



Evaluation du suivi de l'enracinement d'une culture annuelle par résistivité électrique

Mémoire pour l'obtention du Master 2 « Hydro 3
Hydrogéologie ~ Hydrobiogéochimie ~ Hydropédologie »

CAMUEL Cyrille

04/09/2015

Stage du 01/02/2015 au 31/07/2015 ; soutenance le 04/09/2015

Encadrement :

**COUSIN Isabelle, directrice de recherche INRA
SEGER Maud, ingénieure d'études INRA**



REMERCIEMENTS :

Je remercie Catherine Hénault, directrice de l'unité de Sciences du Sol de l'INRA d'Orléans, pour m'avoir accueilli au sein de l'unité.

Je tiens à remercier Isabelle Cousin et Maud Séger qui ont encadré mon stage et m'ont fait confiance tout au long de celui-ci, je leur en suis très reconnaissant. Isabelle, malgré ton emploi du temps chargé tu as su rester disponible pour m'orienter dans mon travail et me permettre d'avancer. Bien sûr, je n'oublierai pas ton mind-map et tes fameux copier-coller plus qu'utiles. Maud, sans toi je crois que j'aurais été relativement perdu lors de la prise en main de mon travail, tu as été très pédagogue et bonne conseillère. Je pense que les petits moments de stress qu'on a pu avoir m'ont permis de rester concentré tout au long du stage. Merci à toutes les deux pour m'avoir accompagné et ce, même après le stage. Merci à Christian Walter pour m'avoir donné le contact qui m'a permis de m'adresser à l'INRA d'Orléans et de travailler dans cette structure.

Mes remerciements s'adressent ensuite à l'ensemble du personnel de l'INRA qui m'a accompagné sur le terrain par tous les temps et toutes les températures : Christian Le Lay, Didier Laloua, Ghislain Girot, Guillaume Giot et Pierre Courtemanche. Guillaume je te suis reconnaissant pour le temps que tu as passé à traiter des données pour moi, j'espère que les Bérurier Noir t'accompagnaient pour faire passer le temps plus vite. Pierre, nos pique-niques ainsi que nos parties de ping-pong resteront dans ma mémoire, je te remercie pour ta gentillesse et ta disponibilité.

Jamais je n'avais vu un tel entêtement face à un problème, je tiens à remercier Charlène Perrier pour le service assistance ArcGis de l'INRA. Charlène tu as été d'une grande aide, encore merci pour m'avoir écouté dans mes moments de doute.

Je tiens également à remercier Nicolas Cavan. Nicolas le jour de notre arrivée je me suis dit que je ne serai pas le seul nouveau et finalement j'ai rencontré bien plus que ça, je suis heureux d'avoir fait ta connaissance.

Que serait-il advenu de mon stage sans les conseils avisés de Jordan Bureau qui a partagé mon bureau pendant ces six mois. Jordan je pense que j'ai quand même contribué à la bonne continuation de ta thèse, après tout on avait bien le bureau des doctorants. Je te remercie pour tes corrections et ton aide tout au long de mon séjour à l'INRA.

Je ne pensais pas lors de mon arrivée que je participerais à la création de la team cancer avec Florent Lelu et Vanille Thibault, tenez bon la team est entre vos mains.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont participé à la réussite de mon stage de près et de loin ; je remercie l'ensemble du personnel du bâtiment carto. Je remercie mes parents et ma sœur pour leur soutien, Alicia merci pour ta relecture et tes conseils lors de la dernière ligne droite.

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont contribué à mon bien être pendant le stage, Sébastien, Baptiste, Chloé, Anne-Sophie, Antoine, Perrine, Mercedes, Eugénie, Catherine, Hakima, Laëtitia... toutes ces pauses cafés, ces volleys à l'île Charlemagne, ces babys foots et ces ping-pongs et surtout la bonne ambiance générale m'ont permis de passer six excellents mois à l'INRA.

Résumé :

La dynamique temporelle d'enracinement des végétaux aux cours des cycles culturaux est un paramètre d'importance pour les modèles de bilan hydrique des sols, en particulier pour calculer la réserve utile à un moment donné. Dans ce contexte, les outils de géophysique, qui permettent de caractériser les sols sans les perturber, pourraient constituer des méthodes d'intérêt pour suivre la croissance racinaire des plantes au cours du temps. L'objectif de l'étude présentée dans ce rapport est d'évaluer la potentialité de l'outil de résistivité électrique pour caractériser l'évolution de l'enracinement d'une culture. Pour cela, une expérimentation *in situ* a été réalisée pendant quatre mois sur une parcelle de blé. A différents stades de croissance de la culture, des mesures de résistivité électrique par tomographie 2D ont été couplées à des observations de l'enracinement grâce à la méthode du profil racinaire.

Les premiers résultats sont encourageants, une relation linéaire croissante apparaît entre les résistivités électriques et la densité de racines : sur deux dates, les zones de plus forte densité racinaire présentent des résistivités plus élevées en moyenne que les zones présentant une densité de racine moindre. Néanmoins des traitements complémentaires sont encore nécessaires pour consolider ces résultats sur d'autres stades culturaux.

Mots clés : résistivité électrique, racines, géophysique, sol, cultures, eau.

Abstract:

The temporal dynamic of root system growth is a parameter of interest for soil hydric models, especially to evaluate the field capacity. The geophysical tools enable soil characterization without disturbing them and could be used to monitor root growth of plants. The objective of this study is to evaluate the potential of the electrical resistivity tool to characterize the temporal evolution of a culture root system. For this purpose, an *in situ* experiment was carried out for four months on a plot of wheat. At different phenological stages, 2D electrical resistivity tomographies and roots maps were performed at the same times and same locations.

The first results are promising: a positive linear relationship is observed between, root density and electrical resistivity. However, further data processing are needed to solidify this observation for another phonological stages.

Keywords: Electrical resistivity, roots, geophysics, soil, crops, water.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. La résistivité électrique – Définition et paramètres d’influence	3
2.1. Définition et principe de la mesure	3
2.2. Facteurs influençant la résistivité électrique des sols	3
2.2.1. Nature du sol et porosité	3
2.2.2. La teneur en eau	4
2.2.3. La température	4
2.3. Acquisition des données	4
3. Matériel et méthode.....	5
3.1. Dispositif expérimental.....	5
3.2. Suivi des paramètres physiques	7
3.2.1. Teneur en eau et température	7
3.2.2. Masses volumiques.....	7
3.3. Caractérisation du fonctionnement du sol par résistivité électrique.....	7
3.3.1 Dispositif de mesure	7
3.3.2. Evaluation de la résistivité « vraie »	8
3.4. Suivi de l’enracinement de la culture	9
3.5. Comparaison des données de résistivité et des données d’enracinement.....	10
4. Résultats.....	10
4.1. Suivi des paramètres physiques	10
4.2. Suivi de l’évolution de l’enracinement	12
4.3. Suivi du fonctionnement du sol par résistivité électrique.....	13
4.4. Comparaison de la résistivité électrique et de l’enracinement.....	14
5. Discussion	17
Conclusion.....	19
Bibliographie.....	20

Index des illustrations :

Figure 1 Localisation du site expérimental.....	5
Figure 2 Photographie du profil de sol sur la parcelle d'étude. Le premier horizon (0-25 cm) est organo-minéral avec la présence de nombreuses racines ; les horizons 2 (25-40 cm) et 3 (40-55 cm) sont des horizons structuraux ; l'ensemble repose sur un horizon cryoturbé (horizon 4, 55 cm et plus) avec des intrusions de lentilles de calcaire gris.	6
Figure 3 Présentation du dispositif expérimental.....	6
Figure 5 Position des sondes en sol cultivé.....	7
Figure 4 Position des sondes en sol nu.....	7
Figure 6 Dispositif de mesure.....	8
Figure 7 Grille de 50 cm de côté avec une maille de 2 cm par 2 cm utilisée pour les profils racinaires.....	9
Figure 8 Confrontation de la résistivité électrique inversée et des cartographies racinaires. Les points noirs symbolisent la présence de racine (maillage 2 cm x 2 cm).....	10
Figure 9 Evolution temporelle de la teneur en eau du sol cultivé (figure de gauche) et du sol nu (figure de droite) au cours de l'expérimentation. Teneurs en eau mesurées par des sondes TDR avec correction par les mesures ponctuelles gravimétriques.....	11
Figure 10 Evolution temporelle de la température du sol au cours de l'expérimentation sur sol cultivé (figure de gauche) et sur sol nu (figure de droite) Suivi des températures toutes les deux heures pendant la totalité de l'expérimentation.....	12
Figure 11 Profils racinaires 1D observés à 4 dates pendant le cycle cultural.....	12
Figure 12 Carte racinaires aux dates du 1 ^{er} avril et du 12 mai (100 cm de large sur 74 cm de profondeur). La présence de racines est représentée par les cases grisées, l'apparition de l'horizon cryoturbé est représentée en marron. Chaque carré représente une maille de la grille de 2 * 2 cm.....	13
Figure 13 Evolution de la résistivité au cours de l'expérimentation. Cas de la ligne 4. Résistivités apparentes (colonne de gauche), résistivités inversées et corrigées par la température par inversion en mode time-lapse (colonne de droite). Les quatre profils racinaires (notés PR) sont notés en face des modèles électriques à la même date.....	14
Figure 14 Comparaison des résistivités électriques inversées et des profils racinaires aux dates du 1 avril et du 12 mai. La présence de racine est symbolisée par les points noirs.	15
Figure 15 Comparaison entre les données de résistivité électrique inversée (à gauche) et les proportions de racines par maille de résistivité électrique inversée à droite aux dates du 1er avril et du 12 mai.....	16
Figure 16 Représentation box plot de l'évolution de remplissage des cases du maillage de résistivité vrai entre le 1 avril 2015 (graphique de gauche) et le 12 mai 2015 (graphique de droite). Chaque boîte représente une classe de proportion de racine par maille.....	16
Figure 17 Suivi de la proportion moyenne de racine en fonction de la résistivité : données du 1 avril et du 12 mai.....	17

1. Introduction

Les changements climatiques actuels entraînent la modification de l'équilibre des grands cycles physico-chimiques. Parallèlement, le stress hydrique augmente tout autour du globe. Les régions les plus touchées par ce manque d'eau sont les grandes plaines céréalières qui représentent les principales réserves alimentaires du monde (FAO 2006). Avec une population mondiale croissante, un des défis majeurs pour les années à venir sera de maintenir la productivité des cultures en prenant en compte le caractère plus aléatoire des apports en eau.

Un enjeu important consiste donc à évaluer, de façon précise, la quantité d'eau que le sol peut stocker et restituer aux plantes pour leur croissance et la création de biomasse végétale. Cette quantité constitue la Réserve Utile (RU). Elle dépend à la fois de caractéristiques intrinsèques du sol, comme sa texture, sa teneur en matière organique, ou sa structure, mais également de la plante qui l'utilise. En effet, selon ses caractéristiques physiologiques, la plante peut extraire de l'eau retenue plus ou moins fortement par le sol (Gobat *et al.*, 2003) – jusqu'à un potentiel hydrique appelé « point de flétrissement permanent » - mais elle utilise également le stock d'eau du sol uniquement sur sa profondeur d'enracinement. Comme celle-ci varie au cours du temps, la connaissance de la dynamique temporelle de l'enracinement d'une culture est un élément essentiel de l'évaluation de la Réserve Utile du sol. De plus, les connaissances actuelles mettent en évidence des fonctionnements hydriques différenciés entre la rhizosphère et l'ensemble du sol (Young, 1995), car les racines jouent un rôle sur la rétention en eau du milieu. Pendant les périodes sèches, la teneur en eau dans le sol proche des racines est plus importante que sur le reste du profil, car les racines primaires sécrètent des mucilages, exsudats racinaires composés de polysaccharides dont l'une des propriétés est d'augmenter la rétention en eau dans le sol (Chenu, 1993 ; Young, 1995). Lors d'une pluie, la teneur en eau de l'ensemble du sol augmente plus rapidement que celle de la rhizosphère mais, après plusieurs heures, la teneur en eau de la rhizosphère devient de nouveau supérieure à celle de l'ensemble du profil (Carminati *et al.*, 2010). A une échelle très fine, les racines des plantes modifient donc la Réserve Utile du sol (Doussan *et al.*, 2015), mais c'est la profondeur du sol explorée par les racines qui reste le paramètre de premier ordre pour évaluer correctement la RU du sol.

De nombreuses études ont concerné le suivi et la modélisation de l'évolution du système racinaire (Pierret *et al.*, 2007 ; Doussan *et al.*, 2003 ; Dunbabin *et al.*, 2013). Doussan *et al.*, (2003) ont décrit les étapes de colonisation du système racinaire et défini plusieurs grands types d'interactions entre les racines et leur milieu. Ils exposent que l'interaction entre le développement des racines et la structure du sol dans lequel elles croissent est la plus importante. Mais des interactions intra ou interspécifiques existent entre les plantes elles-mêmes et peuvent modifier la dynamique de l'enracinement. Chez les légumineuses, par exemple, les interactions entre les racines et des mycorhizes permettent à la plante d'accéder à des pores de plus petites tailles et d'interagir plus

facilement avec le milieu (Doussan *et al.*, 2003). Les modèles de croissance racinaire basés sur le concept d'architecture fonctionnelle de la racine permettent d'intégrer à la fois l'hétérogénéité du sol et ces interactions complexes entre la structure du sol, son fonctionnement et les racines pour décrire la croissance des racines dans des environnements variables (Pierret *et al.*, 2007 ; Dunbabin *et al.*, 2013). Cependant, ces modèles doivent être enrichis et validés par des études de terrain qui décrivent le fonctionnement de la racine *in situ*. Un enjeu important consiste donc à développer des outils de caractérisation non destructifs du milieu permettant de décrire la dynamique de l'enracinement d'une culture. Une piste consiste à explorer les potentialités des outils de la géophysique de sub-surface pour caractériser la croissance des racines.

Parmi ces outils, les méthodes de mesures par résistivité électrique permettent d'étudier et de mieux comprendre les mécanismes à l'interface sol / racine. Schlumberger introduisit les méthodes électriques dans ses travaux à partir de 1912 afin d'étudier le comportement des roches de sub-surface ; ses méthodes ont ensuite été adoptées par les compagnies pétrolières (Meyer de Stadelhofen, 1991) et, dans le domaine des sciences du sol, la première utilisation de cet outil date de 1938, dans le cadre de prospections archéologiques (Bevan, 2000). Depuis, de nombreuses études ont analysé la faisabilité de prospections électriques pour caractériser le sol et son fonctionnement. Par exemple, Séger *et al.*, (2009) puis Besson *et al.*, (2013) ont caractérisé, par résistivité électrique, la dynamique de l'évolution de zones de sol tassé par la répétition de passages d'engins sur la surface. Michot *et al.*, (2003) ont suivi l'évolution de la teneur en eau d'un sol cultivé et irrigué et ont déterminé que le système racinaire du maïs joue un rôle majeur sur la redistribution de l'eau après infiltration. Avec des méthodes de mesure de résistivité électrique, Srayeddin et Doussan (2009) ont défini des zones d'absorption d'eau par les racines. Cependant, ces travaux ne montrent pas directement le lien entre dynamique d'enracinement et résistivité électrique.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est donc d'évaluer la potentialité de l'outil de résistivité électrique pour caractériser l'évolution de l'enracinement d'une culture de blé, en vue de produire un modèle de dynamique d'enracinement permettant d'améliorer l'évaluation de la dynamique temporelle de la RU. Le travail proposé ici, s'inscrit dans le cadre du projet ANR RUEdesSOLS¹, et a été conduit au sein du laboratoire Sciences du Sol du centre INRA Val de Loire à Orléans. Le travail réalisé a consisté en une expérimentation de terrain de plusieurs mois (mars à juillet 2015), au cours de laquelle des suivis de fonctionnement d'un sol cultivé en blé par imagerie de résistivité électrique ont été couplés à des observations de l'enracinement. Après une présentation de la mesure de la résistivité électrique du sol et des facteurs qui l'influence, je présenterai, au chapitre 3 le

¹ Ce projet propose de référencer, évaluer et coupler différentes approches, (mesures de laboratoire, suivi de terrain, calculs par fonction de pédotransfert, Digital Soil Mapping) d'estimation de la RU pour proposer des méthodologies pouvant être utilisées dans des contextes agro-pédoclimatiques variés à des échelles locales et régionales.

dispositif expérimental que j'ai mis en place puis je présenterai et analyserai les résultats que j'ai obtenus au cours de ce stage (chapitres 4 et 5).

2. La résistivité électrique – Définition et paramètres d'influence

2.1. Définition et principe de la mesure

La résistivité électrique d'un milieu représente sa capacité à limiter le passage du courant électrique dans celui-ci. En termes mathématiques, c'est la résistance ohmique (R en ohm) d'un cylindre de section S (en m^2) et de longueur L (en m) :

$$\rho = \frac{S}{L} R = \frac{1}{\sigma}$$

Avec $R = U/I$ (U , tension en volt et I , intensité en ampère). Son inverse, la conductivité σ s'exprime en siemens par mètre ($S.m^{-1}$).

Les mesures de résistivité électrique d'un sol sont réalisées en injectant, grâce à un générateur, un courant électrique à la surface de ce sol puis en mesurant la différence de potentiel qui en résulte. La mesure est toujours obtenue de la même façon : le dispositif comporte quatre électrodes, deux électrodes d'injection du courant (A et B) dont on connaît l'intensité et 2 électrodes mesurant la différence de potentiel ΔV (M et N). Ces deux informations permettent de calculer la résistance ohmique du milieu prospecté. En appliquant un coefficient géométrique K dépendant de la géométrie des électrodes on calcule la résistivité électrique « apparente » du milieu, c'est-à-dire la résistivité électrique du volume concerné par le passage du courant électrique.

2.2. Facteurs influençant la résistivité électrique des sols

Le déplacement des charges électriques dans le sol dépend de nombreux facteurs. On distingue les facteurs invariants sur le court terme : la nature du sol (nature et quantité d'argileux particulièrement), la capacité d'échange cationique, la charge en éléments grossiers, de ceux considérés comme des variables conjoncturelles : la teneur en eau, la structure (compaction ou travail du sol par exemple), le pH, la matière organique, la teneur en cations, et la température (Samouelian *et al.*, 2005). Dans le cas de l'expérimentation mise en place, les facteurs qui ont été suivis sont la température, la teneur en eau et la masse volumique qui sont les facteurs les plus influents pour notre cas d'étude.

2.2.1. Nature du sol et porosité

La nature du sol influence grandement les mesures, puisque, selon le type de substrat, les mesures peuvent varier de quelques $\Omega.m$ pour des sols argileux jusqu'à plus de 100 000 $\Omega.m$ pour un permafrost. De plus, la résistivité électrique diminue quand la masse volumique augmente (Seladji

et al., 2010). En effet, l'augmentation de la masse volumique est due à une diminution de porosité, ce qui entraîne une plus forte connexion des eaux interstitielles et donc une augmentation de la conductivité électrique.

2.2.2. La teneur en eau

La résistivité électrique dépend également de la teneur en eau du sol ainsi que de son degré de saturation. L'augmentation du degré de saturation a pour incidence une diminution de la résistivité électrique. Au-delà d'un seuil d'environ 60%-70% du degré de saturation, la résistivité du sol n'évolue plus quelle que soit la masse volumique (Aboubacar, 2004).

2.2.3. La température

La température joue un rôle fondamental dans la conduction du courant électrique. Un accroissement de température du sol entraîne une diminution de la résistivité. En effet, les variations de température influencent la viscosité des fluides contenus dans la solution du sol et donc la mobilité des ions présents. Keller et Frischknecht (1966) ont testé l'influence de cinq températures (gamme de 15 à 25 °C) sur 30 sols différents. Ils démontrent que, pour une variation de température de 1°C, la conductivité électrique varie de 2.02% en moyenne. Ils établissent une relation mathématique permettant de relier la résistivité ρ_T à une température T à la résistivité ρ_{ref} à une température de référence T_{ref} :

$$\frac{1}{\rho_T} = \frac{1}{\rho_{ref}} [1 + \alpha(T - T_{ref})]$$

Avec α : coefficient de correction de la résistivité électrique en fonction de sa température. Pour une température de référence de 25°C, α vaut 0.0202.

2.3. Acquisition des données

En fonction de l'objectif recherché, il existe plusieurs façons de réaliser les mesures. En effet, la résistivité électrique est la résultante de l'intégration des masses plus au moins résistantes d'un volume dont la taille dépend de l'écartement entre les électrodes d'injection A et B, du dispositif de mesure utilisé et de la nature du terrain (Bottraud *et al.*, 1984). La technique du sondage électrique consiste à faire varier l'espacement inter-électrodes de part et d'autre d'un point fixe tout en conservant les proportions géométriques du dispositif. Cette mesure permet d'obtenir des mesures de résistivité à la verticale d'un point.

L'augmentation de l'écartement entre les électrodes permet d'augmenter le volume et la profondeur d'investigation. Lors d'un sondage les variations latérales ne sont pas prises en compte. Pour nous fournir cette information, il faut utiliser la technique de la tomographie électrique 2D. Cette technique consiste à déplacer et à écarter les électrodes A-B-M-N le long d'une ligne : lorsque l'on

conserve les mêmes distances entre les électrodes, on prospecte à profondeur constante ; lorsque l'on écarte des électrodes, on prospecte à profondeur croissante. Il existe plusieurs dispositifs de prospection électrique (configuration des 4 électrodes) décrits dans le tableau 1. Le choix de l'une ou l'autre des configurations est réalisé par l'opérateur en fonction des objectifs de son étude.

2D	Wenner	$A \xleftrightarrow{a} M \xleftrightarrow{a} N \xleftrightarrow{a} B$
	Wenner-Schlumberger	$A \xleftrightarrow{na} M \xleftrightarrow{a} N \xleftrightarrow{na} B$
	Dipole-Dipole	$A \xleftrightarrow{a} B \xleftrightarrow{na} M \xleftrightarrow{a} N$
	Pole-Pole	$B \xleftrightarrow{x} A \xleftrightarrow{a} M \xleftrightarrow{x} N$
	Pole-Dipole <i>Forward</i>	$A \xleftrightarrow{na} M \xleftrightarrow{a} N$
	<i>Reversed</i>	$M \xleftrightarrow{na} N \xleftrightarrow{a} A$
3D	Square	$\begin{array}{cc} A & \xleftrightarrow{a} & B \\ \downarrow & & \downarrow \\ M & \xleftrightarrow{a} & N \end{array}$

Tableau 1 Dispositifs de mesures de la résistivité électrique. A et B représentent les électrodes d'injection du courant. M et N mesurent la différence de potentiel électrique. a représente l'espace entre les électrodes, n le facteur d'espacement inter-électrodes et x la distance à l'électrode placée à l'infini dans le dispositif Pole-Pole.

3. Matériel et méthode

3.1. Dispositif expérimental

Le secteur d'étude est situé en « Petite Beauce ». C'est une région d'agriculture intensive qui a rencontré au cours de ces dernières années des problèmes récurrents de ressource en eau d'un point de vue quantitatif et qualitatif (Graveline, 2013). Les reliefs sont peu marqués et cette région agricole se caractérise par des champs ouverts constitués de parcelles de grande taille (de 20 à plus de 100 ha).

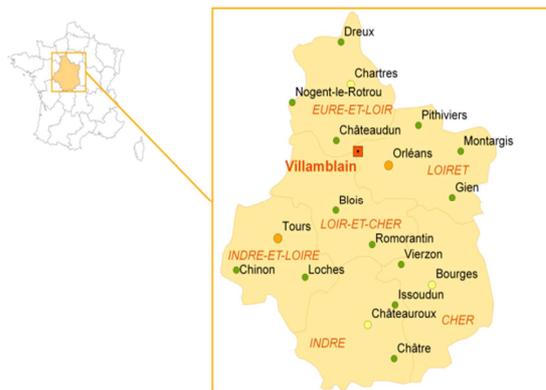
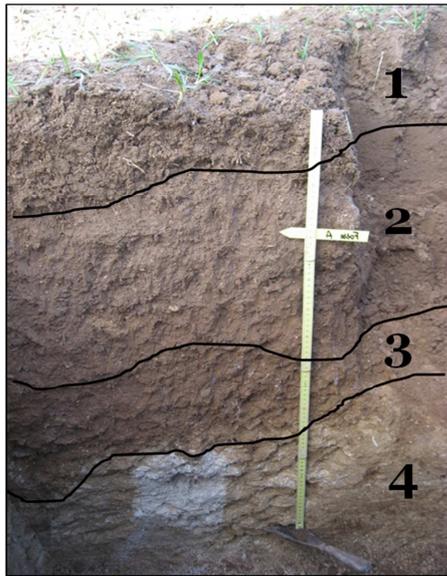


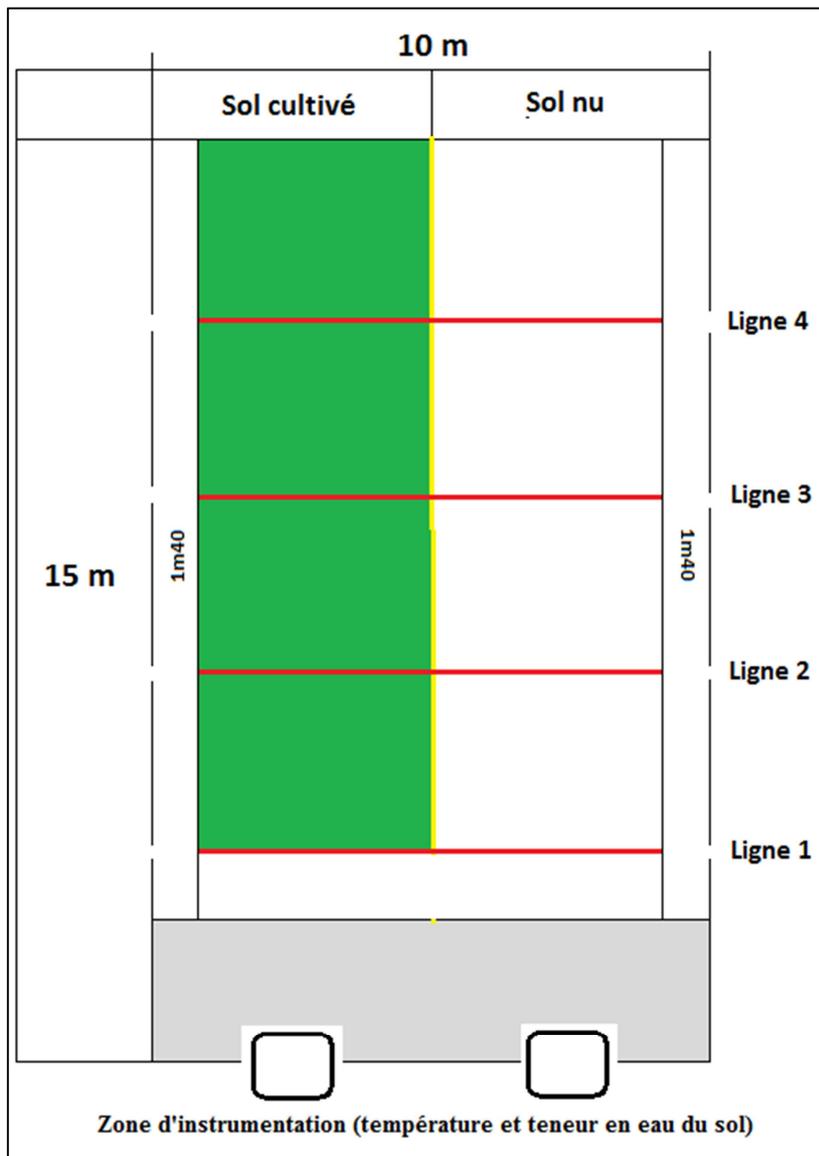
Figure 1 Localisation du site expérimental

La parcelle d'étude se situe sur la commune de Villamblain entre Orléans et Châteaudun au lieu-dit « Limoron » (figure 1) sur une parcelle suivie depuis plusieurs années par l'UR SOLS dans le cadre de différents projets. Lors de l'expérimentation, la parcelle est cultivée en blé et le travail du sol a été superficiel (environ 10 cm). Par ailleurs, le sol n'a pas été labouré depuis une dizaine d'années.



La couverture pédologique est hétérogène sur la parcelle d'étude, mais le sol de la zone d'expérimentation est un calcosol argilo-limoneux sur calcaire cryoturbé (figure 2).

Figure 2 Photographie du profil de sol sur la parcelle d'étude. Le premier horizon (0-25 cm) est organo-minéral avec la présence de nombreuses racines ; les horizons 2 (25-40 cm) et 3 (40-55 cm) sont des horizons structuraux ; l'ensemble repose sur un horizon cryoturbé (horizon 4, 55 cm et plus) avec des intrusions de lentilles de calcaire



Pour répondre à nos objectifs, nous avons délimité une zone d'étude (10m x 15m) constituée de deux placettes juxtaposées, l'une étant cultivée et l'autre étant en sol nu constituant nos deux modalités. Sur ce dispositif, quatre lignes de 7,20 m espacées de 3 m représentent les transects sur lesquels, aux mêmes positions, des profils électriques et racinaires ont été réalisés.

L'expérimentation a été conduite entre le 17 mars 2015 et le 7 juillet 2015. Pendant cette période, j'ai réalisé des tomographies électriques 2D à 14 dates, et des cartographies racinaires à 4 dates, sur chacune des lignes

Figure 3 Présentation du dispositif expérimental
Les positions des lignes électriques et des profils racinaires sont représentées en rouge

de tomographie électrique. Après chaque profil racinaire, la ligne sur laquelle celui-ci avait été effectué n'est plus disponible pour réaliser les mesures électriques. De ce fait la ligne disposant de l'ensemble des données électriques pour toutes les dates de la campagne est la ligne 4 dont le profil racinaire a été réalisé le 7 juillet.

3.2. Suivi des paramètres physiques

3.2.1. Teneur en eau et température

Pour mesurer la teneur en eau et la température, les capteurs utilisés sont respectivement des réflectomètres (CS616 Campbell Scientific) et des capteurs thermistances (107T Campbell Scientific). Les sondes ont été réparties sur l'ensemble du profil de sol (figures 4 et 5), dans deux fosses situées à proximité de la zone d'expérimentation, l'une en sol nu et l'autre en sol cultivé (voir position sur la figure 3). Les mesures ont été réalisées pendant toute la durée de l'expérimentation et stockées par une centrale d'acquisition Campbell avec une fréquence d'acquisition de deux heures.

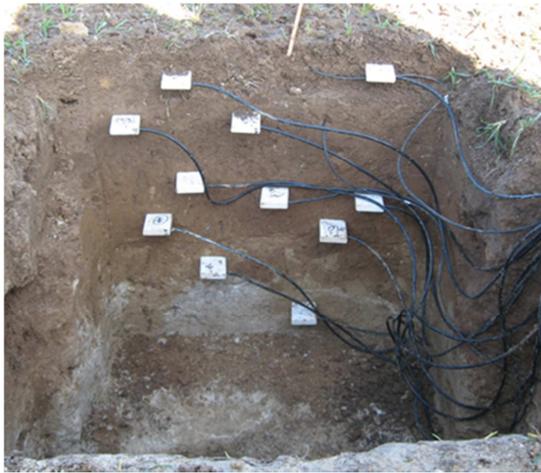


Figure 5 Position des sondes en sol nu

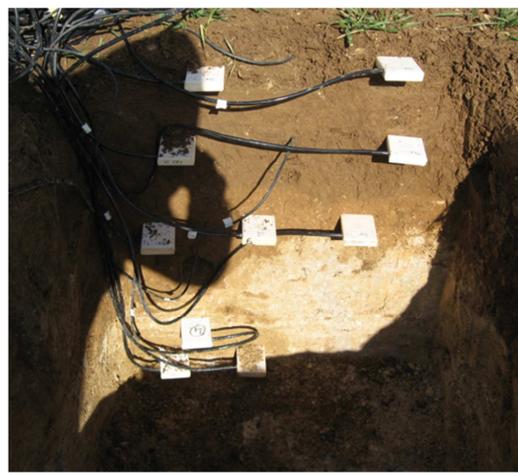


Figure 4 Position des sondes en sol cultivé

Parallèlement à ces mesures en continu, j'ai effectué des mesures ponctuelles de teneur en eau gravimétriques sur prélèvement à la tarière à chaque date de tomographie électrique sur le terrain, cela afin de corriger l'éventuelle déviation de teneur en eau mesurée par les sondes.

3.2.2. Masses volumiques

Des mesures de masse volumique du sol ont été effectuées dans les deux modalités en début et fin d'expérience à l'aide de cylindres de sol non perturbé.

3.3. Caractérisation du fonctionnement du sol par résistivité électrique

3.3.1 Dispositif de mesure

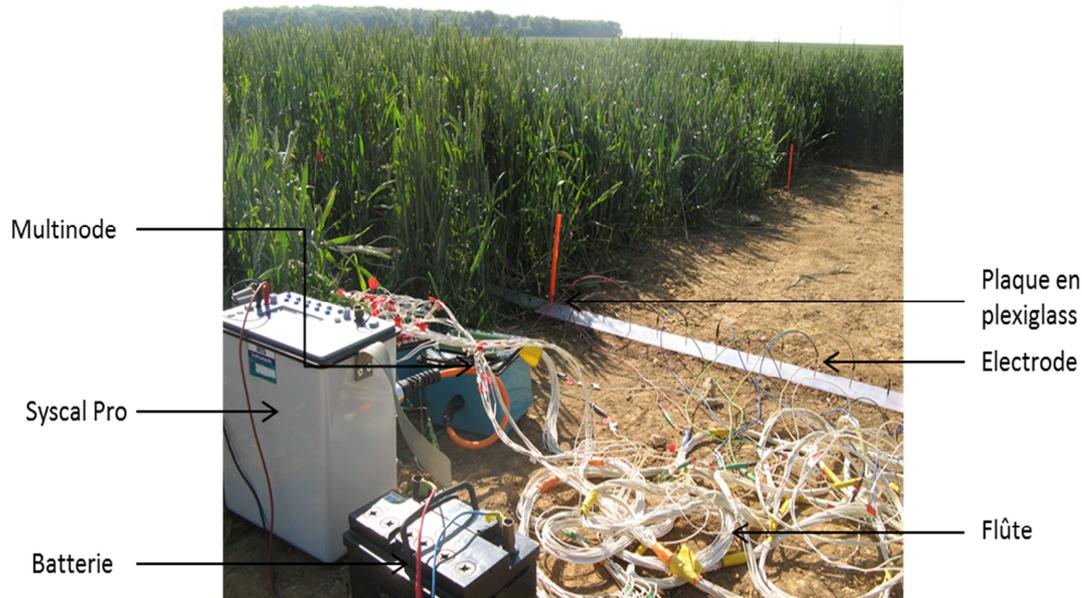


Figure 6 Dispositif de mesure

L'expérimentation à conduire exigeait une vision latérale du sol ainsi qu'une prospection suivant la profondeur. De ce fait, j'ai réalisé des tomographies électriques 2D en mode Wenner alpha, ce qui garantit une bonne sensibilité de la mesure aux structures horizontales du sol et une sensibilité moindre au bruit que le mode Wenner beta. Le dispositif que j'ai mis en place est constitué de 72 électrodes espacées précisément de 10 cm grâce à leur insertion dans des plaques en plexiglas. Ces électrodes sont reliées à deux boîtiers par un système de câblage (« flûte »). L'injection du courant et la mesure de différence de potentiel sont pilotées par un résistivimètre de type Syscal Pro (Iris Instruments) (figure 6). Ce type de dispositif a déjà été utilisé pour caractériser la structure du sol et sa dynamique, notamment après tassement (Seger *et al.*, 2009 ; Besson *et al.*, 2013).

3.3.2. Evaluation de la résistivité « vraie »

La résistivité apparente en un point de l'espace représente une valeur intégrée des résistivités des points situés dans la zone d'influence des électrodes. Dans des milieux présentant des hétérogénéités, la résistivité apparente n'est donc pas la résistivité « réelle » en un point donné, mais celle-ci peut être évaluée par modélisation à l'aide d'une procédure d'inversion. On obtient ainsi un modèle de « résistivité vraie » du milieu. J'ai réalisé cette procédure à l'aide d'un algorithme d'inversion, comme celui proposé par Loke et Barker (1996) dans le logiciel Res2DInv. Cette méthode permet de donner une estimation des résistivités vraies pour des profondeurs correspondantes. Le principe consiste à représenter le milieu prospecté par un modèle maillé de cellules rectangulaires à l'intérieur desquelles la résistivité électrique est considérée comme constante. On modélise une mesure de la résistivité électrique sur ce milieu modèle, et l'on obtient une image de résistivité apparente que l'on compare à celle obtenue lors de l'expérimentation *in situ*. Les valeurs de résistivité électrique de chaque cellule du modèle sont alors modifiées par itérations successives, jusqu'à ce que la différence des distributions des résistivités apparentes simulées et des résistivités apparentes mesurées soit inférieure à un seuil prédéfini, ici égal à 5 %. Le modèle de résistivité vraie est alors stable et l'on considère qu'il correspond à un modèle de la distribution réelle des résistivités dans le sol. Plus la

densité de points de mesures est importante et meilleure est la résolution. Ces valeurs de résistivité sont appelées « résistivités vraies » ou « résistivités inversées ».

Pour analyser l'évolution de la résistivité électrique au cours de l'ensemble de l'expérimentation, j'ai inversé les données de résistivité apparente en mode dit « time-lapse » : à la date t , la distribution des résistivités de la date $t - 1$ sert de modèle de référence pendant l'inversion. Pour confronter les données de résistivité électrique et les données racinaires, j'ai inversé de façon indépendante les données de résistivité apparente.

J'ai utilisé les mesures de températures mesurées grâce au dispositif présenté en partie 3.2, pour corriger les résistivités électriques inversées à une température de référence à l'aide de l'équation de Keller et Frischknecht (1966) présentée en partie 2.2.3.

Notons que, les cartes racinaires 2D (voir paragraphe suivant) sont des informations « vraies » obtenues directement en 2 dimensions avec une résolution de 2 cm par 2 cm. On ne peut donc les confronter directement avec les tomographies de résistivité apparente dont chaque point représente l'intégration d'un volume de sol différent selon l'espacement entre les électrodes au moment de la mesure.

3.4. Suivi de l'enracinement de la culture

Afin de caractériser la dynamique de l'enracinement tout au long de la saison culturale, la méthode du profil racinaire a été choisie (Tardieu et Manichon, 1986). Elle repose sur une cartographie *in situ* de l'enracinement à un instant donné. Dans une fosse assez profonde pour dépasser la profondeur d'enracinement maximal de la culture, j'ai disposé sur le plan de fosse des grilles de 50 cm de côté à maillage régulier de 2 cm par 2 cm (figure 7). J'ai noté la présence ou non de racine dans chaque maille pour obtenir une cartographie racinaire d'un mètre de large sur la profondeur maximale d'enracinement. Tout au long de l'expérimentation, j'ai réalisé les cartographies racinaires à 4 stades phénologiques : le 1^{er} avril au début du tallage du blé, le 12 mai à l'épiaison, le 11 juin à la floraison et le 7 juillet en fin de maturation de la culture, juste avant la récolte.



Figure 7 Grille de 50 cm de côté avec une maille de 2 cm par 2 cm utilisée pour les profils racinaires

J'ai représenté les données sous forme de « cartes racinaires 2D », c'est-à-dire grâce à une grille numérique de maille 2 cm x 2 cm où j'ai précisé pour chaque cellule, s'il y a présence ou absence de racine. J'ai également créé des « profils 1D » en calculant la proportion de racines pour chaque ligne d'observation (50 cellules par ligne), et en représentant la proportion de chaque ligne en fonction de la profondeur.

3.5. Comparaison des données de résistivité et des données d'enracinement

Pour comparer les données de résistivité vraie avec les données racinaires, j'ai transformé les cartes racinaires (de maille de 2cm x 2 cm) à la même résolution spatiale que le maillage de la tomographie de résistivité vraie (figure 8). Le maillage du modèle de tomographie est composé de cellules rectangulaires dont la hauteur augmente avec la profondeur.

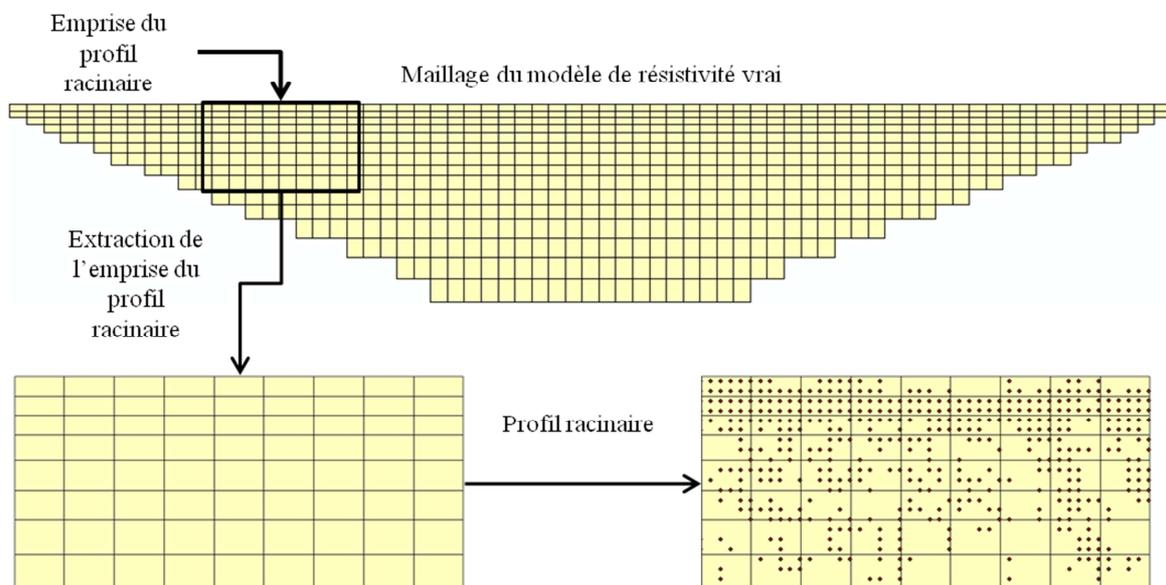


Figure 8 Confrontation de la résistivité électrique inversée et des cartographies racinaires. Les points noirs symbolisent la présence de racine (maillage 2 cm x 2 cm)

Pour cela, j'ai extrait de l'image de résistivité électrique la zone où a été effectuée la carte racinaire. Puis, j'ai fait concorder les mailles du modèle de résistivité avec les mailles de la carte racinaire. Ainsi, j'ai pu, pour chaque maille du modèle électrique, calculer une proportion de présence de racines. Il est alors possible de comparer une proportion d'enracinement avec les données de résistivité vraie.

4. Résultats

4.1. Suivi des paramètres physiques

Les courbes de l'évolution de la teneur en eau pendant la durée de l'expérimentation indiquent une évolution semblable dans les différents horizons (figure 9). Que ce soit en sol nu ou en sol cultivé, la dynamique d'évolution est plus marquée dans les horizons de surface, en lien avec les

variations climatiques : les horizons de surface s'humidifient plus rapidement que les horizons sous-jacents lors d'épisodes pluvieux et s'assèchent plus rapidement en période d'évaporation. En effet, pour le sol nu l'amplitude de la variation de teneur en eau dans l'horizon de surface est d'environ $0.150 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ alors que pour l'horizon 3 correspondant à la sonde située à 45 cm elle est d'environ $0.050 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Pour le sol cultivé, la variation de teneur en eau est de $0.240 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ pour l'horizon de surface et de $0.175 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ pour l'horizon 3. Cette variation de teneur en eau est plus marquée pour le sol cultivé que pour le sol nu, quelle que soit la profondeur, en raison d'une plus forte demande en eau induite par la croissance de la culture.

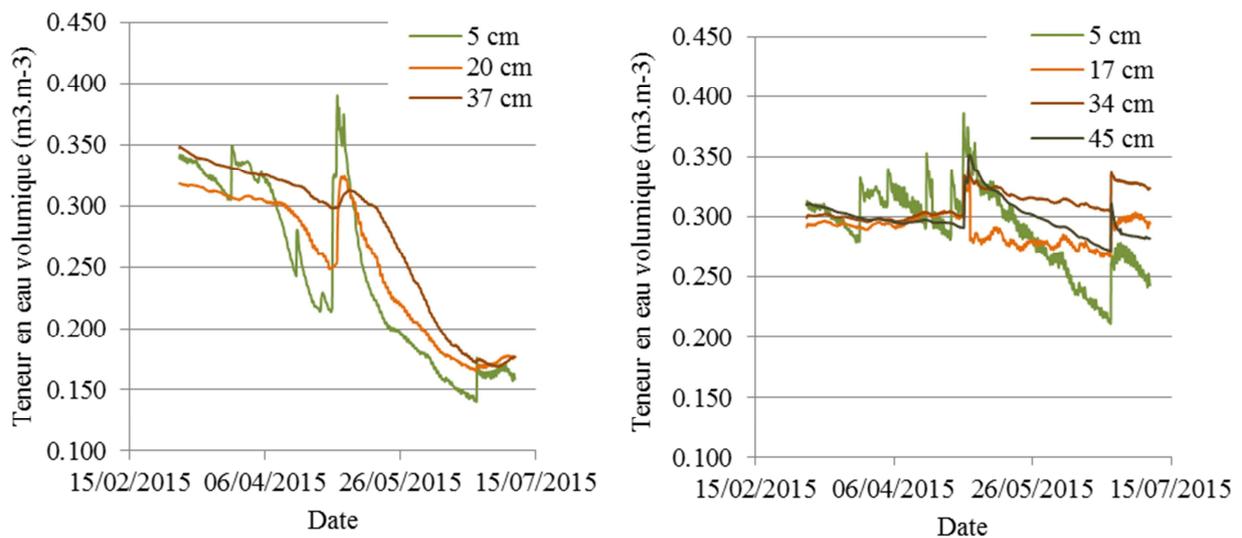


Figure 9 Evolution temporelle de la teneur en eau du sol cultivé (figure de gauche) et du sol nu (figure de droite) au cours de l'expérimentation. Teneurs en eau mesurées par des sondes TDR avec correction par les mesures ponctuelles gravimétriques

Au cours de l'expérimentation, la teneur en eau diminue globalement sur les deux modalités (sol nu et sol cultivé), en lien avec les variations climatiques. Le pic des premiers jours de mai s'explique par un fort épisode pluvieux à cette période ; s'en suit une période sèche jusqu'à la fin de l'expérimentation (Annexe 1).

Pour les deux modalités (sol nu et sol cultivé), la température du sol augmente constamment au cours de l'expérimentation (figure 10). Cette évolution de la température s'atténue avec la profondeur avec des variations de 10°C pour l'horizon 4 (supérieur à 55 cm) et de presque 30°C pour l'horizon 1 (compris entre 0 et 25 cm) en sol cultivé. Cette variation est plus élevée en sol nu où elle atteint 35°C pour l'horizon 1. Ces variations de température non négligeables sur la durée de l'expérimentation ont été prises en compte pour corriger l'effet de la température sur la résistivité inversée.

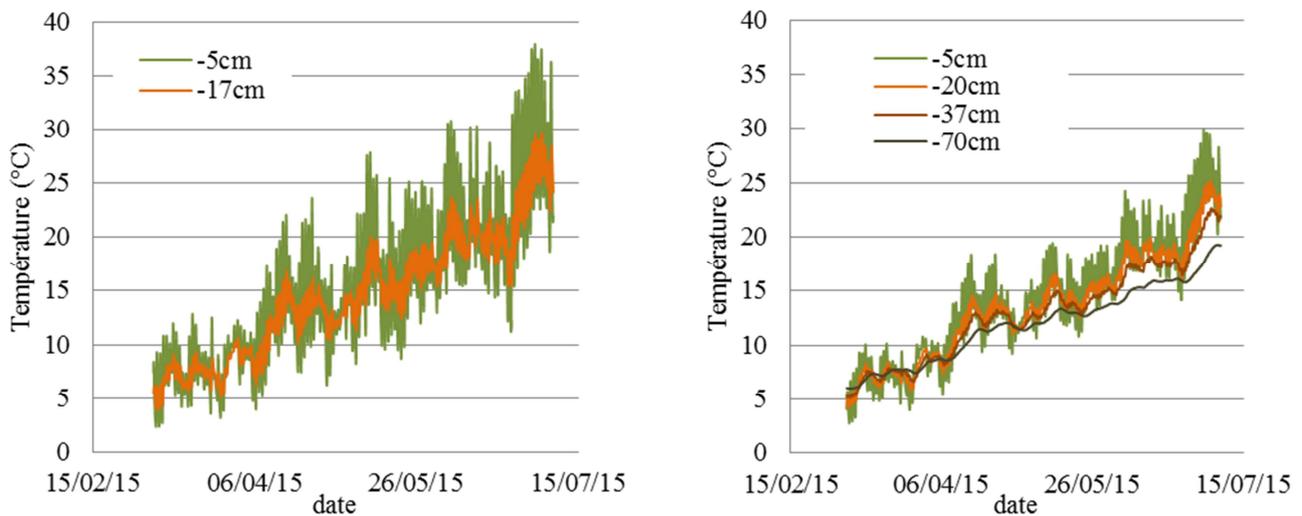


Figure 10 Evolution temporelle de la température du sol au cours de l'expérimentation sur sol cultivé (figure de gauche) et sur sol nu (figure de droite) Suivi des températures toutes les deux heures pendant la totalité de l'expérimentation.

La masse volumique des deux modalités de sol évolue entre les deux dates de mesures, dans le tableau 2 présenté ci-dessous les valeurs de masses volumiques ont été moyennées par classe de profondeur, par modalité et par date. Pour les deux modalités on remarque une augmentation de la masse volumique dans les horizons de surface (0 – 10 cm) de $0,2 \text{ g.cm}^{-3}$ en sol nu et $0,12 \text{ g.cm}^{-3}$ en sol cultivé.

	Sol Nu		Sol Cultivé		
	10-mars	07-juil		10-mars	07-juil
0 - 9 cm	1,08	1,28	0 - 10 cm	1,08	1,2
14 - 22 cm	1,47	1,47	12 - 21 cm	1,44	1,49
28 - 37 cm	1,38	1,38			
41 - 50 cm	1,31	1,35			

Tableau 2 Masses volumiques des deux modalités de sol (en g.cm^{-3}) au début et en fin d'expérience

4.2. Suivi de l'évolution de l'enracinement

La figure 11 présente les « profils racinaires 1D » pour les quatre dates observées. On observe une variation de l'enracinement entre le début de tallage et l'épiaison puis une certaine stabilisation de

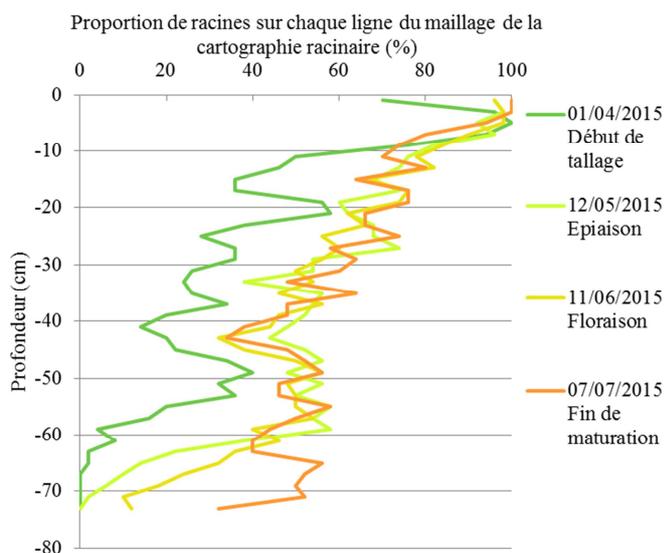


Figure 11 Profils racinaires 1D observés à 4 dates pendant le cycle cultural

la dynamique d'enracinement à partir de l'épiaison. En début de tallage les racines sont peu présentes dans les premiers cm et très présentes entre 4 et 8 cm. La proportion de racines diminue avec la profondeur jusqu'à 75 cm. Aux stades d'épiaison, de floraison et de fin de maturation, la proportion de racines est maximale en surface, où elle est quasiment de 100%. Elle diminue avec la profondeur jusqu'à 60 cm selon une dynamique similaire pour les différents stades. Pour une profondeur de 70 cm, la proportion de racines passe de 5% lors

de l'épiaison, à 10% lors de la floraison jusqu'à presque 50% en fin de maturation. En raison de cette similarité des profils racinaires à partir de l'épiaison, seules les dates du 1^{er} avril 2015 et du 12 mai 2015 seront analysées dans la suite de ce mémoire.

Entre ces deux dates de mesure le système racinaire du blé a évolué (figure 12). Au 1^{er} avril, seuls les premiers centimètres sont densément colonisés par les racines même si, sur les 6 premiers centimètres, la colonisation n'est pas totale. En profondeur, les racines sont présentes de façon sporadique. Le 12 mai, le système racinaire a colonisé quasi-totalement les 5 premiers centimètres à la surface du sol et la densité racinaire est plus importante sur l'ensemble du profil. Il est intéressant de noter que pour les deux dates, les racines ne colonisent pas l'horizon cryoturbé.

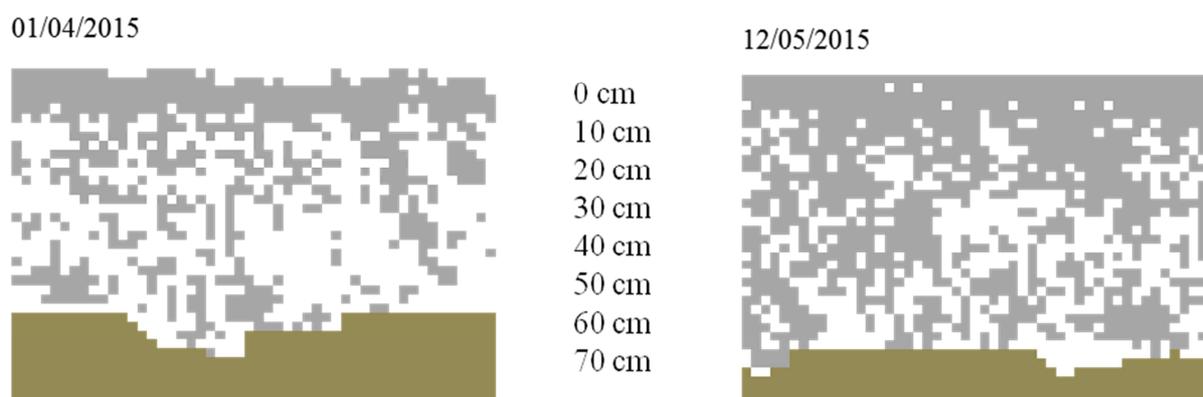


Figure 12 Carte racinaires aux dates du 1^{er} avril et du 12 mai (100 cm de large sur 74 cm de profondeur). La présence de racines est représentée par les cases grisées, l'apparition de l'horizon cryoturbé est représentée en marron. Chaque carré représente une maille de la grille de 2 * 2 cm.

4.3. Suivi du fonctionnement du sol par résistivité électrique

La figure 13 présente les tomographies de résistivité électrique apparente et inversée au cours de l'expérimentation pour 6 des 14 mesures (voir l'ensemble des mesures en annexe 2) et pour la ligne 4. Chaque profil électrique prospecte sur une profondeur de 1 m (au centre du profil) et sur une distance de 7,20 m de large correspondant au dispositif mis en place. On observe qu'avant la date du 11 juin, les résistivités augmentent globalement avec la profondeur avec une couche relativement peu résistive (10 à 35 $\Omega.m$) en surface (0 à 55cm) et une couche plus résistante (35 à 60 $\Omega.m$) à partir de 55 cm, correspondant à la profondeur d'apparition du calcaire cryoturbé. Les trois premières dates sont globalement similaires et correspondent à une période où la teneur en eau est élevée (figure 9). Pour les deux dernières dates, on observe des profils électriques similaires. Ces imageries ont été réalisées respectivement aux stades phénotypiques de la floraison et de la maturité du blé. Pour ces deux stades, la croissance racinaire était quasiment identique et a atteint son maximum. De plus, pendant cette période le stress hydrique était très important et la teneur en eau similaire (environ 0,170 $m^3.m^{-3}$).

Les deux modalités de traitement (sol nu et sol cultivé) se différencient de façon nette. Pour la zone concernée par la culture de blé, on observe dès le début de l'expérimentation des résistivités en moyenne plus élevées en toute proche surface du sol et cette différenciation s'accroît nettement à partir du 12 mai avec l'apparition de résistivités très élevées (très souvent supérieures à 100 $\Omega.m$) sur toute la hauteur du profil, masquant le contraste entre le sol et le calcaire cryoturbé observé en début d'expérimentation et semblant influencer la résistivité de la zone en sol nu. En sol nu (moitié droite des tomographies électriques), la résistivité est plus faible dès le début de l'expérience pour les premiers centimètres et une couche conductrice (10 à 20 $\Omega.m$) située entre 10 et 30 cm de profondeur persiste sur toute la durée de l'expérimentation.

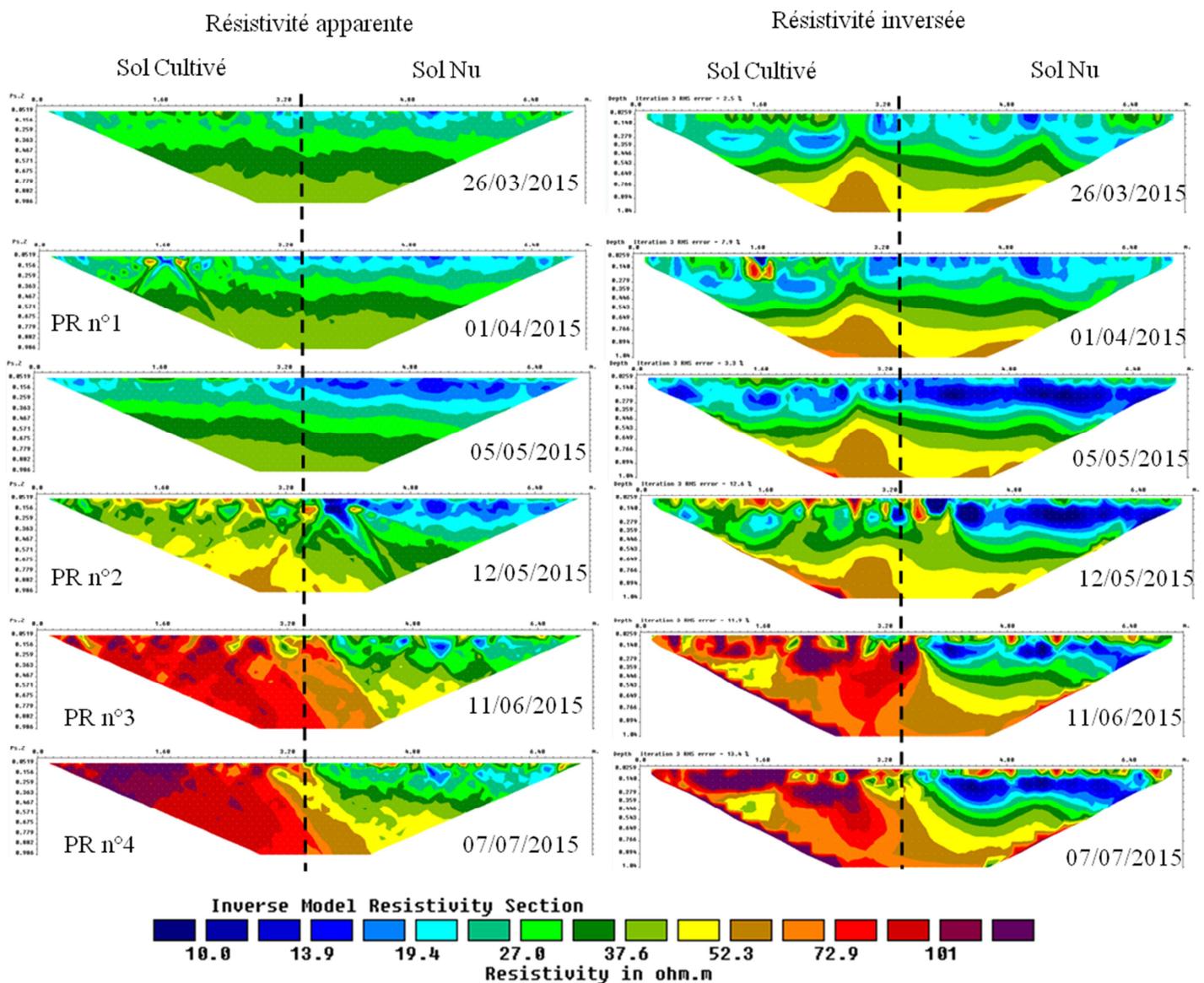


Figure 13 Evolution de la résistivité au cours de l'expérimentation. Cas de la ligne 4. Résistivités apparentes (colonne de gauche), résistivités inversées et corrigées par la température par inversion en mode time-lapse (colonne de droite). Les quatre profils racinaires (notés PR) sont notés en face des modèles électriques à la même date.

4.4. Comparaison de la résistivité électrique et de l'enracinement

Les données de résistivité électrique inversées confrontées aux cartes racinaires du 1^{er} avril et du 12 mai sont présentées sur la figure 14 pour une profondeur d'investigation de 80 centimètres. Aux deux dates, la répartition des résistivités électriques est relativement semblable, avec une première couche en surface (0 – 10 cm) assez résistante (jusqu'à 60 Ω .m le 1^{er} avril et 80 Ω .m le 12 mai), une seconde couche (10-50 cm) plus conductrice (de l'ordre de 20 Ω .m) et enfin, une couche à nouveau plus résistante à partir de 50 cm (avec une résistivité de 80 Ω .m le 1^{er} avril et environ 50 Ω .m le 12 mai) correspondant à l'horizon cryoturbé.

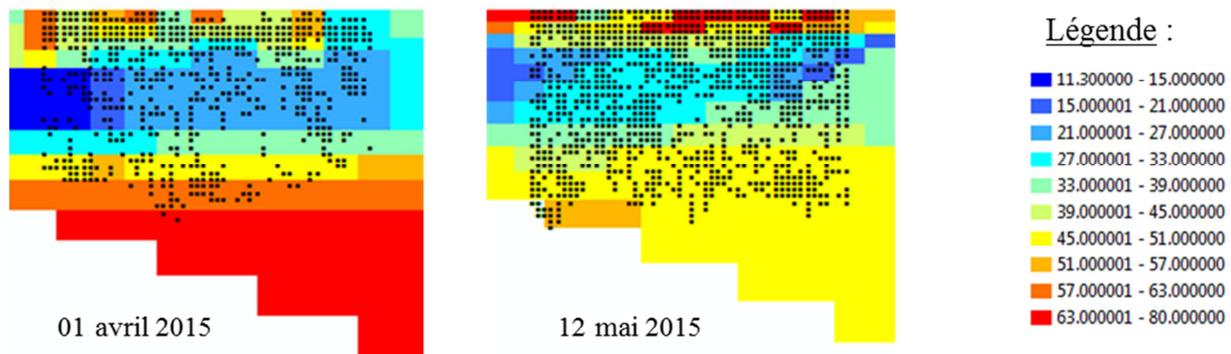


Figure 14 Comparaison des résistivités électriques inversées et des profils racinaires aux dates du 1 avril et du 12 mai. La présence de racine est symbolisée par les points noirs.

Pour les deux dates on observe une densité plus importante de racines en surface. Cet horizon présente des valeurs de résistivité élevées (40 à 80 Ω .m) par rapport au reste du profil (hors horizon cryoturbé en bas de profil). Pour les couches intermédiaires de résistivité plus faible, la densité racinaire est importante le 12 mai mais faible le 1^{er} avril. Enfin il semble que l'horizon cryoturbé constitue un obstacle pour l'enracinement puisqu'on n'y observe pas de racine, même à la date du 12 mai.

La figure 15 représente la comparaison entre les cartographies de résistivité électrique inversée (à gauche) et les cartographies de proportions de racines calculées sur le maillage du modèle électrique (à droite). On remarque une certaine similitude entre des résistivités électriques et la proportion de racines. En effet, aux deux dates de mesure, les 3 lignes les plus proches de la surface sont celles qui présentent les valeurs de résistivités les plus grandes (environ 50 à 60 Ω .m pour les deux dates) et des proportions de racines élevées (environ 70% pour le 1^{er} avril et 90% pour le 12 mai). En revanche on n'observe pas le même phénomène au niveau de la dernière ligne des profils.

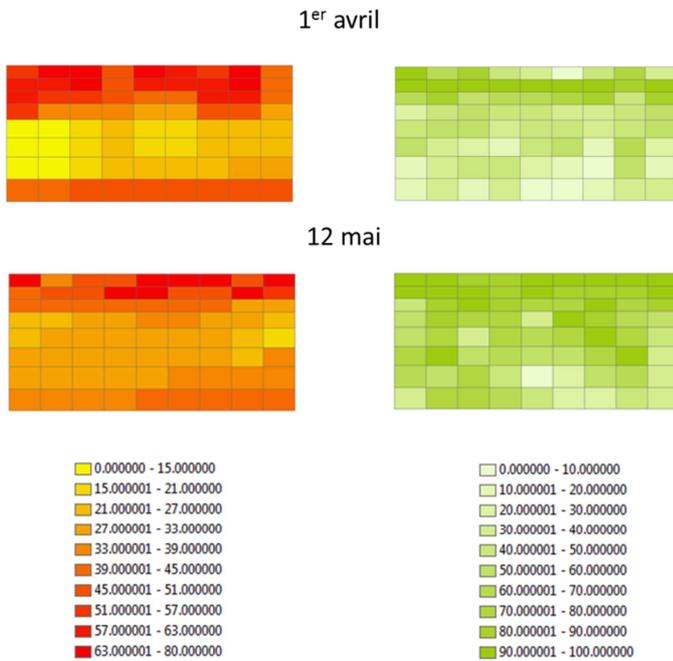


Figure 15 Comparaison entre les données de résistivité électrique inversée (à gauche) et les proportions de racines par maille de résistivité électrique inversée à droite aux dates du 1^{er} avril et du 12 mai

Les boxplots de la figure 16 représentent les caractéristiques statistiques non spatiales des valeurs de proportions de racines par classe de résistivité électrique, pour les dates du premier avril (à gauche) et du 12 mai (à droite).

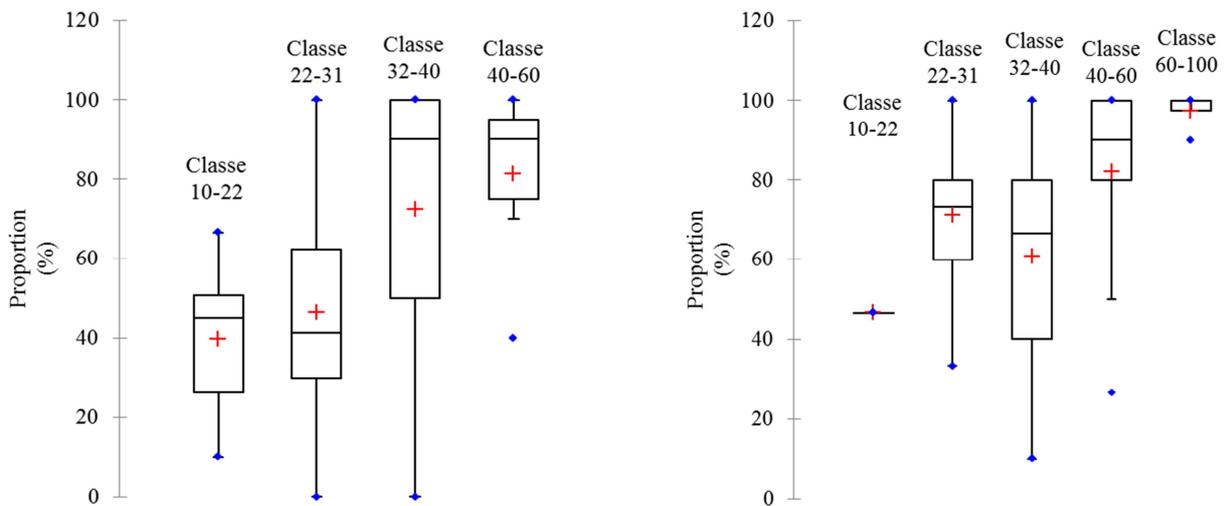


Figure 16 Représentation box plot de l'évolution de remplissage des cases du maillage de résistivité vrai entre le 1 avril 2015 (graphique de gauche) et le 12 mai 2015 (graphique de droite). Chaque boîte représente une classe de proportion de racine par maille.

On constate que la proportion de racines augmente avec la résistivité lorsque celle-ci est considérée par classe, en particulier pour la date du 1^{er} avril : par exemple la classe 10-22 $\Omega.m$ présente une proportion de racines pour la zone de mesure d'environ 40% tandis que pour la classe 40-60 $\Omega.m$ cette proportion est de presque 90% ; entre ces deux classes, la proportion de racines augmente. Ceci est moins visible le 12 mai, mais ne contredit pas cette hypothèse.

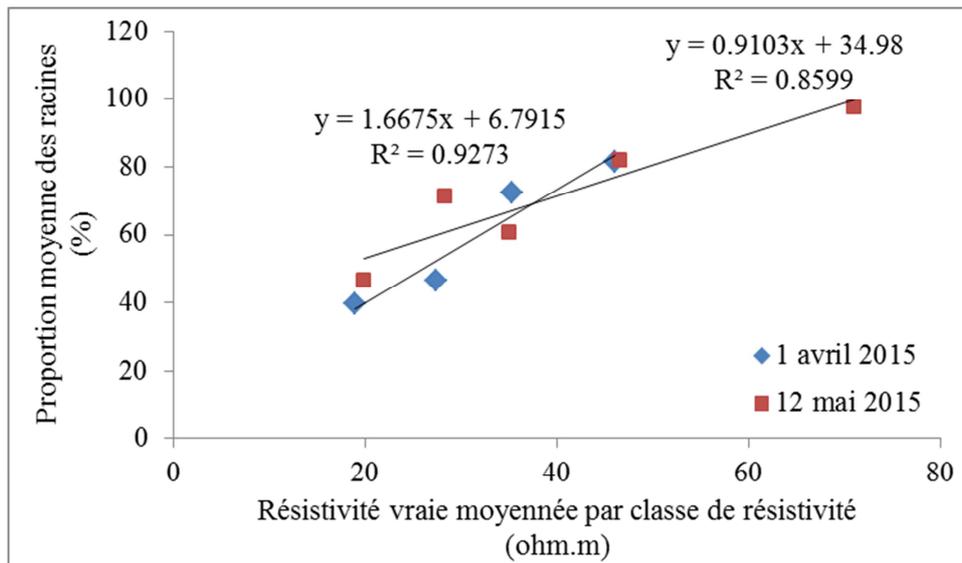


Figure 17 Suivi de la proportion moyenne de racine en fonction de la résistivité : données du 1 avril et du 12 mai

La proportion moyenne de racines en fonction de la résistivité moyenne de chaque classe de résistivité présente une relation linéaire croissante, avec des coefficients de détermination élevés ($R^2 = 0.93$ pour le 1^{er} avril et $R^2=0.86$ pour le 12 mai), (figure 17).

5. Discussion

L'expérimentation que j'ai conduite a permis de suivre la dynamique de l'enracinement, grâce à la méthode du profil racinaire. Au cours du cycle cultural, l'analyse des cartes et des profils racinaires met en évidence deux groupes : au début de tallage, la répartition des racines dans le sol diffère de celle des stades d'épiaison, de floraison et de fin de maturation (figure 12). Ces différences s'expliquent par une croissance rapide du système racinaire du blé jusqu'à l'épiaison et un ralentissement très important après avec une croissance légère à plus de 60 cm pour permettre à la plante de récupérer de l'eau plus profondément. On a pu observer que l'horizon de sol cryoturbé est un obstacle majeur à l'enracinement (figure 12) : celui-ci pourrait être d'ordre physique, lié à la structure plus dense et moins fissuré de cet horizon (Tardieu and Manichon, 1986). Afin de mieux appréhender la dynamique de l'enracinement au cours du cycle cultural, des expériences complémentaires devraient être réalisées entre le semis et l'épiaison, avec des intervalles de temps entre les profils racinaires plus courts.

Lors de notre expérimentation nous avons cherché à établir une relation entre la présence de racines et la résistivité. Or, nous savons que la résistivité électrique est dépendante de nombreux paramètres du sol. Nous avons considéré certains facteurs comme invariants sur la durée de l'expérimentation (texture, nature des minéraux argileux, CEC, charge en éléments grossiers, pH, matière organique). En ce qui concerne la nature du sol, nous avons décrit le profil pédologique et identifié les horizons. La mesure de résistivité électrique met bien en évidence la transition entre les horizons de surface (0 à 55 cm) et l'horizon de calcaire cryoturbé et nous pouvons admettre que cette

structuration n'a pas évolué pendant la durée de l'expérimentation. En ce qui concerne les facteurs susceptibles de varier pendant la durée de l'expérimentation (teneur en eau et température), nous avons installé des capteurs permettant de réaliser un suivi. En ce qui concerne la structure du sol, nous avons réalisé les mesures sur une zone qui n'avait pas été concerné par des passages de roues au préalable et qui avait été travaillée de la même façon sur toute la surface d'expérimentation. La structure de l'horizon de surface de notre zone d'étude était donc la plus homogène possible. Cependant, la masse volumique de l'horizon de surface a augmenté entre le début et la fin de notre expérimentation (variation de 1,08 à 1,20 g.cm⁻³ sur la modalité de sol cultivée), ce qui devrait conduire à des résistivités plus faibles en fin d'expérimentation (Besson *et al.*, 2013). Cependant, la teneur en eau de l'horizon de surface a diminué, et c'est cette variation qui explique en premier lieu l'augmentation de la résistivité électrique au cours de l'expérimentation.

L'analyse des résultats a permis d'identifier deux fonctionnements différents entre les deux modalités. En effet, le sol cultivé et le sol nu réagissent différemment comme l'indique l'évolution des profils de résistivité électrique. Les profils de résistivité du côté de la modalité cultivée évoluent plus rapidement que sur la modalité en sol nu, avec des résistivités plus élevées durant les périodes sèches. Cette évolution sur la partie cultivée s'explique par des variations plus importantes de la teneur en eau du sol liées à l'absorption racinaire du blé, comme le confirme les suivis de teneur en eau.

Pour discuter de la possibilité de caractériser l'enracinement par résistivité électrique, nous nous sommes intéressés plus spécifiquement aux dates du 1^{er} avril et du 12 mai présentant les profils racinaires les plus contrastés. Le 12 mai le stade cultural du blé est à l'épiaison c'est-à-dire au moment où l'évolution des racines primaire atteint quasiment son apogée et continue très faiblement jusqu'à maturité de la plante (Miège, 1938). C'est la raison pour laquelle les profils sont très proches jusqu'à 60 cm à partir de ce stade cultural. Des analyses statistiques mettent en évidence que, en moyenne, une proportion de racines plus importante correspond à une résistivité moyenne plus élevée. Ceci pourrait s'expliquer par deux raisons : d'une part les racines absorbent de l'eau et diminuent la teneur en eau du sol ; d'autre part, lors de leur croissance puis de leur sénescence, les racines peuvent créer de la microfissuration. Malgré ce résultat encourageant, on n'observe cependant pas de lien évident entre les profils de résistivité inversée et les cartes racinaires. Des études complémentaires sont donc nécessaires pour faire de la résistivité électrique un outil diagnostique de la dynamique de l'enracinement.

On notera également que les données de résistivité électrique apparente ont été confrontées à un « profil racinaire apparent », calculé en intégrant – en chaque point - la proportion des racines des éléments du maillage qui le surplombe, selon un schéma identique à celui de l'évaluation de la résistivité apparente. Les résultats actuels ne sont pas probants et n'ont donc pas été présentés dans ce mémoire. Des traitements complémentaires sont nécessaires pour mieux évaluer le volume d'intégration à prendre en compte lors du calcul de ce profil racinaire apparent. Par ailleurs, la méthode d'élaboration des cartes racinaires, sur un principe « présence / absence de racines dans une

maille de la grille », ne prend en compte ni la taille des racines ni leur état fonctionnel. Pourtant, il paraît probable que des racines de diamètres différents interagissent proportionnellement à leur taille avec le milieu. Une autre méthode d'évaluation de la dynamique d'enracinement serait à mettre en œuvre pour confronter des données sur les racines aux données de résistivité électrique.

Conclusion

L'objectif de cette étude était d'évaluer la potentialité de l'outil de résistivité électrique pour caractériser l'évolution temporelle de la profondeur d'enracinement d'une culture. L'utilisation de la résistivité électrique pour caractériser le fonctionnement du sol notamment de l'évolution de l'enracinement est une technique intéressante car non destructive. Les mesures ont été réalisées sur une placette expérimentale constituées de deux modalités, une partie en sol nu et l'autre sur un sol cultivé couvert de blé. La répartition des racines dans le sol influence le profil hydrique. La teneur en eau étant un paramètre faisant varier la résistivité électrique, nous avons cherché à savoir si la résistivité électrique permettait de mettre en évidence le front d'évolution des racines au cours du temps. L'aspect temporel a été étudié en installant un suivi de résistivité électrique et de certains paramètres physiques du sol influençant la résistivité électrique (teneur en eau et température). Les autres facteurs d'influence ont été considérés comme négligeables ou invariants sur la durée de l'expérimentation.

Les premiers résultats obtenus sont encourageants. Il semble que l'on pourrait différencier des variations de densité de racines dans le sol grâce à des mesures de résistivité électrique. En effet, en comparant nos résultats, des corrélations positives entre la résistivité électrique inversée et les variations de présence de racine dans le sol se sont révélées. Il en ressort que les zones où la présence de racines est importante présentent des résistivités en moyenne plus élevées que pour des zones du sol présentant peu de racines. En analysant les résultats il ne faut pas oublier que la présence d'eau dans le sol est un paramètre majeur qui fait varier la résistivité des sols comme en atteste les différences de résistivités obtenues tous le long du suivi temporel entre le sol nu et le sol cultivé. Pour valider nos résultats, il serait intéressant de réaliser une expérience complémentaire avec des profils racinaires à d'autres stades de croissance de la plante.

Enfin, les profils de résistivité électrique ont été réalisés sur quatre lignes distinctes au cours de l'expérimentation. Même si certaines lignes ont été détruites au cours de l'expérimentation par la réalisation des cartes racinaires, des tomographies électriques à une même date sur des lignes différentes existent. Je n'ai pas analysé la variabilité spatiale de la résistivité électrique à une date donnée, mais ce travail reste à faire et permettrait de discuter de la variabilité du fonctionnement du sol au sein de la zone d'expérimentation.

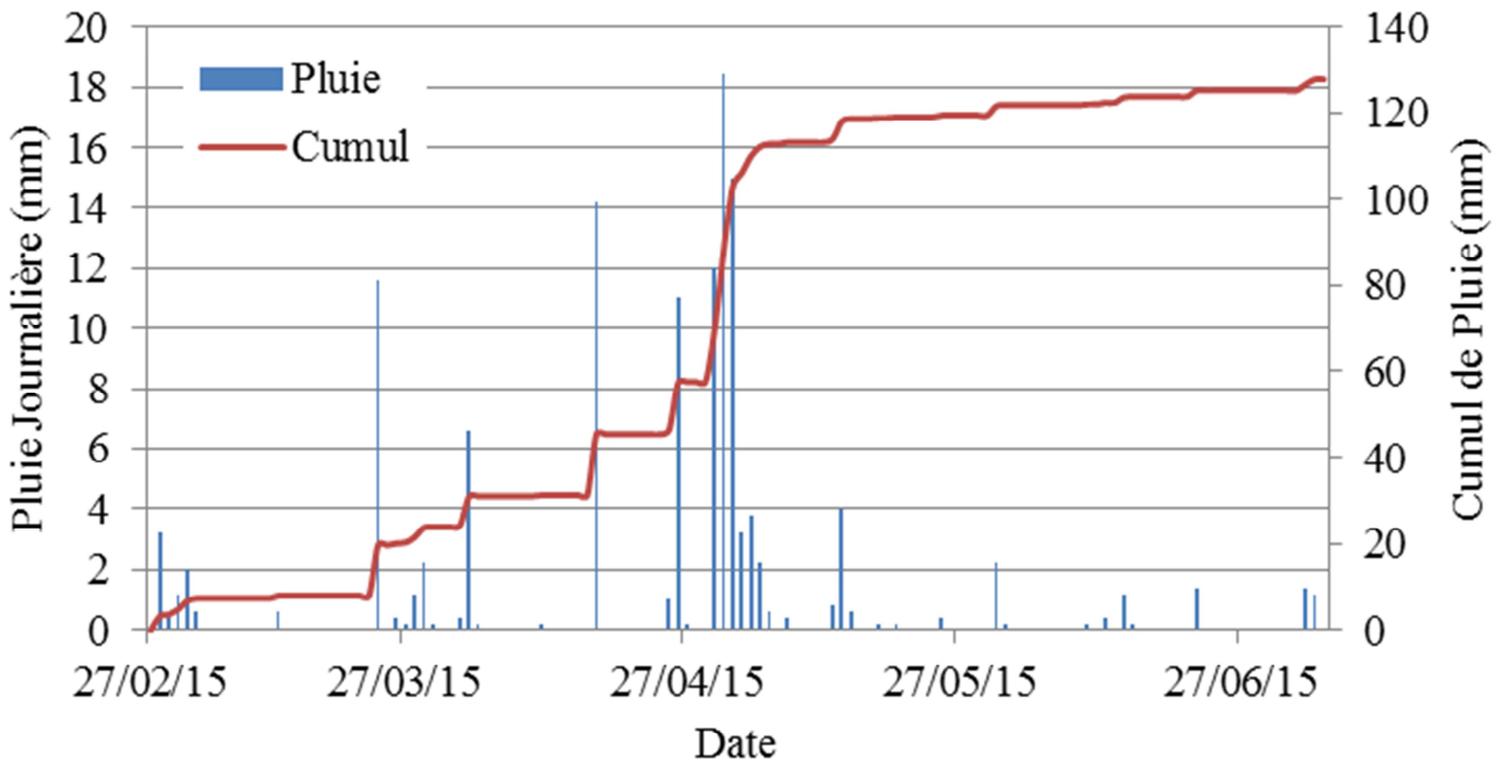
Bibliographie

- Aboubacar Sani A., 2004. Utilisation de la mesure de la résistivité électrique pour la caractérisation de la structure des sols cultivés. Mémoire de DESS Sciences de l'environnement, Université de Strasbourg, 60 p.
- Besson A., Seger M., Giot G., and Cousin I., 2013. Identifying the characteristic scales of soil structural recovery after compaction from three in-field methods of monitoring. *Geoderma* 204, 130–139.
- Bevan B., 2000, An early Geophysical survey at Williamsburg, USA. *Archeol. Prospect.*, 7, 51-58.
- Bottraud J.C., Bornand M., Servat E., 1984. Mesures de résistivité et étude du comportement agronomique d'un sol. *Science du sol*, 4 : 279-294
- Carminati A., Moradi A.B., Vetterlein D., Vontobel P., Lehmann E., Weller U., Vogel H.-J., and Oswald S.E., 2010. Dynamics of soil water content in the rhizosphere. *Plant Soil* 332, 163–176.
- Chenu C., 1993. Clay- or sand-polysaccharide associations as models for the interface between micro-organisms and soil: water related properties and microstructure. *Geoderma* 56, 143–156.
- Doussan C., Pagès L., and Pierret A., 2003. Soil exploration and resource acquisition by plant roots: an architectural and modelling point of view. *Agronomie* 23, 419–431.
- Doussan C., Seger M., Chabbi A., Charrier X., Giot G., Renard D., Cousin I., 2015. RURac. Mise en évidence de l'évolution temporelle de la Réserve Utile des sols sous l'action des racines : Une première pierre dans une optique de gestion des propriétés hydriques du sol par gestion de la végétation et de son enracinement. *Pari Scientifique EA*, Rapport final, 20 pages.
- Dunbabin V.M., Postma J.A., Schnepf A., Pagès L., Javaux M., Wu L., Leitner D., Chen Y.L., Rengel Z., and Diggle A.J., 2013. Modelling root–soil interactions using three–dimensional models of root growth, architecture and function. *Plant Soil* 372, 93–124.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2003. *Le sol vivant: Bases de pédologie, biologie des sols*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 568 p
- Graveline N., 2013. *Agricultures' adaptation to water management policies and global change : the interest of economic programming models*. phdthesis. AgroParisTech.
- Keller G.V., and Frischknecht F.C., 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*.
- Loke M.H, Barker R.D., 1996. Rapid Least-squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical prospecting*, 44, 131-152.
- Meyer de Stadelhofen C., 1991. *Applications de la géophysique aux recherches d'eau* (Paris, France: Technique et documentation-Lavoisier).
- Michot D., Benderitter Y., Dorigny A., Nicoulaud B., King D., and 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, 1138.
- Miège E., 1938. Etude du développement du système racinaire du Blé. *Rev. Bot. Appliquée Agric. Colon.* 18, 233–259.

- Pierret A., Doussan C., Capowiez Y., Bastardie F., and Pagès L., 2007. Root Functional Architecture: A Framework for Modeling the Interplay between Roots and Soil. *Vadose Zone J.* 6, 269.
- Samouelian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., and Richard G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Tillage Res.* 83, 173–193.
- Seger M., Cousin I., Frison A., Boizard H., and Richard G., 2009. Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements. *Soil Tillage Res.* 103, 387–398.
- Seladji S., Cosenza P., Tabbagh A., Ranger J. and Richard G., 2010. The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation. *European Journal of Soil Science*, 61: 1043–1055. doi: 10.1111/j.1365-2389.2010.01309.x
- Srayeddin I., and Doussan C., 2009. Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography. *Plant Soil* 319, 185–207.
- Tardieu F., and Manichon H., 1986. Characterization as a Water Sink of the Maize Root-System in Cultivated Fields .2. a Method for Studying Vertical and Horizontal Distribution of Roots. *Agronomie* 6, 415–425.
- Young I.M., 1995. Variation in moisture contents between bulk soil and the rhizosheath of wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Wembley). *New Phytol.* 130, 135–139.
2006. Food aid for food security? (Rome: FAO).

ANNEXES

Annexe 1 : Suivi des précipitations au cours de l'expérimentation.



**Annexe 2 : Tomographies de résistivité électrique apparente (à droite) et inversée (à gauche)
au cours de l'expérimentation pour les 14 dates de mesure (ligne 4)**

