

Suivi annuel des variations de l'humidité du sol à l'aide de sondages Schlumberger

Pascal BRUNET⁽¹⁾, Christophe BOUVIER⁽¹⁾, Jean Louis PERRIN⁽¹⁾, Henri ROBAIN⁽²⁾

⁽¹⁾ HSM, Université Montpellier 2, cc MSE, 34 095 Montpellier cedex 5

⁽²⁾ GEOVAST, IRD, 32 avenue Henri Varagnat 93143 Bondy cedex, France

Abstract

Vertical Electrical Soundings have been carried out over one year, in order to measure the temporal variability of the soil moisture. A line of 20 electrodes was settled on a very clay soil, in Montpellier. The soil moisture was also measured through TDR experiment. The evolution of the resistivities in space and time show that the upper clays of the soil are very sensitive in the climatological inputs (rain and temperature), whereas the variations in the lower clays are much smoother. Both resistivities and moistures resulting from TDR are very close together, and their relationship could be suited with Archie's law.

Introduction

La réponse hydrologique d'un bassin versant est influencée par de multiples facteurs, notamment les conditions d'humidité des premiers horizons des sols. La connaissance de la variabilité temporelle du contenu en eau du sol reste encore très limitée à l'échelle du bassin versant, voire de la parcelle, et l'utilisation des sondages électriques verticaux (SEV) Schlumberger permet *a priori* d'estimer l'humidité des couches superficielles du sol à une échelle relativement large, intégrant un premier niveau de variabilité spatiale. En outre, la relative simplicité de la mesure et son caractère non destructif sont autant d'avantages de cette technique de mesure, qui peut apporter un complément essentiel à d'autres types de mesures de l'humidité. Une ligne d'électrodes a été implantée et laissée en place durant plus d'un an et des sondages Schlumberger ont été effectués régulièrement. L'évolution des résistivités au cours de l'année a été observée puis interprétée en fonction des données climatiques et des caractéristiques du sol. Une comparaison avec des mesures TDR est également présentée.

Description de l'expérimentation

20 électrodes ont été mises en place sur le terrain d'expérimentation du CEFE situé sur le campus du CNRS à Montpellier. Le site est équipé d'un pluviomètre et de capteurs de température (atmosphère, sol à -40 et -80 cm). Les sondages de type Schlumberger sont effectués avec un appareil Syscal. Les distances AB/2 mesurées sont 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 6, 8, et 10 m, MN est égal à 0.5 m. Le premier sondage remonte à mai 2002, les 18 autres se sont succédés à intervalle plus ou moins réguliers en essayant de suivre les principaux événements climatiques. A proximité des électrodes, un tube plastique dédié aux mesures TDR (méthode

TRIME) a été installé. L'analyse géophysique du premier sondage a confirmé les informations disponibles sur la structure du sous sol, à savoir : une couche d'argile (type argile de décalcification) d'environ 3 m d'épaisseur reposant sur un substratum calcaire très fissuré et karstifié. La couche d'argile, sondée à la tarière semble très homogène et les variations de résistivité dans cette couche peuvent être attribuées aux différences de teneur en eau ou de température.

Evolution des sondages

La figure 1 réunit les sondages les plus représentatifs des différentes saisons. Les variations sont surtout notables près de la surface; à partir de AB/2 égal à 4 m les résistivités apparentes mesurées augmentent systématiquement indiquant la présence du substrat calcaire. L'été se caractérise par une hausse des résistivités à partir de la surface. L'automne, très pluvieux en 2002, entraîne une baisse et une homogénéisation très nettes des résistivités. Ces dernières augmentent sensiblement durant l'hiver. Enfin les sondages du début de printemps 2003 donnent des valeurs proches de celles de l'hiver, et seule la mesure avec AB/2 = 0.5 m indique un dessèchement de la surface. Le printemps 2003 sec et très chaud en juin est marqué par une nette augmentation des résistivités proches de la surface. L'interprétation que l'on peut faire des sondages bruts ne peut guère aller au delà de ces observations en raison de l'intégration du signal sur les différents horizons du sol.

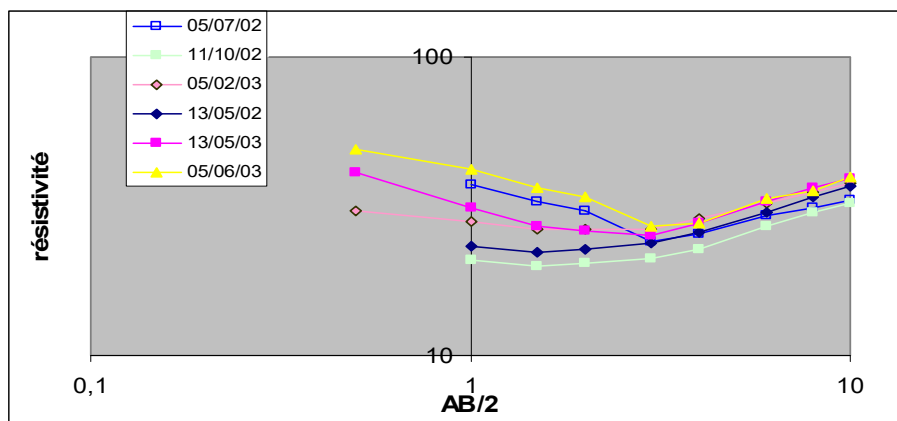


Figure 1 : Sélection des sondages représentatifs des différentes saisons

Inversion des sondages

Pour chacun des sondages, les valeurs de résistivités aux différentes profondeurs de notre terrain d'études ont été calculées à l'aide du logiciel d'inversion IPI2WIN (Moscou State University), en divisant le sous-sol en 9 couches de 0.3 m d'épaisseur au-dessus du substrat. Bien que la solution numérique obtenue par inversion ne soit pas unique, l'incertitude est réduite en imposant des conditions de cohérences temporelle et spatiale des profils calculés (pas de variations brutales et inexplicables entre couches voisines, supposées homogènes, ou d'un sondage à l'autre). Si des incertitudes demeurent, en particulier pour les couches profondes, les résultats obtenus pour les couches proches de la surface sont très satisfaisants.

L'évolution temporelle des résistivités

Les variations de résistivités sont particulièrement notables près de la surface. (Figure 2a). Durant le printemps 2002, les précipitations sont modérées jusqu'au 10/6 et les variations de résistivités ne concernent que la couche de surface. La sécheresse presque totale, 19 mm entre le 10/6 et le 24/8, s'installe ensuite. Le sondage du 5/7 montre une hausse des résistivités qui se limite encore au premier mètre de sol. Le 27/8, après 70 jours secs et une précipitation de 80 mm, la résistivité de la couche de surface diminue spectaculairement alors que les couches

suivantes jusqu'à C4 (0.9 à 1.2 m) demeurent très résistives. Les variations des couches plus profondes, en dessous de 1.2 m, sont très amorties et ne révèlent pas de changements importants de l'humidité (Figure 2b). Durant l'automne les épisodes pluvieux importants se succèdent, les résistivités baissent et s'homogénéisent sur l'ensemble du profil. En janvier et en particulier près de la surface, la résistivité s'accroît nettement pour diminuer progressivement en février puis mars. Au printemps 2003, très sec, les résistivités des couches proches de la surface augmentent de façon importante. Le sondage de début juin 2003 indique une surface plus sèche que le sondage de début juillet 2002.

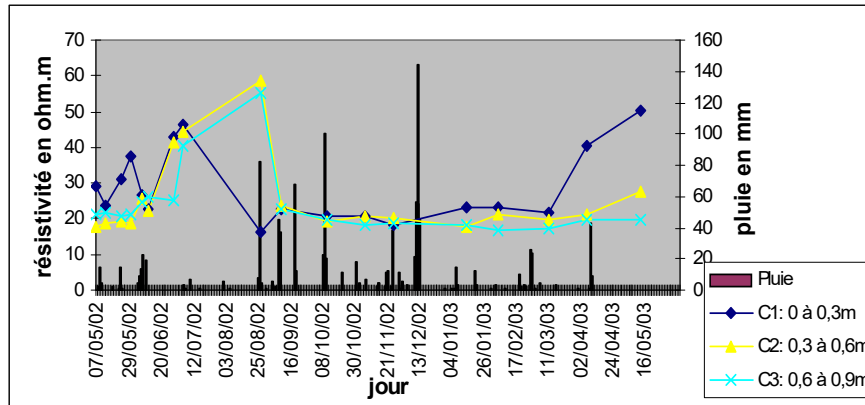


Figure 2a : Evolution des résistivités corrigées en température des couches de surface

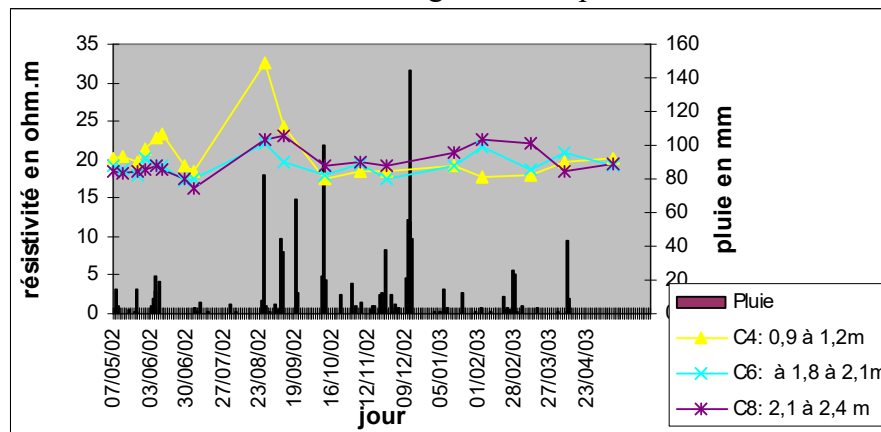


Figure 2b : Evolution des résistivités corrigées en température des couches profondes

L'influence de la température

L'évolution des résistivités est bien corrélée avec l'humidité durant une grande partie de l'année. Cependant les sondages de l'hiver, janvier février mars, présentent des variations que l'on ne peut interpréter en ne considérant que les changements d'humidité. En particulier, le sondage du 14/1, réalisé à la fin d'une période de froid intense et de neige, a donné des résistivités élevées, se rapprochant des valeurs des périodes sèches. Ceci nous a incité à prendre compte un autre paramètre jouant sur nos mesures : la température.

La résistivité des matériaux solides ou des solutions liquides est en effet une fonction de la température. Keller et Frischknecht (1966) fournissent l'expression suivante qui permet de ramener la résistivité mesurée à une température t à la résistivité à une température standard (18° étant pris ici comme température de référence) :

$$\rho_{18} = \rho_t (1 + \alpha (t-18))$$

Une valeur de α égale à 0.025 est issue de la littérature (Hollier-Larousse *et al.*, 2001). Une température inférieure à 5°C entraîne une correction de l'ordre de 40% ce qui est loin d'être négligeable. Les températures des différentes couches de sol ont été obtenues par des mesures

prés de la surface et par calcul pour les couches plus profondes. Pour la couche de surface (C1 de nos profils, 0 à 0.3 m), la température retenue est la température moyenne de l'air pour les 24 heures précédant la mesure. Pour C2 et C3, on dispose des mesures deux thermocouples, l'un enterré à -40 cm l'autre à -80 cm. On a comparé ces mesures avec les moyennes des températures atmosphériques sur 10 et 30 jours respectivement. L'accord est satisfaisant. Pour les couches profondes nous avons utilisé une expression exprimant l'amortissement dans le sol de la température extérieure (Musy et Soutter, 1991) :

$$T(z,t) = T_{moy} + A_o \cdot \exp(z/d) \cdot \sin(wt + \phi + z/d)$$

avec z la profondeur, T_{moy} la température moyenne au cours de la période P , A_o l'amplitude de température au cours de la période P , ϕ le déphasage, $w = 2/P$, d la profondeur d'amortissement, qui varie en fonction du sol, de l'humidité et bien entendu du cycle considéré journalier ou annuel. Les figures 2a et 2b présentent des valeurs de résistivités corrigées en température selon les principes énoncés plus haut. L'illustration de la correction appliquée à la couche C1 est donnée par la figure 3. Pour cette couche de surface les corrections maximales appliquées ont été : 1.14 le 28/06 soit 23.5°C, et 0.625 le 14/1 soit 3°C.

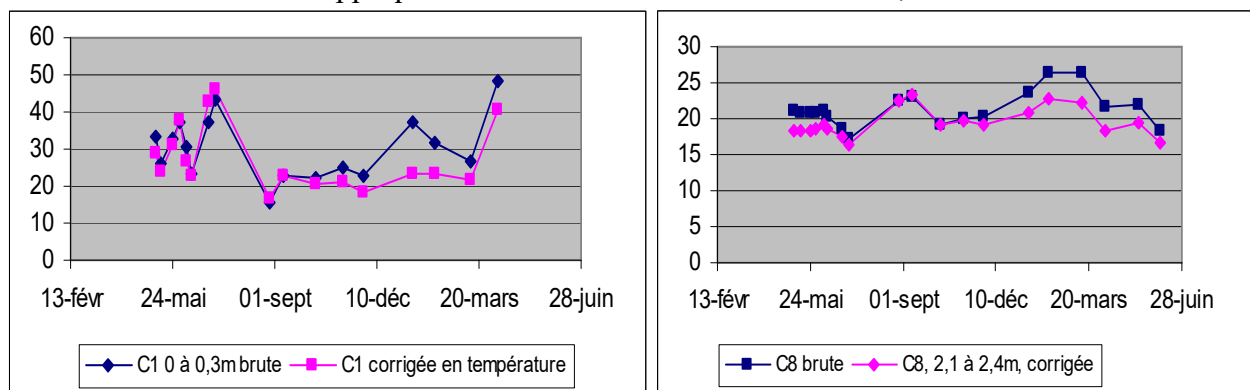


Figure 3 : Effet de la correction en température

Comparaison TDR résistivité

Un tube plexiglas, permettant la mesure d'humidité par une sonde TDR de type TRIME, a été installé à proximité des électrodes au mois de septembre. Début novembre, des prélèvements de sols entre la surface et -1 m nous ont permis de déterminer la densité apparente du sol, entre 1.4 et 1.55. A l'aide d'abaques (Rawls et Brakensick, 1989), d'une analyse rapide du sol et de la valeur de la densité apparente, on a pu estimer une valeur de la porosité totale à 0.48. Avec la valeur de la porosité on a pu transformer l'humidité volumique en pourcentage de saturation volumique, et pour avoir des variations de même signe on représente la valeur $1 - \text{saturation}$. La figure 4 présente neuf couples de % de saturation mesurés par TDR et de résistivités, obtenus pour la couche superficielle C1 à différentes dates. Hormis les petites fluctuations de résistance dans les conditions d'humidité élevées, les deux variables sont bien corrélées. Malgré une teneur relativement élevée en argile, on peut tenter d'appliquer le formalisme d'Archie à ces mesures pour décrire la relation entre résistivité électrique et teneur en eau :

$$\rho = \rho_w \phi^{-m} S^{-n}$$

avec ρ la résistivité interprétée de l'horizon, ρ_w la résistivité de la phase liquide, ϕ la porosité de l'horizon et S le pourcentage de saturation en eau de l'horizon. Les constantes empiriques n et m , appelées constante de tortuosité et constante de cimentation, sont respectivement proches de 2 et comprises entre 1.3 (pour les formations meubles) et 2 (pour les formations indurées). En posant $n=2$ et $\rho_w=20 \Omega.m$, et avec une porosité de 0.48, on trouve ici, $m = -0.6$ tant pour les conditions humides (80% de saturation) que pour les conditions sèches (50% de saturation). Cette valeur est en dehors de la gamme des valeurs établies dans la littérature pour

les formations sédimentaires non argileuses. Cet écart est vraisemblablement lié à la teneur en argile du matériau qui diminue fortement la résistivité de la phase liquide du fait de phénomènes de conduction liés au matériau. Cependant, le fait que m soit une constante qui ne dépend pas de la saturation en eau, indique que le formalisme d'Archie pourrait être appliqué ici pour obtenir la teneur en eau de la résistivité.

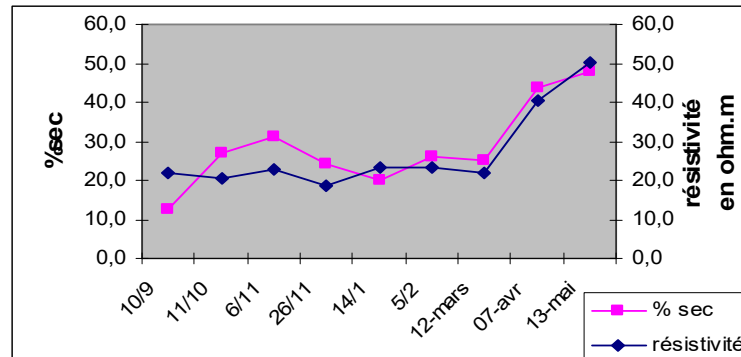


Figure 4 : Relation entre teneur en eau mesurée par TDR et résistivité interprétée de la couche de surface. (% sec = 1- %saturé)

Conclusions

Le suivi annuel de l'humidité d'un sol argileux montre que les variations sont bien caractérisées dans le temps et dans l'espace par les mesures de résistivités réalisées par sondages électriques. Les couches superficielles du sol réagissent fortement aux forçages climatiques, alors que les couches profondes sont moins influencées. Les résistivités mesurées doivent être corrigées en fonction des variations de température pour une bonne interprétation du signal en termes d'humidité. Les résistivités sont bien corrélées aux mesures d'humidité réalisées par TDR, et la relation entre ces 2 variables peut être modélisée à l'aide de la loi d'Archie. Le calage de cette loi conduit cependant à une valeur du paramètre m éloignée de celle qu'on trouve dans la littérature, ce qui peut être dû à la forte teneur en argile du matériau étudié.

Remerciements

Nous remercions Mr Christian Collin du CEFE CNRS pour l'installation sur le terrain et les données météo ainsi que Mr Roger Bayer de l'UM II pour le prêt gracieux du matériel de géophysique

Bibliographie

- Archie G.E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. AIME*, 145, 54–62.
- Hollier-Larousse A., Curmi P., Walter C., Auzizeau J., Palma-Lopes S., Fleury A., 2001. Variation spatiale et variation temporelle de la résistivité apparente mesurée par la radio magnétotellurique dans des séquences de sols hydromorphes. *3^{ème} colloque GEOFCAN*.
- Keller G.V., Frischknecht F.C., 1966, Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press.
- Musy A., Soutter M., 1991. Physique du sol. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne. (collection gérer l'environnement), 348 p.
- Rawls W.J., Brakensick D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulics properties. *Unsaturated flow in Hydrologic modeling. Theory and practice*. H.J. Morel-Seytoux Ed. Nato Series, Mathematical and Physics Sciences, 275, 275-300.