water content increases, electrical resistivity decreases following an exponential law  $R = a e^{b/Hp}$ . The a regression parameter is correlated with the particle size distribution allowing to classify the soil samples. This parameter decreases with clay and silt content and increases with sand content.

During a field survey, soils are at different water contents and this variability must be taking in account. When the relationship R versus Hp is known, we calculate the  $R_{0,2}$  value which is the electrical resistivity at a reference water content proposed as  $0,20 \text{ gg}^{-1}$ . If the relationship is unknown, we can measure at two given periods two couples (R, Hp), determine the a, b parameters considering an arbitrary exponential law and then obtain the  $R_{0,2}$  value.

## Introduction

Les méthodes électriques sont utilisées non seulement pour la prospection de formations géologiques et d'aquifères (Keller et Frischknecht, 1966 ; Mac Neill, 1980) mais également pour caractériser les sols affectés par la salinisation (Rhoades et Ingvalson, 1971 ; Vieillefon et Zante, 1981 ; El Oumri et Vieillefon, 1983 ; Montoroi, 1992).

Pour un matériau donné, la propagation du courant électrique dépend de la nature chimique des phases solides et liquides ainsi que de leur teneur respective (Gupta et Hanks, 1972 ; Rhoades et al, 1976 ; Nadler, 1982 ; Bottraud et Rhoades, 1985). L'interprétation du signal électrique reçu après injection du courant sera d'autant plus aisée que certains de ces paramètres seront considérés comme invariants.

Dans cette communication, nous développons une approche expérimentale au laboratoire pour déterminer la relation résistivité électrique-teueur en eau d'échantillons de sol. Les caractéristiques analytiques des courbes obtenues sont reliées aux caractéristiques physiques des échantillons, notamment la granulométrie, et les limites d'utilisation des méthodes électriques sur le terrain sont discutées.

## Matériels et méthodes

Des échantillons de sol ont été prélevés dans la partie aval du bassin versant délimité par le lac collinaire d'El Gouazine (Albouy et al., 1995). Celui-ci est situé en Tunisie centrale entre Ain Jelloula et Ksar Lamsa à environ 50 km au nord-ouest de Kairouan (route MC 46) et à 110 km au sud-ouest de Tunis. Les échantillons ont été séchés à l'air, broyés et tamisés en deux fractions (2 mm et 200  $\mu$ m).

Un dispositif expérimental a été mis en place, sur le modèle de Rhoades et al. (1977), pour effectuer la mesure de la résistivité électrique d'un échantillon de sol au cours de sa dessiccation (**figure 1**). Celui-ci est placé dans une cellule de mesure cylindrique ouverte aux deux extrémités et fabriquée en PVC. La cellule a un diamètre de 53,4 mm et une hauteur de 5 cm, soit un volume de 111,98 cm<sup>3</sup> et est remplie par environ 144 g de sol tamisé à 2 mm. L'échantillon est réhumecté sur une table à succion sous -10 hPa et est ensuite tassé durant 15 mn sous une pression de 10 N cm<sup>-2</sup>. Quatre électrodes en inox sont enfoncées à mi-hauteur dans la paroi de la cellule selon le modèle Carré. Elles pénètrent l'échantillon sur une longueur de 11,2 mm. La teneur en eau pondérale est déterminée par pesée tandis que les lectures simultanées de résistance sont obtenues à l'aide d'un résistivimètre RMCA-4.

L'ensemble des échantillons a également fait l'objet d'une caractérisation minéralogique pour la fraction inférieure à 200  $\mu$ m, granulométrique et hydrophysique ( $\rho_f$  3,0 et 4,2) pour la fraction inférieure à 2 mm.

Au moment des prélèvements sur le terrain, des mesures électriques ont été réalisées à l'aide d'un montage Wenner à faible écartement ( $a = 10$  cm) et la teneur en eau pondérale des échantillons a été mesurée après dessiccation dans une étuve à 105 °C.

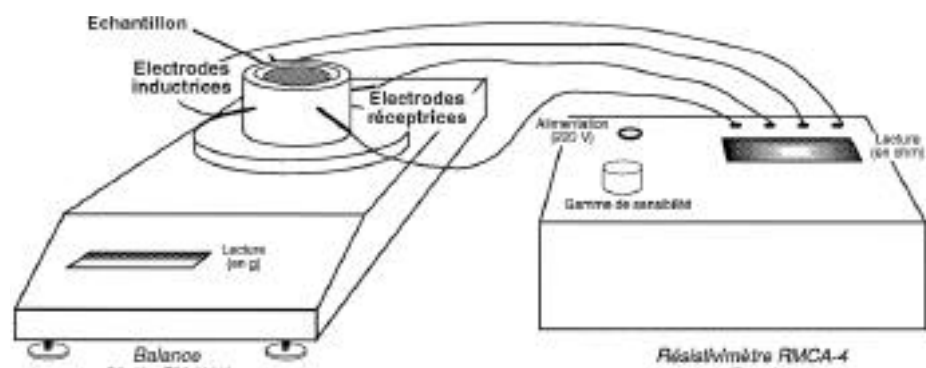


Figure 1 - Dispositif expérimental de mesure de la résistivité électrique

## Résultats

### ❖ Les courbes résistivité électrique-humidité pondérale

Pour les échantillons de sol et le profil de sol P2, les courbes sont présentées dans la **figure 2**. Une loi exponentielle de type  $R = a e^{b/H_p}$  a été calculée par régression où  $R$  représente la résistivité électrique apparente (en Ohm.m) et  $H_p$  la teneur en eau pondérale. Les caractéristiques des courbes  $R = f(H_p)$  sont données dans le **tableau 1**.

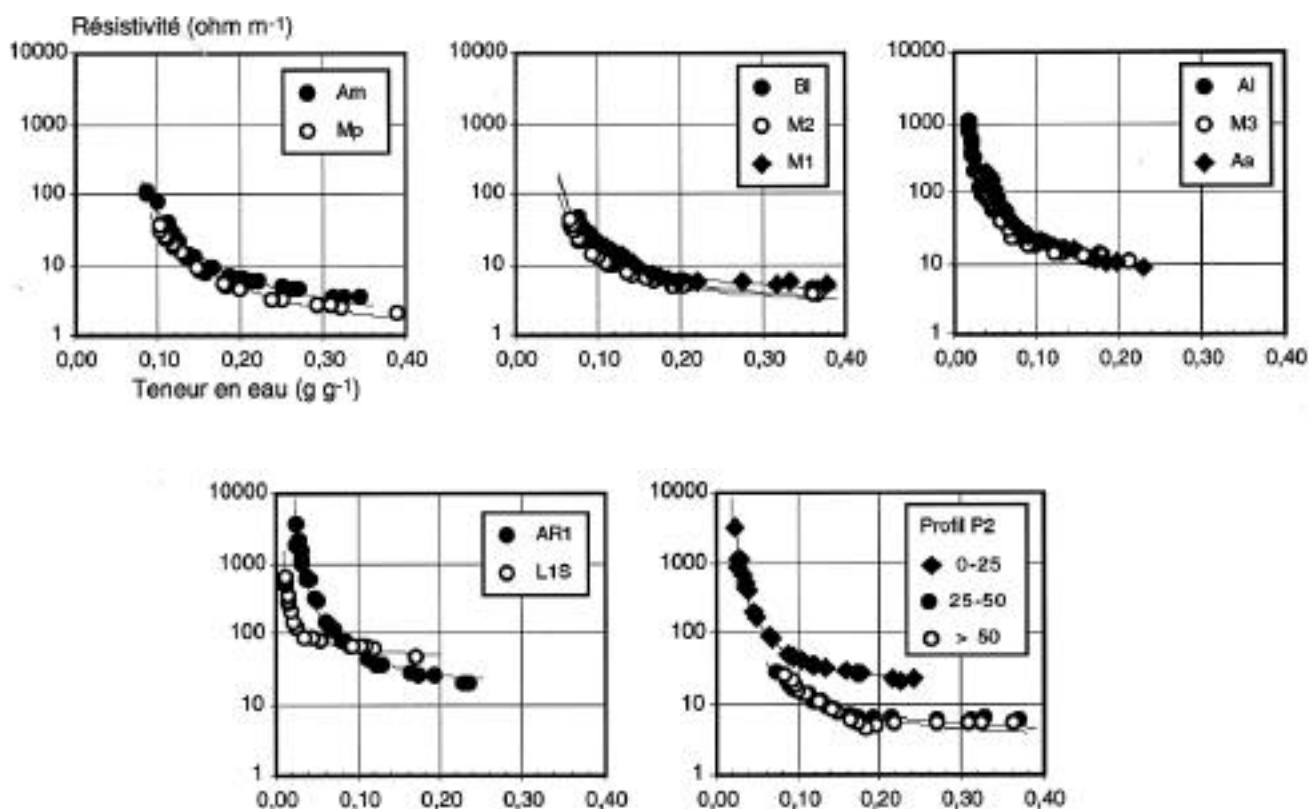


Figure 2 - Relation entre la résistivité électrique apparente ( $R$ ) et la teneur en eau pondérale ( $H_p$ ) pour les sols du site d'El Gouzine

Le coefficient  $a$  possède la dimension d'une résistivité électrique. Nous avons ainsi regroupé les échantillons de sol en 4 classes selon la valeur de  $a$  (**tableau 1**):

- pour  $a < 1$ , les sols Am et Mp sont les plus conducteurs car riches en minéraux argileux et en gypse.
- pour  $1 < a < 3$ , ils sont également conducteurs mais calcaires (M2, B1 et M1)
- pour  $3 < a < 10$ , c'est une classe intermédiaire comprenant les sols Aa, M3 et A1.
- pour  $a > 10$ , il s'agit de sol les plus résistants car pauvres en minéraux argileux : ils sont sableux et calcaires (AR1, L1S).

Le profil de sol P2 comprend une couche superficielle résistante ( $a > 10$ ) reposant sur un horizon plus conducteur car plus argileux ( $1 < a < 3$ ).

	Matériaux conducteurs (riches en minéraux 2/1 et 1/1)							Matériaux intermédiaires			Matériaux résistants (pauvres en minéraux 2/1 et 1/1)		
	Argileux gypseux		Argileux calcaires (marnes)					Aa	M3	Al	Sableux calcaires		
	Am	Mp	M2	Bl	M1	P2 <sub>25-50</sub>	P2 <sub>&lt;50</sub>				AR1	L1S	P2 <sub>0-25</sub>
R à saturation (en .m)	1,9	3,2	3,7	4,3	5,2	5,6	5,1	8,7	10,9	13,0	18,5	43,9	22,1
Hp à saturation (en g g <sup>-1</sup> )	0,39	0,35	0,37	0,37	0,38	0,37	0,36	0,23	0,21	0,18	0,23	0,17	0,24
R à sec (en .m)	35,0	106,5	40,3	44,9	29,5	27,5	25,1	202,6	183,1	1005,6	3594,3	611,1	3265,2
Hp à sec (en g g <sup>-1</sup> )	0,10	0,09	0,07	0,08	0,09	0,07	0,08	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,02
a (en .m)	0,631	0,824	1,769	1,791	2,447	3,046	2,335	4,975	5,017	8,668	12,225	42,997	13,551
b (en g g <sup>-1</sup> )	0,399	0,416	0,202	0,234	0,212	0,154	0,187	0,148	0,127	0,088	0,146	0,030	0,120
r <sup>2</sup>	0,993	0,984	0,988	0,983	0,953	0,928	0,893	0,997	0,991	0,995	0,922	0,990	0,997

Tableau 1 - Caractéristiques des courbes  $R = a e^{b/Hp}$  pour différents matériaux du bassin versant d'El Gouzine

Il existe une relation entre le coefficient a et les principales classes granulométriques des échantillons (**figure 3 et tableau 2**). Ce coefficient diminue avec la teneur en argile (particules <2 µm) et en limons (2 µm < particules < 50 µm) et augmente avec la teneur en sables (50 µm < particules < 2 000 µm). Autrement dit, plus il est faible, plus le sol est conducteur et vice-versa.

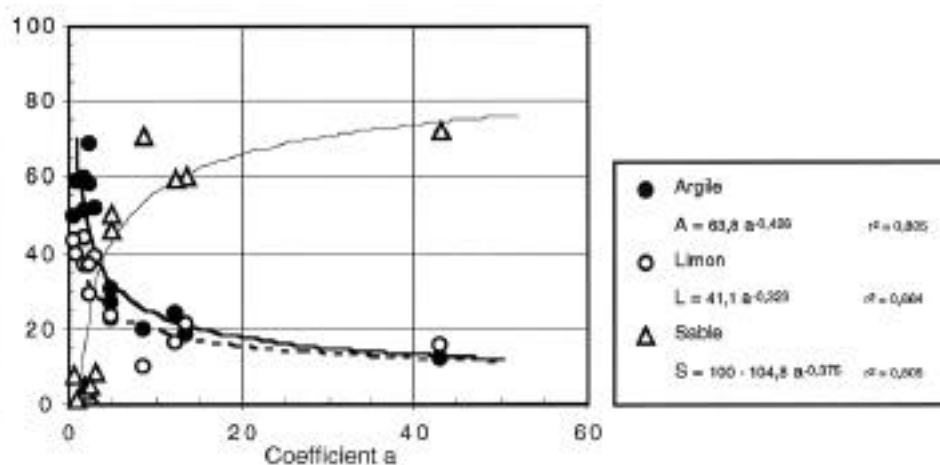


Figure 3 - Relation entre la granulométrie (en g 100g<sup>-1</sup>) et le coefficient a (en .m)

	Echantillons de sol										Profil de sol		
	Am	Mp	M2	Bl	M1	Aa	M3	Al	AR1	L1S	P2 <sub>0-25</sub>	P2 <sub>25-50</sub>	P2 <sub>&lt;50</sub>
Argile	49,51	59,08	51,41	59,59	68,52	30,67	26,98	19,66	24,23	11,84	18,71	52,07	57,94
Limon	43,03	39,72	43,80	36,53	29,37	23,13	22,97	9,68	16,16	15,69	21,09	39,28	37,03
Sable (en g 100g <sup>-1</sup> )	7,46	1,20	4,80	3,88	2,12	46,20	50,05	70,66	59,61	72,47	60,20	8,65	5,04
pF 3,0	0,362	0,269	0,310	0,298	0,328	0,163	0,160	0,099	0,140	0,078	0,134	0,297	0,313
pF 4,2 (en g g <sup>-1</sup> )	0,251	0,193	0,210	0,208	0,227	0,106	0,101	0,057	0,090	0,037	0,084	0,204	0,216
H <sub>p</sub> terrain (en g g <sup>-1</sup> )	0,206	-	0,177	-	0,227	-	0,081	-	-	0,025	-	-	-
R <sub>terrain</sub> (en .m)	1,1	-	22,3	-	8,4	-	47,1	-	-	860	-	-	-
R <sub>calculée</sub> (en .m)	4,4	-	5,6	-	6,2	-	24,1	-	-	144,7	-	-	-
R <sub>0,2</sub> (en .m)	4,7	6,6	4,9	5,8	7,1	10,4	9,5	13,4	25,4	50,0	24,6	6,6	6,0

Tableau 2 - Caractéristiques physiques des sols du bassin versant d'El Gouazine (avril 1995)

### ❖ Comparaison entre les mesures de terrain

A partir de sondages électriques réalisés sur le terrain, les mesures de l'humidité pondérale et de la résistivité électrique d'un matériau donné peuvent être resituées sur une courbe résistivité électrique-teneur en eau. Pour les échantillons de sol Am, M2, M1, M3 et L1S, on constate que la mesure de terrain  $R_{\text{terrain}}$  à une humidité  $H_p$  est du même ordre de grandeur que la valeur calculée  $R_{\text{calculée}}$  par la courbe ajustée  $R=f(H_p)$ , aux erreurs expérimentales près.

Au cours d'une campagne de mesures sur le terrain, on rencontre des matériaux à des états d'humidité variables. Pour comparer les valeurs de résistivités électriques mesurées, il conviendrait donc de rapporter ces valeurs à une teneur en eau pondérale de référence.

Dans cette étude, on propose la valeur de 0,20 g g<sup>-1</sup>, qui est commune à l'ensemble des échantillons, et on calculera la résistivité électrique  $R_{0,2}$  correspondante.

Ce calcul peut être fait de deux manières :

- si on détermine la relation  $R = a e^{b/H_p}$  au laboratoire pour un sol donné, le calcul de  $R_{0,2}$  est immédiat.
- sinon, il suffit d'avoir, pour un même sol pris à deux instants données, deux couples de mesures ( $R, H_p$ ) et ( $R', H_p'$ ). Par un calcul simple, les coefficients  $a$  et  $b$  de la relation  $R = a e^{b/H_p}$  sont :

$$a = R / e^{b/H_p} = R' / e^{b/H_p'} \text{ et } b = (H_p H_p' / (H' - H)) \ln R/R'$$

et  $R_{0,2}$  est alors déduit.

Un tel calcul du  $R_{0,2}$  présente l'intérêt majeur de lever certaines erreurs d'interprétation des mesures de résistivités électriques sur le terrain.

## Conclusion

L'étude de la relation résistivité électrique (R) - teneur en eau pondérale (Hp) montre les points suivants :

- les mesures électriques effectuées sur le terrain nécessitent la connaissance de l'état d'humidité du sol ou de la formation superficielle.
- au niveau d'un profil de sol, la mesure électrique doit correspondre à un petit volume prospecté et donc être réalisée avec un quadripôles à faible écartement ( $a < 10$  cm). Pour des écartements supérieurs la variabilité spatiale de la teneur en eau est alors à considérer.
- pour comparer les résistivités électriques de deux matériaux donnés, il convient de rapporter ces mesures à une teneur en eau de référence. Ce calcul est possible lorsque l'on connaît l'expression analytique de la relation  $R = f(Hp)$  qui est de type exponentielle,  $R = a e^{b/Hp}$  : nous proposons la valeur de référence de  $0,20 \text{ g g}^{-1}$ .
- sans connaître cette expression analytique, nous proposons une méthode qui permet, à partir de deux couples (R, Hp) obtenus à deux instants donnés, de calculer la résistivité à la teneur en eau de référence.

En perspective, cette démarche devra être validée avec un échantillonnage de sols plus important et la signification physique de la relation  $R = f(Hp)$  sera analysée en considérant les propriétés électriques des phases solides et liquides .

## Bibliographie

Albouy Y., Bellier G., Job J.O., Montoroi J.P., Arfaoui M., Gaaloul N., Gasmi M., Guigen N., Khalifa F., Lamy V., Larvy Delarivière J., Millot G., 1995. Application des méthodes géophysiques à l'étude des formations superficielles du bassin versant du lac collinaire d'El Gouazine (Tunisie centrale). Rapport scientifique. Multigr., ORSTOM/CRGR, Bondy, 50 p. et annexes.

Bottraud J.C., Rhoades J.D., 1985. Referencing water content effects on soil electrical conductivity - salinity calibrations. Soil Sci. Soc. Am. J., 49 : 1579-1581.

El Oumri M., Vieillefon J., 1983. Etude expérimentale de la conductivité électrique globale des sols. Application à l'estimation de leur salinité. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XX, 2 : 91-108.

Gupta S.C., Hanks R.J., 1972. Influence of water content on electrical conductivity of the soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36 : 855-857.

Keller G.R., Frischknecht F.C., 1966. Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon, Tarrytown, NY.

Mac Neill J.D., 1980. Electrical conductivity of soils and rocks. Technical note TN-5, Geonics Ltd, Mississauga, Canada.

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.

Nadler A., 1982. Estimating the soil water dependence of the electrical conductivity soil solution / electrical conductivity bulk soil ratio. Soil Sci. Soc. Am. J., 46 : 722-726.

Rhoades J.D., Ingvalson R.D., 1971. Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 35 : 54-60.

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

Rhoades J.D., Kaddah M.T., Halvorson A.D., Prather R.J., 1977. Establishing soil electrical conductivity calibrations using four-electrode cells containing undisturbed soil cores. *Soil Sci.*, 123, 3 : 137-141.

Vieillefon J., Zante P., 1981. Etude du régime hydrique et de la salure en périmètre irrigué sur sol gypseux salé. DRES-ORSTOM, Tunis, Et. Spéc. 190, 101 p.