

# Mesures in-situ de paramètres électriques de substrats organiques

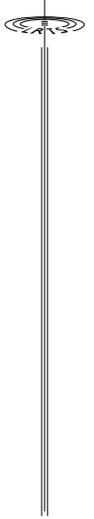
*Thomas Cliche, étudiant 2<sup>e</sup> cycle*

*Dr Dominic Grenier, directeur de recherche*

*Dr Jean Caron, Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation,  
Département des Sols et de Génie Agro-alimentaire, co-directeur de recherche*

*Abstract: The follow-up of the volumetric water content and the salinity of horticultural substrates implies great efforts and are of great importance for the control of the fertirrigation. The values of these parameters can be obtained by in-situ electrical parameters measurements of organic substrates. The purpose of this project is to develop a technique for the measurement of the volumetric water content and the salinity of the soil by electromagnetic measurements of the permittivity. The technology that we choose is based on simultaneous utilisation of a time domain reflectometry probe and a resistive probe. However, some experimentations have been made with a frequency measurement of the complex permittivity. The results show the possibility to determine the water content and the salinity with the proposed measurement and the use of the appropriate equations. Also, relations between physical parameter and the complex permittivity can be made.*

*Résumé: Le suivi de la teneur en eau volumique et de la salinité dans des substrats horticoles de hautes salinités implique des efforts considérables et revêt une grande importance dans le contrôle de la fertirrigation. Les valeurs de ces paramètres peuvent être obtenues par des mesures in-situ de paramètres électriques de substrats organiques. L'objectif de ce projet est de concevoir une technique in-situ permettant la quantification de la teneur en eau et de la salinité de substrats horticoles par une mesure électromagnétique de la permittivité. La technologie retenue est basée sur l'utilisation simultanée d'une sonde de réflectométrie métallique (TDR) et d'une sonde résistive. Toutefois, des expérimentations ont également été effectuées à l'aide d'une mesure de la permittivité complexe en fonction de la fréquence. Les résultats indiquent qu'il est possible de déterminer par une mesure in-situ la teneur en eau volumique et la salinité de substrats avec la méthode proposée et l'utilisation d'équations de convergence adéquates. Des relations entre les paramètres physiques et la permittivité sont également soulignées par les mesures de la permittivité complexe.*



Les propriétés diélectriques de substrats sont d'intérêts pratiques et théoriques considérables. Les intérêts pratiques proviennent du fait que la permittivité complexe des substrats analysés peut être utilisée comme un indicateur sensible et précis de sa teneur en eau et de sa salinité. Ces deux paramètres sont essentiels à nombre de calculs en physique des substrats de façon, par exemple, à optimiser les ressources de fertirrigation chez un producteur. L'objectif de ce projet, réalisé en collaboration avec le Département des Sols et de Génie Agro-alimentaire de la Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Université Laval, est de concevoir une technique *in-situ* permettant la quantification de la teneur en eau volumique (TEE) et de la salinité de substrats horticoles par une mesure électromagnétique de la permittivité.

Il a donc été décidé de fabriquer et de tester une sonde ou un ensemble de sondes capable de mesurer simultanément *in-situ* la teneur en eau et la salinité des substrats. La première proposition qui est explorée est la détermination de la permittivité complexe par une mesure de réflectométrie métallique en domaine fréquentiel. Les efforts nécessaires à l'élaboration de cette technique pour des mesures applicables en pépinières sont considérables est l'utilisation des résultats à court terme représentait une contrainte majeure. Cette proposition a donc dû être abandonnée en partie. Une technique utilisant en partie une technologie existante et une sonde résistive développée à donc été la voie d'exploration retenue pour répondre aux objectifs. Cette technique utilise le fait que la mesure *in-situ* de la teneur en eau par une sonde insérée dans le substrat est affectée par la salinité du milieu et qu'une sonde mesurant la salinité est influencée par la teneur en eau du substrat. Des mesures simultanées et la création d'une fonction de convergence permettent des mesures adéquates des deux paramètres recherchés.

La sonde de technologie existante fonctionne sur le principe de la réflectométrie métallique. La réflectométrie métallique utilise la variation de la permittivité d'un sol avec la teneur en eau présente dans le substrat. En effet, la permittivité d'un sol sec est d'environ 8 alors que la permittivité de l'eau est de 80. Il est clair que la propriété physique fondamentale affectant le temps de parcours d'une onde électromagnétique dans une ligne de transmission est la constante diélectrique du milieu de propagation. La constante diélectrique complexe est définie comme étant :

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$$

Il est facile de prouver que la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique est reliée à la vitesse de la lumière dans ce milieu. On peut exprimer cette vitesse comme étant :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon' \frac{1 + \sqrt{1 + (\tan \delta)^2}}{2}}}$$

où  $c$  est la vitesse de propagation d'une onde TEM dans le vide (environ  $3 \times 10^8$  m/s)

- $\tan \delta$  est la tangente de perte définie comme

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} + \frac{\sigma_0}{\omega \epsilon' \epsilon_0}$$

où  $\sigma_0$  est la conductivité électrique du milieu à une fréquence nulle,

- $\omega$  est la fréquence angulaire ( $2\pi f$ )
- $\epsilon_0$  est la permittivité du vide ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m).

Il est possible de supposer que lorsque la tangente de perte est faible ( $\ll 1$ ) on peut arriver à une relation plus simple de vitesse de propagation qui devient :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Les milieux peu conducteurs ont une tangente de perte qui peut être considérée faible mais ce n'est plus le cas dans des milieux à salinité élevés. Ceci explique pourquoi les techniques de réflectométrie métallique dans le domaine temporel pour la détermination de la teneur en eau sont principalement utilisées pour des milieux à teneur en sels peu élevée. De plus, il est aussi évident d'affirmer que la vitesse de propagation est également la distance parcourue divisée par le temps pris pour parcourir cette distance; soit, pour un aller-retour :

$$v = \frac{2l}{T}$$

où  $2l$  représente la distance de l'aller-retour de l'onde électromagnétique le long de la sonde de longueur  $l$  et  $T$  le temps pris pour faire ce parcours.

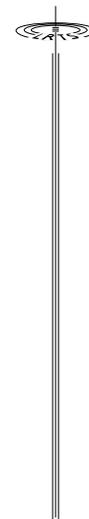
En combinant les deux équations reliant les vitesses de propagations, nous obtenons l'équation suivante pour la valeur de la constante diélectrique relative du substrat entre les tiges de la ligne de transmission :

$$\epsilon_r = \left[ \frac{ct}{2T} \right]^2$$

La seule variable inconnue dans cette équation est ici le temps de parcours  $T$ . La dernière équation est donc considérée comme l'équation fondamentale pour l'utilisation de la réflectométrie métallique. [Topp : 1980] a démontré que le temps de parcours  $T$  dans une ligne de transmission coaxiale de longueur connue remplie de substrat variait sensiblement avec sa teneur en eau volumique notée  $\theta$ .

La sonde résistive construite fonctionne sur le principe de la variation de la résistivité du substrat en fonction de son niveau salin. L'instrumentation nécessaire est très simple et peu coûteuse. Elle requiert simplement un générateur de courant alternatif et un voltmètre. Le circuit-simplifié représentant le substrat entre les tiges comme une résistance s'opposant au passage du courant entre les tiges inséré dans le substrat est présenté en figure 8.

Les résultats obtenus représentent alors la résistivité apparente du sol, soit la réciproque de la conductivité électrique apparente ( $CE_{app}$ ). La conductivité électrique apparente est la résultante des composantes de la phase solide ( $CE_{sol}$ ) et de la phase liquide ( $CE_{liq}$ ) du sol. En agriculture, on s'intéresse surtout à  $CE_{liq}$  car c'est dans la phase liquide que les racines font leurs prélèvements et c'est cette phase qui amène la naissance d'un potentiel osmotique. La conductivité électrique apparente dépend également de la teneur en eau présente dans le sol au moment de la mesure c'est donc dire que :

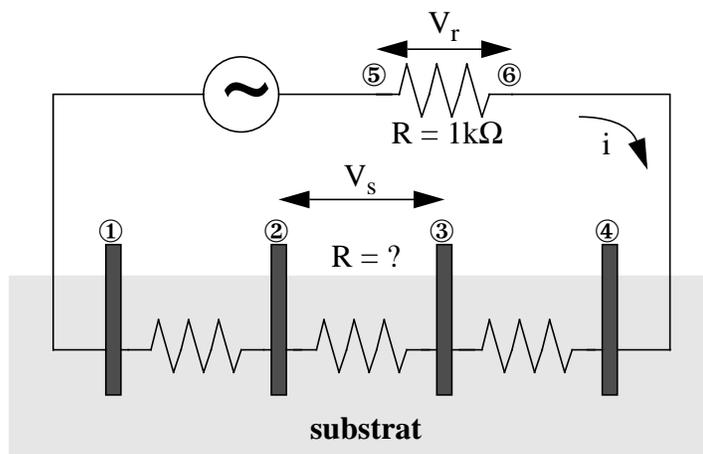


$$CE_{app} = CE_{liq} + CE_{sol}$$

et

$$CE_{app} = f(TEE)$$

8



**Figure 8** Circuit représentant la mesure résistive

Les résultats des mesures de teneurs en eau avec la sonde de réflectométrie métallique démontrent l'influence majeure de la salinité du substrat sur la mesure de la teneur en eau. Une équation de calibration permettant une mesure de la teneur en eau avec la sonde de réflectométrie métallique a donc été bâtie dans des substrats de salinités connues. Des séries d'essais indépendants permettent de valider l'équation obtenue. Pour la mesure de la salinité par la sonde résistive construite, les résultats ont également démontré une influence de la mesure de la salinité par une variation de la teneur en eau. Une équation de calibration permettant une mesure de la salinité avec la sonde résistive a donc été bâtie dans des substrats de teneurs en eau connues. Des séries d'essais indépendants permettent d'identifier des variations certaines de la mesure de la salinité dans des substrats de hautes teneurs en eau et hautes salinités. Néanmoins, les résultats de l'équation de calibration de la salinité ont été utilisés afin d'obtenir une équation de convergence entre les valeurs de teneurs en eau mesurées par la sonde de réflectométrie métallique et les valeurs de salinités mesurées par la sonde résistive. Cette équation, minimisant l'erreur quadratique entre les estimés et les valeurs mesurées de teneur en eau et entre les estimés et les valeurs mesurées de salinités, permet, avec l'aide du programme développé, une estimation adéquate de la teneur en eau et de la salinité à partir de mesures simultanées d'une sonde de réflectométrie métallique et d'une sonde de salinité construite. La validation de l'équation développée par des essais indépendants a permis de répondre aux objectifs fixés.

Parallèlement au développement de cette technique, des mesures de permittivité dans les substrats horticoles à différentes teneurs en eau et salinités sont faites grâce à l'utilisation d'une

sonde développée et d'un analyseur de réseau à partir des prémices de la première proposition explorée soit la méthode fréquentielle.

La technique proposée consiste essentiellement à mesurer la constante diélectrique  $\epsilon_r$  du substrat. On peut en effet exprimer la permittivité  $\epsilon$  comme :

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_o = \epsilon' - j\epsilon''$$

où  $\epsilon_o = 8,854 \times 10^{-12} F/m$  est la permittivité du vide. La partie réelle de cette permittivité  $\epsilon'$ , est un indicateur du potentiel de polarisation du matériau, incluant l'eau dans notre cas. La partie imaginaire,  $\epsilon''$ , représente les pertes d'énergie par conduction et par pertes diélectriques dans le matériau. On peut exprimer ces pertes comme :

$$\epsilon'' = \epsilon_d'' + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_o}$$

où  $\epsilon_d''$  représente les pertes diélectriques,  $\sigma$  la conductivité des ions (dS/m) et  $\omega$  la fréquence angulaire.

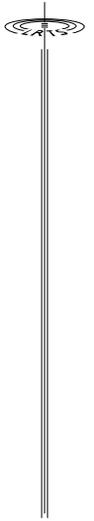
Afin de mesurer la permittivité d'un substrat à l'aide de la sonde construite, nous relierons la sonde à l'analyseur de réseau HP8752C avec un câble coaxial de 50  $\Omega$  RG-58A/U. Avec l'aide d'un ordinateur et d'un programme adéquat que nous avons développé, il est possible de sauvegarder, via le port de communication GPIB, les courbes des parties réelles et imaginaires du coefficient de réflexion. Pour chacune des parties du signal un total de 201 points d'amplitudes et de fréquences différentes sont enregistrés. La gamme de fréquence couverte par l'analyseur de réseau va de 300 kHz à 1.3 GHz. Ces mesures sont par la suite utilisées dans des programmes développés sous *Matlab* pour permettre l'analyse des résultats. La figure suivante présente l'évolution des parties réelles et imaginaires de la permittivité en fonction de la fréquence pour différents teneurs en eau. La conductivité électrique du substrat est de 0.41 dS/m.

En pratique, l'inconnu dans le substrat est la teneur en eau via la mesure de la partie réelle de la permittivité peut être faite à partir de la sonde de permittivité et l'analyseur de réseau. L'équation développée à une fréquence de 80 MHz prend l'aspect suivant :

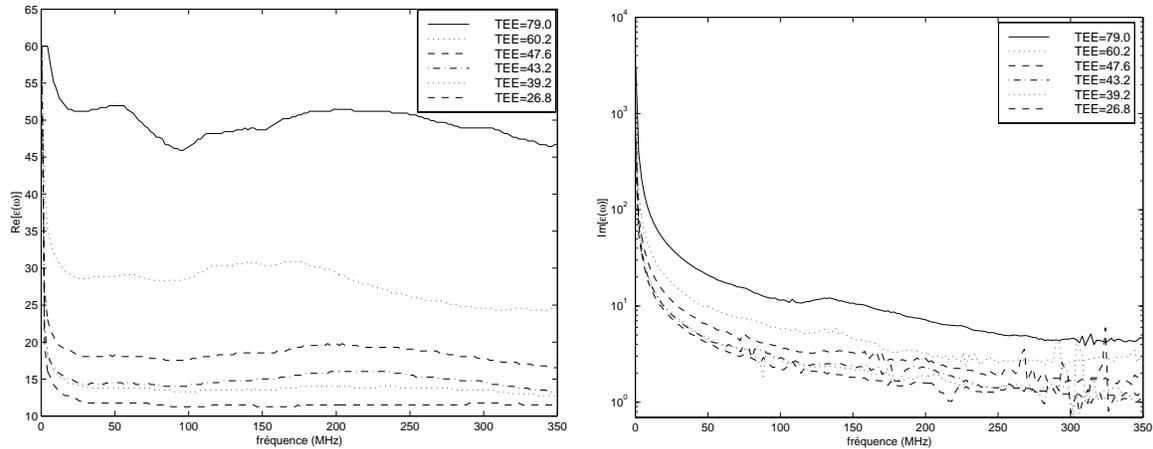
$$TEE = 4.2796 \times 10^{-4} \epsilon_r^3 - 0.0747 \epsilon_r^2 + 4.5157 \epsilon_r - 14.2386$$

Cette équation est similaire à celle développée par Topp [Topp : 1980] en utilisant la partie réelle de la permittivité sans faire appel à une constante diélectrique apparente ( $K_a$ ). Topp [Topp : 1980] utilise une constante diélectrique apparente puisqu'il assume des pertes faibles et un milieu homogène dans lequel la constante diélectrique apparente est égale à la partie réelle de la permittivité à partir d'un appareil de réflectométrie métallique en domaine temporel. La figure 3 suivante présente la courbe calculée et les mesures de l'estimation de TEE optimales en fonction de la partie réelle de la permittivité pour différentes conductivités électriques.

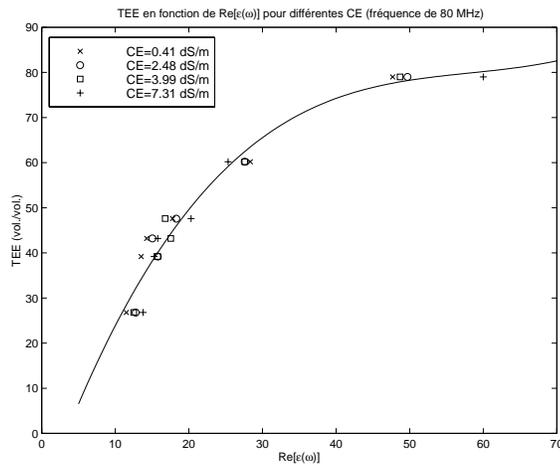
Une évaluation de la tangente de pertes est également faite et présente une dépendance avec la salinité du substrat et une indépendance relative par rapport à la teneur en eau. La tangente de perte constituerait donc un bon indicateur du niveau salin du substrat tout comme la partie réelle de la permittivité constitue un bon indicateur de la teneur en eau. Néanmoins, le nombre



de séries d'essai indépendants étant limitée dans ce projet, de telles affirmations restent à être confirmées par un nombre plus grand d'échantillons.



**Figure 9** Parties réelles et imaginaires de l'estimé de la permittivité en fonction de la fréquence d'un substrat de  $CE = 0.41 \text{ dS/m}$ .



**Figure 10** TEE en fonction de la partie réelle de la permittivité pour différentes CE à une fréquence de 80 MHz.

## Références

G.C. Topp, J.L. Davis, and A.P. Annan «Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines» *Water Resour. Res.*, vol. 16, no 3, pp. 574-582, 1980.