

## **Evaluación de un nuevo método de caracterización del perfil hídrico del suelo a partir de la inversión de una sola señal TDR.**

J.M. Sánchez-Pérez<sup>1</sup>, J.P. Laurent<sup>2</sup>, M. Bohy<sup>3</sup>, A.V. Auzet<sup>3</sup> y J.L. Thony<sup>2</sup>

1. CESAC UMR 5576 CNRS-UPS, 29 rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse (Francia); sanchez@cesac.cemes.fr
2. LTHE UMR 5564 CNRS-INPG-UJF-Orstom, BP 53, 38041 Grenoble (Francia); jean-paul.laurent@hmg.inp.fr, jean-louis.thony@hmg.inp.fr
3. CEREG EP 2037 CNRS-ULP-ENGEES, 3, rue de l'Argonne, 67083 Estrasburgo (Francia); auzet@equinoxe.u-strasbg.fr, mbohy@equinoxe.u-strasbg.fr

**RESUMEN.** En este trabajo se evalúa un nuevo método de caracterización del perfil hídrico de la ZNS del suelo denominado TDR-SSI (Spatial Signal Inversion). El protocolo actual de tratamiento de una señal TDR permite calcular la humedad media sobre la longitud total de la sonda (en general 10 a 15 cm) a partir de la medida de la permitividad dieléctrica del suelo y su transformación posterior en contenido en agua mediante de ecuación de Topp et al. (1980), o de otro tipo de ajuste experimental. Con este nuevo método, se puede obtener un perfil de permitividad dieléctrica del suelo y por lo tanto de humedad a partir de la inversión de la señal TDR obtenida con una sonda de longitud variable (15 cm a 1 m). Los resultados obtenidos mediante este tratamiento han sido comparados con otros métodos (sonda de neutrones, medidas TDR TRIME™ y gravimétricas). Los primeros resultados obtenidos muestran una buena adecuación del método. No obstante, existen algunas limitaciones al uso de este tipo de tratamiento de tipo eléctrico ocasionadas por la mala calidad de la señales recuperadas.

**ABSTRACT.** A new method for the characterisation of the water profile in the unsaturated zone of soil called TDR-SSI (Spatial Signal Inversion) is evaluated in this paper. The current TDR protocol, permits calculation of the mean soil water-content on the total length of the probe (10 to 15 cm) as the measure of permittivity of the soil and their transformation in water content through the Topp et al (1980) polynomial relation, or of other type of experimental adjustment. With this new method, a dielectric permittivity profile of the soil can be obtained, and therefore a soil water content profile, as the inversion of one single TDR signal obtained with a variable length probe (15 cm to 1 m). The results obtained through this treatment have been compared with other methods (neutron probe, TDR tube TRIME measurements and gravimetric). The first results obtained show a good performance of the method. Nevertheless, there exist some limitations to the use of this type of treatment of electrical type by the poor quality of the recovered signals.

### **1.- Introducción.**

En los últimos años se han hecho grandes avances en el campo de la medida del contenido en agua del suelo “in

situ”, a partir de medidas de frecuencia (Sondas Capacitivas) o medidas de la contante dieléctrica (TDR : Time Domain Reflectometry). Estas técnicas permiten fácilmente obtener el contenido en agua del suelo en una unidad de volumen y permiten establecer perfiles de humedad del suelo realizando medidas a diferentes niveles. Por otra parte, los sistemas de medida pueden conectarse a un datalogger y así establecer un seguimiento en el tiempo de la humedad. Una alternativa interesante para establecer el perfil de humedad es el sistema TDR tipo tubo de la empresa Imko que permite realizar medidas puntuales a lo largo de un tubo en fibra de vidrio instalado previamente en el suelo. En este trabajo se presentan la evaluación de un nuevo método de caracterización del perfil de humedad de un suelo desarrollado por el Laboratoire de Transfert en Hydrologie de l'Environnement de Grenoble (LTHE), denominado TDR\_SSI (TDR Signal Spatial Inversion), que permite obtener el perfil de humedad del suelo a partir del tratamiento de una sola señal TDR obtenida con un sistema de medida clásico (TRASE, TECTRONIC, etc) y una sonda TDR de dos varillas de hasta 1 m de longitud.

En este trabajo se comparan los datos obtenidos con esta nueva técnica con los datos obtenidos en dos experiencias. Una primera experiencia de campo realizada en Grenoble en la que se comparan los datos obtenidos con esta técnica con los obtenidos a partir de otras técnicas (Sonda de neutrones, medidas gravimétricas, medidas TDR TRIME) y una experiencia de laboratorio, realizada en Estrasburgo, en la que se probó este tipo de medida en condiciones de laboratorio. En el dispositivo experimental de Grenoble se dispuso de tubo de 1,2 m de profundidad para las medidas mediante la sonda de neutrones, de un tubo en fibra de vidrio de 0,8 m para la medida TDR con el sistema TRIME y de dos sondas TDR de dos varillas de 1 m. En el dispositivo de Estrasburgo, se dispuso de una sonda TDR de 15 cm situada en un bloque de suelo en condiciones controladas. En la experiencia de campo, la medida de la humedad por gravimetría se realizó en paralelo, muestreando el suelo a partir de fosas realizadas a proximidad de los tubos o mediante una barrena de muestreo. En la experiencia de laboratorio la humedad del suelo se controló en continuo. Todas las medidas realizadas se han obtenido aplicando el protocolo propuesto por el fabricante.

## 2.-TDR: consideraciones teóricas, estado del arte.

### 2.1.-TDR: consideraciones teóricas.

El método TDR ("Time Domain Reflectometry") consiste básicamente en medir la velocidad de transmisión de una onda en una línea de transmisión. La señal TDR se mide a la salida de un generador de impulsión y representa la suma de las tensiones incidentes y reflejadas. La amplitud de esta señal es dependiente del tiempo ya que a cada instante la onda encuentra diferentes discontinuidades de impedancia durante la propagación en el medio, una fracción de la energía es reflejada hacia el generador.

Los generadores más comúnmente utilizados tienen tiempo de subida del orden de los 200 ps ( $2 \cdot 10^{-10}$  segundos), lo que corresponde a una frecuencia de 10 GHz. Cuando la onda encuentra una discontinuidad a una distancia  $L$  se puede establecer después de un tiempo  $\Delta t$  que:

$$\Delta t = \frac{L}{V} \quad (1)$$

siendo  $V$  la velocidad de la onda. La velocidad de la onda es función de la velocidad de la luz  $c$  ( $3 \cdot 10^8$  m/s) y de la permitividad eléctrica relativa  $K$  del material dieléctrico por el que circula la onda.

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (2)$$

Comunmente,  $K$  se denomina "*constante dieléctrica*" aunque esta denominación no es del todo correcta ya que  $K$  varía en función de la frecuencia, de la temperatura, de la humedad, etc. Combinando la ecuaciones (1) y (2) se obtiene la ecuación básica TDR:

$$\Delta t = \frac{L}{c} \sqrt{K} \Rightarrow K = \left( \frac{c \Delta t}{L} \right)^2 \quad (3)$$

Esta ecuación (3) permite evaluar  $K$  a partir del análisis de una señal TDR. En este sentido, para un "Material", desde el punto de vista TDR, se puede considerar que se trata de un método de medida de la permitividad eléctrica de los materiales dieléctricos.

### 2.2.-TDR en física del suelo.

En física de suelos, el uso del método TDR para medir el contenido de agua del suelo remonta a los años 70, gracias a un gran número de trabajos realizados sobretodo en Canada (Hoekstra y Delaney, 1974; Bhagat y Kadaba, 1977, Davis y Annan, 1977; Topp et al., 1980, 1982a, 1982b, 1983, 1984, Topp y Davis, 1981, 1985).

En la práctica, esta medida puede realizarse en el suelo gracias al fuerte contraste entre la permitividad del agua ( $K_e \approx 80$ ) y la de los minerales que constituyen comúnmente la

matriz de los suelos :  $4 \leq K \leq 10$  (las tablas pueden consultarse en Touloukian, 1980; Guéguen y Palciauskas, 1992; Von Hippel, 1995; Schön, 1996).

La permitividad de un suelo es fuertemente sensible al contenido en agua del suelo. A partir de esta relación Topp et al. propusieron en 1980 una relación empírica que permite calcular el contenido de agua del suelo en función de la medida de la permitividad  $K$  con un sistema TDR:

$$\theta = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} K + 5.5 \cdot 10^{-4} K^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} K^3 \quad (4)$$

Teóricamente, esta relación polinómica es utilizable para suelos del mismo tipo y con las mismas densidades que los suelos utilizados por Topp et al. (1980) para realizarla. En general esta relación da buenos resultados en cualquier tipo de suelo. No obstante, se recomienda que los datos obtenidos con esta relación se validen con medidas de tipo gravimétrico. En el caso de que no exista concordancia entre los dos tipos de medida sería necesario establecer una nueva relación  $\theta(K)$  propia al suelo estudiado.

### 2.3.- Tipos de sonda utilizadas para la medida TDR de la humedad del suelo.

Para realizar una medida TDR en un suelo es necesario el uso de una sonda por la que se transmite la onda. Los tipos de sondas más utilizadas son (Figura 1):

1. "Sondas de dos varillas" son las más utilizadas en experiencias de campo y pueden instalarse fácilmente en diferentes niveles. Un tipo particular de sonda de dos varillas es la sonda tipo tubo desarrollado por Imko (TRIME System) que permite realizar una medida a partir de un tubo de acceso en fibra de vidrio.
2. "Sondas de tres varillas", similares a las sondas de dos varillas pero con la ventaja de investigar un volumen de suelo mayor.
3. "Sondas coaxiales", utilizadas en experiencias de laboratorio para realizar la calibración. En este tipo de sonda se mide el contenido en agua de un volumen de suelo conocido.

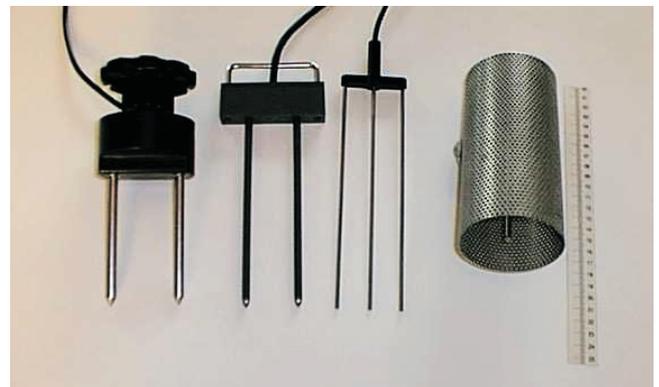


Fig. 1. Sondas TDR. De izquierda a derecha : sonda de dos varillas de Soil Moisture Eqt. Corp., sonda de dos varillas TRIME de Imko, sonda de tres varillas tipo "Burable" de Soil Moisture y sonda de tipo coaxial (LTHE).

En la Figura 2 se presenta la distribución adimensional del campo eléctrico y la zona sobre la que se realiza la medida (proyección en un plano perpendicular a las varillas). Para una geometría definida por el diámetro de las varillas ( $d$ ) y la distancia entre las varillas ( $D$ ), una sonda TDR se caracteriza por una impedancia  $Z_{sa}$  del aire característica definida por :

$$Z_{sa} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\pi}{\epsilon_0}} \cosh^{-1} \sqrt{\frac{D}{d}} = 120 \cosh^{-1} \sqrt{\frac{D}{d}} \quad (5)$$

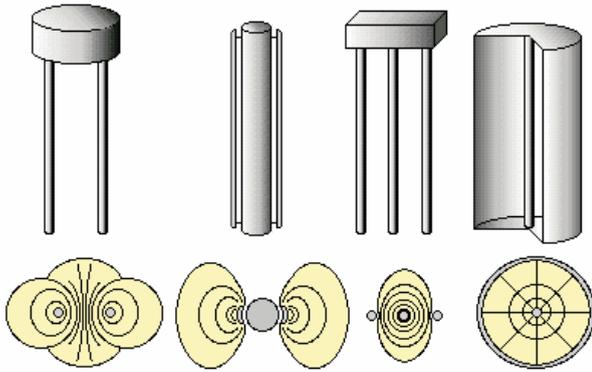
siendo

$D$  la distancia entre las varillas.

$d$  el diámetro de las varillas.

$\mu_0$  la permeabilidad del vacío ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m).

$\epsilon_0$  la permitividad del vacío ( $1/36\pi \cdot 10^{-9}$  F/m).



**Fig. 2.** Proyección del volumen investigado por diferentes tipos de sondas TDR. De derecha a izquierda: sonda de dos varillas Imko, sonda tipo tubo de Imko, sonda de tres varillas y sonda coaxial. Según Laurent (1998), adaptado de Zegelin y White (1989) y Whalley (1993).

La impedancia característica de la sonda TDR tiene una gran influencia en la forma de la señal TDR. Si tenemos en cuenta que el voltage medido representa la suma de las ondas emitidas y reflejadas  $V^+$  y  $V^-$ . La señal TDR, representa el coeficiente de reflexión  $\rho$  definido por :

$$\rho = \frac{|V^-|}{|V^+|} \quad (6)$$

Donde  $\rho$ , determina las discontinuidades existentes a lo largo de la línea. El cambio de una zona de impedancia  $Z_1$  a otra zona de impedancia  $Z_2$  corresponde a un coeficiente de reflexión  $\rho_{12}$  :

$$\rho_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (7)$$

Los dos casos extremos de discontinuidad son :

1 Corto circuito ( $Z_2 = 0$ ) :  $\rho = -1$ .

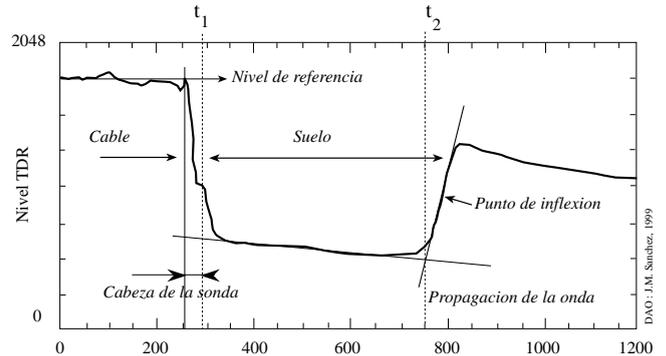
2 Circuito abierto ( $Z_2 \rightarrow \infty$ ) :  $\rho = 1$ .

### 3.- Material y métodos.

Las medidas TDR han sido efectuadas con dos sistemas TDR, las medidas realizadas con el tratamiento clásico han sido realizadas con un sistema TDR TRIME-FM de la empresa Imko GmbH equipado con una sonda tipo tubo. El tratamiento de señales por el método de inversión de la señal ha sido efectuado a partir de señales tomadas con un sistema TRASE de Soil Moisture Eqt. Corp.

#### 3.1.- Tratamiento clásico de señales TDR.

El tratamiento clásico de una señal TDR se realiza en general de manera automática a partir de la medida de los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  de las reflexiones producidas en el inicio y en el final de la sonda (Figura 3), lo que permite calcular el tiempo de propagación  $\nabla t = t_2 - t_1$  y, a partir de este tiempo, la permitividad  $K$  mediante la ecuación (3).



**Fig. 3.** Método clásico de procesamiento de una señal TDR, arena húmeda, TRASE system, connector probe 30 cm, 12 ns.

El sistema TRASE permite recuperar las señales TDR en 1200 puntos digitalizados a 12 bits (4096 niveles). La primera reflexión esta identificada mediante un "Dip" generado por la cabeza del conector. La posición de la segunda reflexión se calcula por el método de las tangentes. El sistema TRIME no permite el tratamiento de la señal TDR y el tiempo de propagación es directamente transformado en contenido en agua a partir de una ecuación de calibración.

#### 3.2.- Tratamiento de señales TDR mediante el método TDR\_SSI.

El método de tratamiento de señales TDR mediante inversión de la señal ha sido denominado TDR\_SSI "TDR Signal Spatial Inversion" y desarrollado por el LTHE de Grenoble. Las bases físicas que explican el tratamiento de la señal y la validación del método están recogidas en los

trabajos de Pereira Dos Santos (1997), Zakri (1997), Laurent *et al.*, (1998a, 1998b).

Este método está basado en la idea de que una señal TDR no sólo es capaz de medir un contenido medio de agua, sino que representa la suma de varias reflexiones entre el principio y el final de la sonda. Cada discontinuidad de impedancia puede atribuirse a un tiempo  $t$  y a una variación del contenido en agua del suelo. O lo que es lo mismo, cada variación del contenido en agua en un suelo produce una fluctuación de la permitividad eléctrica y por lo tanto de la impedancia, creando una serie de reflexiones que se recuperan en la señal TDR medida  $\rho(t)$ . Una señal TDR es vista, en este método, como una imagen de la impedancia a lo largo de la sonda (Laurent, 1998).

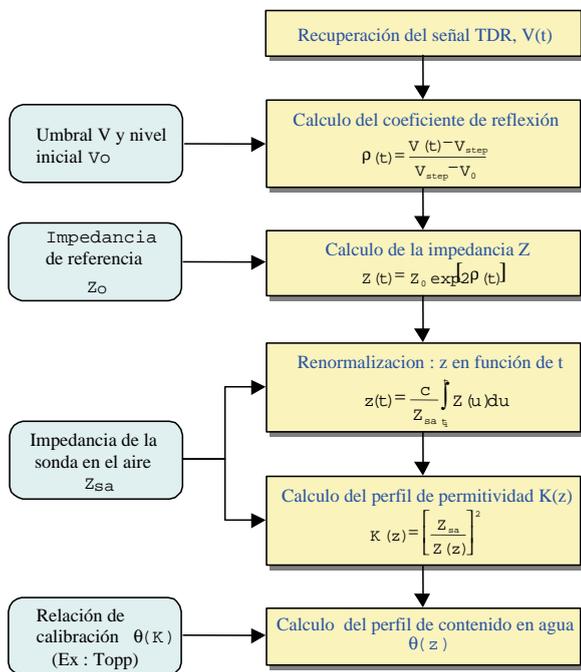


Fig. 4. Protocolo TDR\_SSI (Laurent, 1998).

El protocolo general de tratamiento de una señal TDR mediante inversión está representado en la Figura 4. Este tipo de tratamiento ha sido aplicado a las señales obtenidas en las dos experiencias.

**4.- Resultados y discusión.**

**4.1.- Experiencia en condiciones de campo.**

En la Figura 5 se presentan los perfiles de humedad obtenidos con diferentes métodos. Los resultados muestran una buena adecuación entre las medidas TDR tipo tubo, las medidas con sonda de neutrones y el contenido en agua volumétrico. Los perfiles de humedad obtenidos mediante el método TDR\_SSI en dos sondas de 1 m situadas a 2 m de distancia muestran perfiles de humedad similares a los

obtenidos con los otros métodos. No obstante en la profundidad 20 a 60 cm existen diferencias significativas entre los métodos clásico y esta nueva técnica.

Estas diferencias pueden atribuirse a problemas de contacto entre las sondas y el suelo o a la resolución espacial de los diferentes tipos de medida. Es evidente que la resolución vertical del método TDR\_SSI es inferior a 1 cm en el caso de una sonda de 1 m de longitud con una base de tiempo de 24ns (120 puntos de medida). Por otro lado, el volumen de suelo en el que se realiza la medida del contenido en agua es diferente en cada método. La medida por gravimetría integra el diámetro de la barrena utilizada (4.5 cm) cada 10 cm, la sonda de neutrones una esfera de 20 cm, la sonda TDR tipo tubo una zona de 4 a 5 cm alrededor del tubo sobre 17 cm.

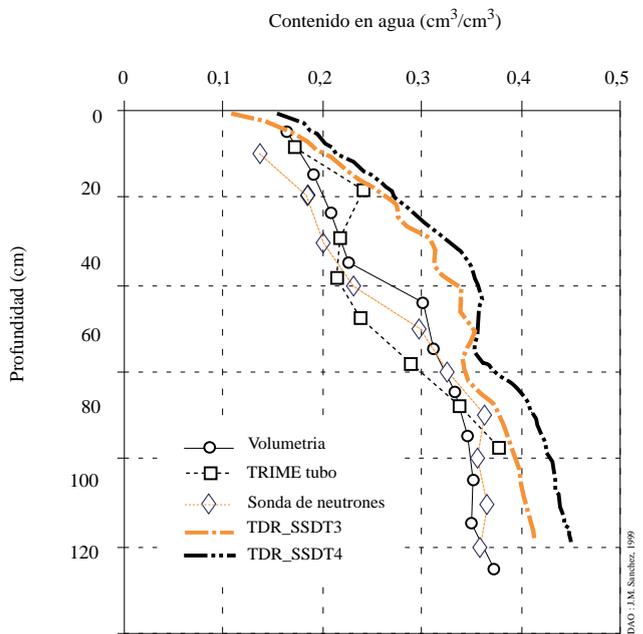


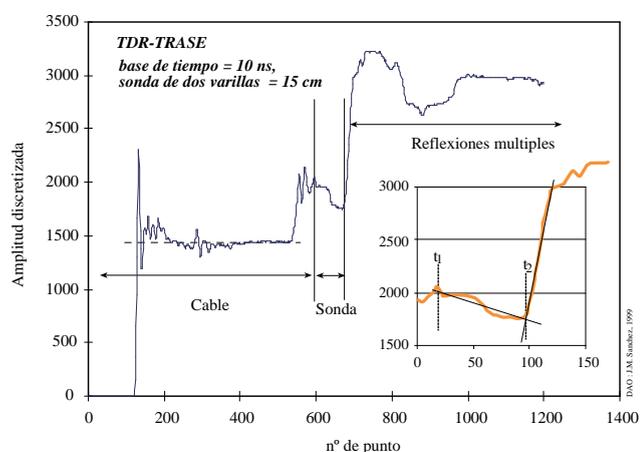
Fig. 5. Perfiles de humedad obtenidos mediante varios métodos.

**4.2.- Experiencia en condiciones de laboratorio.**

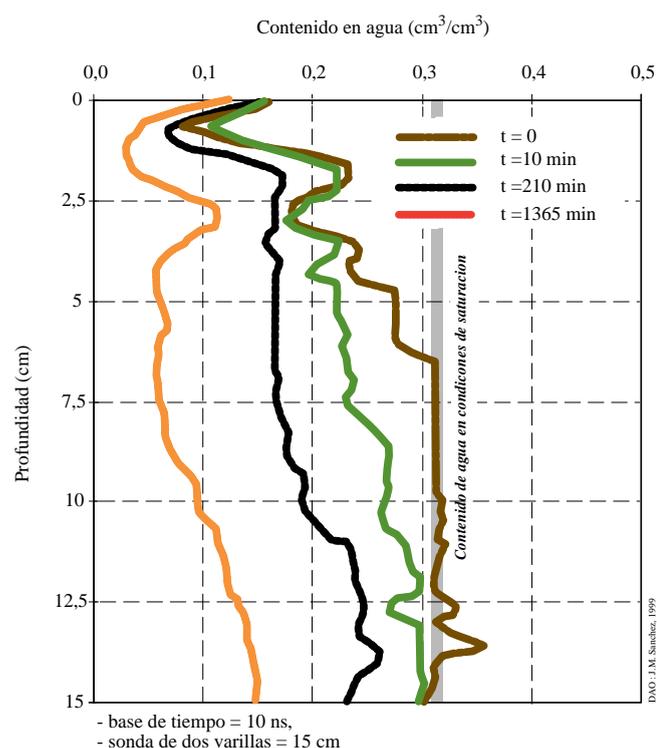
En una segunda experiencia se procedió a la medida del perfil de humedad en una muestra de suelo tomada en un cilindro de 15 cm de altura y 11 cm de diámetro equipado con dos baterías de tensiómetros a 2.5, 5, 7.5, 10 y 12.5 cm. El bloque de suelo se situó sobre una placa de cerámica porosa conectada a un sistema de depresión que permitía controlar las condiciones de drenaje. Las medidas se realizaron con un sistema TDR TRASE en una sala climatizada a 20 °C. Este sistema ha sido desarrollado en el CEREG de Estrasburgo con el objeto de caracterizar en condiciones de drenaje controlado las curvas de retención y de conductividad (Bohy, 1999).

La forma general de las señales tratadas se presenta en la Figura 6. Se puede reseñar que en esta experiencia se utilizó un cable lo más corto posible (60 cm) con el objeto de limitar los efectos del mismo en la medida. No obstante se puede apreciar que el nivel de la amplitud durante el

paso por el cable es muy irregular lo que condiciona posteriormente el tratamiento de la señal.



**Fig. 6.** Señal TDR obtenida con la sonda de 15 cm en condiciones de laboratorio.



**Fig. 7.** Perfiles de humedad obtenidos en laboratorio en condiciones de drenaje.

Los perfiles de humedad obtenidos en esta experiencia se presentan en la Figura 6. Se puede observar que el perfil de humedad en condiciones de saturación no se refleja en el perfil obtenido con el método. En efecto, el resultado obtenido en los 7 primeros centímetros presenta diferencias de más de 20 % de humedad con relación a la saturación. Esta diferencia de humedad puede ser atribuida a los ruidos de fondo producidos por el paso de la señal en el cable (ver

Figura 7) que perturba el tratamiento de la misma. No obstante, este método aporta información sobre la evolución del perfil de humedad durante el drenaje del monolito.

## 5.- Conclusiones.

El método de determinación del perfil de humedad a partir del tratamiento de una sola señal TDR, se presenta como un método alternativo interesante, aunque actualmente existen algunos problemas de orden electrónico por resolver como la obtención de una señal limpia.

En el caso de sondas de longitud superior a 50 cm, este problema queda resuelto ya que la parte de la señal tratada que corresponde al cable es mucho menor que la que corresponde a la sonda. En el caso de sondas de pequeño tamaño, como en el segundo ejemplo aquí presentado el tratamiento se complica y los datos no son del todo satisfactorios.

Con este objeto se está procediendo actualmente a la construcción de un prototipo de emisor de onda capaz de emitir una señal limpia. Esta mejora del sistema permitirá obtener medidas de perfiles de humedad a niveles de resolución mayores que los obtenidos actualmente.

*Agradecimientos.* Este trabajo ha sido financiado por el Programa Nacional de Investigación en Hidrología francés (PNRH-INSU) en el marco del proyecto: "Optimisation de méthodes diélectriques pour l'hydrologie", PNRH97-24.

## Referencias.

- Bohy, M. (1999). Amélioration et test d'une méthode de drainage automatisé (MEDIA) pour la caractérisation hydrodynamique de monolithes de sol : Mémoire de DEA, CEREG-ULP-ENGEEES, 65 pp.
- Bhagat, P.K., Kabada, P.K. (1977). Relaxation models for moist soils suitable at microwave frequencies. *Materials Science and Engineering*, 28, 47-51.
- Davis y Annan, (1977). Electromagnetic detection of soil moisture: Progress report I. *Canadian Journal Remote Sensing*, 3, 76-86.
- Guéguen Y., Palciauskas V. (1992). *Introduction à la physique des roches*, Hermann, Paris.
- Hoekstra, P., Delaney, A. (1974). Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 79(11), 1669-1768.
- Laurent J.P. (1998). Intercomparaison des méthodes de mesure de la teneur en eau du sol par humidimétrie neutronique et TDR, Rapport IAIA Contract N 9638/R0, Juillet 1998, 47 pages + floppy disk.
- Laurent J.P., Auzet A.V., Chanzy A., Pereira dos Santos L., Sanchez-Perez J.M. (1998 a). Tests of a new TDR-method to measure soil water-content profiles, European Geophysical Society, XXIII General Assembly, Nice, 20-24 avril 1998.
- Laurent J.P., Peirera dos Santos L. (1998 b). Une nouvelle méthode de détermination des profils de teneurs en eau dans les sols par inversion d'un seul signal de réflectométrie temporelle (TDR), 16ème Congrès Mondial de Science du Sol, Montpellier, 20-26/08 1998.
- Peirera dos Santos L (1997). Développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d'un signal TDR., Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Schön J.H. (1996). *Physical Properties of Rocks*, Pergamon.
- Topp, G.C., Davis J.L., Annan A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission. *Water Resour. Res.*, 16, 574-582.

- Topp, G.C., Davis, J.L. (1981). Detecting infiltration of water through the soil cracks by time-domain reflectometry. *Geoderma*, 26, 13-23.
- Topp, G.C., Davis, J.L. (1985). Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (RDT): a field evolution. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 49, 19-24.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P. (1982 a). Electromagnetic determination of soil water content using RDT. I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 672-678.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P. (1982 b). Electromagnetic determination of soil water content using RDT. II. Evaluation of installation and onfiguration of parallel transmission lines. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 672-678.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Bailey, W.G., Zebchuk, W.D. (1984). The measurement of soil water content using a portable RDT hand probe. *Can. J. Soil Sci.*, 19, 313-321.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Chinnick, J.H. (1983). Using TDR water content measurement for infiltration studies. In: *Advances in infiltration*, ASAE Publication 11-83, 231-240.
- Touloukian Y. S. (1980). Physical properties of rocks and minerals, Y. S. Touloukian Eds McGraw-Hill / Cindas.
- Von Hippel A. (1995). Dielectrics and waves. Artech House, Boston
- Whalley W. R. (1993). Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. *J. Soil Sci.* 44:1-9.
- Zakri T. (1997). Contribution à l'étude des propriétés électriques de matériaux poreux humides en vue de l'estimation de leur teneur en eau par mesures diélectriques : modèles de mélanges et résultats expérimentaux. Thèse de Doctorat. INPG, Grenoble.
- Zegelin S. J., White I. (1989). Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resour. Res.*, 25(11):2367-2376.

#### **Direcciones internet**

Imko GmbH, Germany : <http://www.alive.de/imko/TRIME-tube-com.htm>, 1996.

LTHE, Programa TDR\_SSI : <http://lthent1.hmg.inpg.fr/~laurent/TDR/tdrssi.htm>