

APPORTS DES MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE DU SOL DANS LES ÉTUDES SUR LE FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DU SYSTÈME SOL/VIGNE

CONTRIBUTION OF SOIL ELECTRIC RESISTIVITY MEASUREMENTS TO THE STUDIES ON SOIL/GRAPEVINE WATER RELATIONS

Etienne GOULET^{1*} et Gérard BARBEAU²

1: Cellule « Terroirs Viticoles », Confédération des Vignerons du Val de Loire
42 rue Georges Morel, 49071 Beaucouzé cedex
2 : Unité Expérimentale Vigne et Vin, INRA, 42 rue Georges Morel,
49071 Beaucouzé cedex, France

Résumé : La mesure de la résistivité électrique des sols est une technique non destructive et intégrante. Elle offre la possibilité de spatialiser précisément les différents horizons du sol et de localiser leur variation d'humidité, certains dessèchements préférentiels pouvant être alors attribués au fonctionnement racinaire de la vigne. Le volume de sol soumis au prélèvement des racines peut ainsi être mieux appréhendé et pour certains types de sols, cette technique permet également de quantifier l'eau disponible. Des applications dans des études relatives aux pratiques agro-viticoles peuvent être entreprises et les premiers essais de mise en relation de la résistivité électrique du sol avec les caractéristiques physiologiques de la vigne semblent prometteurs.

Abstract: The classical techniques that allow to quantify the soil water status such as the gravimetric method or the use of neutrons probes do not give access to the volume of soil explored by the plant root system. On the contrary, electric tomography can be used to have a global vision on the water exchange area between soil and plant. The measurement of soil electric resistivity, as a non destructive, spatially integrative technique, has recently been introduced into viticulture. The use of performing equipment and adapted software allows for rapid data processing and gives the possibility to spatialize the variations of soil texture or humidity in two or three dimensions.

Soil electric resistivity has been tested for the last three years at the Experimental Unit on Grapevine and Vine, INRA, Angers, France, to study the water supply to the vine in different "terroir" conditions. Resistivity measurements were carried out with the resistivity meter Syscal R1+ (Iris Instruments, France) equipped with 21 electrodes. Those electrodes were lined up on the soil surface in a direction perpendicular to 5 grapevine rows with an electrode spacing of 0.5 m. and a dipole-dipole arrangement. Resistivity measurements were performed on the same place at different times in order to study soil moisture variations. This experimental set up has permitted to visualise the soil stratification and individualize some positive electric anomalies corresponding to preferential drying ; this desiccation could be attributed to grapevine root activity. The soil bulk subject to the water up-take could be defined more precisely and in some types of soil, available water may even be quantified. Terroir effect on grapevine root activity has also been shown up on two different experimental parcels through electric tomography and first results indicate that it is possible to monitor the effects of soil management (inter-row grassing) or different rootstocks on the water supply to the vine. As soil electric resistivity depends on soil parameters (texture, structure, humidity or temperatures) that explain most of vine development and berry ripening variations, relationships between some physiological variables and electric resistivity measurements have also been tested with promising results.

Geophysical techniques such as soil electric resistivity constitute a tool for scientists and recent technological developments are now facilitating the use of these equipments. The measurement of soil electric resistivity could be applied on many agronomic studies. Electric imagery could contribute to a better characterisation of the available soil water content and, as an integrative method, this one could also be used to explain interactions between soil characteristics and vine development. However, electric tomography is not to replace classical methods of water availability measurement but it has to take part to the elaboration of global indices.

Mots clés : Résistivité électrique, activité racinaire, alimentation hydrique, sol, vigne

Key words: Electric resistivity, root activity, water supply, soil, vine

INTRODUCTION

Le fonctionnement hydrique de la vigne est responsable du développement végétatif de la plante et est également un paramètre explicatif important de la composition du raisin et de la qualité du vin (Seguin, 1965 ; Van Leeuwen et Seguin, 1994). Ce fonctionnement est influencé d'une part par des variables mésoclimatiques comme l'humidité de l'air (Trambouze et Voltz, 1996 ; Riou *et al.*, 1994) et d'autre part par des variables édaphiques telle que la disponibilité de l'eau dans le sol (Morlat, 1989). Plusieurs méthodes de mesures permettent d'apprécier l'état hydrique de la plante (Van Leeuwen *et al.*, 2003) à un moment donné ou durant une période précise du cycle végétatif : potentiel hydrique (Choné *et al.*, 2001), micromorphométrie (Van Leeuwen *et al.*, 2000) ou delta C13 (Gaudillère *et al.*, 2002). Elles sont le plus souvent associées à des suivis hydriques du sol qui permettent d'expliquer les variations de mesures observées sur la plante et d'en comprendre les origines. L'état hydrique du sol peut être établi grâce à des prélèvements ou à des mesures *in situ* à l'aide de sondes neutroniques ou de sondes T.D.R. (Guyot, 1999), ces méthodes performantes ont néanmoins le défaut d'être intrusives donc de perturber le milieu d'étude et de n'être représentatives que d'un faible volume de sol.

L'objectif de cette publication est de présenter l'intérêt des techniques géophysiques de sub-surface, et notamment la résistivimétrie électrique pour étudier la dynamique hydrique des sols de façon non destructrice et spatialement intégrante. Après un descriptif des dispositifs expérimentaux et une rapide présentation de cette méthode basée sur la conductivité électrique du sol, ses apports en terme de suivis hydriques et de spatialisation de l'activité racinaire seront exposés au travers de plusieurs résultats issus d'expérimentations menées sur le vignoble du Val de Loire.

MATERIELS ET METHODES

I - DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

1) Évolution hydrique du sol au cours du cycle végétatif de la vigne :

Un réseau de parcelles expérimentales appartenant à l'Unité Vigne et Vin du centre INRA d'Angers (49, France) a été utilisé pour suivre l'évolution hydrique du sol suivre par tomographie de résistivité électrique au cours du cycle végétatif de la vigne. Ce réseau établi en 2001 en moyenne vallée de la Loire est constitué de parcelles situées sur des milieux géo-pédologiques différents, mais comprenant un matériel végétal identique (Cabernet franc, clone 210 sur porte-greffe 3309C). Les vignes sont âgées d'une vingtaine d'années, plantées en densité comparable (5 000 cep/ha) et conduites selon un itinéraire viticole standardisé. Ce réseau permet d'étudier préférentiellement l'influence des variables relatives au type de sol et au mésoclimat sur le comportement de la vigne et en particulier sur son développement racinaire et son fonctionnement hydrique.

Dans un souci de clarté scientifique, seuls les résultats de l'évolution hydrique de deux milieux géo-pédologiques opposés sont présentés dans cette étude. La comparaison s'effectuera entre le milieu « argile à silex » (parcelle 1) présentant une forte différenciation texturale (limon-argilo-sableux sur argile lourde) et le milieu « craie sablo-glauconieuse » (parcelle 2) représenté par un sol limon-sablo-argileux superficiel reposant sur une craie légèrement friable (tableau I et II).

2) Effet des pratiques viticoles sur l'activité racinaire de la vigne :

L'effet des pratiques viticoles sur l'activité racinaire de la vigne a également été étudié par tomographie de résistivité électrique sur un essai « enherbement » (parcelle 3) du domaine expérimental de l'Unité Vigne et Vin situé à Montreuil-Bellay (49, France). Cet essai planté

Tableau I - Analyses granulométriques de la parcelle 1
Granulometric analyses on parcel 1

Milieu "argiles à silex" (parcelle 1)		Profondeur (en cm)	
		0 - 50	50 - 100
Graviers	g/kg	115	56
Cailloux	g/kg	28	21
Terre fine	g/kg	857	923
Argile (< 2 microns)	g/kg	213	516
Limon Fin (2-20 microns)	g/kg	399	344
Limon Grossier (20-50 microns)	g/kg	99	53
Sable Fin (50-200 microns)	g/kg	121	40
Sable Grossier (200-2000 microns)	g/kg	168	47
Densité apparente		1,019	0,946

Tableau II - Analyses granulométriques de la parcelle 2
Granulometric analyses on parcel 2

Milieu "craie sablo-glaucconieuse" (parcelle 2)		Profondeur (en cm)		
		0 - 55	55 - 80 C1	80 - 100 C2
Graviers	g/kg	41	4	4
Cailloux	g/kg	2	0	2
Terre fine	g/kg	957	996	993
Argile (< 2 microns)	g/kg	211	200	173
Limon Fin (2-20 microns)	g/kg	183	166	220
Limon Grossier (20-50 microns)	g/kg	107	108	140
Sable Fin (50-200 microns)	g/kg	277	232	261
Sable Grossier (200-2000 microns)	g/kg	222	294	206
Densité apparente		1,147	1,018	0,901

Tableau III - Analyses granulométriques de la parcelle 3
Granulometric analyses on parcel 3

Milieu Marnes de l'Oxfordien (parcelle 3)		Horizons		Roche
		Surface 0-60	Profondeur 60-85	Marnes 85-130
Graviers	g/kg	6,30	18,0	0,0
Cailloux	g/kg	25,25	335,0	0,0
Terre fine	g/kg	968,50	647,0	1000,0
Argile (< 2 microns)	g/kg	359,00	466,0	363,0
Limon Fin (2-20 microns)	g/kg	162,50	129,0	388,0
Limon Grossier (20-50 microns)	g/kg	112,50	86,0	137,0
Sable Fin (50-200 microns)	g/kg	119,00	87,0	70,0
Sable Grossier (200-2000 microns)	g/kg	247,00	232,0	42,0

en 1994 comprend différentes modalités d'entretien du sol et différents couples cépage/porte-greffe. Le sol de texture argileuse est développé sur des marnes du Jurassique apparaissant à 1 mètre de profondeur (tableau III). L'étude à porté sur les cépages Cabernet franc et Chenin greffés sur Riparia et SO4, chaque couple faisant l'objet d'une comparaison entre une modalité enherbée (*Festuca* sp. var. *rubra* 50 %) et une modalité dés herbée.

II - MESURE D'HUMIDITÉ DU SOL

L'humidité des sols a été mesurée par prélèvement de sol sur chaque horizon et séchage à l'étuve à 105 °C. L'humidité au point de flétrissement a également été établie sous pression de 16 bars sur plaque poreuse (Laboratoire de Conseils et d'Analyses de Blanquefort, 33 - France).

III - COMPTAGE RACINAIRE

Plusieurs fosses pédologiques ont été ouvertes pour procéder à des comptages rigoureux de racines permettant d'établir le profil racinaire de chaque modalité étudiée. Les fosses sont ouvertes à 15 cm du rang et s'étendent jusqu'au milieu de l'inter-rang sur une longueur totale équivalente à une série de trois ceps. Les comptages ont lieu sur le rang et sur l'inter-rang et s'effectuent de chaque coté d'un cep sur une distance égale à la moitié

de l'écartement inter-cep (Morlat and Jacquet, 1993). La densité est exprimée pour chaque horizon en nombre de racine par mètre carré.

IV - MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

1) Principe

La résistivité électrique d'un horizon de sol est égale à l'inverse de sa conductivité électrique, elle est donc définie par la capacité de l'horizon à limiter le passage du courant électrique. La résistivité électrique d'un sol est influencée par plusieurs facteurs répartis entre les variables intrinsèques pérennes telles que la texture, la structure, la pierrosité et la carbonatation du sol et les variables d'états diachroniques comme la teneur en eau, la température et la concentration de la solution du sol (Mc Neil, 1980 ; Michot, 2003). Les mesures de résistivité électrique d'un sol traduisent donc son état à un moment donné. Pour étudier la variabilité spatiale des sols d'une région donnée il est donc préférable d'opérer les mesures à un temps *t* pour s'affranchir des variables diachroniques. À l'inverse, l'étude des variations temporelles de résistivité électrique d'un sol permet par exemple d'étudier spécifiquement sa dynamique hydrique puisque les variables intrinsèques du sol (texture, structure...) sont constantes dans le temps et que seules les variables diachroniques peuvent faire varier la résistivité électrique.

2) Méthode

Pour étudier finement les différents horizons pédologiques ou pour évaluer les variations spatiales et temporelles d'humidité d'un sol, le dispositif des panneaux électriques produisant des profils de résistivité est généralement utilisé (Benderitter et Schott, 1999). Cette méthode consiste à mesurer la résistivité apparente d'un volume de sol en injectant un courant électrique continu dans le sol par le biais d'électrodes d'injection et en le récupérant au niveau d'électrodes de réception. Pour l'ensemble des expérimentations, un système multi-électrodes piloté par un résistivimètre Syscal R1 de chez Iris Instrument a été utilisé. Le dispositif comprend 21 électrodes espacées de 50 cm et alignées de façon perpendiculaire aux rangs de vigne recoupant ainsi 5 ceps (distance de 2 m entre rangs).

L'indice de profondeur, la distance inter-électrodes et le type de configuration du dispositif de mesure déterminent la précision et la profondeur de sol prospectée. Pour les mesures concernant la couverture pédologique, plusieurs études (Ward, 1990 ; Michot, 2003) ont démontré l'intérêt d'utiliser la configuration dipôle-dipôle (meilleur échantillonnage) par rapport aux configurations pôle-pôle ou Wenner (meilleur rapport signal/bruit mais faible échantillonnage horizontal). Cette configuration retenue pour nos expérimentations permet la création de quadripôles de mesure (dipôle d'injection + dipôle de réception), la mesure étant effectuée au centre de ce quadripôle et à une profondeur proportionnelle à la distance inter-électrode (figure 1).

Les mesures de résistivité électrique apparente obtenues sont ensuite traitées par le logiciel Res2Dinv (Loke *et al.*, 1996). Ce logiciel permet de diviser le sol prospecté en blocs rectangulaires présentant chacun une valeur de résistivité « vraie » correspondant à la minimisation de la différence entre la résistivité calculée par le programme et la résistivité mesurée. Ce processus informatique appelé inversion des données permet de réduire significativement les erreurs liées aux artefacts de mesure (Panissod *et al.*, 2001). Les résultats peuvent être pré-

sentés sous forme de section de résistivité électrique (tomographie) ; il est ainsi possible de visualiser les variations latérales de résistivité sur la longueur du profil ainsi que les variations verticales sur la profondeur d'investigation.

La méthode des panneaux électriques nécessite un dispositif expérimental contraignant et relativement long à mettre en place, elle est donc conseillée pour l'étude des variations de résistivité électrique locales. De plus, les conditions d'utilisation de cette méthode sont assez restreintes puisque des sols trop secs et/ou trop graveleux induisent des difficultés majeures de mesure en terme de conductivité au niveau des électrodes. Néanmoins lorsque les expérimentations ont lieu dans la gamme des conditions favorables, il est alors possible d'effectuer des suivis hydriques spatio-temporels du sol (Michot *et al.*, 2001). En effet au niveau d'un même horizon pédologique possédant une structure et une texture homogène, seules les variations d'humidité et de température peuvent provoquer des variations latérales de résistivité électrique. Le fonctionnement végétatif de la vigne induit un prélèvement hydrique au niveau du sol provoquant un assèchement préférentiel au niveau du système racinaire actif, cette diminution locale d'humidité provoque alors une augmentation de la résistivité électrique du sol appelée anomalie électrique positive. La localisation de ces anomalies sur une section de résistivité électrique peut donc théoriquement permettre de spatialiser l'activité racinaire de la vigne au niveau des différents horizons du sol mais également de suivre son évolution temporelle.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

I - SUIVI DE L'ÉVOLUTION HYDRIQUE DU SOL AU COURS DU CYCLE VÉGÉTATIF DE LA VIGNE

Les premiers panneaux ont été réalisés début avril 2002 lorsque les sols étaient proches de la capacité au champ et la vigne au stade phénologique « débourrement ». Afin d'observer les différences de résistivité obtenues par le dessèchement du sol, il a été choisi d'effectuer

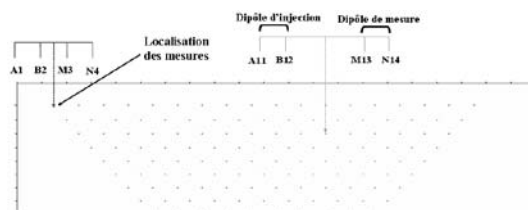


Figure 1 - Système multi-électrodes en configuration dipôle-dipôle

Multi-electrodes set-up with dipole-dipole arrangement

une deuxième campagne de mesures début septembre 2002, à une époque où les disponibilités en eau sont moins importantes, et ce à l'emplacement exact des premiers panneaux. En août 2003, une troisième série de mesure a été réalisée afin de confirmer ou d'infirmer les observations issues des comparaisons des deux premières campagnes de mesure.

La température du sol étant un facteur important de variation de la résistivité électrique (Hesse, 1964), les mesures du mois de septembre 2002 et d'août 2003 ont été corrigées et rapportées à celles d'avril 2002 afin que seules les variations d'humidité des sols influencent les valeurs de la résistivité électrique mesurée. Les valeurs de résistivité électrique ont donc été augmentées de 2 % par degré Celsius supplémentaire, ce coefficient de correction correspond à la gamme de températures rencontrées dans les sols étudiés et est en accord avec la bibliographie existante sur ce sujet (Campbell *et al.*, 1948 ; Michot, 2003). L'évolution thermique temporelle et verticale des sols étudiés a été estimée d'après des suivis thermiques effectués sur ces mêmes types de sols en 1988 par R. Morlat (Cellier *et al.*, 1996) qui concluait à des écarts printemps/été d'environ 15 °C degrés pour les horizons de surface et de 9 °C pour l'horizon argileux de profondeur sur le milieu « argiles à silex ». De même, les écarts thermiques du milieu « craie sablo-glaucconieuse » étaient de l'ordre de 20 °C pour la surface et de 12 °C pour la profondeur.

Les résultats sur le suivi de l'évolution hydrique du sol au cours du cycle végétatif de la vigne par tomographie de résistivité électrique sont présentés séparément pour chaque milieu étudié, la comparaison entre milieu est ensuite discutée.

1) Milieu « argile à silex » (parcelle 1)

a) Avril 2002

La section de résistivité électrique vraie inversée de la parcelle 1 (figure 2) fait apparaître 3 couches subhorizontales correspondant globalement aux différenciations texturales verticales de la parcelle. L'horizon d'argile lourde très conducteur correspond bien à la couche la moins résistante représentée en bleu sur la section de résistivité. Aucune variation latérale d'humidité ou de résistivité en relation avec les rangs et les inter-rangs n'a été observée. Au début avril, les très fortes teneurs en eau de ce type de sol et les conditions climatiques associées permettent à la vigne de s'alimenter sans contrainte et sans puiser dans les réserves intrinsèques du sol ce qui n'induit aucune différence d'humidité ou de résistivité.

b) Septembre 2002

La couche de faible résistivité correspondant à l'horizon argilisé présente des discontinuités latérales de résistivité électrique (figure 2). Sous les inter-rangs, la résistivité électrique est sensiblement identique à celle du mois d'avril, mais sous les rangs le sol est nettement plus résistant alors qu'il s'agit du même horizon d'argile lourde. La figure 3 est une représentation de la variation relative de la résistivité électrique de la section entre avril et septembre, elle permet d'observer très clairement les anomalies résistantes positives qui s'expliquent par un assèchement préférentiel provoqué par l'activité racinaire. Les mesures d'humidité (tableau IV) démontrent en effet l'existence d'une relation entre les anomalies résistantes observées et l'assèchement du sol sous les rangs puisque l'humidité sous les inter-rangs ne diminue en moyenne que de 5 % entre avril et septembre alors que l'humidité sous les rangs diminue de près de 19 %. Un assèchement

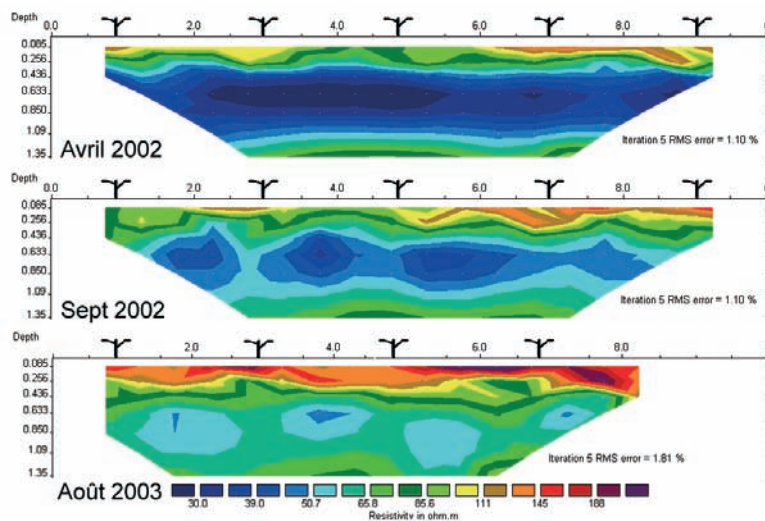


Figure 2 - Sections de résistivité électrique ; suivi spatial et temporel de la parcelle 1

Electric resistivity sections; spatial and temporal monitoring on parcel 1

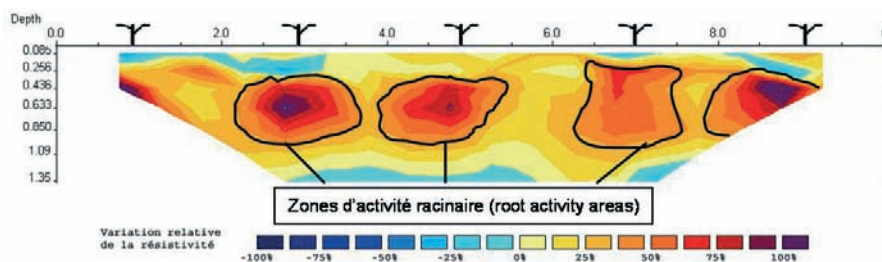


Figure 3 - Section de variation relative de la résistivité électrique de la parcelle 1 entre avril et septembre
Section of relative resistivity variation on parcel 1 between April and September

Tableau IV - Humidité pondérale du sol de la parcelle 1 : variations spatiales et temporelles
Soil moisture content (% in weight) on parcel 1: spatial and temporal variations

Profondeur	Humidité rang (%)			Humidité inter-rang (%)			Assèchement avril/septembre (%)	
	avril	septembre	pF 4.2	avril	septembre	pF 4.2	Rang	Inter-rang
30 cm	47,20	35,84	24,70	48,11	35,77	25,36	24,07	25,66
70 cm	44,62	36,33	33,91	42,84	40,69	32,56	18,58	5,02

Tableau V - Variations spatiales de la densité racinaire du sol de la parcelle 1
Spatial variations of soil root density on parcel 1

Profondeur	racines sous le rang (nbre/m ²)				racines sous l'inter-rang (nbre/m ²)				Moyenne totale
	< 1mm	1 à 2 mm	> 2 mm	Moyenne	< 1mm	1 à 2 mm	> 2 mm	Moyenne	
0-50 cm	25	112	22	53	15	83	2	33	43
50-80 cm	167	93	20	93	92	135	8	78	86
80-100 cm	108	28	5	47	75	15	5	32	39
Total	100	78	16	65	61	78	5	48	56

préférentiel s'est donc bien produit sous les rangs et se traduit par un accroissement de 90 % de la résistivité électrique entre avril et septembre. Sous les inter-rangs, le faible assèchement ne provoque qu'une légère augmentation (19 %) de la résistivité électrique (figure 3).

L'alimentation hydrique de la vigne aurait donc lieu principalement dans cet horizon argileux, l'horizon de surface n'intervenant que de façon secondaire puisqu'il ne présente ni dessèchement ni anomalies résistantes sous les rangs. Les comptages racinaires présentés dans le tableau V viennent confirmer cette hypothèse en démontrant l'existence d'un pic racinaire dans l'horizon argileux entre 50 et 80 cm, plus dense sous le rang (93 racines par m²) que sous l'inter-rang (78 racines par m²). Au mois d'août 2003, une nouvelle mesure démontre un accroissement généralisé de la résistivité électrique de l'horizon argileux provoqué par l'assèchement estival, l'accroissement est cependant plus important sous les rangs (figure 2) ce qui confirme la localisation de l'activité racinaire obtenue au mois de septembre 2002.

Cette expérimentation a été répétée sur deux autres parcelles (11 et 111) fortement argilisées et la relation entre la teneur en eau pondérale de l'horizon argileux et sa résistivité électrique a été étudiée. Sur les parcelles 1

et 11 des relations nettes apparaissent (figure 4) ; cependant la parcelle 111 ne présente aucune variation de résistivité électrique significative malgré l'assèchement constaté grâce aux mesures d'humidité du sol. Il est à noter qu'aucune imprécision de mesures souvent liée à des problèmes de contact à l'interface sol-électrode n'a été observée sur cette parcelle au cours des trois campagnes d'expérimentations. Cette absence de relation peut s'expliquer par l'influence d'autres facteurs sur la conductivité électrique du sol. Ces facteurs (carbonatation, concentration de la solution de sol, température et minéralogie des argiles) considérés comme secondaires par rapport à la teneur en eau du sol peuvent cependant se révéler non négligeables selon leur amplitude et conduire à masquer les effets d'un assèchement. En l'occurrence, l'horizon argileux de profondeur de la parcelle 111 présente un pH nettement plus élevé (7,70) que celui des parcelles 1 (4,49) et 11 (4,24) de même qu'un comportement hydrique différent. En effet, les parcelles 1 et 11 présentent respectivement des valeurs d'humidité pondérale allant de 92,49 % et 88,79 % au pF 2 à 32,63 % et 33,99 % au pF 4,2 alors que l'humidité pondérale de la parcelle 111 s'échelonne entre 52,93 % au pF 2 et 21,20 % au pF 4,2. Aucune analyse minéralogique n'a été effectuée sur ces argiles mais l'ensemble de ces éléments conduit à penser que la nature des argiles de la parcelle 111 est différente

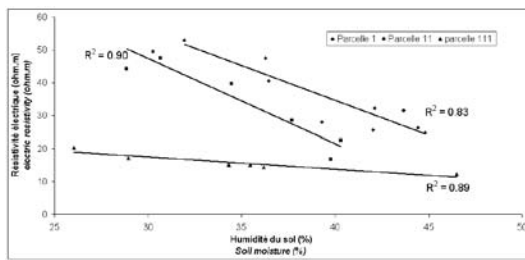


Figure 4 - Relation entre l'humidité des sols développés sur « argile à silex » et leur résistivité électrique

Relationship between soils moisture content of clay flints and their electric resistivity

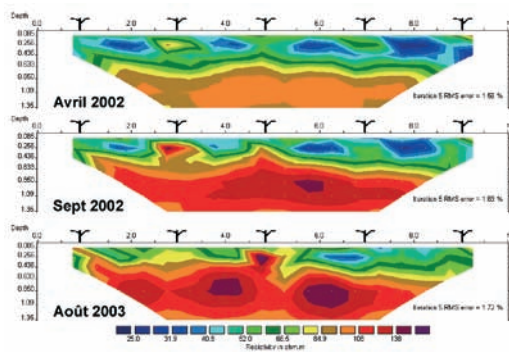


Figure 5 - Sections de résistivité électrique ; suivi spatial et temporel de la parcelle 2

Electric resistivity sections; spatial and temporal monitoring on parcel 2

de celles des parcelles 1 et 11, ce qui expliquerait les différences observées sur la figure 4. Les valeurs de résistivité électrique du sol traduisent donc bien l'interaction de plusieurs facteurs et non pas la seule variation de la teneur en eau. La résistivité électrique mesurée dans l'objectif de déterminer l'état hydrique du sol ne peut donc pas être considérée comme une méthode utilisable en routine sur tous types de substrats pédologiques. Cependant les résultats des parcelles 1 et 11 démontrent qu'il est tout de même possible d'établir au champ une relation résistivité/humidité lorsque les conditions sont favorables. Si cette méthode présente bien entendu des limites d'utilisation liées à la réponse du sol ou à la météorologie, elle demeure en conditions favorables d'un intérêt certain pour obtenir des renseignements sur l'état hydrique des sols sans perturber le milieu, ce qui n'est pas le cas des autres techniques actuellement utilisées.

2) Milieu « craie sablo-glaucconieuse » (parcelle 2)

a) Avril 2002

La section de résistivité électrique vraie inversée de la parcelle 2 (figure 5) permet de différencier les trois

horizons de sol observés lors de la réalisation du profil pédologique. Sur le premier horizon, des discontinuités latérales de résistivité électrique sont nettement observables, les zones d'anomalie résistante se trouvent sous les rangs. Cette différenciation ayant lieu dans l'horizon de surface, il est impossible de conclure que les anomalies résistantes proviennent de la seule différence d'humidité observée entre les rangs (26,65 %) et les inter-rangs (29,55 %) (tableau VI), d'autant que celle-ci reste relativement faible. Les différences de résistivité électrique sont essentiellement dues au tassement de l'inter-rang par le passage répété des machines, en effet la diminution de la porosité provoquée par le compactage du sol induit une quantité d'air moins importante ce qui facilite la conduction électrique par rapport aux milieux plus aérés situés sous les rangs. Les couches de résistivité électrique correspondant à la craie (craie tendre puis craie indurée) sous-jacente ne font pas ressortir de variations latérales de résistivité.

b) Septembre 2002

Les mesures effectuées au mois de septembre 2002 démontrent une augmentation générale de la résistivité électrique du sol provoquée par l'assèchement estival. Cette augmentation de résistivité électrique est nettement observable dans les horizons de craie et correspond effectivement à une baisse importante de son humidité (tableau VI). La figure 6 représentant les variations relatives de la résistivité électrique entre avril et septembre permet de comparer plus finement l'évolution du profil, des zones nettement plus résistantes apparaissent sous les rangs. Les mesures d'humidité démontrent l'existence d'une relation entre ces anomalies résistantes observées et l'assèchement du sol sous les rangs (tableau VI). En effet, alors que l'humidité sous les inter-rangs ne diminue en moyenne que de 20 % entre avril et septembre dans le premier horizon de craie friable, l'humidité des rangs diminue elle de près de 42 %. Un assèchement préférentiel s'est donc bien produit sous les rangs, il se traduit par un accroissement de la résistivité électrique de 73 % entre avril et septembre. Sous les inter-rangs, l'assèchement moins conséquent ne provoque qu'une augmentation de 16 % de la résistivité électrique (figure 6).

L'assèchement supplémentaire situé sous les rangs et dans le premier niveau de craie friable correspond donc au prélèvement hydrique effectué par les racines de la vigne qui sont présentes en plus forte densité dans cette zone (tableau VII). L'anomalie résistante associée à ce dessèchement et facilement spatialisable sur la section de résistivité peut alors être définie comme la zone d'activité racinaire principale de la vigne.

La spatialisation de l'activité racinaire de la vigne par résistivimétrie électrique permet d'indiquer que l'ali-

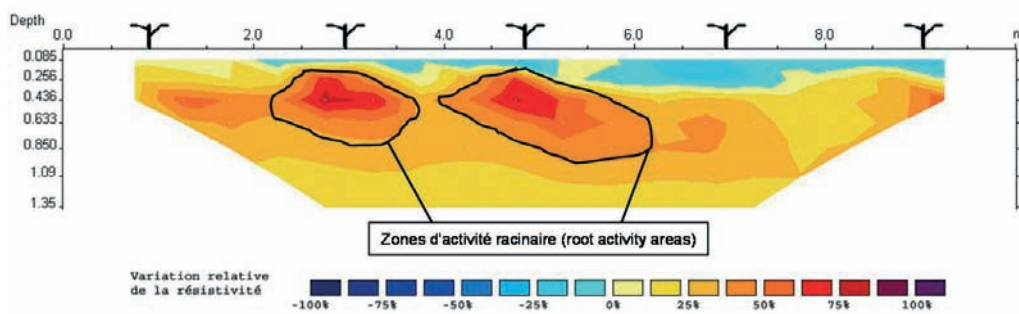


Figure 6 - Section de variation relative de la résistivité électrique de la parcelle 2 entre avril et septembre
 Section of relative resistivity variation on parcel 2 between April and September

Tableau VI - Humidité pondérale du sol de la parcelle 2 : Variations spatiales et temporelles
 Soil moisture content (% in weight) on parcel 2: spatial and temporal variations

Profondeur	Humidité rang (%)			Humidité inter-rang (%)			Assèchement avril/septembre (%)	
	avril	septembre	pF 4.2	avril	septembre	pF 4.2	Rang	Inter-rang
30 cm	26,65	23,22	13,98	29,55	25,58	13,14	12,87	13,42
70 cm	31,33	18,24	12,48	31,39	25,00	12,46	41,79	20,36
100 cm	28,54	17,89	11,18	26,91	19,95	12,36	37,33	25,88

Tableau VII - Variations spatiales de la densité racinaire du sol de la parcelle 2
 Spatial variations of soil root density on parcel 2

Profondeur	racines sous le rang (nbre/m ²)				racines sous l'inter-rang (nbre/m ²)				Moyenne totale
	< 1mm	1 à 2 mm	> 2 mm	Moyenne	< 1mm	1 à 2 mm	> 2 mm	Moyenne	
0-55 cm	267	131	22	140	544	124	9	226	183
55-80 cm	650	95	10	252	450	65	0	172	212
80-100 cm	671	14	9	231	486	57	3	182	207
Total	529	80	14	208	493	82	4	193	200

mentation hydrique de la vigne située sur la parcelle de craie s'effectue principalement à l'interface de l'horizon organique et de la craie altérée. Les mesures démontrent un assèchement intense du sol et de la craie pendant la période estivale, mais les valeurs d'humidité restent toujours au dessus de la valeur du point de flétrissement permanent, même au niveau de la zone d'activité racinaire principale. Le sol d'argile à silex est globalement plus humide que celui développé sur la craie, son assèchement estival est également moins important mais il reste cependant suffisant pour atteindre les valeurs du point de flétrissement permanent de la vigne au niveau de la zone d'activité racinaire située dans l'horizon argileux entre 50 et 80 cm.

Les mesures d'humidité et de résistivité électrique réalisées sur le sol de ces deux parcelles expérimentales mettent donc en évidence une différence de fonctionnement hydrique du système sol-vigne. Le milieu craie propose

une alimentation hydrique de surface, la contrainte hydrique estivale peut être importante, mais aucune rupture d'alimentation ne semble être observée ; ce phénomène peut s'expliquer par la forte colonisation racinaire observée dans les premiers centimètres de craie souvent altérés et bénéficiant d'une relative humidité générée par la circulation hydrique capillaire. Au contraire, le milieu « argile à silex » pourtant plus humide et proposant une alimentation hydrique plus profonde paraît pouvoir être plus stressant pour la vigne lors de millésimes secs. En effet, les valeurs d'humidité mesurées dans la zone d'activité racinaire sont relativement proches de celles mesurées au point de flétrissement permanent de la vigne.

Ces premiers résultats démontrent qu'il est possible de suivre la dynamique hydrique du système sol-vigne par des mesures de résistivité électrique. Cette méthode non invasive permet de ne pas déstructurer le sol et pré-

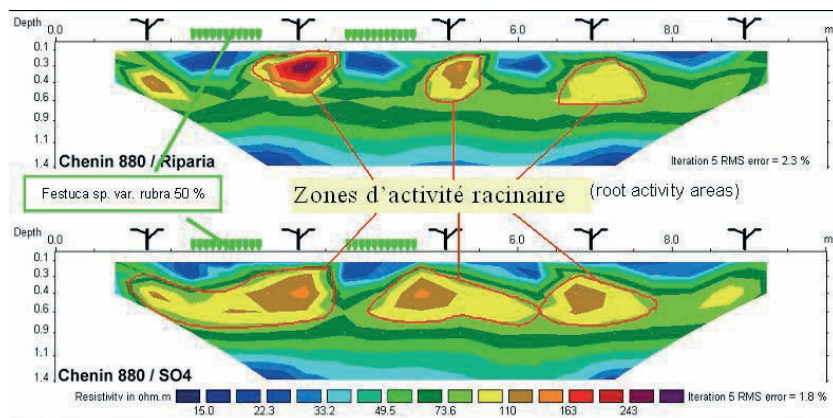


Figure 7 - Sections de résistivité électrique ; suivi spatial des effets de l'enherbement et du porte-greffe
Electric resistivity sections; spatial monitoring of cover crop and rootstock effects

sente l'avantage d'une visualisation en deux dimensions, fondamentale pour les études de dynamique des fluides.

II - EFFET DES PRATIQUES VITICOLES SUR L'ACTIVITÉ RACINAIRE DE LA VIGNE

La méthode des panneaux électriques a également été utilisée pour évaluer l'influence de certaines pratiques viticoles sur le fonctionnement de la vigne. Les résultats présentés dans le paragraphe suivant concernent plus précisément les effets de l'enherbement et du type de porte-greffe sur l'activité racinaire de la vigne.

Les mesures de résistivité électriques ont été effectuées sur Cabernet franc et Chenin. Seuls les résultats des deux panneaux électriques sur Chenin (un sur porte-greffe Riparia et l'autre sur SO4, positionnés de façon à intégrer une modalité enherbée et une modalité désherbée) sont présentés dans cette étude mais les données obtenues sur le Cabernet franc sont similaires et les conclusions de ce travail peuvent s'appliquer aux deux cépages.

1) Effets du porte-greffe sur l'activité racinaire de la vigne

Des variations latérales de résistivité électriques sont visibles sur les deux sections verticales réalisées sous le cépage Chenin (figure 7), les zones les plus résistantes, appelées anomalies électriques positives, correspondent aux zones d'activité racinaire de la vigne et traduisent un assèchement relatif du sol. Les zones d'activité racinaire principale du Riparia sont restreintes et situées majoritairement sous les rangs et à faible profondeur (0-60 cm), contrairement à celles du SO4 qui semblent être plus diffuses puisqu'elles s'étendent jusque sous les inter-rangs et se développent plus profondément (0-80 cm). Pour chaque modalité d'entretien du sol étudiée, la résistivité électrique mesurée au sein des zones d'activité racinaire est toujours

plus importante pour le porte-greffe Riparia. La zone d'activité racinaire du porte-greffe SO4 étant plus diffuse que celle du Riparia, le volume du sol exploité est donc plus grand et l'assèchement lié à l'alimentation hydrique de la vigne y est alors relativement moins important ce qui induit des valeurs de résistivité électrique plus faibles que celles observées au niveau du Riparia. Les zones d'activité racinaire de la vigne greffée sur Riparia étant plus petites et relativement plus sèches que celles de la vigne greffée sur SO4, la contrainte hydrique, représentée par l'accroissement de la résistivité électrique, sera plus importante sous la modalité Riparia.

Les résultats obtenus sont tout à fait cohérents par rapport aux connaissances actuelles sur le fonctionnement de ces deux porte-greffes plantés en milieu vigoureux. En effet, l'excès de vigueur souvent mentionnée du porte-greffe SO4 par rapport au Riparia (Minet *et al.*, 2000 ; Pouget et Delas, 1989) peut s'expliquer, sur cet essai, par la différence de contrainte hydrique observée par résistivimétrie électrique.

Afin de mettre en relation les mesures de résistivité électrique du sol et le profil racinaire réel de la vigne, des comptages précis de racines ont été effectués par ouverture de fosses pédologiques sur cépage Cabernet franc. Ces comptages (tableau VIII) confirment la présence d'un profil racinaire de surface situé préférentiellement sous le rang pour la modalité Riparia alors que les racines issues du porte-greffe SO4 sont plus grosses et descendent de façon plus latérale (sous l'inter-rang) et plus profonde dans le sol.

2) Effets de l'enherbement sur l'activité racinaire de la vigne

Les effets du mode d'entretien des sols et son interaction avec le type de porte-greffe sur l'activité racinaire

Tableau VIII - Effet du porte greffe sur la densité racinaire de la vigne : comparaison Riparia/SO4
Rootstock effect on grapevine root density : comparaison Riparia/SO4

Profondeur	Porte-greffe	racines sous le rang (nbre/m ²)				racines sous l'inter-rang (nbre/m ²)				Moyenne totale
		< 1mm	1 à 2 mm	> 2 mm	Moyenne	< 1mm	1 à 2 mm	> 2 mm	Moyenne	
0-60 cm	Riparia	282	98	42	141	67	16	0	27	84
	SO4	204	36	38	93	58	7	7	24	58
60-85 cm	Riparia	200	70	10	93	160	50	0	70	82
	SO4	300	40	10	117	210	40	10	87	102
85-130 cm	Riparia	200	15	0	72	262	0	0	87	79
	SO4	246	15	3	88	305	28	6	113	101
Moyenne Riparia		227	61	17	102	163	22	0	62	82
Moyenne SO4		250	30	17	99	191	25	8	74	87

Tableau IX - Effet de l'enherbement sur la densité racinaire de la vigne : comparaison enherbé/désherbé
Effect of inter row grassing on grapevine root density : comparaison grass/no grass

Profondeur	Modalités	racines sous le rang (nbre/m ²)				racines sous l'inter-rang (nbre/m ²)				Moyenne totale
		< 1mm	1 à 2 mm	> 2 mm	Moyenne	< 1mm	1 à 2 mm	> 2 mm	Moyenne	
0-60 cm	Enherbé	282	98	42	141	67	16	0	27	84
	Désherbé	74	38	26	46	142	9	8	53	49
60-85 cm	Enherbé	200	70	10	93	160	50	0	70	82
	Désherbé	210	30	0	80	200	30	0	77	78
85-130 cm	Enherbé	200	15	0	72	262	0	0	87	79
	Désherbé	62	0	0	21	244	22	0	89	55
Moyenne Enherbé		227	61	17	102	163	22	0	62	82
Moyenne Désherbé		115	23	9	49	195	20	3	73	61

de la vigne sont également observables grâce aux mesures de résistivité électrique et à leur représentation sous forme de section en deux dimensions (figure 7).

L'enherbement semble provoquer une augmentation plus importante de la résistivité électrique sous les rangs des modalités enherbées que sous ceux des modalités désherbées. La concurrence de la fétuque rouge au niveau de l'alimentation hydrique provoque un assèchement supplémentaire dans les zones d'activité racinaire de la vigne ce qui induit une plus forte anomalie positive par rapport aux zones d'activité racinaire situées sous les modalités désherbées. L'impact de l'enherbement est plus important chez Riparia que chez SO4 puisque l'accroissement relatif de la résistivité électrique des zones d'activité racinaire entre les modalités désherbée et enherbée est plus fort chez Riparia (+ 200 %) que chez SO4 (+ 130 %). La zone d'activité racinaire du SO4 étant plus profonde que celle du Riparia, elle subit donc de façon moins importante la contrainte hydrique développée sur les horizons de surface par la fétuque rouge.

Les comptages racinaires réalisés lors de l'ouverture des fosses (tableau IX) indiquent une augmentation du nombre de racines sous les rangs des modalités enherbées. Ceci s'explique par la contrainte hydrique induite par la fétuque rouge provoquant une diminution du développement racinaire latéral et une concentration des racines sous le rang déjà mise en évidence dans d'autres travaux

(Celette *et al.*, 2005 ; Morlat et Jacquet, 2003). L'assèchement est donc plus intense sous les rangs de la modalité enherbée que sous ceux de la modalité désherbée ce qui provoque l'augmentation plus importante de la résistivité électrique observée sur la modélisation des sections en deux dimensions. Si Celette *et al.* (2005) démontrent que les inter-rangs enherbés sont plus humides en début de cycle végétatif de la vigne (meilleure infiltration hivernale par rapport aux sols nus), ils indiquent également que l'assèchement est plus important sous les rangs des modalités enherbées que sous les rangs des modalités désherbées entre le mois de juin et la période de maturité ce qui confirme nos observations réalisées au cours de cette période.

La spatialisation de l'activité racinaire de la vigne par tomographie de résistivité électrique permet de visualiser de façon non destructrice les zones principales de fonctionnement des racines. Les effets de différents porte-greffe sur le développement racinaire dans un type de sol précis peuvent donc être visualisés sans ouverture de fosses et donc sans perturbation du milieu. L'impact de l'enherbement sur la disponibilité de l'eau au niveau des racines de la vigne semble aussi pouvoir être étudié par l'intermédiaire des panneaux électriques. Ces résultats démontrent l'intérêt de l'utilisation de la résistivimétrie électrique dans les suivis expérimentaux concernant l'impact des pratiques agro-viticoles sur le développement racinaire et l'alimentation hydrique de la vigne.

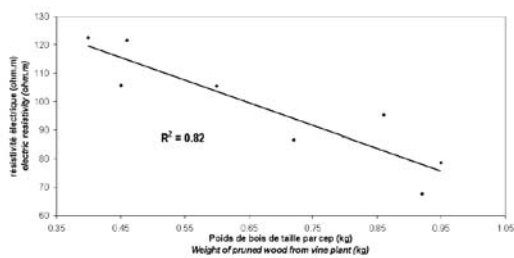


Figure 8 - Relation entre la résistivité électrique du sol et le poids de bois de taille

Relationship between soil electric resistivity and weight of pruned wood

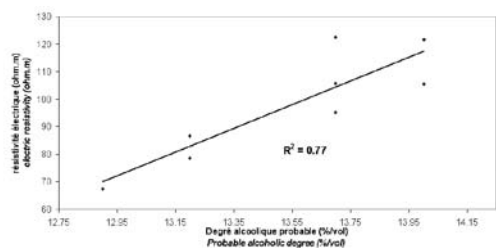


Figure 9 - Relation entre la résistivité électrique du sol et degré alcoolique potentiel du moût

Relationship between soil electric resistivity and must potential alcoholic degree

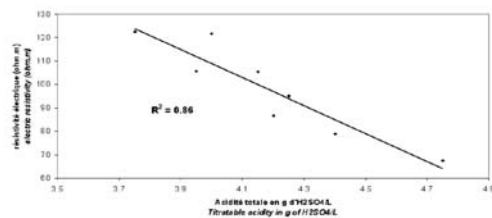


Figure 10 - Relation entre la résistivité électrique du sol et l'acidité totale du moût

Relationship between soil electric resistivity and must titratable acidity

3) Résistivité électrique du sol et fonctionnement de la vigne : une mise en relation est elle possible ?

La résistivité électrique d'un sol dépend principalement de sa texture, de son humidité et de sa température, ces trois variables sont également reconnues comme influençant directement le fonctionnement végétatif de la vigne et leurs relations sont le plus souvent étudiées une à une grâce aux méthodes de mesures classiques. Ce constat étant dressé et en considérant que la valeur de la résistivité électrique d'un sol est représentative de l'état de ces variables au moment de sa mesure, se pose alors

la question de savoir si cette mesure peut être utilisée comme un indice général du sol pouvant être relié au fonctionnement végétatif de la vigne.

La difficulté de la mise en relation entre des variables écophysologiques de la vigne et la résistivité électrique d'un sol résulte dans la pertinence de la localisation des mesures électriques. Le sol est en effet représenté par une succession d'horizons de résistivité électrique différente, plus ou moins épais, ce qui complique le choix de la valeur retenue pour représenter la résistivité électrique générale du sol. Le choix d'une valeur moyenne sur l'ensemble du profil ne paraît pas être judicieux puisqu'il nivellerait l'importance de chaque horizon ainsi que l'effet des transitions entre horizons (différenciation texturale). De plus ce sont les racines qui représentent l'interface entre la vigne et le sol et si celles-ci peuvent s'étendre profondément et coloniser l'ensemble des horizons, les résultats présentés au cours de cette publication démontrent en revanche que l'activité principale de ces racines en terme de prélèvement hydrique est localisée dans des zones précises du sol facilement spatialisables par des mesures de résistivité électrique.

S'il est évident que l'ensemble des horizons intervient dans les relations entre le sol et la vigne (conduction thermique, circulation de l'eau...), le fait qu'une zone précise et identifiable du sol soit le siège principal de l'activité racinaire nous a conduit à utiliser les valeurs de résistivité électrique de cette zone comme représentatives de l'interface sol-vigne.

Pour les huit modalités étudiées sur l'essai enherbement, la zone d'activité racinaire a été spatialisée par résistivimétrie électrique (figure 7) et les mesures de résistivité contenues à l'intérieur de cette zone ont été moyennées pour obtenir une valeur représentative. Les variables écophysologiques à étudier ont été choisies en fonction de leur lien avéré avec certaines variables édaphiques également responsables de la variation de la résistivité électrique des sols. C'est ainsi que le cycle phénologique et le poids de bois de taille ont été mis en relation avec les valeurs de résistivité électrique obtenues sur les différentes modalités. Si aucune relation nette n'est apparue entre les valeurs de résistivité électrique du sol et les variations du cycle phénologique, le poids de bois de taille moyen par souche s'est en revanche révélé être corrélé négativement avec la résistivité électrique du sol (figure 8).

En ce qui concerne la composition de la vendange, c'est l'acidité totale des moûts et les degrés probables mesurés qui semblent pouvoir être mis en relation avec la résistivité électrique de la zone d'activité racinaire (figures 9 et 10).

Au vu de ces premiers résultats et strictement dans les conditions de notre expérimentation, il semble que la

résistivité électrique du sol puisse être utilisée pour expliquer une partie importante de la variation de certains fonctionnements de la vigne et de certaines caractéristiques de la vendange. Ces relations observées entre la résistivité du sol et quelques paramètres de fonctionnement du végétal s'expliquent par leurs liens communs aux variables édaphiques. En effet, la résistivité électrique d'un sol est directement liée aux caractéristiques géo-pédologiques reconnues comme en partie responsables du fonctionnement de la vigne et de la composition de la vendange.

CONCLUSIONS

La résistivité électrique d'un sol traduit l'état et l'interaction de ses principales propriétés au moment de la mesure. La structure d'un sol et son aération, sa texture et son état hydrique ainsi que sa température peuvent être approchés simultanément et de façon intégrative par résistivimétrie électrique. La recherche viti-vinicole et plus particulièrement celle orientée vers l'étude des terroirs viticoles utilise depuis de nombreuses années ces variables édaphiques pour expliquer, en partie, le fonctionnement de la vigne et les différences observées dans la composition de la vendange. Ces variables sont le plus souvent étudiées individuellement et leurs effets sur la vigne sont habituellement considérés en utilisant des modèles additifs peu représentatifs du milieu réel. De plus leurs mesures sont généralement très localisées et nécessitent l'introduction de dispositifs à l'intérieur même du sol perturbant ainsi le milieu d'étude.

Les premiers résultats dont nous disposons démontrent que l'étude de la résistivité électrique des sols peut être complémentaire des méthodes traditionnelles utilisées pour caractériser les variables édaphiques. L'intérêt principal des mesures de résistivité électrique réside dans la non destruction du milieu d'étude, l'appareillage de surface est en effet non invasif et le courant électrique ne perturbe pas la structure du sol. La méthode des panneaux électriques utilisée pour ces expérimentations permet de prospecter un volume de sol important tout en gardant une très forte densité de mesures, contrairement aux méthodes d'études classiques. Si la résistivimétrie électrique est aujourd'hui de plus en plus utilisée dans de nombreux domaines de recherche relatifs aux sols, c'est aussi et surtout grâce aux progrès considérables réalisés en matière de traitements des mesures. Des logiciels spécialisés modélisent les résultats sous forme de coupes en deux dimensions et permettent ainsi une spatialisation des mesures et une représentation visuelle de l'hétérogénéité spatiale d'un sol en matière de texture ou d'humidité ce qui facilite par exemple l'étude de sa dynamique hydrique.

L'innovation principale à retenir suite aux différents résultats présentés dans cette étude reste bien évidem-

ment la possibilité de spatialiser intégralement les zones de dessèchement préférentiel du sol attribué à l'activité racinaire de la vigne en définissant la zone d'influence des racines dans le sol en terme de prélèvement hydrique. La spatialisation de cette activité racinaire par résistivimétrie électrique conduit à une meilleure caractérisation du Réservoir Utilisable en Eau (R.U.E.) du sol tant au niveau de sa taille qu'au niveau de son stock d'eau disponible pour la plante au moment de la mesure. Dans un même sol, plus la zone d'activité racinaire est électriquement résistante, plus son assèchement est intense et plus la contrainte en terme d'alimentation hydrique est forte. En appliquant des protocoles précis mais relativement simples à mettre en place, l'incidence du type de sol, de la saison, du porte-greffe ou des pratiques viticoles sur la disponibilité de l'eau pour la vigne peut être observé et étudié grâce à la résistivimétrie électrique.

Les mesures de résistivité électrique étant liées à l'état général d'un sol (teneur en eau, température, porosité...), il est alors possible de les mettre en relation avec les variables de fonctionnement de la vigne directement influencées par les variables édaphiques. Les premiers résultats observés sur nos parcelles expérimentales en terme de corrélation entre les valeurs de résistivité du sol et certaines variables de fonctionnement de la vigne sont satisfaisantes mais méritent d'être approfondies dans d'autres contextes.

L'aspect intégratif de cette méthode la positionne sur le plan de l'observation de l'influence de l'interaction des variables édaphiques sur le fonctionnement végétatif général de la vigne. Cependant pour expliquer et déterminer le rôle de chaque variable, le recours aux méthodes de mesures spécifiques pour chacune d'entre elles reste encore nécessaire et indispensable. Cette méthode d'étude n'a donc pas pour vocation de remplacer les méthodes déjà existantes mais permet d'introduire un facteur intégratif nouveau et intéressant dans le cadre de la mise en place d'indices globaux relatifs aux sols pour la recherche viti-vinicole.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier J.P. Rossignol de l'Institut National d'Horticulture d'Angers (France, 49) pour le prêt du matériel de résistivimétrie et son soutien technique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENDERITTER Y. and SCHOTT J.J., 1999. Short time variation of the resistivity in an unsaturated soil : the relationship with rainfall. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **4**, p. 37-49.
- CAMPBELL R.B., BOWER C. A. and RICHARDS L.A., 1948. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and

- ion concentration for soil extract. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **13**, p 66-69.
- 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**, p 205-217.
- CELLIER P., JACQUET A., BAUTRAIS P., MORLAT R. et DELANCHY P., 1996. Modélisation du régime thermique des sols de vignobles du Val de Loire : relations avec des variables utilisables pour la caractérisation des terroirs. In : *1er colloque international sur les Terroirs Viticoles*, Angers, p 107-112.
- CHONÉ X., VAN LEEUWEN C., DUBOURDIEU D. and GAUDILLÈRE J.P., 2001. Stem water potential is a sensitive indicator for grapevine water status. *Ann. Bot.*, **87**, p 477-483.
- GAUDILLÈRE J.P., VAN LEEUWEN C. and OLLAT N., 2002. Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *J. Exp. Bot.*, **53**, p 1-7
- GUYOT G., 1999. Estimation de l'évapotranspiration. 149-151. *Climatologie de l'environnement*. Edition Dunod, Paris, 525 p.
- HESSE A., 1964. Prospection géophysique à faible profondeur. Application à l'archéologie. *Thèse de l'Université de Paris*, 133p.
- LOKE M.H. and BARKER R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophys. Prosp.*, **44**, p 131-152.
- Mc NEIL J.D., 1980. *Electrical conductivity of soils and rocks*. Geonics limited, technical note. TN 5.
- MICHOT D., 2003. Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispéculaire pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire. *Thèse*, Université Paris 6, 393 p.
- MICHOT D., DORIGNY A. et BENDERITTER Y., 2001. Mise en évidence par résistivité électrique des écoulements préférentiels et de l'assèchement par le maïs d'un calcisol de Beauce irrigué. *Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, **332**, p 29-36.
- MINET F., ASSELIN C., DUC D., BARBEAU G., COSNEAU M. et BOUVET M.H., 2000. Étude de l'adaptation de dix porte-greffe sur cépage Chenin, en Val de Loire, pour la production de vin de l'A.O.C. « Coteaux du Layon ». *P.A.V.*, **117**, n° 19 p 410-422.
- MORLAT R., 1989. Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Application aux vignobles rouges de Moyenne Vallée de la Loire. *Thèse d'État soutenue à Bordeaux II le 18.12.89*. Tome I : textes, 289 p ; tome II : Annexes, 129 p.
- MORLAT R. and JACQUET A., 2003. Grapevine root system and soil characteristics in a vineyard maintained long-term with or without interrow sward. *Am. J. Enol. Citic.*, **54**, 8.
- MORLAT R. and JACQUET A., 1993. The soil effects on the grapevine root system in several vineyards of the Loire Valley (France). *Vitis*, **32**, P 35-42.
- PANISSOD C., MICHOD D., BENDERITTER Y. and TABBAGH A., 2001. On the effectiveness of 2D electrical inversion results : an agricultural case study. *Geophysical Prospecting*, **49**, p 570-576.
- POUGET R. et DELAS J., 1989. Le choix des porte-greffe de la vigne pour une production de qualité. *Connaissance de la vigne et du vin*, n° hors série.
- RIOU C., PIERI P. et LE CLECH B., 1994. Consommation d'eau de la vigne en conditions hydriques non limitantes. Formulation simplifiée de la transpiration. *Vitis*, **33**, p 109-115.
- SEGUIN G., 1965. Étude de quelques profils de sols de vignoble Bordelais. *Thèse de doctorat 3^e cycle*. Faculté des Sciences de Bordeaux, 107 p.
- TRAMBOUZE W. et VOLTZ M., 1996. Caractérisation des relations hydriques sol/vigne dans un terroir languedocien. In : *1er colloque international sur les Terroirs Viticoles*, Angers, p 164-169.
- VAN LEEUWEN C., TREGOAT O., CHONÉX., 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. OIV*, **76** - 867-868, p 367-379.
- VAN LEEUWEN C., LERICH O., RENARD R., TREGOAT O. and ALLA P.L., 2000. Micromorphometric changes in trunk diameter in relation to mild water stress in field grown vines. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **34**, n° 2, p 41-47.
- 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-Émilien, 1990). *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **28**, n° 2, p 81-110.
- WARD S. H., 1990. Resistivity and induced polarization methods. *In geotechnical and environmental geophysics*, vol. 1, Ward, S.H., Editor, Society of Exploration Geophysicist, p 147-190.

Manuscrit reçu le 29 septembre 2005 ; accepté pour publication, après modifications le 30 mars 2006