

Caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle de l'état hydrique d'un sol de vigne par résistivité électrique

Characterization of spatial and temporal soil water status in vineyard by DC resistivity measurements

J.P. GOUTOULY^{1*}, D. ROUSSET², H. PERROUD² et J.P. GAUDILLÈRE¹

1 : I.N.R.A.- UMR Œnologie-Ampélogie, Équipe Écophysiologie and Agronomie Viticole,
71, avenue Édouard-Bourlaux B.P.81 33883 Villenave d'Ornon cedex, France

2 : CNRS –UPPA Modélisation et Imagerie en Géosciences, avenue de l'Université 64000 Pau, France

*Corresponding author : goutouly@bordeaux.inra.fr

Abstract : We performed a DC resistivity monitoring experiment during eight months in 2003. Low, medium and high resolution measurements have been carried out at various locations of a vineyard. General apparent resistivity mapping evidences the spatial variations of the summer drying of the subsurface.

Three experiments have been conducted in the studied area :

- parallel 2-D dipole-dipole sections (96 electrodes at 1 meter spacing). The sections are orientated in the long direction of the studied area and located between the vine rows. After inversion, these sections allow to describe the vertical variations of the electrical resistivity and help to specify the 3D geological sketch of the studied area down to three meters.

- high resolution « borehole like » tomographic sections obtained with a custom electrode set. Three PVC rods, two of them vertically placed and one horizontal between the two vertical carry 48 stainless steel electrodes, 0.13 m spaced. This allows to investigate a 4 squared meters section with electrodes on three sides of it. Two of these devices were placed within the studied area. Moisture measurements were performed in the investigated section with time domain reflectivity probes. High resolution cross borehole tomography shows moisture variation at the vine stock scale, and short time interval such as the diffusion of a rainfall.

Key words : *Vitis vinifera*, tomography, water content, root absorption, variability

Introduction

La caractérisation de l'état hydrique du sol d'une parcelle de vigne est un élément essentiel à la bonne compréhension des processus impliqués dans la qualité des raisins à la récolte. Son impact sur la vigueur de la vigne et sur la qualité des raisins n'est plus à démontrer. Ainsi, lorsque la contrainte environnementale est modérée, celle-ci possède un effet positif sur le potentiel œnologique du raisin (teneur en sucres, teneur en composés phénoliques, potentiel aromatique..., van Leeuwen et Seguin, 1974 ; Hardie *et al.*, 1986 ; Duteau, 1987 ; van Leeuwen *et al.*, 2003).

L'évaluation de l'alimentation hydrique d'une parcelle peut se faire à partir d'indicateurs plante qui peuvent être soit de nature ponctuelle comme le potentiel hydrique (tige ou foliaire de base Choné *et al.*, 2001) soit à caractère intégratif comme la discrimination isotopique du C13/C12 sur les moûts (Gaudillère *et al.*, 2002). Mais plus classiquement, l'évaluation de l'alimentation hydrique d'une parcelle se fait par mesure de la teneur en eau du sol (notamment méthodes gravimétriques et méthodes de réflectométrie dans le domaine temporel ou TDR). Cette évaluation peut aussi se faire à partir d'un indicateur plus synthétique : le bilan hydrique (Lebon *et al.*, 2003). Celui-ci est obtenu en croisant des données climatologiques (évapotranspiration, précipitation), la transpiration de la vigne et la Réserve Utile (RU) en eau du sol, estimée notamment à partir de la texture du sol. La RU demeure cependant la principale variable difficile à mesurer. Elle dépend d'une part de la profondeur d'enracinement considérée, une notion arbitraire compte tenu de la difficulté de prendre en compte avec exactitude le fin chevelu racinaire sur les plantes pérennes : quantité, activité, turn over..., Pierret *et al.*, 2004). Elle dépend aussi de la capacité d'absorption racinaire et de sa variation avérée en situation d'alimentation hydrique hétérogène (Habib *et al.*, 1991). Ces deux

caractéristiques rendent délicat l'établissement de ces bilans hydriques, obligeant à faire des hypothèses par trop simplificatrices (définition d'horizons homogènes à colonisation racinaire homogène, procédure dite « en palier »). De plus, ces méthodes, basées sur des prélèvements de sol à diverses profondeurs, deviennent rapidement fastidieuses, si l'on souhaite représenter l'offre en eau à l'échelle d'une parcelle entière et prendre en compte sa variabilité. Les méthodes basées sur la tensiométrie permettent d'avoir des informations relatives aux transferts d'eau dans le sol, et entre le sol et la culture (Celette *et al.*, 2005) ; mais la nécessité de capteurs à demeure ne permet pas une généralisation de ces méthodes à de grandes surfaces.

Le développement des méthodes géophysiques de surface ou de sub-surface, non destructives et spatialement intégrantes, peuvent constituer une aide au suivi des transferts hydriques en milieu non saturé et renseigner sur les horizons effectivement soumis à une absorption racinaire (Michot *et al.*, 2003). Samouëlian *et al.* (2005) détaillent la forte dépendance existant entre la mesure de résistivité et les différentes variables intrinsèques des sols tant pérennes (texture, structure, CaCO₃, profondeur...), que diachroniques (teneur en eau, en sels, température...).

L'objectif de cette étude est de tester les capacités de la méthode électrique à multiélectrodes à suivre les transferts hydriques dans un sol de vignoble et à observer la dynamique de la teneur en eau du volume de sol prospecté par les racines.

Matériels et méthodes

Vignoble

Les expérimentations ont été conduites sur une parcelle de vigne située à Villenave d'Ornon (lat/long WGS84 : 44° 45' 14" N / 0° 33' 38" E ; Château Couhins, AOC Pessac-Léognan, Bordeaux, France). La parcelle est de 0,25 ha, de cépage *Vitis vinifera* L. cv Merlot greffé sur Fercal planté à la densité de 6 250 ceps/ha (distance inter-rangs : 1,6 m ; distance dans le rang : 1 m), conduite en guyot double et avec les rangs orientés dans l'axe nord-sud. La hauteur de rognage est de 1,50 m, la hauteur de palissage de 1 m. Le sol est hétérogène et comprend des zones cartographiées de sols de graveleux, argileux ou sableux.

Tomographie de résistivité électrique

Deux types de tomographie ont été effectués, pilotés par un résistivimètre Syscal R2 (Iris Instruments) et un convertisseur DC/DC. Trois batteries 12V en série assurent l'alimentation pour les séquences de mesures. Les mesures ont été inversées avec le logiciel RES2DINV pour obtenir des coupes de résistivité électrique (Loke and Baker, 1996).

a) coupes parallèles à l'échelle de la parcelle : une première configuration en panneaux électriques dipole-dipole a permis de réaliser 6 coupes de résistivité obtenue à partir d'un alignement de 96 électrodes espacées de 1 m (une en face de chaque cep à 0,2 m de celui-ci), et orientée le long des rangs afin de caractériser la variabilité du sol sous les ceps. Le cycle de mesure est d'environ 3 heures. Les variations spatiales du sol (profondeur, structure), de la teneur en argile et de la teneur en eau génèrent des variations spatiales de résistivité. Ces mesures ont été faites en début (avril 2003) et en fin de cycle (septembre 2003) de la vigne.

b) tomographie à échelle du cep : une configuration originale permet de constituer un panneau électrique de 2 m x 2 m en acquisition à la verticale de deux ceps. Ce panneau de 4 m² est généré à partir de 3 barres PVC de 2 m comportant chacune un alignement de 16 électrodes. L'espacement entre les électrodes est de 0,13 m. Une barre PVC est placée horizontalement sur le sol, orientée dans le sens du rang, à 0,10 m de celui-ci et entre deux autres barres PVC placées verticalement dans le sol. Les mesures de résistivité, réalisées avant et après une pluie, et à plusieurs reprises le long du cycle de la vigne, permettent de mettre en évidence des variations de la teneur en eau sous les deux ceps. Ce dispositif a été installé dans deux zones de sol très différentes : une zone gravele-sableuse (A) et une zone argilo-sableuse (B). L'acquisition des données pour les panneaux électriques des deux zones a été faite lors de mêmes journées de mesure, l'une après l'autre. On dispose ainsi de 25 panneaux électriques pour chaque zone, réalisés de juin à octobre 2003.

Teneur en eau par mesure TDR

Parallèlement à ces mesures de résistivité, huit profils d'humidité volumique du sol (de 0 à 2 m par épaisseur de 0,2 m – moyenne de 3 mesures par épaisseur) ont été mesurés par sonde TDR (TRIME[®]-T3 et FM3 de Imko) à partir de huit tubes de 2 m régulièrement répartis sur la parcelle. Deux d'entre-eux sont situés au centre des deux panneaux électriques servant aux tomographies haute résolution.

Température du sol

À 1 m de chaque tube TDR, les températures du sol à 0,50 m de profondeur sont enregistrées à partir de 8 centrales HOBO[®] H8 (Onset Computer Corporation) munies de sonde température TMC6-HB.

Résultat et discussion

Tomographie d'un rang de vigne

La tomographie d'un seul rang de vigne sur les six effectués est présentée (figure 1) et révèle la forte variabilité du signal de résistivité de ce sol, à la fois latéralement et en profondeur. Il existe une correspondance entre les gammes de résistivité et les types de sols repérés sur la parcelle. À cette résolution obtenue avec 1 m d'espacement inter électrode, la lentille de graves (peyrosol), située au centre de la parcelle, apparaît clairement et offre une gamme de résistivité élevée ($> 50 \Omega.m$) du fait de son faible taux d'argile et fort taux d'éléments grossier (tableau 1). La forte charge en éléments grossiers (40 à 45%) de l'horizon profond apparaît clairement générant une gamme de résistivité très élevée ($> 130 \Omega.m$). Les horizons pédologiques à fort taux d'argile (30 à 40%) présentent la plus faible résistivité ($< 10 \Omega.m$).

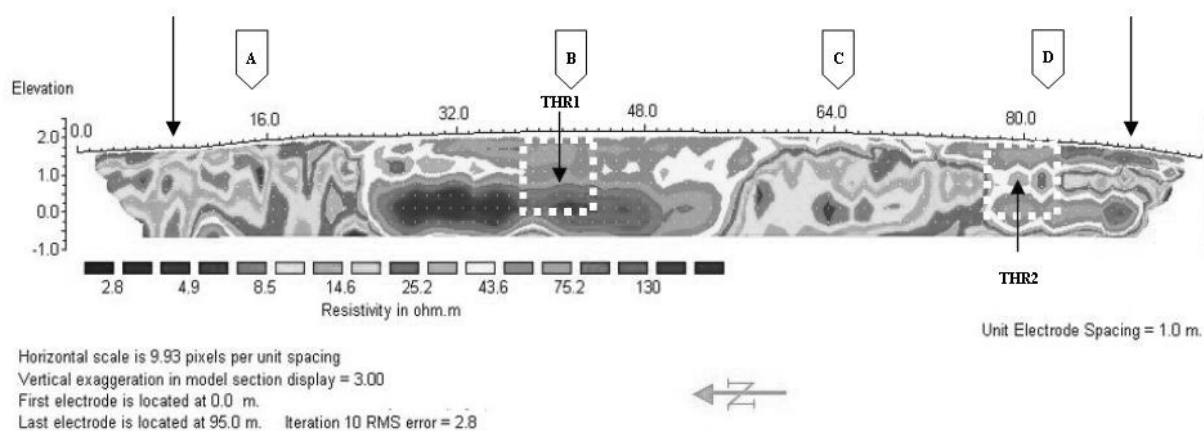


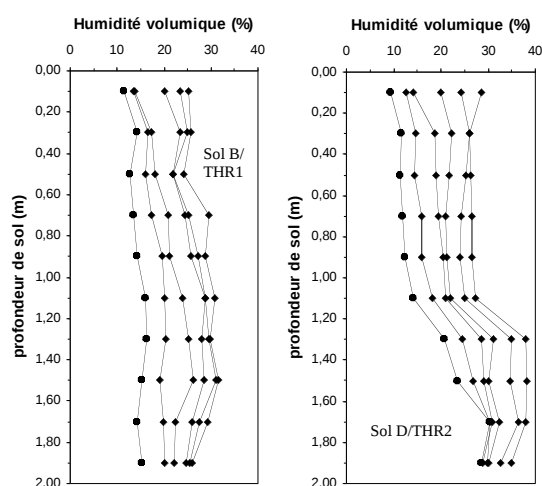
Figure 1 - tomographie sous un rang de vigne (82 m de long, entre les deux flèches, avril 2003).

A : calcisol sablo-argileux sur calcaire altéré; B : peyrosol plus ou moins rédoxique C : calcisol rédoxique sur calcaire altéré

D : brunisol sablo-argileux rédoxique sur argile rubéfiée ; THR1 et THR2 : localisation des deux tomographies haut résolution (cf texte)

sol	profondeur (cm)	éléments grossiers(%)	argile (% TF)	calcaire total (g/kg TF)	Matières organiques (%TF)
A	0-50	13,8	25,9	93	1,3
	50-140	19,3	38,4	468	0,3
B	0-53	25,2	19,6	63	1,2
	53-68	6	13,8	28	1,3
	68-180	13,1	19,1	1	0,4
	180-200	45	19,9	1	0,3
C	0-90	12,7	23,4	29	0,8
	90-180	5,1	74,1	10	0,3
D	0-70	13,7	15,3	12	1,5
	70-120	3,3	25,2	1	0,2
	120-180	2,4	39,7	1	0,2
	180-200	1,4	29,5	1	0,2

Tableau 1 - Principales caractéristiques des horizons pour les quatre sols (TF : terre fine).



Cette tomographie montre clairement la variabilité de l'offre en eau du sol sur cette parcelle, et est en correspondance avec les relevés d'humidité volumique effectués dans ces différentes zones. La dynamique de l'évolution sur un millésime des teneurs en eau dans les sols A et D est présentée dans la figure 2. Le peyrosol (B) s'assèche de façon progressive sur l'ensemble des 2 m du profil hydrique (taux d'argile assez constant d'environ 19%).

Figure 2 - Profil hydrique de types de sol A et D mesure de la teneur en volumique par sonde TDR

La différence de texture des horizons pédologiques du brunisol argileux (D) entraîne un appauvrissement plus lent à partir de 1,20 m de profondeur (30 à 40% d'argile).

La résolution obtenue avec cet écart inter électrode de 1 m est suffisante pour mettre en évidence les variations de sols. Cette technique offre la possibilité de mieux cerner les causes probables des fonctionnements différenciés de la vigne sur cette parcelle. Ce type d'analyses peut être à la base d'une meilleure redéfinition des modes de conduite appliquée classiquement à l'ensemble de cette parcelle. Une gestion intra parcellaire peut ainsi être envisagée

Tomographie haute résolution

Le dispositif des panneaux électriques à haute résolution permet d'avoir accès plus finement aux flux hydriques sous la vigne, ce que ne permettait pas la tomographie précédente (figure 3). On constate une grande variabilité du signal de résistivité dans les 2 m de sol sous les ceps de vigne. Globalement on retrouve dans ces deux panneaux électriques, la répartition des plages de résistivité obtenues lors de la tomographie du même rang de vigne.

L'ensemble du profil de la zone de grave (sol B) présente les valeurs de résistivité les plus élevées et le sol D présente une résistivité plus élevée dans les horizons supérieurs, à taux d'argile moins important qu'en profondeur. Cette variabilité n'apparaît pas structurée en fonction de la seule profondeur, mais varie aussi latéralement. Les forts remaniements que ces sols de vignobles ont subis au cours de la période Quaternaire, avec des phases de dépôts, reprises et re-dépôts ont rendu ces sols fortement hétérogènes. La texture et la structure du sol fluctuent en fonction de la profondeur ainsi que latéralement. La charge en argile et en éléments grossiers variables est facilement détectable à la main. Cela se traduit aussi plus directement par des modifications de la géométrie de la macroporosité et du potentiel matriciel du sol (Hallaire et Cointepas, 1993 ; Samouëlian *et al.*, 2005). Le système racinaire des plantes pérennes peut, au cours de sa croissance, utiliser de telles hétérogénéités pour s'installer dans des zones plus aptes à assurer l'alimentation hydrominérale (Habib *et al.*, 1991). À cette échelle, ceci peut se traduire par une plus forte résistivité révélant une activité du système racinaire.

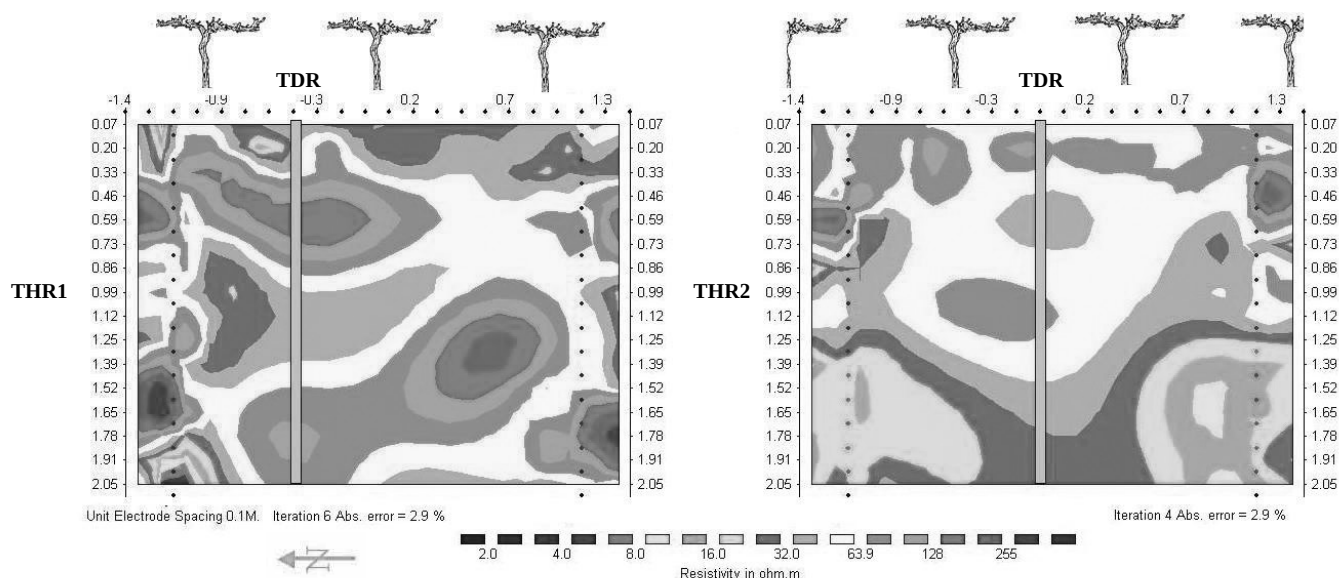


Figure 3 - Tomographies haute résolution (THR1 et THR2) dans les deux zones de sol B et D.
(distances en mètre ; points noirs : emplacement des électrodes ; 25/06/03).

Suivi diachronique des tomographies

L'évolution de la résistivité a été enregistrée à plusieurs reprises au cours du cycle de la vigne en 2003, en phase d'assèchement et en phase de réhumectation après une pluie. Pour les deux types de sols, quatre sections de résistivité vraies sont présentées afin de caractériser le fonctionnement de ces sols : une avant une pluie de 54 mm clôturant une période de 12 jours sans précipitation et trois sur les journées suivantes.

Entre la tomographie du 25/06/03 (figure 2) et celle du 09/07/03 (figure 3), seulement 43% de la demande climatique a été satisfaite : 28 mm de précipitation contre 64 mm en ETP Penmann cumulée. Ceci explique l'augmentation de la résistivité sur l'ensemble du profil de la THR1, installée dans un peyrosol. De même au niveau du THR2, la résistivité augmente de plus de 100% dans l'horizon supérieur (0 à 0,7 m), le moins riche en argile, alors que celle de l'horizon profond (> 1,20 m) reste relativement stable.

La pluie de 54 mm le 15/07/03 a occasionné une infiltration d'eau dans le sol générant une baisse de résistivité, variable selon les sols. Mais cet état n'a pas duré puisque rapidement, au bout deux jours, on retrouve des tomographies à fortes résistivités.

L'ensemble des 50 tomographies réalisées pour les deux de sols révèle une certaine instabilité du phénomène mesuré. Globalement, on retrouve les zones d'une journée à l'autre, mais il n'existe pas de stabilité des bordures de ces zones. Le signal de résistivité est sous la dépendance de variables intrinsèques du sol, à la fois physique et chimique (Samouëlian *et al.*, 2005). La concentration de la solution du sol est variable selon l'état de dessèchement et de réhydratation ainsi que sous l'effet de l'activité de l'absorption du système racinaire. Ces événements peuvent avoir un effet non négligeable sur la résistivité et devrait être mieux pris en compte (Besson *et al.*, 2004). Ceci montre à nouveau les limites des modèles simplificateurs de transferts hydriques dans les sols qui discrétisent le sol en couches homogènes de potentiel matriciel.

Enfin on peut penser que la variabilité élevée de résistivité constatée à la verticale des ceps soit une des causes de la variabilité de potentiel hydrique constatée d'un cep à l'autre (*cf.* présentation de van Leeuwen *et al.*).

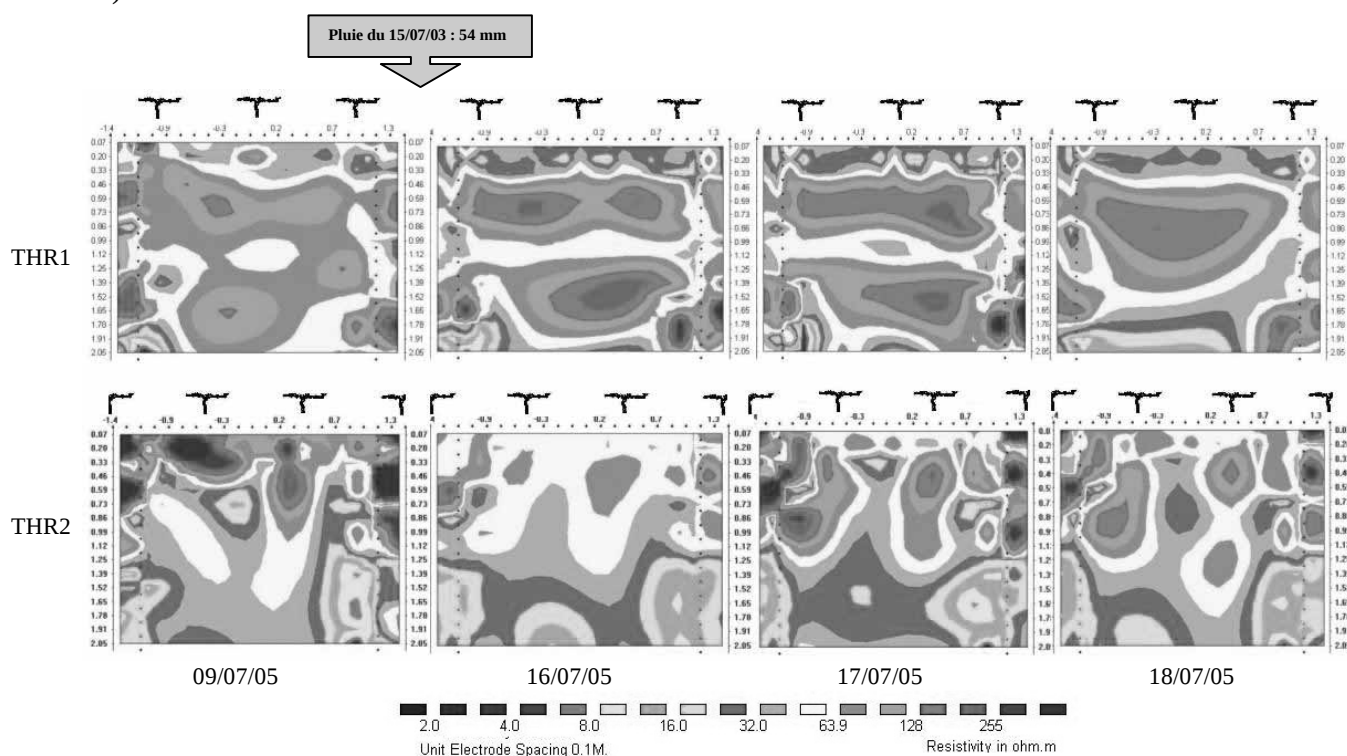


Figure 4 - Quatre journées montrant l'évolution des résistivités vraies des deux tomographies haute résolution THR1 et THR2 après une pluie de 54 mm.

Conclusion

Ces résultats montrent la grande hétérogénéité de la teneur dans une parcelle de vigne. Les méthodes géophysiques de mesure de la résistivité des sols permettent une détermination plus rapide que par la méthode des carottages, des zones de sols et de leur variabilité. Elles permettent de réaliser des mesures non-destructives et renouvelables, de matérialiser les discontinuités entre horizons pédologiques. La multiplication des mesures dans le temps donne accès à la dynamique des facteurs pouvant influencer ce signal, la teneur en eau en premier lieu. Cependant ces méthodes ne permettent pas d'accéder directement à cette information. Une phase d'interprétation est nécessaire afin d'attribuer correctement une cause à chaque

effet constaté. Ceci est dû à la sensibilité du signal aux caractéristiques physiques et chimiques du milieu, modifiées de plus par le climat et par le fonctionnement du système racinaire.

Références bibliographiques

Choné X., van Leeuwen C., Dubourdieu D. and Gaudillère J.P., 2001. Stem water potential is a sensitive indicator for grapevine water status. *Annals of Botany*, **87**, 4, 477-483.

Celette F., Wery J., Chantelot E., Celette J. and Gary C. (2005) Belowground interactions in a vine (*Vitis vinifera* L.)-tall fescue (*Festuca arundinacea* Shreb.) intercropping system : water relations and growth. *Plant and Soil*, **276**, 205-217.

Besson A., Cousin I., Dabas M. et King D., 2005. Impact de la solution du sol sur les mesures de résistivité électrique : premiers essais méthodologiques. 5^e Colloque Geofcan 20-21 septembre, Orléans.

Duteau J., 1987. Contribution des réserves hydriques profondes du calcaire à Astéries compact à l'alimentation en eau de la vigne dans le Bordelais, *Agronomie*, **7**, 10, 859-865.

Habibx R., Pagesx L., Jordan M.O., Simonneau T., Sebillotte M., 1991. Approche à l'échelle du système racinaire de l'absorption hydro-minérale. Conséquences en matière de modélisation. *Agronomie*, **11**, 2, 623-643.

Hallaire V. et Cointepas J.P., 1993. Caractérisation de la macroporosité d'un sol de verger par analyse d'image. *Agronomie*, **13**, 2, 155-164.

Hardie W. and Considine J., 1976. Response of grapes to water-deficit stress in particular stage of development. *Am. J. Enol. Viticult.*, **27**, 2, 55-61.

Gaudillère J.-P., van Leeuwen C., Ollat N., 2002. Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *J. Exp. Bot.*, **53**, 369, 757-763

Lebon E., Dumas V., Pieri P., Schultz H.R., 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology*, **30**, 699-710.

Loke M.H. et Barker R.D., 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* **44**, 1, 131-152.

Michot D., Benderitter Y., Dorigny A., Nicoulaud B., King D., Tabbagh A., 2003. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resour. Res.*, **39**, 5, 1-14

Pierret A., Moran C.J., Doussan C., 2004. Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots. *New Phytologist*, **166**, 967-980

Samouëlian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A. and Richard G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil & Tillage Research*. **83**, 173-193

Van Leeuwen C. et Seguin G., 1994. Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Émilion, 1990). *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **28**, 2, 81-110

Van Leeuwen C., Trégoat O., Choné X., Jaeck M.-E., Rabusseau S. et Gaudillère J.-P., 2003. Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin. *Bull. O.I.V.*, **76**, n°867-868, pp. 367-379.