



**HAL**  
open science

## Estimation de la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols à l'échelle de la parcelle

Isabelle Cousin, Arlène Besson, Julien Moeys, Marie-Pierre Lefebvre, Bernard Nicoullaud, Alexey Bobachev, Odile Duval, Hocine Bourennane, Yves Coquet, Jean-Patrice Assi, et al.

### ► To cite this version:

Isabelle Cousin, Arlène Besson, Julien Moeys, Marie-Pierre Lefebvre, Bernard Nicoullaud, et al.. Estimation de la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols à l'échelle de la parcelle. 2e Colloque ECCO, Dec 2007, Toulouse, France. 6 p. hal-01192303

**HAL Id: hal-01192303**

**<https://hal.science/hal-01192303>**

Submitted on 6 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ESTIMATION DE LA VARIABILITE SPATIALE DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES DES SOLS A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

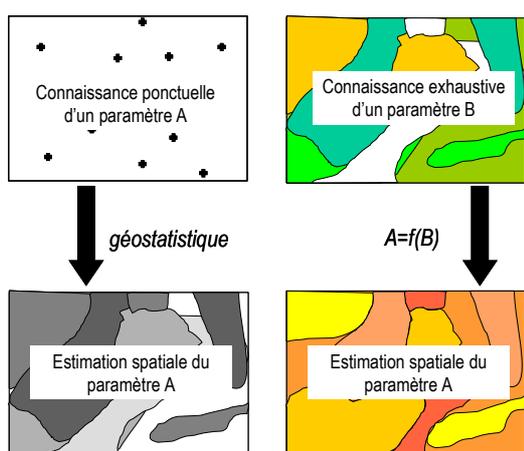
*Isabelle COUSIN<sup>1</sup>, Arlène BESSON<sup>1</sup>, Julien MOEYS<sup>3</sup>, Marie-Pierre LEFEBVRE<sup>1</sup>, Bernard NICOULLAUD<sup>1</sup>, Alexey BOBACHEV<sup>1,2</sup>, Odile DUVAL<sup>1</sup>, Hocine BOURENNANE<sup>1</sup>, Yves COQUET<sup>3</sup>, Jean-Patrice ASSI<sup>4</sup>, Christian CAMERLYNCK<sup>4</sup>, Alain TABBAGH<sup>4</sup>, Abad CHAABI<sup>5</sup>, Gilles LEMAIRE<sup>5</sup>, Anatja SAMOUËLIAN<sup>6,1</sup>, Henri ROBAIN<sup>7</sup>, Gaghik HOVHANNISSIAN<sup>7</sup>, Michel DABAS<sup>8</sup>, Dominique KING<sup>1</sup>, Guy RICHARD<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>INRA, UR0272 Science du sol, Centre de Recherche d'Orléans, BP 20619, F-45166 Olivet cedex, <sup>2</sup>Department of geophysics, Geological Faculty, Moscow State University, Leninskie gory, Moscow, GSP-2, 119992, Russie, <sup>3</sup>UMR Environnement et Grandes Cultures, INA-PG, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, <sup>4</sup>UMR Sisyphe, Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, <sup>5</sup>INRA Unité Ecophysiologie des Plantes fourragères, 86600 Lusignan, France, <sup>6</sup>Universität Heidelberg, Institut für Umwelphysik INF 229, 69120 Heidelberg Allemagne, <sup>7</sup>IRD Unité GEOVAST, 32 avenue H. Lavagnat, 93143 Bondy Cedex, <sup>8</sup>Geocarta, 16 rue du Sentier, 75002 Paris.

**Mots-clé** : sol – géophysique – fonctionnement hydrodynamique - spatialisation

## I. INTRODUCTION

L'utilisation de modèles hydrologiques pour la prévision et la prévention des risques de pollution des eaux suppose que les données d'entrée de ces modèles soient disponibles et fiables sur les zones d'étude. Parmi ces données d'entrée, les propriétés hydrodynamiques des sols sont des paramètres incontournables dont la qualité conditionne grandement la fiabilité des simulations réalisées. Certains des modèles couramment employés utilisent, pour caractériser les sols, leurs propriétés de conductivité hydrodynamique en régime insaturé. Ces propriétés, qui s'expriment souvent sous la forme de fonctions paramétrées, sont parfois connues ponctuellement mais leur extrapolation spatiale reste délicate. Les objectifs de ce projet consistaient donc à fournir des méthodes de mesure et/ou d'estimation pour connaître la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols. Deux démarches peuvent a priori être mises en oeuvre pour appréhender la variabilité des propriétés du milieu (Figure 1) :



d'une part, on peut extrapoler spatialement des mesures hydrodynamiques obtenues ponctuellement ; d'autre part, il s'agit d'estimer, à partir d'une variable déjà spatialisée – qui contient des informations indirectes sur les caractéristiques du sol – les propriétés de celui-ci. Ces deux stratégies doivent être complémentaires et nous nous sommes attachés à discuter les mérites réciproques de ces deux approches.

**Figure 1** : Démarche mise en oeuvre dans le projet : à gauche, estimation à partir de données ponctuelles à droite, estimation à partir d'une variable auxiliaire exhaustive

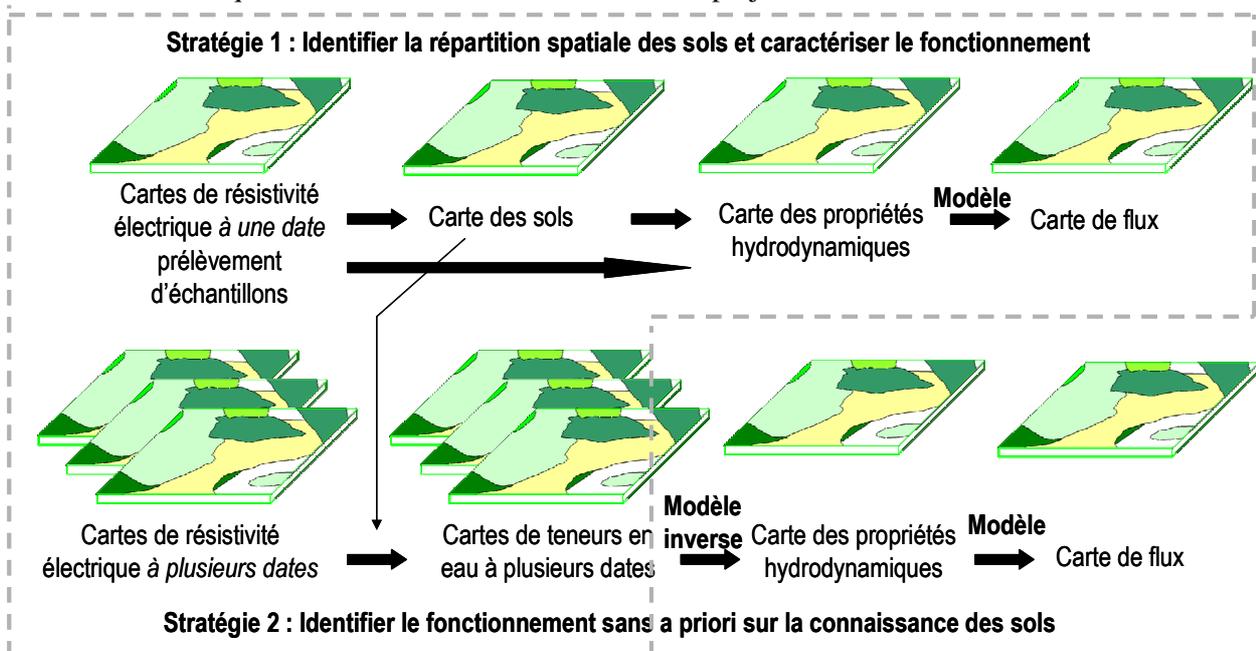
Le projet proposait initialement de traiter cette question à 2 échelles d'intérêt : d'une part, à l'échelle de la parcelle agricole, unité de décision de l'agriculteur, et d'autre part à l'échelle de la petite région agricole, unité de décision des acteurs locaux. Les résultats issus des travaux menés lors de la première année du projet nous ont encouragé à nous focaliser plus spécialement sur l'échelle parcellaire et ce sont ces résultats qui sont présentés dans cet article.

## II. DEMARCHE, MATERIELS, METHODES

### II.1. La démarche de l'étude et son évolution au cours du projet

L'une des stratégies prévues dans le projet (stratégie 2) consistait à caractériser la variabilité spatiale du milieu à l'aide d'une variable auxiliaire qui serait sous la dépendance des propriétés hydrodynamiques que l'on cherche à caractériser. Il s'agissait d'utiliser la mesure spatialisée de la résistivité électrique, dont on sait qu'elle dépend – entre autres – de la nature du matériau (type de sol) et de sa teneur en eau. Nous pensions initialement instrumenter le site d'étude en quelques points afin de réaliser un suivi temporel ponctuel de la teneur en eau. Ces données seraient ensuite inversées par un modèle et l'on obtiendrait ponctuellement des propriétés hydrodynamiques qui seraient extrapolées spatialement sur la base de la carte de résistivité électrique.

Les premiers résultats de notre projet nous ont conduit à modifier cette approche (Figure 2) : plutôt que de suivre ponctuellement la teneur en eau, nous avons choisi de mener des prospections géophysiques à plusieurs dates. Si la structure du sol – seule caractéristique du milieu qui peut varier à l'échelle de l'année culturale – est peu ou pas modifiée, on peut considérer en première approximation que c'est la teneur en eau seule qui fait évoluer le signal de résistivité électrique. Un suivi temporel de la résistivité électrique – qui nous permet de nous affranchir de l'effet du type de matériau – nous donne une information sur l'évolution temporelle de la teneur en eau et nous permet d'identifier des zones de fonctionnement homogènes du point de vue du fonctionnement hydrodynamique, sans a priori sur la connaissance du milieu. Il s'agit ensuite d'inverser cette information spatialisée pour estimer les propriétés hydrodynamiques. C'est la première étape de cette démarche qui a été mise en œuvre dans le cadre du projet.



**Figure 2** : les deux stratégies mises en œuvre dans le projet. L'encadrement pointillé délimite les contours du projet.

### II.2. Présentation des sites d'étude

Les deux stratégies présentées précédemment ont été mises en œuvre sur deux parcelles situées en Beauce. Ces deux parcelles se caractérisent par un fort contraste de types de sol sur une petite surface.

Le site de **Ouarville** est une parcelle de 22,5 ha, au sud-est de Chartres, en Beauce chartraine. C'est une parcelle cultivée qui s'étend sur une longueur de 982 m suivant une direction E.SE - O.NO, pour une largeur de 236 m. Un léger vallon traverse la parcelle dans sa largeur, et la divise ainsi en deux versants opposés et dissymétriques, avec à l'ouest des pentes généralement inférieures à 1,5%, et à l'est un bas de versant plus pentu (de 2 à 4,8%) qui laisse rapidement place à un plateau aux pentes très faibles (<1%). Le substrat calcaire, présentant un faciès issu de phénomènes de cryoturbation et de solifluxion, est recouvert de sols dont l'épaisseur varie de 0,30 m à plus de 1,2 m. Dans certains secteurs, une argile de décarbonatation peut recouvrir le calcaire. Au-dessus de cette dernière, ou directement sur le calcaire, on trouve en de nombreux points une formation d'argiles à meulrières. Une couverture de limon éolien « limon de Beauce » vient recouvrir les matériaux précédemment cités. Des graviers, essentiellement quartzueux, rattachés à la formation

du Burdigalien des « sables et graviers de Lozère », se trouvent en quantités très variables dans une partie des sols de la parcelle. Cinq types de sols ont été identifiés sur la parcelle (Moeys et al., 2006). Ce site sert de support à la première stratégie de notre étude.

Le site de **Villamblain** est une jachère non cultivée de 2,5 ha, situé en Petite Beauce. Comme le site de Ouarville, le matériau est un calcaire, cryoturbé par endroit, recouvert d'un limon éolien. Huit types de sols sont identifiés sur ce site. Ils se différencient principalement par le caractère calcaire ou calcique des sols, l'épaisseur de la formation argilo-limoneuse et les différents types de matériaux sous-jacents : calcaire dur, calcaire tendre, calcaire cryoturbé. Ce site sert de support à la deuxième stratégie de notre étude.

### II.3 Méthode de prospection géophysique et prélèvement d'échantillons

Le dispositif MUCEP (Multi Continuous Electrical Profiling) développé initialement au CNRS (Dabas et al., 2001; Panissod et al., 1997) est mis en œuvre sur les deux sites d'étude. Il permet l'acquisition en temps réel d'un grand nombre de points de mesure de résistivité électrique à l'échelle parcellaire. Il est composé d'un jeu d'électrodes roulantes, tractées (courant et mesure des différences de potentiel), couplé à un résistivimètre, d'un radar Doppler et d'un dGPS. Sur l'ensemble des deux parcelles, les différents passages du MUCEP (ou profils) sont espacés de 2m. Le long d'un profil et tous les 10 cm, trois mesures de résistivité électrique apparente sont enregistrées, correspondant, en théorie, à des épaisseurs investies par le courant de 0.5 (voie1), 1 (voie2) et 2 m (voie3). Chaque mesure électrique est corrigée de l'impact de la température, une température de référence de 25°C étant choisie (Keller and Frischknecht, 1966).

Sur le site de **Ouarville**, une prospection est réalisée pendant l'été et sert de support à l'échantillonnage de 140 sondages ponctuels permettant l'établissement de la carte des sols. Une fois cette carte établie, des prélèvements de sol non perturbé dans des cylindres (15 cm de diamètre, 7,5 cm de hauteur) sont réalisés sur les 19 horizons représentatifs de la parcelle. Leurs propriétés hydrodynamiques (rétention en eau et conductivité en régime insaturé) sont déterminées par la méthode évaporatoire de Wind (Tamari et al., 1993). Sur le site de **Villamblain**, quatre prospections MUCEP sont réalisées au cours de l'année 2006, avec un pas de temps de 2 mois environ (avril – juin – août – octobre). Une description pédologique réalisée sur 33 sites permet d'établir une carte des sols de haute résolution spatiale. De plus, lors de chaque intervention géophysique, ces mêmes sites sont échantillonnés aux profondeurs systématiques de 0-30, 30-50, 50-70 et 70-100 cm. Les teneurs en eau pondérales des volumes de sol prélevés (environ 100 cm<sup>3</sup>) sont déterminées par méthode gravimétrique et pondérées par l'épaisseur de sol concernée.

### II.4. Modélisation du fonctionnement hydrodynamique

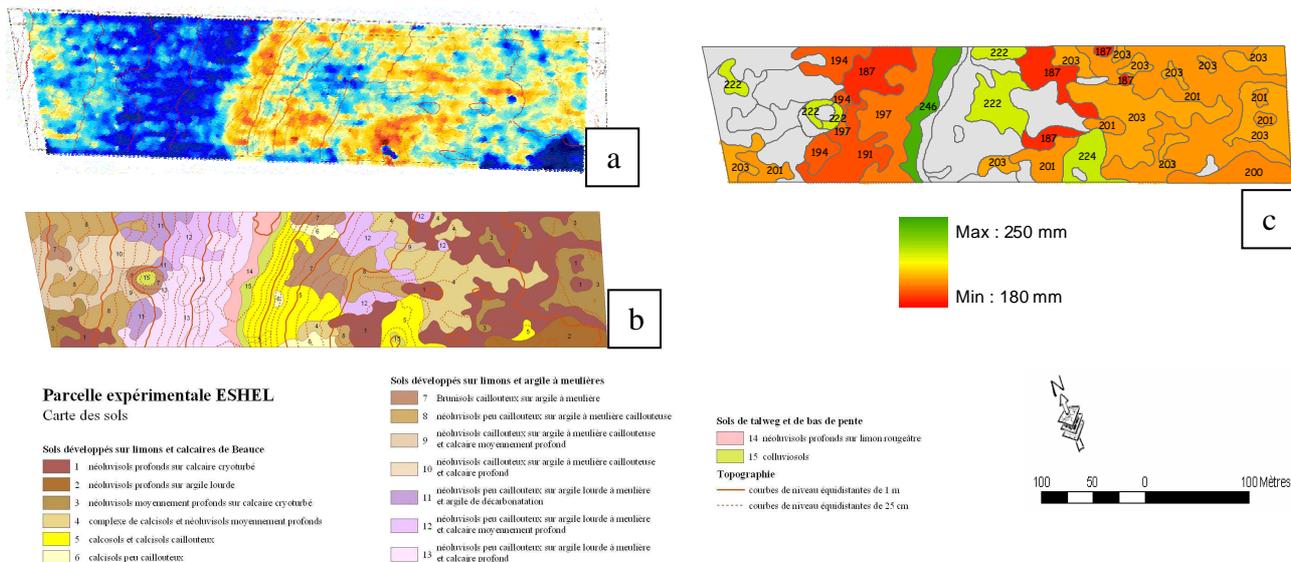
Dans le cadre de la première stratégie mise en œuvre, sur le site de Ouarville, on procède à une modélisation du fonctionnement hydrodynamique des sols. Le fonctionnement des sols étant essentiellement vertical dans cette zone, nous utilisons un modèle de fonctionnement 1D (Hydrus 1D, Simunek et al., 1998). Un modèle local est appliqué pour chaque unité de sol et généralisé à l'ensemble de l'unité. Afin d'être en mesure de discuter de la variabilité très locale – i.e. à l'intérieur d'une unité cartographique - nous avons caractérisé, par panneau électrique 2D ou 3D, la variabilité de l'épaisseur des horizons de sols. Cette information est ensuite utilisée dans la modélisation.

## **III. RESULTATS ET DISCUSSION**

### III.1. Identifier la répartition spatiale des sols et simuler le fonctionnement hydrodynamique spatialisé.

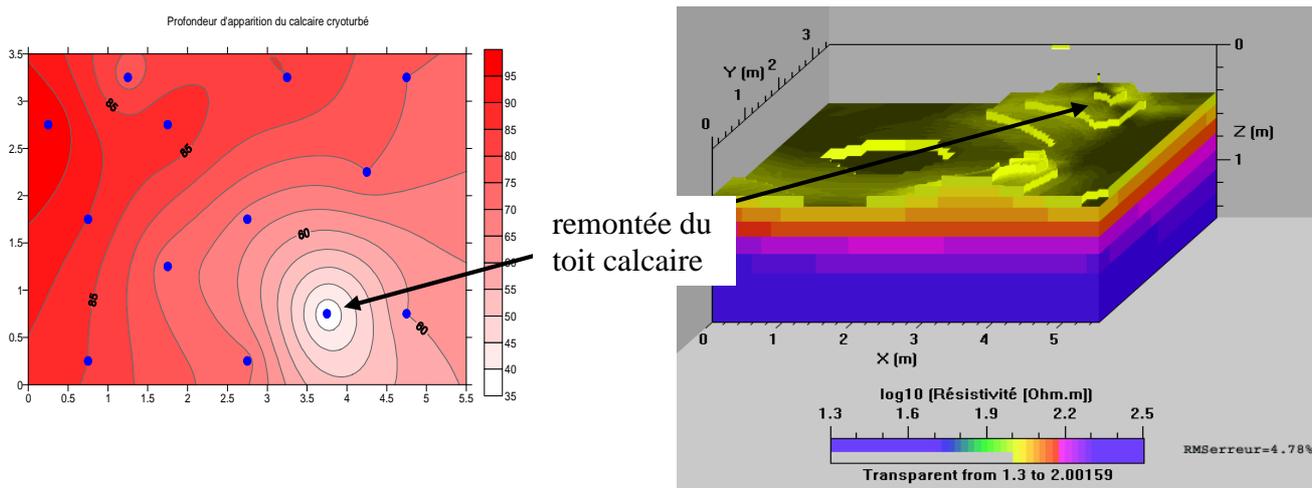
Ces travaux s'appuient sur le site de Ouarville. La prospection géophysique spatialisée met en évidence une structuration du milieu selon deux grandes zones : à l'ouest de la parcelle, des sols peu résistants, à l'est de la parcelle, des sols plus résistants (Figure 3). Dans la partie ouest, les sols (brunisol et néoluvisol) sont développés sur la formation d'argile à meulière, tandis qu'à l'est ils sont développés sur des calcaires. En milieu de parcelle, des colluviosols se développent dans le talweg. Sur toute la parcelle, certains sols sont peu épais et caillouteux. Afin de simuler le fonctionnement hydrodynamique, chaque unité de la carte des sols est représentée par un profil pédologique synthétique. Le drainage annuel à la base de chaque UTS est simulé grâce au modèle Hydrus 1D sur la base d'un scénario climatique réel (pluie et évapotranspiration issues de la station de Bricy, en Beauce). La figure 3 présente l'expression cartographique de la quantité d'eau qui arrive annuellement à la base du sol. Certaines unités cartographiques, constituées de sols très caillouteux pour lesquels la détermination expérimentale des propriétés hydrodynamiques par la méthode de Wind n'a pas été possible, ne sont pas renseignées. On constate néanmoins la très grande hétérogénéité de la parcelle, avec un écart de l'ordre de 30 % sur le drainage entre les zones les moins filtrantes (187 mm dans

les néoluvisols sur argile – Unité 12) et les plus filtrantes (246 mm pour les néoluvisols profonds sur limon – Unité 14).



**Figure 3 :** Parcelle de Ouarville. –a- Carte de résistivité électrique obtenue par MuCep (seule la voie 2 est présentée ici) –b- Carte des sols à haute résolution obtenue sur la parcelle –c- Evaluation spatiale de la lame d'eau drainée à la base du sol par modélisation 1D.

Les sondages à la tarière réalisés sur la parcelle montrent une ondulation à très faible période du toit calcaire sur lequel se développe le sol. Afin d'appréhender cette variabilité très locale, nous avons réalisé une prospection électrique tridimensionnelle – 96 électrodes espacées de 50 cm -, sur une zone de 20 m<sup>2</sup> environ. Treize sondages pédologiques montrent que le toit de l'horizon calcaire est situé entre 30 et 100 cm sur la zone prospectée (Figure 4a). Ces informations sont confirmées par la prospection géophysique qui permet, en outre, une visualisation continue de l'épaisseur du sol (Figure 4b) (Assi, 2007). Il convient de noter ici que les différences entre les deux figures qui illustrent la profondeur d'apparition du calcaire ont deux origines : d'une part, la différence des techniques de mesure et de représentation cartographique (le sondage est ponctuel et la carte résulte d'une interpolation alors qu'en résistivité, la carte résulte de l'inversion de données de résistivité apparente plus résolues dans l'espace). ; d'autre part, la nature du substrat n'est pas la seule source de variation de la résistivité électrique mesurée. Celle-ci dépend également de la teneur en eau du sol dont on sait par ailleurs qu'elle est fortement variable dans l'espace.



**Figure 4 :** Variabilité à courte distance de l'épaisseur du sol. A gauche, profondeur d'apparition du calcaire d'après 13 sondages ponctuels. A droite, représentation d'un écorché de la profondeur d'apparition du calcaire d'après la prospection géophysique 3D.

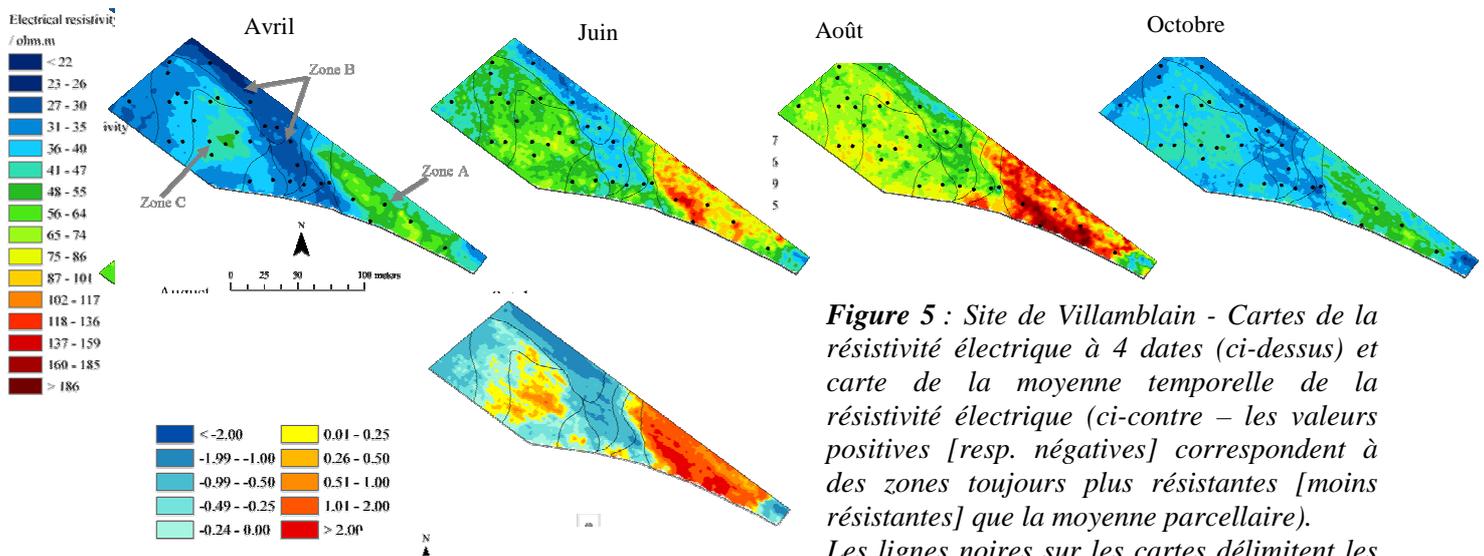
La prise en compte de cette variabilité de l'épaisseur du sol entraîne, sur certaines zones, une variation de l'estimation de la lame d'eau drainée par simulation de l'ordre de 30%. Certains points de fuite peuvent ainsi être identifiés.

### III.2. Identifier le fonctionnement hydrodynamique à l'échelle parcellaire sans a priori sur l'organisation du milieu

Ces travaux s'appuient sur le site de Villamblain. Une prospection géophysique spatialisée est réalisée à quatre dates dans l'année. Nous savons que le signal de résistivité électrique, dépend, au premier ordre, du type de sol, de sa teneur en eau, de la composition de la solution du sol et de la température du sol. Des travaux de laboratoire ayant montré par ailleurs que l'effet de la composition du sol était négligeable devant l'effet de la teneur en eau sur les sols étudiés et sachant par ailleurs que l'on peut s'affranchir de l'effet de la température par un modèle de conversion, le signal mesuré ne dépend que du type de sol et de la teneur en eau. Des prospections répétées et calées spatialement devraient montrer simplement l'effet de la teneur en eau.

La figure 5 présente la résistivité de la voie 1 du Mucep, pour le site d'étude, aux quatre dates de prospection. On observe que les valeurs de résistivité en un point donné varient dans le temps, sous l'effet de la variation de la teneur en eau du sol. On note par ailleurs que, quelle que soit la date, certaines zones présentent systématiquement une résistivité plus élevée que d'autres zones de la parcelle, ce que confirme la carte de moyenne temporelle. La confrontation de cette carte avec la carte des sols met en évidence les points suivants : certaines zones homogènes en terme de résistivité correspondent à des unités de sol bien identifiées (par exemple, la zone située au sud-est de la parcelle, sur des sols caillouteux peu épais, est systématiquement plus résistante, donc plus sèche) ; en revanche, certaines zones homogènes en terme de résistivité ne concordent pas avec des unités de sol. Ce constat, essentiel, montre que la carte des sols – établie généralement sur la base des types de matériau et non de leurs propriétés de fonctionnement – n'est pas systématiquement le support le plus pertinent pour estimer le fonctionnement hydrodynamique de la couverture pédologique (Besson, 2007).

Sur la base de ces résultats, des cartes de teneurs en eau, estimées sur la base des cartes de résistivité, peuvent être produites (résultats non illustrés ici).



**Figure 5 :** Site de Villamblain - Cartes de la résistivité électrique à 4 dates (ci-dessus) et carte de la moyenne temporelle de la résistivité électrique (ci-contre – les valeurs positives [resp. négatives] correspondent à des zones toujours plus résistantes [moins résistantes] que la moyenne parcellaire). Les lignes noires sur les cartes délimitent les unités de sol.

## IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les travaux à l'échelle parcellaire menés dans le cadre de ce projet avaient pour objectif de tester différentes stratégies d'estimation spatialisée des propriétés des sols. L'approche classique, basée sur une carte des sols dont les unités cartographiques sont renseignées par les propriétés hydrodynamiques, nous a permis de mettre en évidence que le fonctionnement, à l'échelle parcellaire peut être extrêmement contrasté : des simulations de la lame d'eau drainée à la base du sol montrent que celle-ci peut varier de plusieurs dizaines de mm en fonction des unités de sol au cours d'une année. L'hétérogénéité intrinsèque des unités de sol peut

générer également des différences fortes de fonctionnement, jusqu'à 30 % de variation sur la lame d'eau drainée.

L'approche complémentaire, basée sur la détermination de zones de fonctionnement homogènes, sans connaissance a priori de la carte des sols, met en évidence que celle-ci constitue un support globalement satisfaisant pour la description du fonctionnement. Dans le détail cependant, des discordances apparaissent entre les zones identifiées par résistivité et la carte des sols. C'est en partie à cause de la variation de structure de la couche de surface, que l'on doit cette variation du comportement hydrodynamique. Cette stratégie, testée ici sur un système dont le fonctionnement hydrologique est majoritairement vertical, permettrait de mettre en évidence et de quantifier, dans d'autres milieux, des écoulements latéraux, voire des remontées capillaires.

Les perspectives de ce travail consisteraient, dans un premier temps, à mener la deuxième stratégie jusqu'à son terme, c'est-à-dire produire une carte des propriétés hydrodynamiques des sols puis simuler le fonctionnement. Il s'agirait alors de transformer explicitement les cartes de résistivité électrique en carte de teneur en eau, puis en carte de potentiel hydrique afin que nous soyons en mesure de décrire les flux.

Nous avons également proposé l'hypothèse que la variabilité du fonctionnement soit en partie due à la variabilité de la structure du sol, notamment dans l'horizon de surface. Cela repose la question de la variabilité temporelle des propriétés hydrodynamiques des sols, que nous avons supposées constantes dans ce projet. Une étude spécifique sur cet aspect mériterait d'être menée et pourrait s'appuyer sur l'ORE de Lusignan, dont les itinéraires techniques sont connus.

## V. REFERENCES

- ASSI J.P.**, 2007. Contribution de la tomographie électrique 3D à la détermination de la variabilité spatiale du sol à petite échelle : application au suivi des phénomènes d'infiltrations rapides. *Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie*.
- BESSON A.**, 2007. Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau des sols à l'échelle parcellaire par la méthode de résistivité électrique. *Thèse de l'Université d'Orléans*, 192 pages.
- DABAS, M., A. TABBAGH, ET D. BOISGONTIER.** 2001. Multi-depth continuous electrical profiling for characterization of in-field variability. *European Conference On Precision Agriculture*, June 18th-21st 2001, Montpellier - France.
- KELLER, G.V., F.C. FRISCHKNECHT,** 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press, Oxford.
- MOEYS J., B. NICOUILLAUD., A. DORIGNY, Y. COQUET ET I. COUSIN I.**, 2006. Cartographie des sols à grande échelle : intégration explicite d'une mesure de résistivité apparente spatialisée à l'expertise pédologique. *Etude et gestion des Sols*, 13 (4) : 269-286.
- PANISSOD, C., M. DABAS, A. JOLIVET, ET A. TABBAGH,** 1997. A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3m) geoelectrical investigation: the 'Vol-de-canards' array. *Geophysical Prospecting* 45: 983-1002.
- SIMUNEK J., O. WENDROTH ET M.TH. VAN GENUCHTEN,** 1998. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from laboratory tension disc infiltrometer experiments. *Water Resources Research*. 35(10): 2965-2979.
- TAMARI, S., L. BRUCKLER, J. HALBERTSMA, ET J. CHADOEUF,** 1993. A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 642-651.