

La mesure de résistivité électrique : un outil d'aide à la cartographie des sols L'exemple de l'Unité expérimentale d'Epoisses

Maud Séger¹, Hocine Bourennane¹, Marie-Noël Mistou², Catherine Pasquier¹, Guillaume Giot¹,
Marjorie Ubertos³, Isabelle Cousin¹

Résumé. A l'échelle parcellaire, le sol constitue un milieu dont la nature et les propriétés varient. Pour caractériser plus précisément les sols de certaines Unités expérimentales de l'INRA, des prospections géoélectriques ont été réalisées. Sur la base de l'exemple de l'UE d'Epoisses, ce document présente d'une part les avantages de la mesure électrique pour la caractérisation des sols et d'autre part les techniques SIG (système d'informations géographiques) mises en œuvre pour le traitement des données.

Mots clés : résistivité électrique, hétérogénéités intraparcellaires, cartographie, caractérisation des sols, SIG

Introduction

La nature du sol est très variable dans l'espace, à toutes les échelles, depuis l'horizon jusqu'au bassin versant. Au sein d'une même parcelle, il n'est pas rare d'observer plusieurs types de sols présentant des caractéristiques physiques, physico-chimiques et biogéochimiques très différenciées. Pour conduire des études agronomiques et environnementales de qualité à l'échelle infra-parcellaire, la cartographie des sols, qui permet de décrire leur variabilité, est une étape incontournable. Les Unités expérimentales (UE) de l'INRA des Départements EA (Environnement et Agronomie) et BAP (Biologie et Amélioration des Plantes), ont entrepris de cartographier finement les propriétés des sols de leurs parcelles d'essais, dans le but de mieux quantifier les stress hydriques et azotés rencontrés par les cultures lors des expérimentations agronomiques (projet CAREX). A cette fin, des mesures de résistivité électrique ont été conduites sur les Domaines INRA des Départements concernés. En effet, cette mesure quasi-exhaustive, rapide et non destructive permet de caractériser des hétérogénéités du sol de manière quasi-continue dans l'espace. L'objectif de ce travail est de montrer, à partir de l'exemple de l'UE d'Epoisses, que l'intégration sous SIG (système d'information géographique) de mesures ponctuelles de propriétés du sol et de données de résistivité électrique s'avère pertinent pour décrire la variabilité spatiale des sols.

La mesure de résistivité électrique

La résistivité électrique est la propriété physique du sol qui caractérise sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique. Pour la mesurer, on injecte dans le sol un courant électrique d'intensité connue, via deux électrodes (A et B). Deux autres électrodes (M et N) permettent de mesurer la différence de potentiel qui en résulte. On calcule alors la résistivité électrique selon l'équation (1).

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}} \quad (1)$$

où ρ est la résistivité électrique (ohm.m), ΔU_{MN} la différence de potentiel (V), I_{AB} l'intensité électrique (A) et K un facteur géométrique qui dépend de la configuration géométrique des électrodes, c'est-à-dire de leur position respective les unes par rapport aux autres. La circulation du courant électrique à l'intérieur du sol dépend de la nature de ce dernier (granulométrie, présence d'éléments grossiers) et de son état lié à des facteurs conjoncturels (remplissage de la porosité par de l'eau, arrangement spatial des particules de sol, température).

1 INRA, UR0272 SOLS, F-45075 Orléans, France ; Maud.Seger@orleans.inra.fr

2 INRA, UMR0211 Agronomie, INRA Versailles-Grignon, F-78850 Thiverval-Grignon ; France

3 AgroSup Dijon, UMR 1347 Agroécologie, F- 21079 Dijon, France

Dans un milieu hétérogène tel que le sol, la mesure de résistivité électrique résulte de la contribution volumique de toutes les hétérogénéités traversées par le courant, on parle alors de résistivité apparente. Il est important de noter que le volume prospecté augmente avec l'écartement entre les électrodes.

Conditions de mesure

La mesure de résistivité électrique est de manière générale une méthode robuste et fiable. Cependant, certaines conditions de prospection peuvent engendrer une trop forte résistance de contact entre le sol et les électrodes et ainsi dégrader la qualité des mesures. On évitera par exemple les prospections sur des sols trop secs ou trop caillouteux en surface.

Comme précisé dans le paragraphe précédent, la résistivité électrique du sol dépend de variables pérennes (nature du sol) et de variables conjoncturelles. Si l'objectif d'une prospection de résistivité électrique est de caractériser la nature du sol, il est important de la réaliser dans des conditions hydriques et de température les plus constantes possibles au cours de la prospection. Dans tous les cas, des mesures de la teneur en eau et de la température du sol sont des éléments de compréhension très importants.

Le dispositif automatic resistivity profiler (ARP)

L'automatic resistivity profiler (ARP), évolution du MUCEP développé par Panissod et al., (1997) est un dispositif tracté permettant de déplacer quatre paires d'électrodes (une paire AB pour l'injection et trois paires M_1N_1 , M_2N_2 et M_3N_3 pour la mesure de la différence de potentiel) attelées à l'arrière d'un véhicule (Figure 1). Ce dispositif permet donc de prospector les sols à la fois latéralement, grâce au déplacement du véhicule, et sur trois profondeurs, selon les trois voies de mesures V1, V2 et V3. Chaque mesure est géo référencée par un GPS (global positioning system) différentiel (John Deere, modèle StarFire ITC, précision planimétrique de l'ordre de 10 cm).

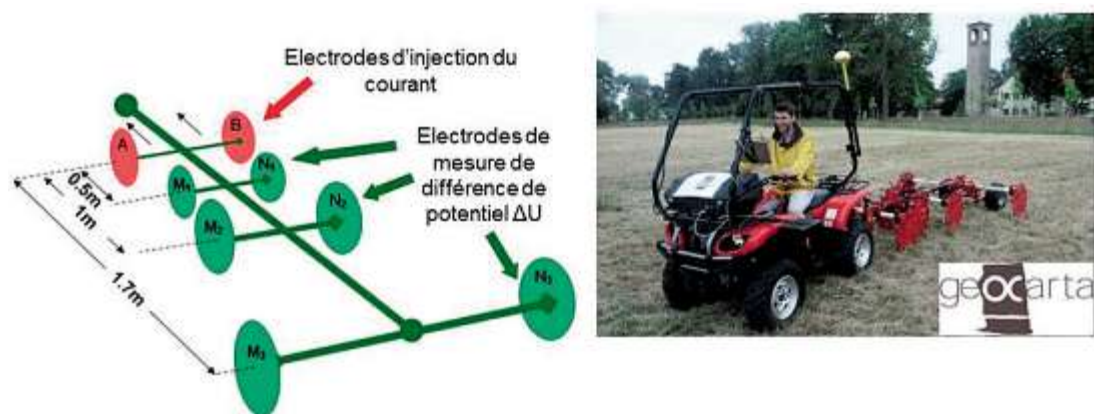


Figure 1 . Schéma et photographie du dispositif tracté ARP, déployé par la société GEOCARTA (www.geocarta.net).
Photo : Geocarta.

Valorisation des données : l'exemple de l'UE d'Epoisses

L'UE d'Epoisses

Le Domaine expérimental d'Epoisses se situe au Sud-Est de Dijon et compte environ 120 ha subdivisés en une centaine de parcelles expérimentales. La carte pédologique au 1/100 000 (Chrétien, 1976) indique que le site présente deux types de sols : des Rendzines brunifiées, de faibles épaisseurs (20 à 40 cm) et des sols bruns calcaïques plus profonds (épaisseur supérieure à 40 cm). Les deux types de sols reposent sur un cailloutis calcaire.

La campagne de prospection ARP sur le site d'Époisses a eu lieu du 15 au 25 novembre 2011. D'après les données de la station météorologique du site, cette période se caractérise par de faibles précipitations (2,5 mm au total) et une faible évapotranspiration (2 mm au total selon le modèle de Penman). La température journalière moyenne du sol à 50 cm a varié entre 9,5 et 11,3 °C pendant ces 10 jours. L'effet des variations temporelles de ces variables a été considéré comme négligeable dans le cas de cette étude.

Représentation des cartes de résistivité électrique

Les fichiers contenant les données de résistivité sont constitués des coordonnées géographiques de chaque point de mesure et des trois valeurs de résistivité associées (V1, V2 et V3). Les données fournies sont de deux types : 1) les données pré-traitées qui correspondent aux mesures réalisées sur le terrain avec suppression des valeurs aberrantes, recalage des coordonnées géographiques et filtrage 1D et 2) une grille régulière de points, grille qui correspond aux données pré-traitées, interpolées selon une maille carrée⁴. La **Figure 2** présente les cartes de résistivité pour les trois voies de mesure sur l'UE d'Époisses réalisées dans un SIG (Arc Map 10.1) à partir de la grille régulière.

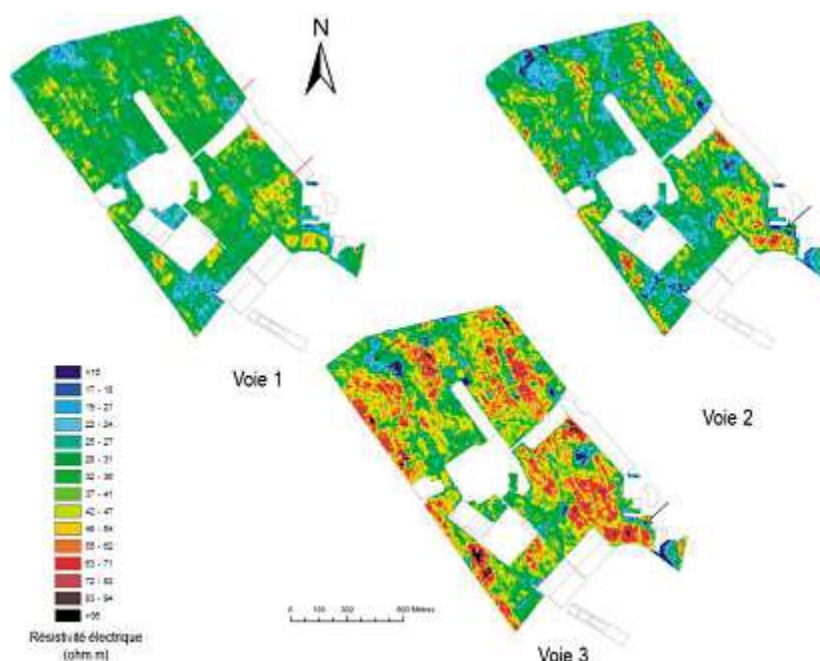


Figure 2. Cartes interpolées des résistivités électriques mesurées par les trois voies de l'ARP et plan d'échantillonnage.

Les valeurs de résistivité des trois voies sont comprises entre 10 et 100 ohm.m avec une majorité de valeurs comprises entre 10 et 80 ohm.m. Du fait du caractère emboîté des mesures, on retrouve une organisation spatiale similaire entre les trois voies, c'est-à-dire que les zones les plus résistantes sur la voie 1 le sont également sur les voies 2 et 3. La forme de certaines zones de faibles résistivités fait penser à des structures de type paléo chenal (voir flèches noires sur la **Figure 2**). La voie 1 met en évidence des structures dont les contours suivent les limites de parcelle (voir flèches rouges sur la **Figure 2**). Cette voie prospectant approximativement sur la couche 0-50 cm est en effet influencée par la structure du sol, elle-même largement dépendante des types de cultures et des pratiques culturales mises en œuvre sur les parcelles comme par exemple le type de travail du sol. Les voies 2 et 3 qui englobent des volumes de sol plus importants sont moins influencées par cet effet parcellaire. La voie 3 met en évidence des résistivités en moyenne plus élevées (moyenne égale à 44 ohm.m) que celles des voies 1 et 2 (moyennes égales à 32 et 33 ohm.m respectivement), laissant à penser que le volume prospecté intègre une partie du cailloutis calcaire résistant.

⁴ L'interpolation est réalisée selon une fonction spline cubique. Cette méthode est adaptée à la création de surfaces variant graduellement. La taille de la maille dépend de l'écartement entre les passages ARP réalisés lors de la prospection. Elle est égale à environ la moitié de cet écartement. Par exemple pour une prospection réalisée tous les 6 m, la maille aura une taille de 3 m de côté.

Guide pour la réalisation d'un plan d'échantillonnage

Les cartes de résistivité électrique, dont la structuration spatiale est liée aux caractéristiques et propriétés des sols décrites plus haut, ne constituent pas pour autant des cartes de sol. Pour réaliser une carte des sols, on doit en effet décrire certaines variables pédologiques, à l'aide de sondages à la tarière ou de fosses pédologiques. La position de ces derniers peut être réfléchiée en fonction de la variabilité spatiale du milieu, appréhendée notamment par les mesures de résistivité électrique. Celles-ci viennent en effet s'ajouter aux connaissances *a priori* du milieu (carte géologique, modèle numérique d'altitude, etc.) et permettent d'optimiser la position des sondages et le futur contour des unités cartographiques de sol. Pour autant, la connaissance exhaustive de la résistivité électrique sur le site d'étude ne s'accompagne pas d'une réduction du nombre de sondages pédologiques pour une résolution cartographique donnée.

Sur le site d'Epoisses, la connaissance que nous avons *a priori* sur l'épaisseur du sol a orienté le choix de la carte de la voie 2 comme support pour la réalisation du plan d'échantillonnage. Elle a été représentée en quatre classes de gamme de résistivité et les 30 points de sondages pédologiques ont été répartis équitablement au sein de ces dernières (**Figure 3**) grâce au SIG. Ce nombre de points, qui représente une observation pour 4 ha de terrain, permet théoriquement de restituer une carte des sols à l'échelle du 1/25 000 (norme AFNOR NFX31-560).

A l'aide d'un DGPS (Trimble, Pro XR, précision < 1 m), les points identifiés sur le SIG ont été implantés sur le terrain pour y effectuer des sondages pédologiques. Pour chaque sondage, la profondeur du sol a été mesurée et les horizons de sols ont été décrits et échantillonnés pour la réalisation d'analyses de sols (granulométrie, CEC, cations échangeables, pH...) au laboratoire de l'INRA d'Arras.

L'observation des sondages de sol montre qu'ils sont constitués d'un horizon de surface labouré reposant soit directement sur le cailloutis calcaire pour les sols de faible épaisseur, soit, pour les sols plus épais sur un horizon structural. Sur l'ensemble des points décrits, l'épaisseur du sol varie entre 23 et 192 cm. Les analyses physico-chimiques montrent des résultats comparables d'un sondage de sol à l'autre. Ces résultats ont permis de mettre en évidence que le site est composé de sols qui se différencient essentiellement par leur épaisseur, en cohérence avec la carte des sols à plus petite échelle réalisée sur la région par Chrétien (1976).

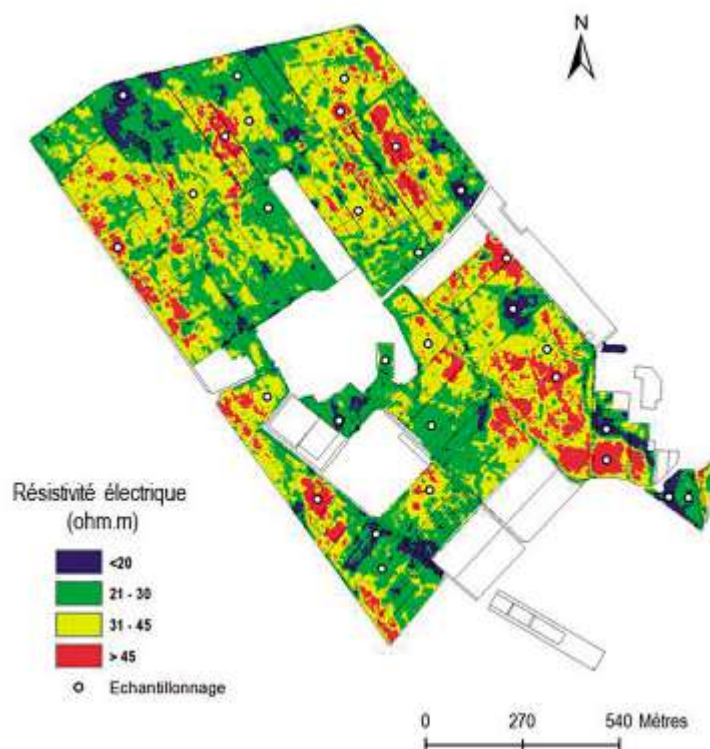


Figure 3 . Carte de quatre classes de résistivité à partir des mesures de la voie 2 et plan d'échantillonnage.

Construction de cartes de profondeurs du sol

Des analyses statistiques (Mitombo, 2013), ont montré qu'il existe, dans le cas du site d'Epoisses, une relation linéaire entre l'épaisseur du sol et le logarithme de la résistivité électrique mesurée par la voie 3 (**Figure 4**) : dans le cas de l'UE d'Epoisses, 71 % de la variation de l'épaisseur est expliquée par la résistivité mesurée sur la voie 3.

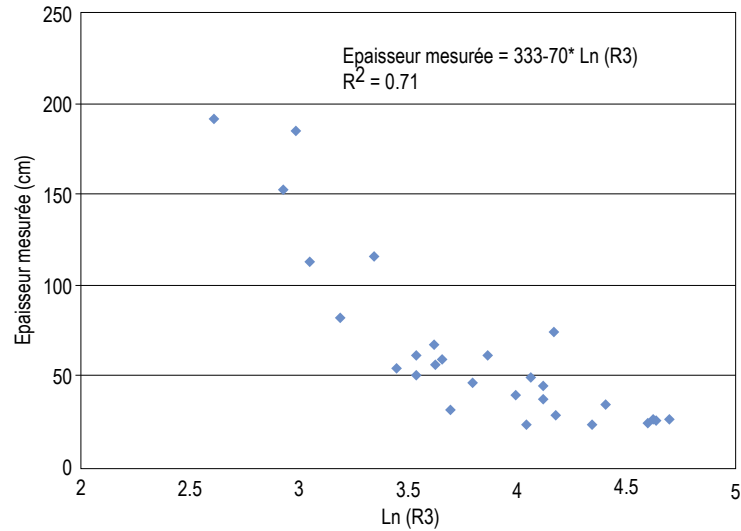


Figure 4. Modèle linéaire entre l'épaisseur du sol mesurée et le logarithme de la résistivité électrique de la voie 3.

Ce modèle a permis de réaliser, sur son domaine de validité (dans la gamme de résistivité qui a servi à établir le modèle), une carte de l'épaisseur estimée du sol à partir des résistivités de la voie 3 (**Figure 5**).

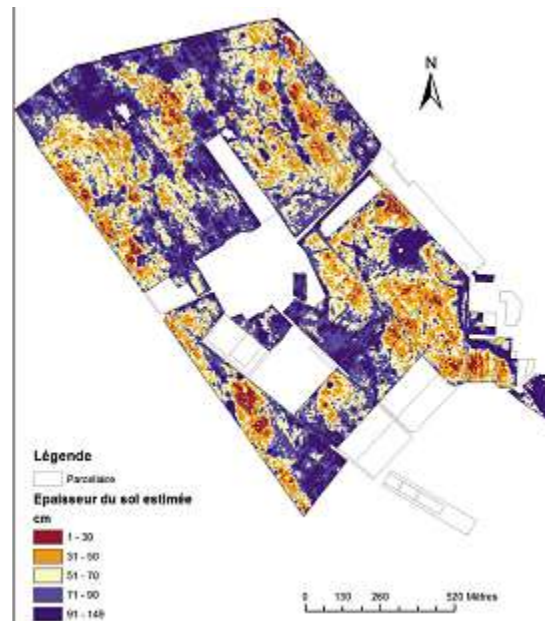


Figure 5. Carte de l'épaisseur du sol estimée grâce au modèle de régression linéaire. Les zones représentées en couleur blanche sur la carte correspondent aux zones qui n'ont pas pu être estimées par le modèle car en dehors du domaine de validité.

La gamme des épaisseurs estimées (3 à 149 cm) est cohérente avec les observations de terrain.

Pour critiquer la qualité du modèle, une nouvelle campagne de mesure doit être réalisée afin d'obtenir un jeu de données de validation indépendant.



Conclusion

Sur la base de l'exemple du Site expérimental de l'INRA d'Epoisses, ce document permet d'illustrer l'intérêt de l'intégration sous SIG de mesures de résistivité électrique associées à des mesures pédologiques pour la cartographie des sols. En effet, la carte de résistivité électrique permet d'acquérir, dans un premier temps une connaissance des hétérogénéités du sol à l'échelle infra-parcellaire et ce, sur trois profondeurs d'investigation ce qui s'avère utile pour établir une stratégie d'échantillonnage. La prospection géoélectrique ne permet pas de faire des cartes des sols ou de propriétés du sol directement. Cependant, des travaux de recherche, nécessitant une phase de calibration, ont permis de proposer des modèles statistiques ou géostatistiques permettant de réaliser des cartes de certaines propriétés du sol (teneur en eau, charge en éléments grossiers par exemple). Dans le cas de l'UE d'Epoisses, elle a permis de construire une carte de l'épaisseur du sol à partir d'un modèle statistique.

Remerciements

Nous remercions Rodolphe Hugard de l'UE d'Epoisses et Gilles Grandeau de l'UMR Agronomie pour le travail d'échantillonnage réalisé pendant la campagne de prélèvement des sols.

Références bibliographiques

Panissod C, Dabas M, Jolivet A, Tabbagh A (1997) A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3 m) geoelectrical investigation : the 'Vol-de-canards' array. *Geophys Prospect* 45, 983-1002.

Chrétien J (1976) Carte pédologique de la France à 1/100 000. Feuille de Dijon, INRA. Editions, carte et notice. 218 p.

Mitombo ND (2013) Valorisation d'une prospection électrique pour établir une carte de l'épaisseur du sol. Mémoire de Master 2 Géosciences planètes ressources Environnement, spécialité Sol, Eaux et Environnement, Université de Lorraine, 25 p.