



La réflectométrie temporelle

Des mesures non destructives de profils hydriques du sol

L'humidité du sol reste aujourd'hui encore une donnée difficile à mesurer de par la nature souvent très hétérogène des sols et la complexité de la relation de l'eau avec la matrice minérale. Sa connaissance est cependant essentielle à la compréhension du fonctionnement hydrique du sol et à l'évaluation de la consommation en eau des plantes.

Des modèles de bilans hydriques de plus en plus fins sont élaborés afin d'évaluer la réserve hydrique du sol, de gérer les doses d'irrigation, réduisant ainsi les besoins de mesures directes. Mais pour valider et caler ces modèles, les mesures de terrain restent incontournables, et en particulier celles de la répartition de l'eau dans l'horizon racinaire.

Pour répondre aux besoins de la recherche d'aujourd'hui, les mesures d'humidité doivent être précises, non destructives, automatisables et nécessiter peu de main-d'œuvre.

La détermination de l'humidité par prélèvement de sol ne répond plus aujourd'hui à ces exigences, bien qu'elle demeure la méthode de référence. Les sondes à neutrons ont partiellement répondu à ces attentes dans les années 70-80 mais leur utilisation est relativement lourde et surtout la source radioactive pose

des risques sanitaires et des problèmes réglementaires de plus en plus contraignants.

La réflectométrie temporelle (souvent appelée TDR pour *Time-Domain Reflectometry*), technique électromagnétique utilisée à l'origine pour le contrôle des câbles de télécommunication, a été adaptée récemment à la mesure de l'humidité du sol et s'est largement répandue en agronomie depuis une vingtaine d'années (DE CLERCK, 1982). Elle semble répondre assez bien aux attentes de la recherche par ses applications multiples : mesure d'humidité volumique, mesure d'eau libre dans les sols gelés, de conductivité électrique, de flux de solutés. Elle permet des mesures simples, rapides, automatisables (TODOROFF et LANGELLIER, 1994) et relativement précises (précision de 1,3 à 2 % d'humidité) (ROTH *et al.*, 1992) même en surface.

Cet article présente les différents dispositifs possibles de mesure de profils hydriques de sols par réflectométrie temporelle : par sondes cylindriques coulissant dans un tube d'accès, par sondes courtes enterrées, par sondes multisegments, et par sondes longues verticales associées à un traitement numérique du signal réfléchi enregistré par le réflectomètre.

P. TODOROFF

Cirad-ca, station de Roujol,
97170 Petit-Bourg, Guadeloupe, France
pierre.todoroff@cirad.fr

Rappel des principes des mesures TDR classiques

Un réflectomètre est constitué principalement d'un générateur de signal et d'un oscilloscope. La mesure s'effectue le long de sondes jouant le rôle de guides d'ondes, enfoncées dans le sol, et reliées au réflectomètre par un câble coaxial.

Le générateur de signal émet des impulsions (de type micro-ondes) qui se propagent *via* le câble le long des guides. L'oscilloscope enregistre les variations de tension, en début de câble, au cours de la propagation du signal. Lorsque ce dernier atteint le début des guides, la faible impédance du sol crée une chute de tension en début de ligne. Inversement, arrivé à l'extrémité finale des guides, le signal est réfléchi et repart vers l'appareil, créant une brusque remontée de la tension (figure 1). La détection de ces deux instants permet d'en déduire le temps de propagation aller-retour du signal le long des guides, puis l'humidité volumique moyenne dans le voisinage des guides (GAUDIN, 1999).

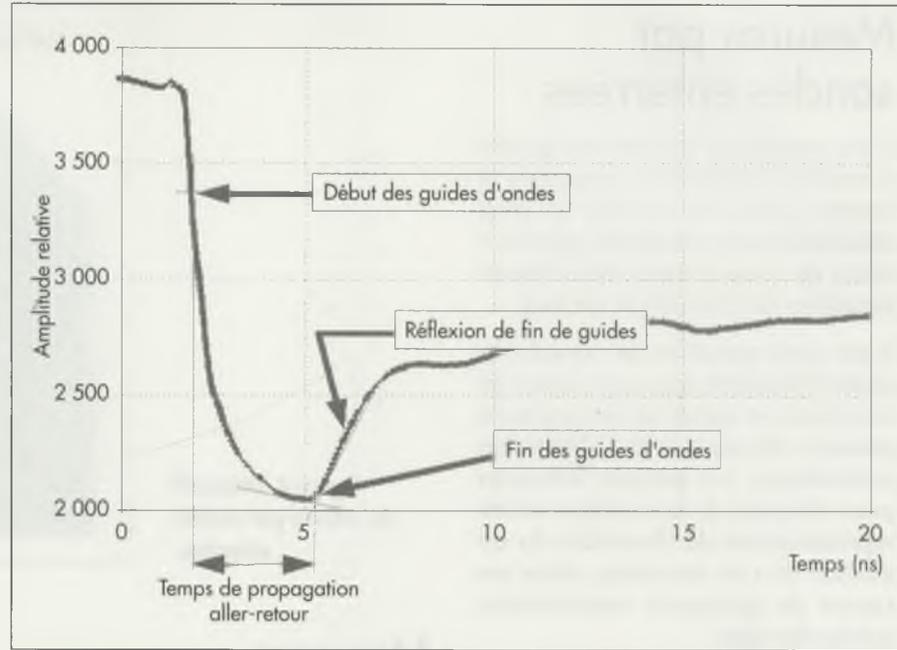


Figure 1. Exemple de courbe de signal réfléchi mesurée dans un sol.

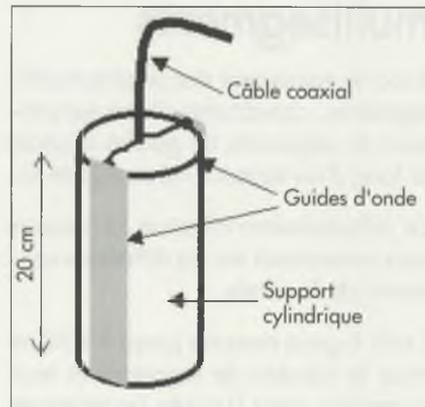


Figure 2. Sonde de type cylindrique.

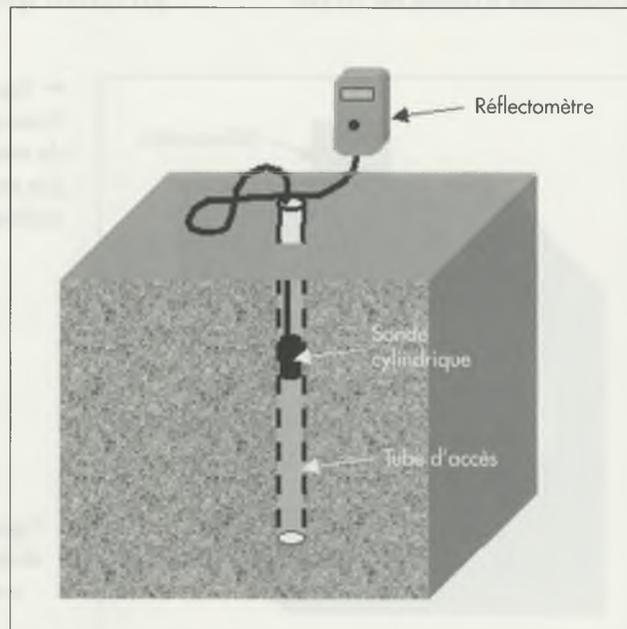
Cette géométrie est par ailleurs bien adaptée à des mesures de profils hydriques en des lieux dispersés. En effet, l'unité de mesure peut être réduite à un boîtier aisément transportable. Les tubes de mesure sont en PVC, fibre de verre ou Tecanat® ; leur coût est peu élevé et n'est pas limitant pour la multiplication des sites de mesures.

Mesures par sonde cylindrique

Il est possible d'utiliser des sondes de configuration différente. En particulier, les guides d'ondes peuvent être fixés de part et d'autre d'un cylindre rigide (figure 2) constituant ainsi une sonde de géométrie semblable à l'ensemble « source-détecteur » de la sonde à neutrons et pouvant coulisser dans un tube de mesure inséré dans le sol (figure 3).

La profondeur maximale de mesure est limitée par la possibilité d'insertion des tubes. Elle peut aisément dépasser le mètre.

Figure 3. Dispositif de mesure par sonde cylindrique.





Mesures par sondes enterrées

Il est possible d'utiliser des guides d'onde de différentes longueurs et formes. Ainsi les sondes les plus répandues sont constituées généralement de 2 ou 3 tiges métalliques parallèles de 15 à 30 cm de long.

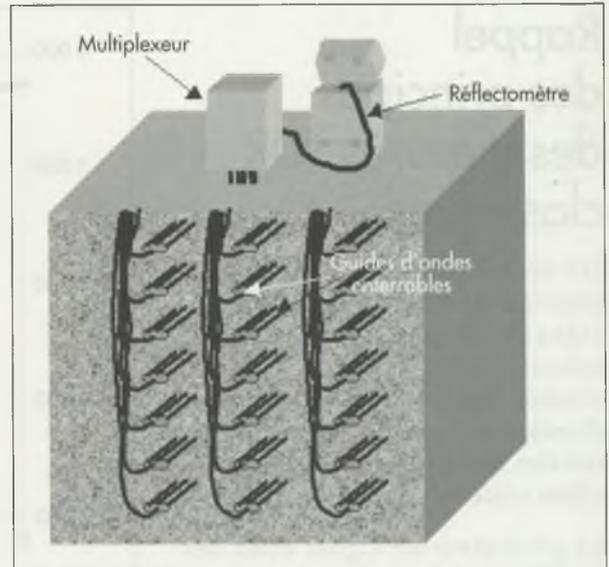
Il est ainsi possible de mesurer le profil d'humidité sous une culture en enterrant en position horizontale plusieurs de ces sondes à différentes profondeurs. Les mesures obtenues pour chacune de ces sondes seront représentatives de l'humidité du sol autour de ces dernières dans un rayon de quelques centimètres autour des tiges.

Les mesures peuvent être effectuées en connectant manuellement les différentes sondes successivement au réflectomètre ou en les reliant à un multiplexeur qui se chargera de leur connexion automatique (figure 4).

Ce type de mesure est bien adapté lorsque l'on veut connaître la distribution de l'humidité sur 2 dimensions (exemple : visualisation d'un bulbe d'humectation), ou automatiser les mesures.

On notera par ailleurs qu'il est possible d'effectuer des mesures fiables, proches de la surface du sol (à 5-10 cm) contrairement aux sondes à neutrons dont les mesures sont trop imprécises à moins de 20 cm.

Figure 4. Dispositif de mesure par sondes enterrées.



Mesures par sondes multisegments

Il existe également des sondes multisegments, constituées d'une succession de segments de guides d'onde le long d'un support rigide (figure 5).

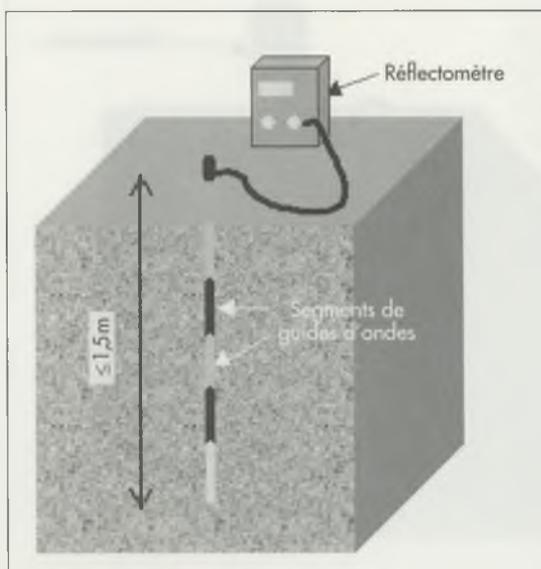
Le réflectomètre effectue la mesure successivement sur les différents segments de la sonde.

Celle-ci peut mesurer jusqu'à 1,50 m mais le nombre de segments et leur longueur sont limités (maximum 5 segments pour une sonde de 1 mètre, segments de 20-30 cm). La précision spatiale des profils est

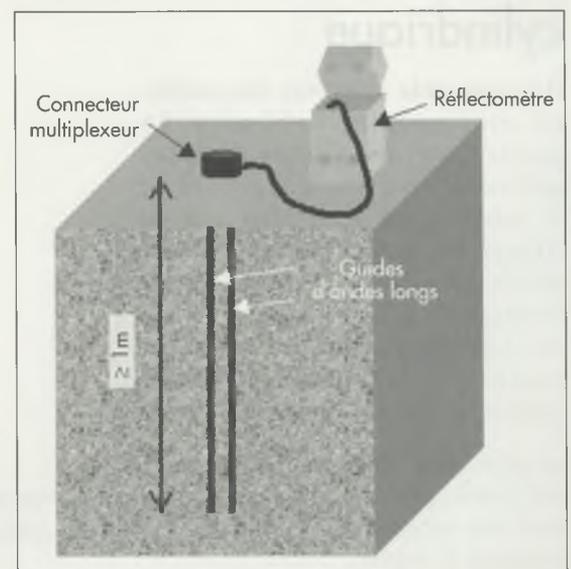
donc également limitée, mais peut être suffisante pour la plupart des besoins de suivi de bilan hydrique. Ainsi, plusieurs mesures sont enregistrées en même temps, l'emploi des sondes multisegments est donc plus rapide que celui des sondes enterrées.

Mesures par sondes verticales longues

Il s'agit d'utiliser des guides d'ondes longs (1 mètre voire plus) constitués de 2 tiges métalliques parallèles, enfoncées verticalement dans le sol depuis la surface (figure 6) et d'obtenir



← Figure 5. Dispositif de mesure par sondes multisegments.



→ Figure 6. Dispositif de mesure par des sondes verticales longues.

le profil hydrique en une seule mesure. Cette technique est encore à l'état expérimental, mais les résultats obtenus aujourd'hui sont très prometteurs, notamment pour des profils de sols peu variables en profondeur.

Le principe est d'analyser point par point la courbe de signal réfléchi enregistrée lors de la mesure par le réflectomètre. En effet, la forme de cette dernière est principalement déterminée par la distribution d'humidité le long des guides d'onde.

Un modèle de propagation d'onde a été développé. Il permet d'établir, moyennant quelques hypothèses simplificatrices, la relation entre un profil d'humidité donné et la forme de la courbe de signal réfléchi correspondante.

Il est ainsi possible de calculer, via un algorithme numérique, le profil d'humidité correspondant à une courbe de signal réfléchi mesurée (TODOROFF, 1998 ; PEREIRA DOS SANTOS, 1997).

Exemples de résultats

Des mesures ont été effectuées sous une culture de canne à sucre à la Réunion. Les caractéristiques du sol sont décrites par COMBRES *et al.* (1999). Une fosse, creusée dans l'interrang puis rebouchée, a permis d'implanter des sondes horizontales de 20 cm de long, à différentes cotes sous le rang, tous les 10 centimètres (figure 7).

Des guides d'ondes de 1 mètre ont également été enfoncés, verticalement depuis la surface, à côté des sondes enterrées. Ceci, de façon à comparer les profils mesurés grâce à ces dernières avec ceux calculés par un modèle d'analyse des courbes de signal réfléchi enregistrées le long des guides de 1 mètre (TODOROFF *et al.*, 1998).

Les profils obtenus montrent une très bonne correspondance entre les

deux types de mesures (figure 8). Le profil calculé le long des guides de 1 mètre permet néanmoins de s'approcher plus finement de la surface qu'avec les sondes courtes enterrées.

Afin de conforter ces résultats sur une période plus longue et tester le modèle d'analyse des courbes de signaux réfléchis en mesure relative, un suivi de profils hydriques a été effectué pendant un mois.

La différence entre deux profils $H_v(z)$ obtenus à deux dates différentes représente la variation de stock hydrique dans l'épaisseur de sol correspondant à la mesure. En appliquant ces variations à un état initial de la réserve hydrique, on peut suivre l'évolution de la réserve du sol.

Ces calculs ont été effectués à la fois à partir des profils hydriques mesurés avec les sondes courtes enterrées et ceux calculés par le modèle le long des guides verticaux. Les deux séries de résultats sont présentées sur la figure 9. Elles partent d'un état de remplissage commun de la réserve hydrique, qui est la moitié de la réserve utile, laquelle était évaluée à 100 mm pour un mètre.

On note, comme le laissaient penser les profils obtenus précédemment, que les variations de stocks calculées à partir des deux types de profils hydriques sont remarquablement proches. Les quelques points qui s'écartent peuvent être dus à des mauvais contacts occasionnels des guides verticaux avec le connecteur de guides d'onde (la connexion est faite manuellement pour chaque mesure).

Ce modèle donne donc des résultats très comparables à des mesures directes par réflectométrie temporelle classique. Il faut cependant noter que les hypothèses de calcul limitent le modèle d'analyse des courbes de signal réfléchi à des milieux faiblement dispersifs : sols à faible conductivité électrique, fertilisation et teneur en argile limitées.

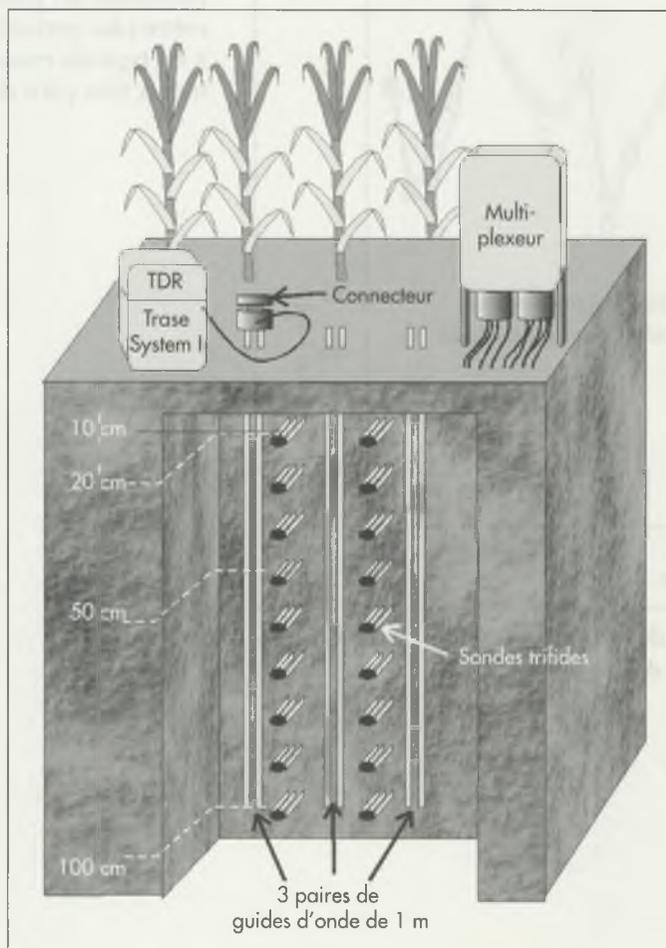


Figure 7.
Dispositif
expérimental.

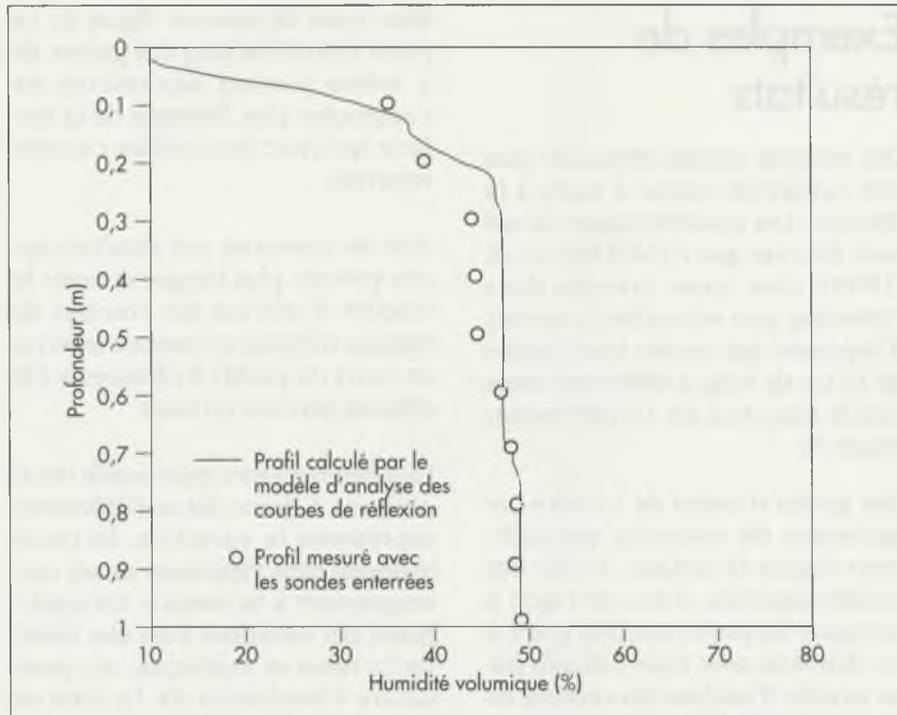


Figure 8. Comparaison des profils moyens calculés et mesurés.

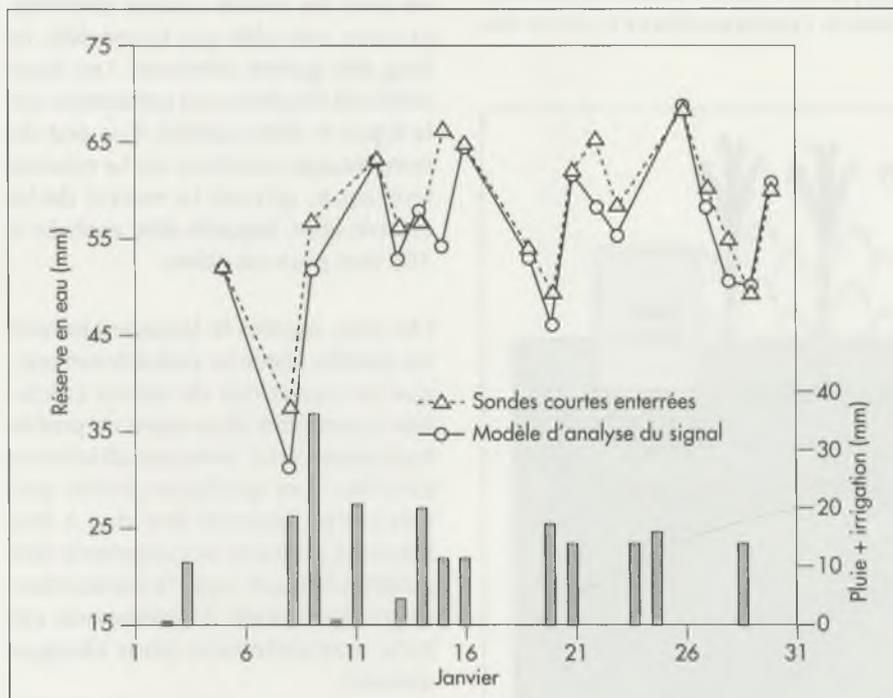


Figure 9. Suivi comparé de la réserve hydrique du sol à partir des profils obtenus via les sondes courtes enterrées et les sondes verticales de 1 mètre.

Conclusion

La réflectométrie dans le domaine temporel apparaît comme une technique intéressante pour répondre aux besoins modernes en mesures d'humidité des sols. Ses nombreuses configurations possibles permettent de l'utiliser dans des conditions de mesures très variées, en particulier sous n'importe quel système d'irrigation.

Les recherches actuelles sur l'analyse du signal réfléchi devraient étendre un peu plus ses champs d'application en rendant possible la mesure non destructive de profils hydriques de sol depuis la surface à partir d'une seule mesure réflectométrique.

Les résultats obtenus sont très encourageants. Des travaux complémentaires mobilisant la communauté scientifique française impliquée dans les mesures hydriques de sols sont en cours pour, d'une part améliorer les modèles de traitement des courbes de réflexion, d'autre part concevoir un prototype de réflectomètre plus performant et plus adapté à ce type de mesure, permettant de mieux tirer parti des modèles.

Bibliographie

COMBRES J.C., LE MEZO L., BOURON B., METE M., 1999. Réserve utile et mesures d'humidité. Difficulté de calage des modèles de bilan hydrique. *Agriculture et Développement* 24 : 39-47.

DE CLERCK P., 1982. Mesure de la teneur en eau des sols par voie électromagnétique, Faculté des Sciences Appliquées, Bruxelles, Belgique. Travail de spécialisation d'ingénieur en géotechnique.

GAUDIN R., 1999. L'évaluation des besoins en eau de la canne à sucre. *Agriculture et Développement*, 24 : 10-20.

PEREIRA DOS SANTOS L.A., 1997. Développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d'un signal TDR, Grenoble, Université Joseph Fourier, université Grenoble 1, thèse de doctorat, 144 p.

ROTH C.H., MALICKI M.A., PLAGGE R., 1992. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Journal of Soil Science* 43 : 1-13.

TODOROFF P., LANGELLIER P., 1994. La réflectométrie temporelle : une nouvelle approche des mesures d'humidité du sol, *Agriculture et Développement* 3 : 32-37.

TODOROFF P., MARAUX F., LANGELLIER P., REVOL P., LAN SUN LUK J.D., 1998. Soil water content profiles calculation in time domain reflectometry from reflected signal traces, 16th World Congress of Soil Science, Montpellier, France.

TODOROFF P., 1998. Modélisation de la propagation de micro-ondes dans le sol afin de calculer un profil hydrique de sol par réflectométrie temporelle, Saint-Denis, université de la Réunion, France, thèse de doctorat, 128 p.

Résumé...Abstract...Resumen

P. TODOROFF — La réflectométrie temporelle. Des mesures non destructives de profils hydriques du sol.

La réflectométrie temporelle, technique électromagnétique récemment adoptée en agronomie pour la mesure de l'humidité volumique des sols, apparaît comme une alternative aux techniques neutroniques et capacitatives. Sa souplesse d'utilisation et ses hautes performances lui permettent de répondre de façon remarquable aux besoins en mesures hydriques de l'agronomie d'aujourd'hui. Les différentes configurations possibles des systèmes réflectométriques pour la mesure de profils hydriques de sol sont présentées : par sondes cylindriques, par sondes enterrées, par sondes multisegments et par sondes longues enfoncées depuis la surface. Ce dernier dispositif, associé à un algorithme de traitement du signal, permet de calculer le profil hydrique le long de ces sondes en une seule mesure. Des mesures journalières de profils et de suivi de bilan hydrique ont été effectuées sous canne à sucre et démontrent l'efficacité de ce procédé. Des travaux complémentaires devraient améliorer la robustesse numérique de celui-ci.

Mots-clés : réflectométrie temporelle, *Time Domain Reflectometry*, profil d'humidité, bilan hydrique, signal réfléchi, Réunion.

P. TODOROFF — Time domain reflectometry (TDR) for non-destructive measurement of soil water profiles.

Time domain reflectometry, an electromagnetic technique adopted recently by agronomists to measure volumetric soil moisture, can be seen as an alternative to neutron and capacitance probes. Its flexibility and high performance go a long way towards satisfying current agronomists' water measurement requirements. The different possible configurations of reflectometric systems for measuring soil water profiles are described: cylindrical probes, buried probes, multi-segment probes and long probes pushed down from the surface. This last device, combined with a signal processing algorithm, can be used to calculate the water profile all along the probe in a single measurement. Daily profile measurements were taken and the water balance monitored under sugarcane, and proved the efficacy of the method. Further work should improve its digital performance.

Keywords: time domain reflectometry, water profile, water balance, reflected signal, Réunion.

P. TODOROFF — La reflectometria temporal. Medidas no destructivas de perfiles hidricos del suelo.

La reflectometria temporal, técnica electromagnética recientemente adoptada en agronomía para la medición de la humedad volumétrica de los suelos, se presenta como una alternativa a las técnicas neutrónicas y capacitativas. Su flexibilidad de utilización y su alto rendimiento le permiten responder satisfactoriamente a las necesidades de mediciones hidricas de la agronomía actual. Se exponen las diferentes configuraciones posibles de los sistemas reflectométricos para la medición de perfiles hidricos de suelo: por sondas cilíndricas, sondas enterradas, sondas multisegmentos y por sondas largas clavadas desde la superficie. Este último dispositivo, asociado a un algoritmo de tratamiento de la señal, permite calcular el perfil hidrico a lo largo de las sondas en una única medida. Se efectuaron mediciones diarias de perfiles y de seguimiento de balance hidrico bajo la caña de azúcar que demostraron la eficacia de este procedimiento. Unos trabajos complementarios deberían mejorar la robustez numérica de dicho procedimiento.

Palabras clave: reflectometria temporal, *Time Domain Reflectometry*, perfil de humedad, balance hidrico, señal reflejada, Réunion.