L'apport des méthodes géophysiques au service de la caractérisation de la fertilité des sols

Isabelle I. Cousin, Arlène Besson, Maud Seger, Guillaume Giot, Guy Richard, Dominique D. King

▶ **To cite this version:**

Isabelle I. Cousin, Arlène Besson, Maud Seger, Guillaume Giot, Guy Richard, et al.. L'apport des méthodes géophysiques au service de la caractérisation de la fertilité des sols. Innovations Agronomiques, 2012, 21, pp.13-29. hal-02642939

HAL Id: hal-02642939
https://hal.inrae.fr/hal-02642939

Submitted on 28 May 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.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

L'apport des méthodes géophysiques au service de la caractérisation de la fertilité des sols

Cousin I.[a], Besson A.[a,b], Seger M.[a], Giot G.[a], Richard G.[a,c], King D.[a]

[a] : INRA, UR 0272 - Unité de Science du Sol, Centre de recherche d'Orléans, 2163 Avenue de la Pomme de Pin, CS 40001 ARDON, 45075 Orléans Cedex 2

[b] : INRA, US 1106 - Unité Infosol, Centre de recherche d'Orléans, 2163 Avenue de la Pomme de Pin, CS 40001 ARDON, 45075 Orléans Cedex 2

[c] : INRA, Département Environnement et Agronomie, Centre de recherche d'Orléans, 2163 Avenue de la Pomme de Pin, CS 40001 ARDON, 45075 Orléans Cedex 2

Correspondance : Isabelle.Cousin@orleans.inra.fr

Résumé

Afin d'ajuster au mieux les pratiques agricoles aux besoins de la plante tout en limitant l'impact environnemental des actions de fertilisation, il convient de connaître le plus finement possible les caractéristiques du sol, support de culture, ces dernières étant susceptibles de varier fortement dans le temps ou dans l'espace. Nous présentons ici l'utilisation de quelques outils de géophysique de subsurface, en particulier la méthode de la résistivité électrique, pour caractériser la fertilité du sol. Les principes de base de la mesure de résistivité électrique, ainsi que les méthodes de prospection par sondage, par panneau électrique et par traîné électrique sont présentés dans un premier temps. Nous montrons ensuite que la structure du sol, élément-clé de la fertilité physique, peut être caractérisée dans des situations simples au champ par résistivité électrique. Il est en particulier possible de discriminer des zones très tassées par le passage d'engins agricoles, de zones plus poreuses ou plus fissurées. Pour autant, la géométrie réelle des zones tassées et l'intensité du tassement ne peuvent être déduites de la prospection électrique. Dans un second temps, nous montrons que la teneur en nitrate du sol – pour peu qu'elle reste dans une gamme classique de teneur observée sur des sols agricoles - ne modifie pas le signal de résistivité électrique, lequel ne peut donc constituer une méthode diagnostique de l'état de fertilité chimique du sol.

Mots-clés : structure du sol, géophysique, teneur en eau, masse volumique apparente, expérimentation

Abstract: Geophysical methods to characterise soil fertility

To both adapt agricultural practices to plant demand and limit environmental impact of fertilization, we need to carefully know the soil characteristics, the latter being strongly variable in space and time. We present here the use of several subsurface geophysical tools, especially the electrical resistivity method, to characterise the soil fertility. Principles of electrical resistivity measurements as well as electrical soundings, electrical arrays and electrical spatial prospection methods are first described. We then demonstrate that the soil structure, a key component of the physical soil fertility, can be described in situ by electrical resistivity in some simple cases: the soil clods highly compacted by traffic can be differentiated from the porous areas or the cracks. Nevertheless, the real geometry of compacted zones and the intensity of compaction cannot be interpreted from electrical measurements. Finally, we demonstrate that the nitrate content – as far as it is in the range of nitrate content for agricultural soils – does not modify the electrical resistivity signal. Thus, the latter cannot be used to interpret the chemical fertility of soil.

Keywords: soil structure, geophysics, water content, bulk density, experiment

1. Introduction

Le concept de fertilité des sols a évolué au cours des dernières décennies et plusieurs définitions sont reconnues dans la littérature. La plus communément retenue actuellement est celle de Häberli et al. (1991, cité par Gobat et al., 2010) qui définit un sol fertile lorsque celui-ci i) présente une faune et une flore variées et biologiquement actives, une structure typique, une capacité de dégradation intacte, ii) permet une croissance normale des végétaux sans nuire à leurs propriétés, et iii) garantit une bonne qualité des produits. Nous utiliserons, pour notre part, la définition plus ancienne mais toujours d'actualité de R. Morel (1989), citée par Chaussod (1996) : « la fertilité est la facilité avec laquelle la racine peut bénéficier dans le sol des différents facteurs de croissance: chaleur, eau, éléments chimiques nécessaires à la plante, substances organiques de croissance ». On considérera donc ici que la fertilité est une combinaison d'éléments physiques et (bio)chimiques qui permettent la croissance harmonieuse de la culture. Afin d'ajuster au mieux les pratiques agricoles aux besoins ainsi définis de la plante, tout en limitant l'impact environnemental des actions de fertilisation, il convient donc de connaître, le plus finement possible, les caractéristiques du sol, support de culture. Ces caractéristiques sont susceptibles de varier fortement dans le temps, à l'échelle de la saison culturale, et dans l'espace, à l'échelle du profil de sol ou de la parcelle agricole. A l'heure actuelle, les technologies développées dans le domaine de la géophysique de subsurface permettent une reconnaissance à haute résolution spatiale de certaines caractéristiques du sol. Nous présenterons ici l'utilisation de quelques outils géophysiques pour caractériser la fertilité des sols. En particulier, nous nous attacherons à faire le point sur la plus populaire d'entre elles, la résistivité électrique, et sur les informations qu'elle peut fournir à l'agriculteur et au conseiller technique dans le cadre de leur démarche de fertilisation. Dans un premier temps, nous rappellerons brièvement le principe de la résistivité électrique et de sa mise en œuvre expérimentale. Dans un second paragraphe, nous décrirons dans quelle mesure la résistivité électrique peut fournir des indications sur la qualité physique des sols. Enfin, dans un dernier paragraphe, nous décrirons brièvement ce que la résistivité électrique ou d'autres outils géophysiques peuvent apporter à la connaissance des propriétés biochimiques du sol.

2. La résistivité électrique des sols : concepts et principe de mesure

2.1. La résistivité électrique des sols : définition et facteurs d'influence

La résistivité électrique ρ d'un milieu est la propriété physique qui détermine la capacité de ce milieu à s'opposer au passage d'un courant électrique. En termes mathématiques, c'est la résistance ohmique (R en ohm) d'un cylindre de section (S en m²) et de longueur (L en m) unitaire :

$$\rho = R \times \frac{S}{L} \qquad [1]$$

On l'exprime en Ohm.m. Elle représente l'inverse de la conductivité σ (capacité du milieu à laisser passer un courant électrique) qui est exprimée en Siemens.

Dans les sols, le passage du courant se fait selon un mode dit électrolytique : ce sont les ions contenus dans l'eau du milieu qui transportent les charges. On parle de conductivité électrolytique volumique quand les déplacements de charges s'effectuent dans l'eau interstitielle et de conductivité électrolytique surfacique lorsque les déplacements sont liés aux ions présents à la surface des particules solides.

La résistivité électrique des sols est sous la dépendance de facteurs multiples. Au premier ordre, on retiendra quatre facteurs d'influence principaux :

- la nature des éléments constitutifs du sol et leur arrangement dans l'espace – La résistivité du sol varie dans une large gamme : de l'ordre de 1 Ohm.m pour les sols très salés, à 10^5 Ohm.m, pour des sols très secs (Samouëlian et al., 2005). L'air étant extrêmement résistant, c'est également la porosité du sol qui conditionne fortement sa résistivité électrique. C'est justement cette caractéristique qui nous intéresse ici et nous reviendrons plus longuement sur ce point dans le troisième paragraphe de cet article.
- La teneur en eau du sol – Le passage du courant dans le sol étant essentiellement de nature électrolytique, la teneur en eau du sol joue un rôle fondamental sur la résistivité électrique du milieu. Celle-ci est d'ailleurs parfois utilisée comme outil de caractérisation de la teneur en eau du sol.
- La température – La résistivité électrique diminue significativement lorsque la température du sol augmente. Pour comparer des données de résistivité électrique entre elles, il convient donc d'exprimer la résistivité du sol à une température de référence. L'équation de Campbell et al. (1948) est largement utilisée mais Besson et al. (2008) présentent une revue complète des équations de correction de la température du sol.
- La concentration de la solution du sol – Lorsque la teneur en eau du sol est telle que le transport de charges électriques est essentiellement de nature électrolytique volumique, la concentration de la solution du sol peut jouer a priori un rôle non négligeable sur la mesure de la résistivité électrique.

2.2. La résistivité électrique des sols : principe de mesure

Pour mesurer la résistivité électrique d'un sol, il est nécessaire d'injecter un courant électrique continu à la surface du sol et de mesurer la différence de potentiel qui en résulte. Quelle que soit la technique choisie, le dispositif de mesure comporte quatre électrodes[1] (on parle de quadripôle) : A et B pour l'injection du courant, M et N pour la mesure de la différence de potentiel. Dans un milieu homogène ou isotrope, les lignes de courant pénètrent le milieu de façon régulière, et l'on peut définir la résistivité électrique par la loi d'Ohm (Figure 1) :

$$\rho = \frac{\Delta V}{I}\left[\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}-\frac{1}{AN}\right)-\left(\frac{1}{BM}-\frac{1}{BN}\right)}\right] = K \times \frac{\Delta V}{I} \qquad [2]$$

où *I* représente l'intensité du courant injecté (A), *ΔV* est la différence de potentiel mesurée entre M et N (V), *AM*, *AN*, *BM* et *BN* sont les distances entre les différentes électrodes (m), et *K* représente un facteur dit facteur géométrique, dont la valeur dépend de la configuration géométrique des électrodes A, B, M, N., c'est-à-dire de leur positionnement respectif dans l'espace de mesure.

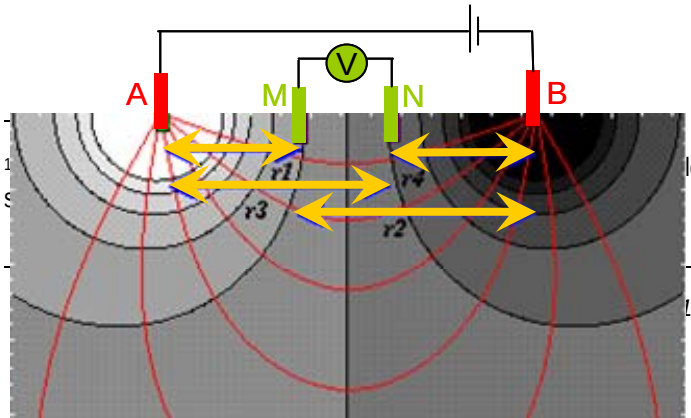

Figure 1 : Distribution des lignes de courant (en rouge) et des équipotentielles (en gris) dans un sol homogène lors de la prospection par un quadripôle A-B-M-N. Les distances *r1*, *r2*, *r3* et *r4* correspondent respectivement aux distances *AM*, *BM*, *AN* et *BN* de l'équation [2].

L'équation [2] est basée sur l'hypothèse d'un milieu isotrope. Dans le sol (et le sous-sol), l'existence de masses relativement conductrices ou résistantes perturbe la répartition des lignes de courant et des lignes équipotentielles. Un corps conducteur attire et concentre les lignes de courant (repoussement des équipotentielles) alors que pour un corps résistant, les lignes de courant ont tendance à le contourner (resserrement des équipotentielles) (Figure 2). Cette déformation des lignes de courant se traduit par une variation de différence de potentiel et permet de détecter les hétérogénéités du sous-sol.

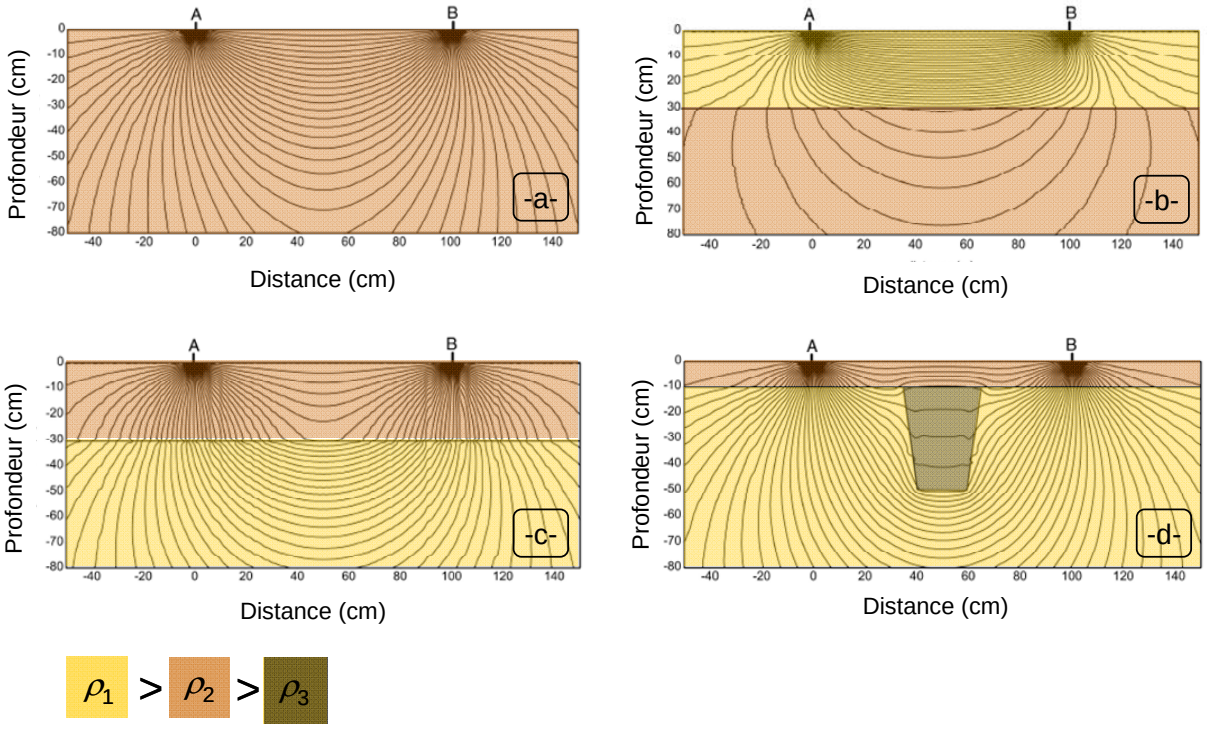

Figure 2 : Distribution des lignes de courant dans un profil de sol pour quatre situations de résistivité ρ contrastées. –a- sol homogène ;-b-, sol dont l'horizon supérieur est moins résistant et concentre les lignes de courant ; -c- sol dont l'horizon supérieur est plus résistant et repousse les lignes de courant ; -d- sol présentant une hétérogénéité locale très résistante, que les lignes de courant contournent. (d'après Chapellier, 2000)

On définit ainsi la notion de résistivité apparente (ρ_a). Si, dans un sol hétérogène, un courant I est injecté et que l'on mesure une différence de potentiel ΔV, alors la résistivité apparente est égale à la résistivité d'un sol homogène (résistivité « vraie ») pour lequel on mesurerait les mêmes valeurs de ΔV et I pour le même dispositif d'électrodes. La résistivité apparente a donc la même dimension que la

résistivité et est exprimée en Ohm.m. Elle est la résultante de l'intégration des masses plus ou moins résistantes d'un volume dont la taille dépend de l'écartement entre les électrodes d'injection AB, du dispositif utilisé et de la nature du terrain (Bottraud et al., 1984). Il s'agit donc d'une mesure relative, dont la signification dépend de l'échelle considérée, mais que l'on peut utiliser de manière comparative en la confrontant à d'autres valeurs. Pour définir la résistivité réelle (ou résistivité « vraie ») d'un terrain en un point donné de l'espace, il faut inverser numériquement la résistivité apparente. Nous ne détaillerons pas ici ce processus d'inversion, mais le lecteur peut se référer utilement à Pellerin et Wannamaker (2005) pour approfondir cette question. De même que l'on ne connaît pas en un point donné la résistivité réelle de ce point, mais seulement sa résistivité apparente, il est difficile de définir la profondeur exacte des lignes de courant lors d'une mesure de la résistivité. Lors de l'exploitation de données de résistivité apparente, on parle ainsi non pas de profondeur, mais de « pseudo-profondeur ».

2.3.Dispositifs expérimentaux de mesure de la résistivité électrique des sols

2.3.1. Mesure locale par la méthode du sondage

L'objectif du sondage électrique est d'analyser la variation verticale de la résistivité apparente au droit d'un point de mesure, situé à la surface du sol. Sachant que la profondeur d'investigation dépend de l'écartement des électrodes nécessaires à la mesure, on effectue une succession de mesures en augmentant l'écartement des électrodes du quadripôle. Chaque valeur de la résistivité apparente est affectée à une pseudo-profondeur donnée. Cette technique permet localement d'analyser la variation de la résistivité électrique en fonction des horizons de sol, et de déterminer éventuellement la profondeur d'apparition de la roche mère.

2.3.2. Mesure locale par la méthode du panneau électrique

Lorsque l'on déplace le quadripôle à la surface du terrain, on observe les variations latérales de sa résistivité électrique à une pseudo-profondeur donnée. En combinant des sondages avec des déplacements latéraux, on obtient des informations à la fois latérales et verticales, ce que l'on appelle un panneau électrique (ou une tomographie électrique) (Figure 3). Cette technique est mise en oeuvre grâce à un dispositif multi-électrodes que l'on pilote depuis un matériel spécifique (multinodes et multiplexeur) et qui permet de réaliser rapidement un grand nombre de mesures selon des séquences préalablement enregistrées. Cette méthode de prospection est typiquement utilisée pour caractériser un profil de sol ou la structure de l'horizon de labour.

2.3.3. Mesure spatialisée à l'échelle de la parcelle agricole

Enfin, à l'échelle de la parcelle agricole, le MuCEP (MUlti Continuous Electrical Profiling), ou son équivalent commercial l'ARP©[2] (Automatic Resistivity Profiler) permettent une mesure quasi-continue de la résistivité apparente du sol, suivant 3 écartements de mesure (Panissod et al., 1997) et donc 3 pseudo-profondeurs d'investigation. Le dispositif est constitué de quatre paires d'électrodes disposées selon un schéma dit « en vol de canard » (Figure 4). Une paire d'électrodes (AB) permet l'injection du courant ; elle est suivie de trois paires d'électrodes (M_1N_1 ; M_2N_2 ; M_3N_3), d'écartement respectif 50, 100 et 200 cm, qui mesurent une différence de potentiel (ΔV_1 ; ΔV_2 ; ΔV_3). Le dispositif est tracté par un véhicule et une mesure de la différence de potentiel sur les 3 paires d'électrodes est réalisée tous les 10 cm (au mieux). La zone à étudier est prospectée en réalisant plusieurs transects de mesure parallèles (encore appelés traînés électriques), espacés de 2, 6 ou 12 mètres, selon la résolution que l'on recherche pour chaque étude.

[2] Voir le site de la société GEOCARTA : www.geocarta.net

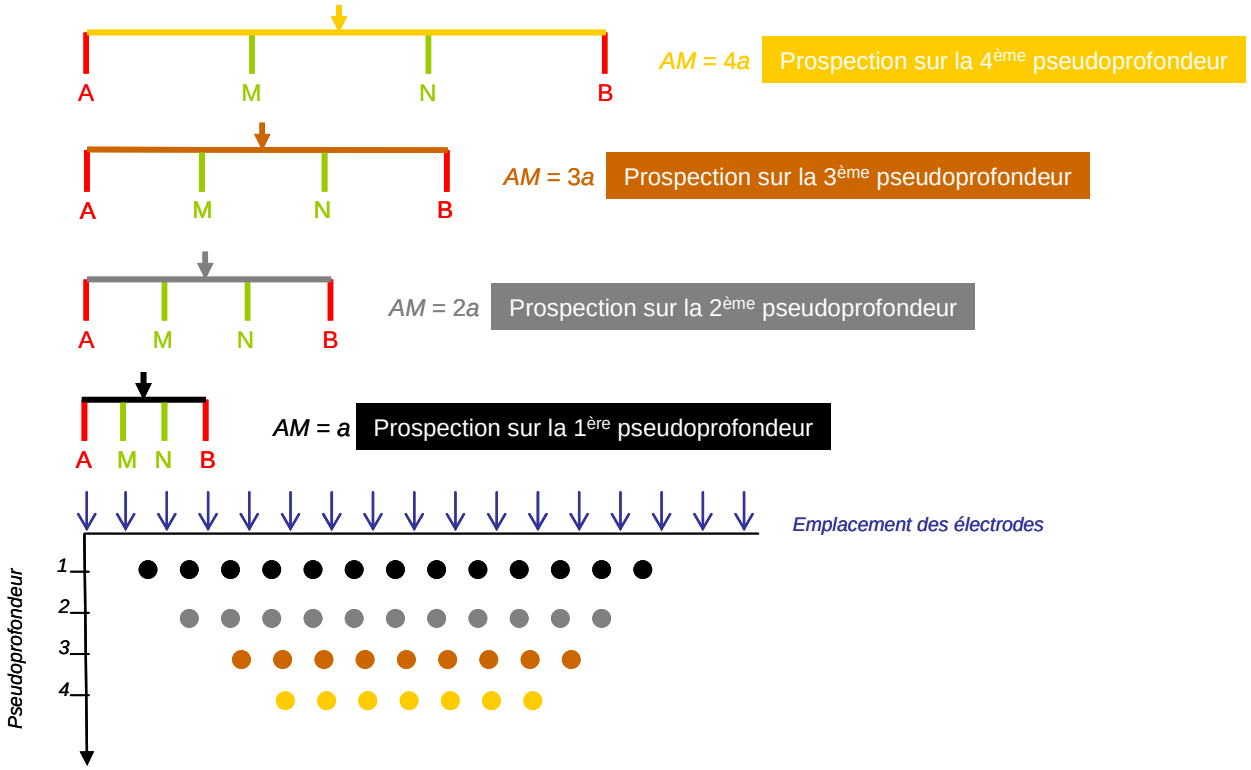

Figure 3 : Principe d'une prospection par tomographie électrique. On déplace latéralement le premier quadripôle le long de l'emplacement des électrodes pour réaliser la prospection sur la première pseudo-profondeur. On déplace ensuite le second quadripôle, puis le troisième, etc, de la même façon. Dans cet exemple, la configuration du quadripôle d'électrodes est de type Wenner.

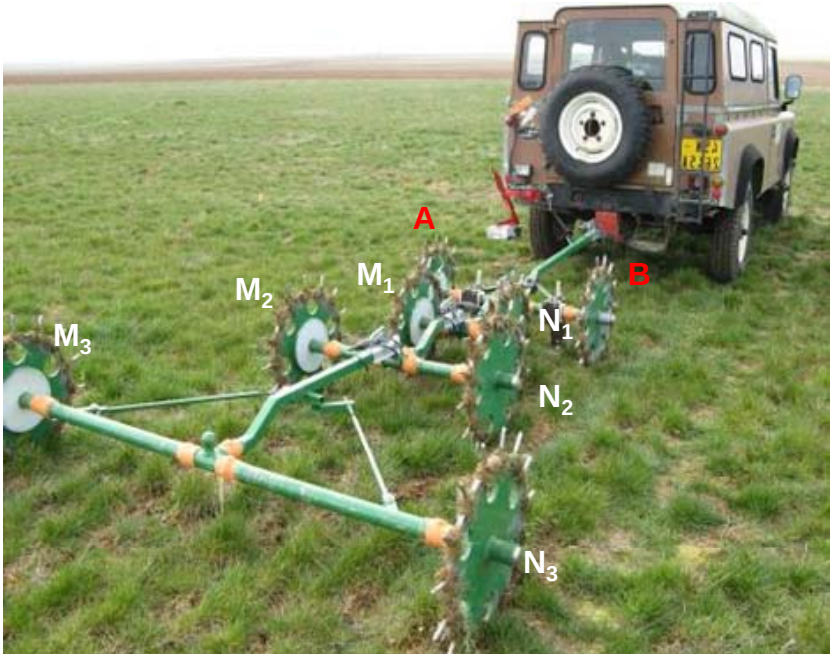

Figure 4 : MuCEP (Multi-Electrode Resistivity Profiler) avec ses quatre trains d'électrodes (AB, M_1N_1, M_2N_2, M_3N_3).

3. Caractérisation de la fertilité physique des sols par résistivité électrique

3.1. Structure et fertilité physique

Les transferts d'eau et de chaleur dans le sol sont fortement dépendants du réseau poreux du sol, c'est-à-dire des vides ménagés par l'arrangement des mottes ou des agrégats de sol entre eux, cet arrangement définissant ce que l'on appelle la structure du sol. C'est à la fois la quantité de vides (porosité), et la connexion de ces vides entre eux qui conditionnent les transferts. Les agronomes s'accordent pour dire qu'un sol poreux, aéré, qui permet une bonne circulation de la chaleur, de l'eau et des éléments nutritifs associés, est favorable à la croissance végétale. Une grandeur synthétique simple qui caractérise l'état de porosité du sol est la masse volumique apparente (autrefois appelée densité apparente). On considérera donc ici par la suite que la caractérisation de la masse volumique apparente du sol permet de définir l'état de fertilité physique du sol. On prendra comme références, une valeur de l'ordre de 1,3 à 1,4 g.cm^{-3} en sol limoneux pour un sol peu dense et bien aéré, et une valeur supérieure à 1,5 g.cm^{-3} pour un sol tassé et peu aéré.

Si, à la surface du sol, l'observation directe à l'œil nu permet d'identifier aisément les états structuraux poreux ou compactés, la caractérisation de ces mêmes états au cœur des horizons de sol n'est pas accessible directement à l'observation. Des prospections par résistivité électrique permettent-elles d'acquérir de l'information sur les états structuraux des horizons de sol ?

3.2. Estimation de la masse volumique du sol par résistivité électrique

3.2.1. Quelques données de laboratoire

Dans la mesure où l'air est significativement plus résistant que les éléments constitutifs du sol ou l'eau, on peut raisonnablement faire l'hypothèse que la résistivité électrique du sol est fonction de sa masse volumique. Les géotechniciens l'ont effectivement démontré depuis les années 60 pour des « sols » et des gammes de masse volumique du domaine de la géotechnique (voir Waxman et Smits, 1968, par exemple). Cela dit, la gamme de variation de masse volumique dans les sols agricoles est-elle suffisante pour modifier sensiblement la valeur de sa résistivité électrique, toutes choses égales par ailleurs ? Sur un sol limoneux à la capacité au champ, Besson et al. (2004) ont mesuré une résistivité électrique de 38 Ohm.m pour une masse volumique apparente de 1.4 g.cm^{-3} et de 27 Ohm.m pour une masse volumique apparente de 1.6 g.cm^{-3}. Ces deux valeurs sont à la fois statistiquement différentes, et physiquement distinctes, dans la mesure où les résistivimètres disponibles actuellement dans le commerce permettent des mesures de résistivité électrique avec une résolution de l'ordre de 0.1 Ohm.m. A la suite de Besson et al. (2004), plusieurs études en conditions contrôlées ont montré que (Figure 5) :

- la résistivité électrique diminue fortement avec la masse volumique apparente du sol, dans la gamme des masses volumiques et des teneurs en eau que l'on rencontre classiquement au champ ;
- à une teneur en eau donnée, l'influence de la masse volumique sur la résistivité électrique est d'autant plus importante que la teneur en eau du sol est faible ;
- à une masse volumique apparente donnée, l'influence de la teneur en eau est d'autant plus marquée que la masse volumique est faible.

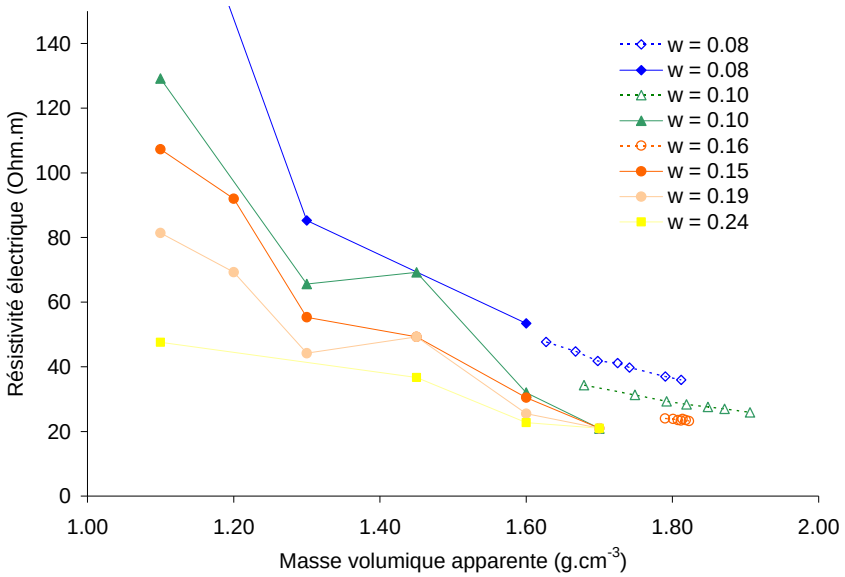

Figure 5 : Evolution de la résistivité électrique en fonction de la masse volumique apparente pour différentes teneurs en eau massique (w, en $g.g^{-1}$). Les données expérimentales ont été obtenues sur des échantillons de sol remaniés compactés à différentes masses volumiques. Ces données sont issues des travaux de Seladji (2010) et Seladji et al. (2010) [figurés pleins] et Beck et al. (2011) [figurés vides]. NB : bien que de texture limoneuse tous les deux, les deux sols n'ont pas été prélevés sur le même site et ne sont donc pas rigoureusement comparables.

3.2.2. Analyse de la masse volumique de l'horizon de labour à l'échelle locale

Les contrastes de masse volumique étant détectables par résistivité électrique sur des échantillons de laboratoire, peut-on utiliser cette méthode comme outil diagnostique pour évaluer l'état de compacité d'une parcelle cultivée ? Des essais au champ ont été menés en conditions contrôlées, sur le site INRA de Mons en Chaussée (80), dans un Luvisol typique (Besson et al., 2004 ; Seger et al., 2009 ; Seladji, 2010). Une parcelle expérimentale labourée a été compactée par le passage d'un engin agricole, puis certaines zones ont été décompactées par labour. Il s'ensuit que trois états structuraux distincts ont été créés : des zones continues, tassées par le passage des roues [état dit « c-delta » dans la nomenclature de Gautronneau et Manichon (1987)], des zones poreuses, constituées de terre fine, à l'extérieur du passage des roues [état dit « o-gamma »], et des zones tassées-détassées à l'endroit des passages de roues ayant subi un labour, où des mottes compactes sont séparées par des cavités structurales importantes et de la terre fine, ce qui conduit à une structure très hétérogène [état dit « b-delta »]. Une prospection de résistivité électrique par panneau, suivie de la description de la structure de l'horizon labouré par la méthode du profil cultural (Gautronneau et Manichon, 1987, Roger-Estrade et al., 2004), a permis d'identifier la localisation des trois types d'états structuraux (Figure 6) : les zones de résistivité faible, de l'ordre de 20 à 30 ohm.m correspondent à des zones continues et compactes (état c-delta, entouré en bleu sur la Figure 6) ; les zones de résistivité les plus élevées, de l'ordre de 60 à 80 ohm.m correspondent à des mottes compactées de plus petite taille entourées de vides visibles à l'œil nu (état b-delta, entouré en rouge sur la figure 6) ; enfin, les zones de résistivité intermédiaire, de l'ordre de 40 à 50 ohm.m correspondent à des zones de terre fine (état o-gamma, entouré en vert sur la Figure 6).

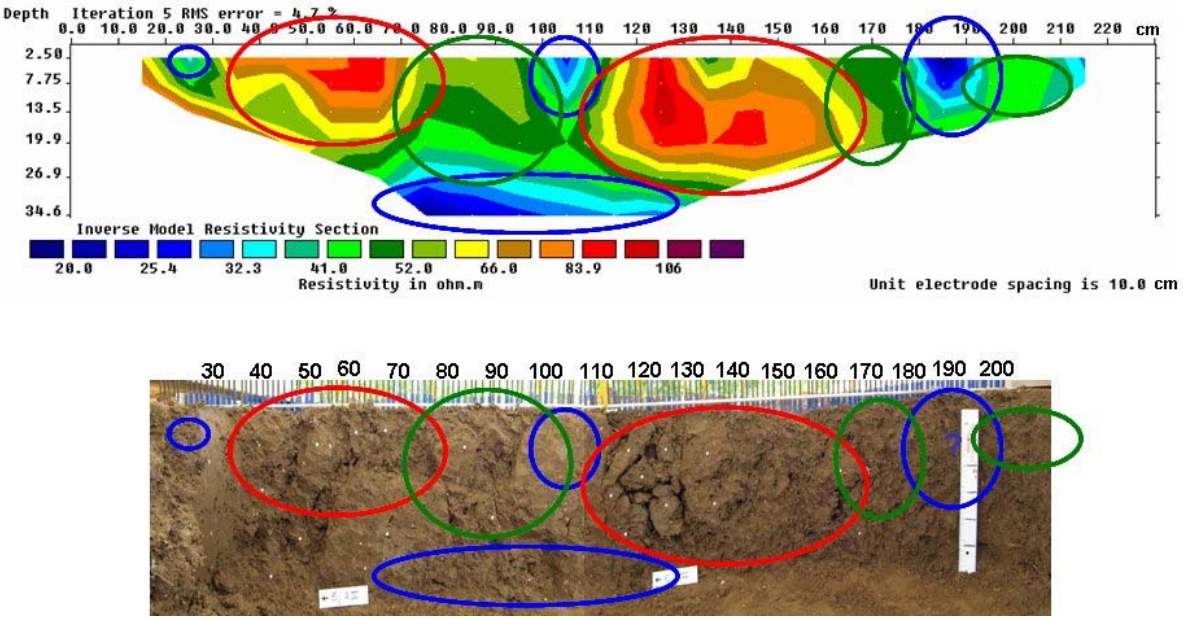

Figure 6 : Tomographie de résistivité électrique sur un sol limoneux (site de Mons en Chaussée) ayant subi différentes contraintes (image du haut), et analyse morphologique par la méthode du profil cultural (image du bas). La prospection électrique a été réalisée en mode Wenner avec un espacement inter-électrode de 10 cm et les données de résistivité apparente ont été inversées par le logiciel Res2DInv de Loke et Barker (1996). (voir le texte pour l'interprétation des ronds de couleur).

On notera, sur la droite du profil cultural, une zone de faible résistivité (entourée en bleu sur le profil cultural) qui ne correspond pas à une zone tassée. Deux hypothèses peuvent expliquer cette apparente incohérence : d'une part, suite à une erreur expérimentale, la portion droite de la zone d'étude a été fortement alimentée en eau, et l'on sait qu'une teneur en eau élevée diminue la résistivité électrique ; d'autre part, il est important de garder à l'esprit que, bien que l'image résultante soit une section 2D, la prospection électrique se développe en réalité dans l'espace 3D. Il est ainsi classique que des différences soient marquées entre un profil cultural, qui présente une coupe strictement bidimensionnelle du profil de sol, et une tomographie qui restitue une image intégrée sur quelques centimètres.

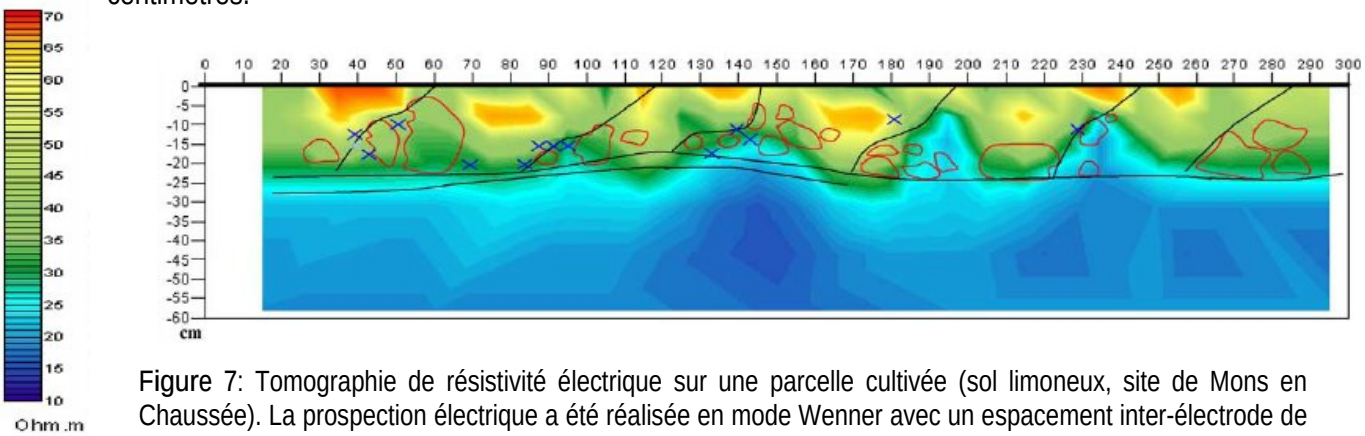

Figure 7: Tomographie de résistivité électrique sur une parcelle cultivée (sol limoneux, site de Mons en Chaussée). La prospection électrique a été réalisée en mode Wenner avec un espacement inter-électrode de 10 cm et les données de résistivité apparente ont été inversées par le logiciel Res2DInv (Loke et Barker, 1996). Les zones entourées de rouge ont été identifiées comme des mottes compactées sur un profil cultural, les croix bleues représentent l'emplacement de pailles enfouies et les lignes noires symbolisent des vides pluricentimétriques dûs au travail du sol et à l'activité de la macrofaune.

Dans cette situation modèle idéale, la résistivité électrique se révèle un outil diagnostique efficace de la structure du sol. Peut-on pour autant l'utiliser « à l'aveugle », dans une parcelle agricole de structure complexe ? Les travaux de Besson et al. (2004) et Seladji (2010) montrent que ce n'est pas si simple (Figure 7) : les zones compactées de grande taille (état c-delta) peuvent être aisément identifiées par leur faible résistivité. En revanche, la terre fine (état o-gamma), les zones très hétérogènes, constituées de mottes compactes de petite taille entourées de vides structuraux (état b-delta), ou encore les mottes compactées qui subissent un début de fissuration, présentent des résistivités du même ordre de grandeur. L'analyse de la variabilité locale de la résistivité, dont on pourrait penser qu'elle est plus élevée pour les états b-delta, n'apporte pas non plus d'éléments convaincants.

3.2.3. Estimation spatialisée de la masse volumique du sol de l'horizon de labour par résistivité électrique

Qu'en est-il à l'échelle d'une parcelle agricole ? La résistivité électrique peut-elle nous permettre d'estimer un état structural moyen de l'horizon de labour ? Des essais de faisabilité ont montré que la méthodologie à mettre en œuvre est complexe (Grandjean et al., 2011) : une prospection géoélectrique spatialisée par ARP doit être associée à des sondages électriques ponctuels et des sondages à la tarière pour permettre une estimation assez précise de l'épaisseur de l'horizon de labour, et des mesures locales de masse volumique sont nécessaires pour calibrer une relation du type « masse volumique = f(résistivité électrique) ». Cette dernière relation ne peut être générique et doit être reformulée pour chaque parcelle analysée. Dans ces conditions, une estimation spatialisée de la masse volumique par résistivité électrique reste possible (Figure 8), mais les états structuraux associés ne peuvent être identifiés.

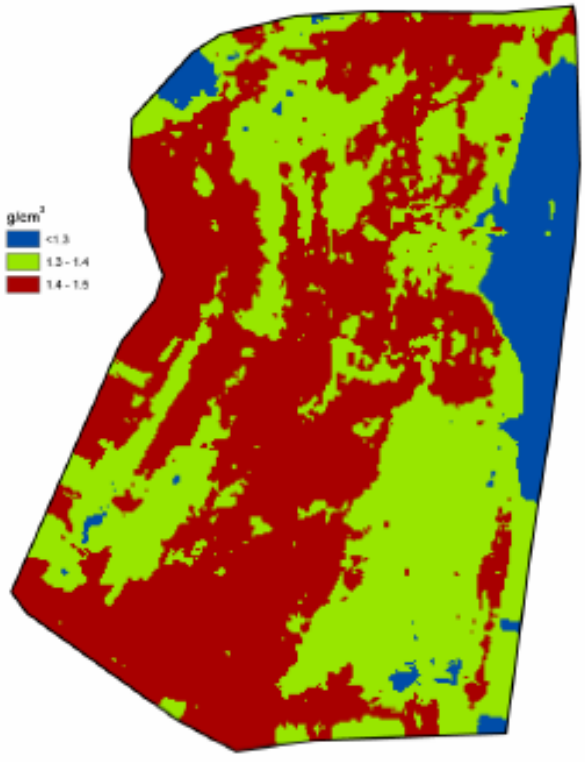

Figure 8 : Estimation de la masse volumique de la couche 0-20 cm du sol à partir d'une prospection spatialisée par la méthode ARP sur une parcelle hétérogène de 2,5 ha. On identifie trois zones de masses volumiques contrastées : inférieure à 1,3 g.cm^{-3} ; de 1,3 à 1,4 g.cm^{-3}, supérieure à 1,4 g.cm^{-3}.

A l'échelle de l'horizon cultivé, la méthode de la résistivité électrique nécessite donc d'être employée avec discernement, afin de démêler correctement les effets de la masse volumique et de la teneur en eau du sol.

3.3. Avantages et limites de l'utilisation de la résistivité électrique pour l'analyse de la fertilité physique du sol

La prospection locale ou spatiale par résistivité électrique est non destructive. Elle peut donc être utilisée a priori à tout moment, et des prospections répétées à des dates différentes peuvent permettre un suivi temporel de l'état structural du sol. La résolution de la mesure n'est pas une limite : c'est l'écartement entre les électrodes qui définit le volume de mesure. Un écartement de l'ordre du cm permet, par exemple, d'analyser finement la fissuration du milieu (Samouëlian et al., 2003 et 2004) ; un écartement de l'ordre de 10 cm permet une analyse de la structure locale de l'horizon de labour ; les écartements plus importants des électrodes de l'ARP permettent une prospection spatialisée à l'échelle d'une parcelle. Enfin, nous avons présenté précédemment des données 2D mais des configurations particulières d'électrodes permettent de caractériser la structure en trois dimensions (Seger et al., 2009, Frison, 2008).

Cependant, l'interprétation du signal électrique pour l'estimation de la structure du sol reste délicate.

- En premier lieu, il convient de bien démêler les influences respectives de la structure du sol et de la teneur en eau sur le signal, ce qui peut s'avérer particulièrement délicat au champ. D'une part, lorsque la teneur en eau du sol est élevée, en période hivernale par exemple, celle-ci influe fortement sur le signal électrique et la discrimination des états structuraux est délicate voire impossible. D'autre part, en condition sèche, une motte fissurée présente une résistivité électrique significativement plus élevée que la terre fine qui l'environne, alors que cette résistivité peut devenir significativement plus faible en période plus humide, si la fissure constitue un passage d'eau préférentiel lorsque l'eau s'infiltre (Richard et al., 2006 ; Besson et al., 2012). Le choix de la période de prospection électrique pour la caractérisation de la structure du sol est donc primordial et doit être effectué de façon raisonnée.

- Deuxièmement, lorsque l'on réalise une prospection multi-électrode par panneau électrique, le choix de la configuration des électrodes et le choix de l'algorithme d'inversion des données expérimentales s'avèrent cruciaux. Il est reconnu qu'une prospection de type dipôle-dipôle permet de caractériser plus particulièrement la variabilité latérale du milieu, alors qu'une prospection de type Wenner permet d'analyser la variabilité verticale (Loke, 2004). Cependant, après inversion, ces prospections conduisent à des « images » de la structure du sol qui peuvent être significativement différentes. On recommande ainsi plutôt une prospection de type Wenner-Schlumberger pour caractériser la structure du sol, car elle présente le meilleur rapport signal/bruit et est peu sensible aux hétérogénéités locales de surface.

- Troisièmement, l'état de la surface sur laquelle on réalise la mesure est à prendre en considération : une prospection par panneau électrique ne peut être correctement interprétée que si les électrodes sont très peu enfoncées dans le sol, et sont à une altitude connue, c'est-à-dire soit constante (cas d'un état de surface relativement plan), soit mesurée par ailleurs par un rugosimètre. Ces deux conditions de ponctualité et d'altitude sont très contraignantes et ne permettent pas, par exemple, une prospection sur un sol fraîchement labouré. Des prototypes expérimentaux qui ne nécessitent pas un contact direct avec le sol (hexapole capacitif, Souffaché et al., 2010) ont été testés dans des situations modèles au champ ; ils simplifient la prospection mais n'améliorent pas significativement la description des états structuraux (Seladji, 2010).

- Enfin, même si la résolution de la mesure peut être ajustée par le choix de l'espacement inter-électrodes, il faut garder à l'esprit que i) on ne peut visualiser d'objets de taille inférieure à cet espacement inter-électrodes : c'est la raison pour laquelle on ne peut « voir » de petites mottes compactées dans un environnement plus poreux ; ii) la résolution spatiale de la mesure diminue avec la profondeur : en particulier, il n'est pas possible d'identifier une semelle de labour par

résistivité électrique ; iii) la structure géométrique des objets observés est fortement dépendante du type d'inversion et d'interpolation des données que l'on a choisi : on distingue ainsi ce que l'on pourrait nommer des « zones », plus ou moins compactes, à géométrie incertaine, mais en aucun cas on ne visualise des « objets » à contours précis.

4. Caractérisation de la fertilité (bio)chimique des sols par des outils géophysiques

Les composantes de la fertilité chimique sont nombreuses. On s'intéressera ici uniquement à la teneur en azote et en matière organique.

4.1. Caractérisation de la fertilité chimique du sol par résistivité électrique

L'utilisation de mesures électriques du sol pour caractériser la concentration en ions de la solution du sol est classique et très répandue. A la mesure du pH du sol est ainsi couramment associée la mesure de la conductivité électrique de la solution du sol (inverse de la résistivité électrique). Les premières mesures des propriétés électriques du sol sont effectivement très anciennes puisqu'elle datent de la fin du XIX^{ème} siècle (Briggs, 1899, cité par Friedman, 2005) mais elles se sont généralisées dans les années soixante-dix (voir la revue de Rhoades et al., 1999) lorsqu'elles ont été utilisées pour caractériser l'état de salinité des sols. La littérature scientifique abonde ainsi en travaux expérimentaux relatant la caractérisation de sols salés par la mesure de leur conductivité électrique. La Figure 9 présente un exemple de mesures en laboratoire de l'évolution de la conductivité électrique apparente en fonction de la teneur en eau et de la conductivité de la solution du sol, et montre la forte influence de la conductivité de la solution sur le signal résultant.

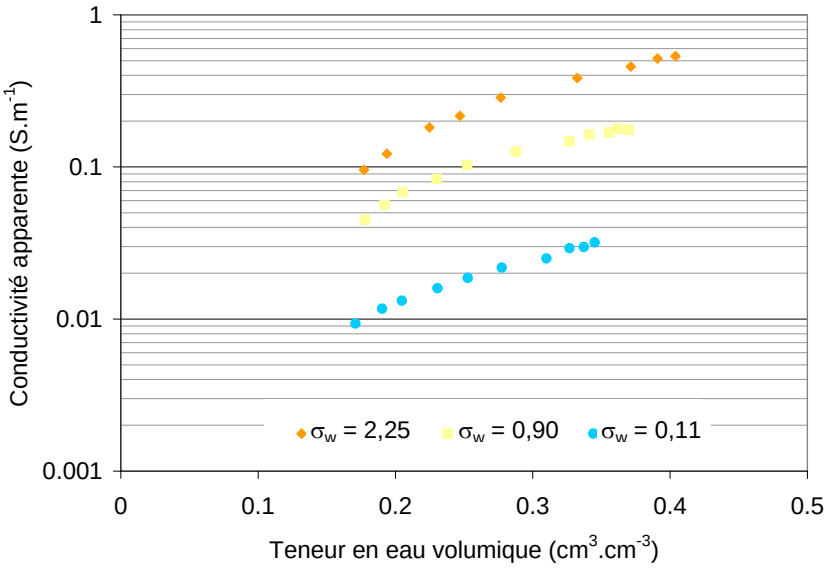

Figure 9: Influence de la conductivité électrique de la solution du sol (σ_w) et la teneur en eau du sol sur la conductivité apparente d'un sol sablo limoneux (Plaggen Soil) (données de Weerts et al., 1999).

De nombreux modèles empiriques proposent des relations entre conductivité apparente du milieu poreux (σ_a), conductivité de la solution ($\sigma_{solution}$), conductivité de la phase solide (σ_{solide}) et teneur en eau (θ). Citons, par exemple, le modèle assez simple de Rhoades et al. (1976) :

$$\sigma_a = [a\theta + b] \times \sigma_{solution} + \sigma_{solide} \quad [3]$$

où *a* et *b* représentent des paramètres empiriques, et dépendent de la texture et de la structure du sol.

Peut-on, pour autant, qualifier l'état chimique du sol par résistivité électrique en contexte de sols non salés et dans les conditions de fertilisation classiques des systèmes de culture de nos régions ? Pour amorcer une réponse à cette question, Besson (2007) a mesuré au laboratoire la résistivité électrique d'échantillons d'horizons de sol non perturbés, prélevés dans un Luvisol typique de Beauce, et saturés soit avec une eau minéralisée de faible force ionique (I = 0,06 mmol.L^{-1}), soit avec une solution nitratée correspondant à une fertilisation de 100 kg.N.ha^{-1} (I = 7,73 mmol.L^{-1}) (Figure 10). Après saturation, ces échantillons ont été équilibrés à différents potentiels matriciels pour faire évoluer leur teneur en eau. On observe que la résistivité électrique varie de l'ordre de 1 à 2 ohm.m entre les deux situations pour les deux horizons AL et S les plus superficiels, et varie de l'ordre de 13 ohm.m entre les deux situations pour l'horizon C. Ainsi, pour les deux horizons superficiels, la concentration en nitrate n'influe pas significativement sur la mesure de la résistivité électrique. En conséquence, il ne semble pas possible, en l'état actuel de nos connaissances, d'espérer qualifier l'état de fertilité chimique d'un sol par résistivité électrique. De façon pratique, cela signifie également qu'une prospection électrique qui serait dédiée à l'analyse de la structure peut être réalisée avant ou juste après une période de fertilisation.

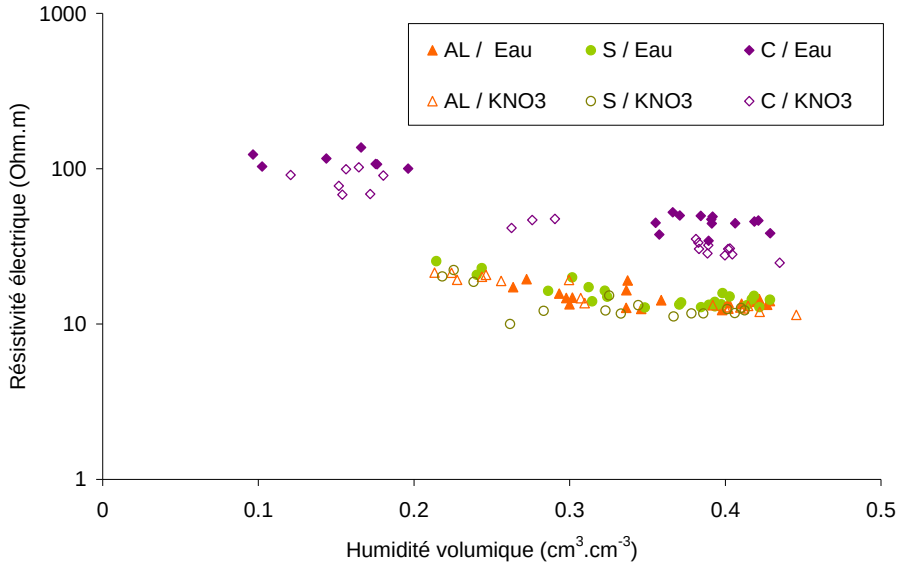

Figure 10 : Influence de la concentration en nitrate sur la résistivité électrique d'échantillons de sol prélevés dans les horizons AL, S et C d'un sol argilo-limoneux de Beauce (Besson, 2007).

4.2. Caractérisation de la teneur en matière organique

Parmi les composantes de la fertilité chimique du sol, la teneur en matière organique est un élément fondamental. L'estimation de la teneur en matière organique par des méthodes géophysiques reste actuellement une question de recherche et n'est pas encore opérationnelle. Néanmoins, quelques travaux récents nous laissent espérer que l'on puisse bientôt caractériser au champ et de manière non destructive, le stock de matière organique au champ.

4.2.1. Teneur en matière organique et résistivité électrique

Une étude en conditions contrôlées sur des sols agricoles et des sols forestiers, très riches en matières organiques, a montré que ces derniers présentaient des valeurs de résistivité électrique supérieures d'un ordre de grandeur aux sols agricoles, en raison de leur teneur en matière organique (Figure 11) (Seladji et al., 2010). Même si les auteurs proposent un modèle explicatif pour comprendre les effets de la teneur en matière organique sur le signal de résistivité électrique, pour autant, l'estimation de la

teneur en matière organique à partir des données de résistivité électrique n'est pas à l'ordre du jour, et nécessite des investigations complémentaires.

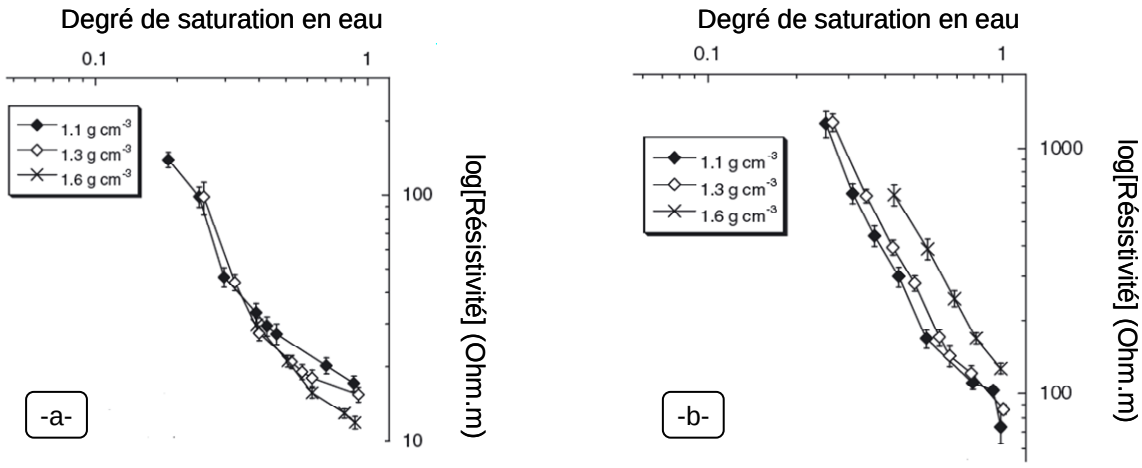

Figure 11 : Résistivité électrique en fonction du degré de saturation en eau pour un échantillon de sol agricole argileux de faible teneur en matière organique (0,7 g.kg^{-1}) (-a-) et pour un sol forestier à forte teneur en matière organique (4,2 g.kg^{-1}) (-b-). Noter l'échelle logarithmique de résistivité.

4.2.2. Teneur en matière organique et propriétés magnétiques des sols

Des études récentes ont également eu pour objectifs de tester la dépendance des propriétés magnétiques du sol (susceptibilité magnétique et viscosité magnétique) à la teneur en matière organique (Thiesson, 2007). Il semble que cette dernière influe significativement sur le signal de susceptibilité magnétique[3] (Figure 12) mais, de même que pour la résistivité électrique, des investigations complémentaires sont à mener pour définir explicitement le lien entre susceptibilité magnétique et matière organique.

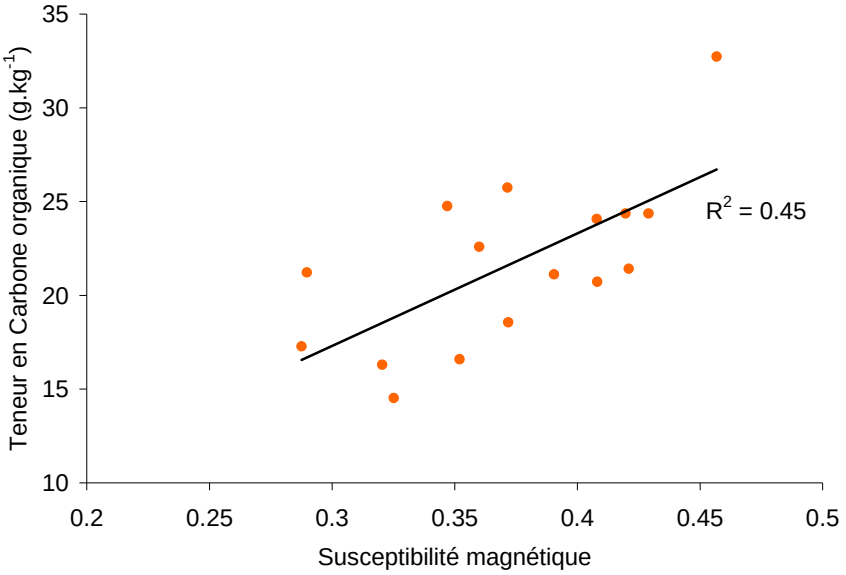

Figure 12 : Influence de la teneur en Carbone organique sur une mesure magnétique (composante en phase de la susceptibilité magnétique) (d'après Thiesson, 2007).

[3] La susceptibilité d'un matériau est sa faculté à s'aimanter sous l'action d'une excitation magnétique par un champ magnétique.

5. Conclusion

Les outils de la géophysique de subsurface, en particulier la méthode de la résistivité électrique, peuvent être employés pour caractériser certains aspects de la fertilité du sol, et spécialement la fertilité physique, par la caractérisation de la masse volumique apparente – caractéristique synthétique de l'état structural du sol – et la description des états structuraux de l'horizon de labour. En effet, nous avons montré qu'il est possible de discriminer des zones très tassées par le passage d'engins agricoles, de zones plus poreuses ou plus fissurées. Pour autant, la géométrie réelle des zones tassées et l'intensité du tassement ne peuvent être déduites de la prospection électrique. En ce qui concerne les composantes chimiques de la fertilité, des recherches en cours tendent à montrer que la matière organique pourrait être caractérisée par résistivité électrique ou par magnétisme. L'utilisation de la résistivité électrique pour la caractérisation de l'état chimique général du sol semble par contre plus délicate : pour les gammes de fertilisation azotée classique dans les sols agricoles de grandes cultures, le signal électrique semble peu influencé par la teneur en nitrate de la solution du sol. Sur le plan pratique, une prospection dont le but serait la caractérisation de la structure du sol pourrait donc être menée indépendamment du calendrier de fertilisation, pour peu que la teneur en eau du sol soit favorable. En effet, dans la mesure où la teneur en eau joue également un rôle majeur dans le signal de résistivité électrique, nous recommandons de réaliser des prospections lorsque le sol n'est pas trop humide, dans tous les cas à une humidité inférieure à la capacité au champ. Enfin, au-delà des aspects de fertilisation, la résistivité électrique reste un outil de choix pour caractériser la variabilité locale ou intraparcellaire des sols ou des types de sol, et de leur charge en éléments grossiers.

Remerciements - De nombreux résultats présentés ici ont été acquis dans le cadre de deux projets : Le projet DST (Dégradation physique de sols agricoles et forestiers liée au tassement, projet financé par le programme GESSOL et le programme ANR/ADD) et le projet DIGISOIL (Integrated system of data collection technologies for mapping soil properties) financé par le FP7.

Références bibliographiques

Beck Y.L., Palma-Lopez S., Ferber V., Côte P., 2011. Microstructural Interpretation of Water Content and Dry Density Influence on the DC-Electrical Resistivity of a Fine-Grained Soil. Geotechnical Testing Journal 34, 6, 1-14.

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 Université Orléans. 212 p.

Besson A., Cousin I., Dorigny A., Dabas M., King D., 2008. The temperature correction for the electrical resistivity measurements in undisturbed soil samples: analysis of the existing conversion models and proposition of a new model. Soil Science 173, 10, 707-720.

Besson A., Cousin I. Samouëlian A., Boizard H., Richard G., 2004. Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. Soil and Tillage Research 79, 239-249.

Besson A., Seger M., Giot G., Cousin I., 2012. Time-scale analyse of the soil structure evolution within an agricultural field locally trafficked. Soumis à Geoderma.

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.

Briggs L.J., 1899. Electrical instruments for determining the moisture, temperature, and soluble salts content of soils. USDA Div. Soils Bull. 10, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC

Campbell R.B., Bower C.A., Richards L.A., 1948. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts. Soil Science Society of America Proceedings 13, 66–69.

Chapellier D., 2000. Prospection électrique de surface, cours de géophysique appliquée en ligne. www-ig.unil.ch/cours/pdf/doc_pro/pro_f.pdf

Chaussod R., 1996. La qualité biologique des sols : évaluations et implications. Etude et Gestion des Sols 3, 4, 261-278.

Friedman S., 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. Computers and Electronics in Agriculture 46, 45-70.

Frison A., 2008. Analyse et modélisation du fonctionnement hydrique d'un horizon de sol à structure hétérogène. Thèse de l'Université d'Orléans, 228 p.

Gautronneau Y., Manichon H., 1987. Guide méthodologique du profil cultural. Paris, 130 p.

Grandjean G., Samyn K., Cousin I., Séger M., Besson A., Lambot S., van Wesemael B., Garfagnoli F., Chiarantini L., 2011.Validation and performance report. Report N° FP7-DIGISOIL-D3.3; 48 p.

Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2010. Le Sol vivant. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 817 p.

Häberli R., Lüscher C., Praplan-Chastenay B., Wyss C., 1989. L'affaire SOL. Pour une politique raisonnée de l'utilisation des sols. Ed Georg, Genève.

Loke M.H., Barker R.D., 1996. Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting 44, 131-152.

Loke M.H., 2004. Tutorial: 2D and 3D electrical imagining surveys. 159 p. http://www.geoelectrical.com/coursenotes.zip.

Morel R., 1989. La fertilité des sols. In : Fertilita des suolo e nutrizione delle piante. SISS et SICA eds, 57-73.

Panissod C., Dabas M., Jolivet E., Tabbagh A., 1997. A novel mobile multipole system (MuCEP) for shallow (0-3 m) geoelectrical investigation: the « vol de canard » array. Geophysical Prospecting 45, 983-1002.

Pellerin L., Wannamaker P.E., 2005. Multi-dimensional electromagnetic modelling and inversion with application to near-surface earth investigations. Computers and Electronics in Agriculture 46, 71-102.

Rhoades J.D., Chanduvi F., Lesch S., 1999. Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 57. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Rhoades J.D., Ratts P.A.C., Prather R.J., 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Science Society of America Journal 40, 651–655.

Richard G., Besson A., Sani A.A., Cosenza P., Boizard H., Cousin I., 2006. A new approach of soil structure characterisation in field conditions based on electrical resistivity measurements. In: R. Horn, et al., (eds.) 17th Triennal ISTRO Conference, Vol. Advances in geoecology, 38. Die Deutsche Bibliothek, Kiel. pp 415-421

Roger-Estrade J., Richard G., Caneill J., Boizard H., Coquet Y., Defossez P., Manichon H., 2004. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. Soil and Tillage Research 79, 33-49.

Samouëlian A., Cousin I., Richard G., Bruand A., Tabbagh A., 2003. Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. Soil Science Society of America Journal 67, 5, 1319-1326

Samouëlian A., Cousin I., Richard G., Tabbagh A., Bruand A., 2005. Electrical resistivity survey in Soil Science: a review. Soil and Tillage Research 83, 173-196.

Samouëlian A., Richard G., Cousin I., Guérin R., Bruand A., Tabbagh A., 2004. 3D cracks monitoring by electrical resistivity tomography. European Journal of Soil Science 55, 751-762

Seger M., Cousin I., Frison A., Boizard H., Richard G, 2009. Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements. Soil and Tillage Research 103, 387-398

Seladji S., 2010. Caractérisation et suivi par méthodes géoélectriques de la dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, 220 p.

Seladji S., Cosenza P., Tabbagh A., Ranger J., Richard G., 2010. The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation. European Journal of Soil Science 61, 1043-1055.

Souffaché B., Cosenza P., Flageul S., Pencolé J.P., Seladji S., Tabbagh A., 2010. Electrostatic multipole for electrical resistivity measurements at the decimetric scale. Journal of Applied Geophysics 71, 6-12.

Thiesson J., 2007. Mesure et cartographie de la viscosité magnétique des sols. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, 143 p.

Waxman M.H., Smits L.J.M., 1968. Electrical conductivities and oil-bearing shaly sands. Society of Petroleum Engineering Journal 8, 107-122.

Weerts A.H., Bouten W., Verstraten J.M., 1999. Simultaneous measurement of water retention and electrical conductivity in soils: testing the Mualem–Friedman tortuosity model. Water Resources Research 35, 1781–1787.