

NOTE TECHNIQUE

Un dispositif pédagogique de mesure de la résistivité électrique :

Illustrer par l'expérience l'apport des méthodes géophysiques pour la caractérisation des propriétés du sol

G. Giot^(*) et M. Seger

UR0272 SOLS. Science du Sol. INRA Orléans. Centre Val de Loire, CS 40001 Ardon 45075 Orléans cedex 2. France

* : Auteur correspondant : guillaume.giot@inra.fr

RÉSUMÉ

La méthode géophysique de mesure de la résistivité électrique est utilisée en science du sol pour aider à la caractérisation des propriétés des sols. L'expérience ludique conçue à l'occasion du Salon International de l'Agriculture de Paris 2009 par l'Inra d'Orléans permet aux visiteurs de découvrir cette technologie. Par le biais d'une manipulation d'un dispositif de mesure miniaturisé sur une maquette de sol, le public acquiert des notions sur la variabilité spatiale de la couverture pédologique et prend conscience de l'intérêt d'utiliser la mesure de résistivité électrique pour détecter des états différenciés du sol.

Mots clés

Communication grand public, sol, géophysique, résistivité électrique, expérimentation.

SUMMARY

AN EDUCATIONAL DEVICE FOR MEASURING ELECTRICAL RESISTIVITY: Illustrating through experience the contribution of geophysical methods for the characterization of soil properties

The electrical resistivity is a geophysical method commonly used in soil science to help characterize soil properties. The fun experience offered at the International Agricultural Show in Paris by INRA Orleans in 2009 allows visitors to discover a technology used in soil studies. Through

Comment citer cet article :

Giot G. et Seger M., 2019 - Un dispositif pédagogique de mesure de la résistivité électrique : Illustrer par l'expérience l'apport des méthodes géophysiques pour la caractérisation des propriétés du sol, 26, Etude et Gestion des Sols, 125-131

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-26/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :
<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

the manipulation of a miniaturized measuring device on a soil model, the public acquires basic knowledge on spatial variability of soil cover and understand the interest of using the electrical resistivity measurement to detect soil spatial heterogeneities.

Key-words

Public communication, soil, geophysics, electrical resistivity, experiment.

RESUMEN

UN DISPOSITIVO PEDAGÓGICO DE MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA: ilustrar por la experiencia el aporte de los métodos geofísicos para la caracterización de propiedades del suelo

Se usa el método geofísico de medida de la resistividad eléctrica en ciencia del suelo para ayudar en la caracterización de las propiedades de los suelos. La experiencia lúdica concebida con motivo del Salón Internacional de Agricultura de París en 2009 por el INRA de Orleans permite a los visitantes descubrir esta tecnología. Por medio de una manipulación de un dispositivo de medida miniaturizado sobre una maqueta de suelo, el público adquiere nociones sobre la variabilidad espacial de la cobertura pedológica y toma conciencia del interés usar la medida de resistividad eléctrica para detectar estados diferenciados del suelo.

Palabras clave

Comunicación gran público, suelo, geofísica, resistividad eléctrica, experimentación.

Depuis les années 1980, la science du sol utilise des technologies issues de la géophysique appliquée pour détecter des variations spatiales et temporelles de propriétés du sol à des échelles allant de l'horizon pédologique à la parcelle. Ce sont des méthodes qui ont la capacité de produire rapidement des données quasi-exhaustives et non destructives. Parmi ces méthodes, la mesure de résistivité électrique est utilisée car sensible à plusieurs caractéristiques du milieu (Samouëlian *et al.*, 2005) : la nature du sol (texture et pierrosité), stable à l'échelle de temps d'observation et des variables conjoncturelles telles que sa structure, sa température et sa teneur en eau. Elle est notamment utilisée comme outil d'aide à la cartographie de parcelles hétérogène par le pédologue (Buvat *et al.*, 2014). Cette méthode est mise en œuvre pour des solutions en agriculture de précision, en particulier pour identifier des zones de fonctionnement homogène à l'intérieur des parcelles (Morari *et al.*, 2009).

Pour illustrer cette méthode auprès du grand public, l'Unité de Sciences du Sol de l'Inra d'Orléans a conçu en 2009, pour le Salon International de l'Agriculture, un dispositif miniaturisé permettant de faire la mesure de la résistivité électrique sur une maquette de sol présentant des états contrastés. Ce dispositif peut être manipulé par le grand public et permet à la fois de s'approprier les concepts théoriques de la mesure et d'observer, par la pratique, les réponses de la résistivité électrique en fonction des caractéristiques du sol.

1- RAPPELS SYNTHÉTIQUES SUR LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

Définition

La résistivité électrique est la propriété physique du sol qui caractérise sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique. 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 au moment de la mesure (teneur en eau, structure, température). On peut donc utiliser cette mesure comme méthode indirecte pour caractériser le fonctionnement des sols et leur organisation.

Mesure

Pour mesurer la résistivité électrique du sol, il faut injecter dans le sol un courant électrique d'intensité connue (I), via deux électrodes (A et B) et mesurer la différence de potentiel qui en résulte (ΔU) via deux autres électrodes (M et N). Cela revient à intégrer le sol dans un circuit électrique tel qu'il est décrit dans la figure 1.

On peut alors calculer la résistivité électrique selon l'équation (1).

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

Où ρ est la résistivité électrique en ohm.mètre ($\Omega.m$), ΔU_{MN} la différence de potentiel mesurée (V), I_{AB} l'intensité électrique injectée (A) et K un facteur géométrique qui dépend de la configuration géométrique des électrodes.

Pour assurer une bonne qualité de la mesure, il est essentiel qu'il y ait un contact physique de bonne qualité entre le sol et les électrodes, c'est pourquoi on parle de méthode galvanique (à l'inverse, par exemple, de la méthode électromagnétique qui ne nécessite pas de contact entre les sols et l'appareil de mesure). Le volume prospecté augmente avec l'écartement entre les électrodes. 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, c'est pourquoi l'interprétation du signal n'est pas aisée et nécessite des étapes de traitement.

Les dispositifs de mesure classiques

Étant donné le principe de mesure basé sur l'utilisation de 4 électrodes (figure 2), il est possible de concevoir n'importe quelle configuration selon l'objectif recherché : il suffit d'agir sur les écartements entre les électrodes. Quel que soit le dispositif employé, il est caractérisé par une certaine profondeur d'investigation et un certain pouvoir de résolution. Le pouvoir de résolution et la profondeur d'investigation varient en sens inverse.

Les dispositifs les plus courants sont les suivants :

- Les dispositifs 4 électrodes : il s'agit de la mise en œuvre de mesures grâce à 4 électrodes que l'on déplace successivement :
 - Autour d'une position centrale (méthode du sondage 1D) afin de mesurer les variations de la résistivité en fonction de la profondeur, pour une position donnée.

Figure 1 - Schéma électrique représentant la mesure de résistivité électrique quand elle est appliquée au sol.

Figure 1 - Electric scheme for resistivity measurement when applied to soil.

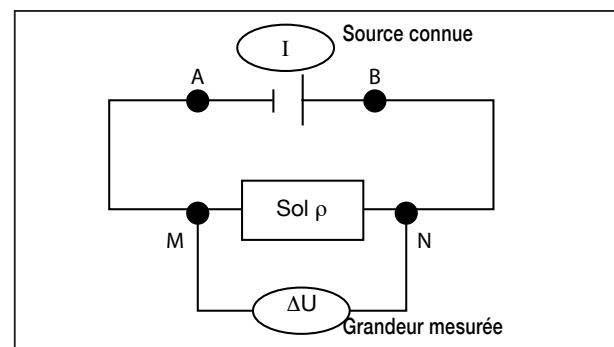


Figure 2 - Principe de base de la mesure de résistivité électrique du sol à 4 électrodes.

Figure 2 - Basic principle of soil resistivity measurement using 4 electrodes.

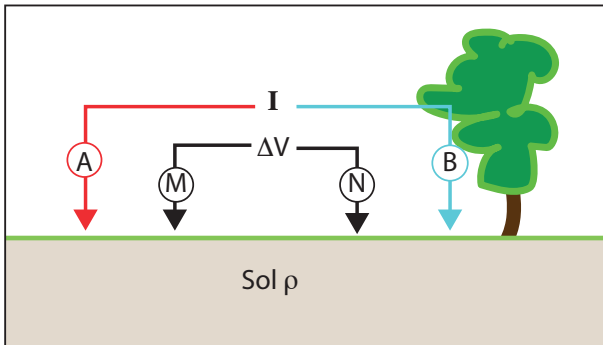


Figure 3 - Dispositif multiélectrodes pour tomographie 2D (Seger M., 2016).

Figure 3 - Multi-electrodes device for 2-D tomography (Seger M., 2016).



- Le long d'un transect (méthode du profil électrique) afin de mesurer les variations latérales de la résistivité à une profondeur d'investigation constante.

- Les dispositifs multiélectrodes (méthodes de tomographie 2D ou 3D): il s'agit de dispositifs permettant de multiplier les mesures de résistivités *via* l'utilisation de nombreuses électrodes (figure 3) afin de réaliser des imageries 2D ou 3D du sous-sol.

Les dispositifs mobiles (figure 8, dispositif MuCEP): il s'agit de dispositifs tractés permettant de réaliser des mesures spatialisées de la résistivité électrique dans des parcelles. Ces mesures sont exhaustives et permettent de produire des cartographies intra-parcellaires de la résistivité électrique à plusieurs profondeurs d'investigation.

2 - LE DISPOSITIF PÉDAGOGIQUE

La maquette de sol

La maquette de sol a été réalisée dans un bac composé d'éléments en PVC transparent de 5 mm d'épaisseur collés entre eux. Il est important de choisir un matériau non électriquement conducteur pour ne pas perturber la mesure électrique. Le bac (figure 4) mesure 30 cm de largeur, 40 cm de longueur et 20 cm de hauteur.

Le bac a été rempli à mi-hauteur avec de la terre fine issue d'un sol argilo-limoneux tamisé à 5 mm de manière à s'affranchir des effets de macro-structure lors de la démonstration.

Plusieurs états de sol ont été créés à l'intérieur de ce bac (figure 5):

- Un état « compacté »: il s'agit d'une bande de sol volontairement compactée, représentant le phénomène de tassement de sols observé dans les parcelles agricoles suite aux passages répétés d'engins agricoles. Pour symboliser ce phénomène, un engin miniature a été placé sur le bac.

- Un état « caillouteux »: il s'agit d'une zone où des cailloux calcaires ont été placés sous la surface du sol. Les éléments grossiers sont volontairement dissimulés sous la surface du sol mais visibles si l'on observe le bac sur le côté.

- Un état « témoin »: il s'agit de la terre fine en place, ni compactée, ni caillouteuse.

Figure 4 - Bac accueillant la maquette de sol (Giot G., 2009).

Figure 4 - Soil container (Giot G., 2009).

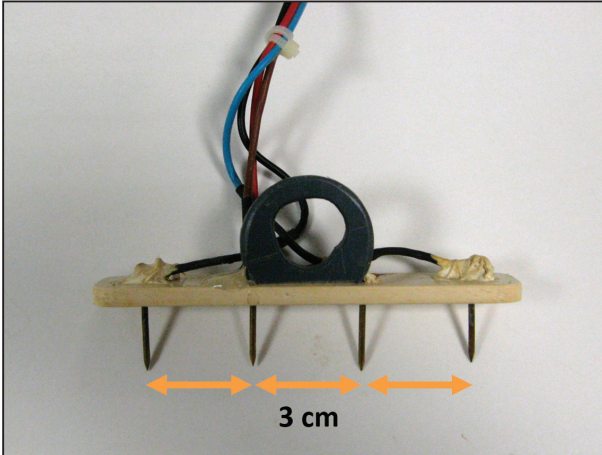


Figure 5 - Structure du sol à l'intérieur du bac (Giot G., 2009).
Figure 5 - Soil structure inside the container (Giot G., 2009).



Figure 6 - Quadripôle d'électrode fabriqué pour le dispositif pédagogique avec écartement de 3cm entre les électrodes (Giot G., 2009).

Figure 6 - Electrode quadri-pole built for the pedagogic device with a distance of 3 cm between electrodes (Giot G., 2009).



Le dispositif de mesure de la résistivité électrique

Le quadripôle

Pour réaliser la mesure électrique, un dispositif miniaturisé de quatre électrodes a été spécialement fabriqué (figure 6). Les électrodes sont des pointes en inox de 1.5 cm disposées en ligne le long d'une plaque en PVC avec des écartements inter-électrodes réguliers ($a = 3$ cm).

Dans notre cas, nous avons utilisé un dispositif de type Wenner ($AM = MN = NB = a$) qui permet une prospection électrique à une profondeur de $AB/3$ soit 3 cm. Cette configuration est pertinente pour mettre en évidence des bandes tassées et des zones caillouteuses à l'échelle de la maquette.

Chacune des électrodes est soudée à un fil électrique se terminant par une fiche banane afin d'être reliée à l'appareil de mesure de la résistivité électrique.

Le coût pour la réalisation de la maquette et du quadripôle miniature (achat des matériaux, découpe et collage des différents éléments en PVC) est d'environ 200 €.

L'appareil de mesure: le résistivimètre

Pour réaliser la mesure de résistivité électrique, nous avons utilisé un résistivimètre Syscal Junior (≈ 10 k€) commercialisé par la société Iris Instrument (figure 7). Cet appareil permet de gérer l'injection du courant à une intensité contrôlée et de mesurer la différence de potentiel. En lui spécifiant un indicateur sur l'espacement entre les électrodes, l'utilisateur obtient directement le résultat de la mesure de résistivité électrique. Le quadripôle d'électrodes est branché au résistivimètre. Le câblage et la configuration de la mesure sont réalisés avant le lancement de l'expérimentation par le grand public.

Réalisation de l'expérience

Explications théoriques simples

En préambule de l'expérimentation, les concepts théoriques essentiels de la mesure de résistivité électrique sont présentés. Pour cela, deux cartels ont été fabriqués comme support de communication (figure 8).

Figure 7 - Résistivimètre et câblage utilisés pour la mesure de résistivité électrique sur la maquette de sol (Giot G., 2009).

Figure 7 - Resistivity measurement apparatus and cables used for the pedagogic device (Giot G., 2009).

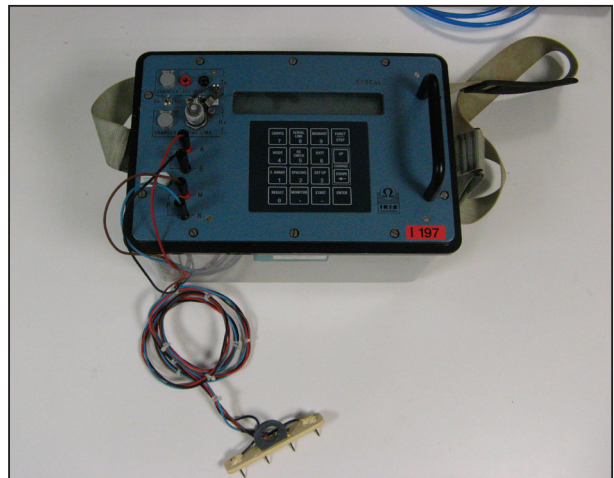


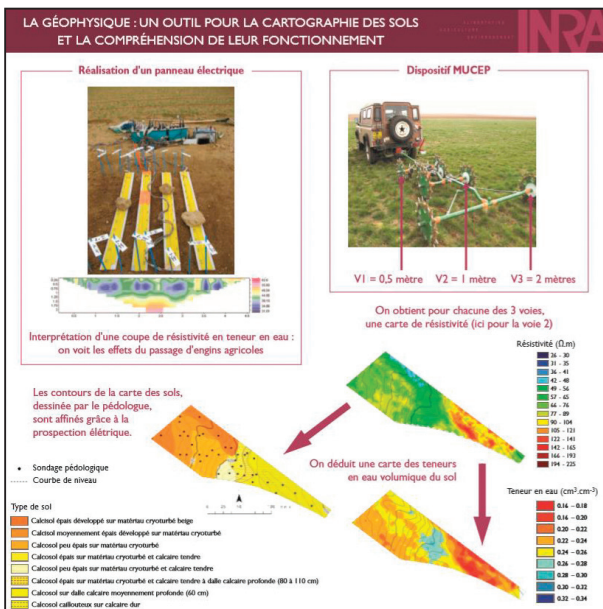
Figure 8 - Présentation des concepts théoriques de la mesure de résistivité électrique à l'aide des cartels au Salon International de l'Agriculture de Paris (INRA, 2009).

Figure 8 - Theoretical explanations of the concept of the electrical resistivity measurement shown in the International Agriculture exposition in Paris (France) (INRA, 2009).



Figure 9 - Cartel de présentation d'applications de la mesure de la résistivité électrique en science du sol (INRA, 2009).

Figure 9 - Examples of applications of resistivity measurements in soil science (INRA, 2009).



Le premier cartel permet d'expliquer le principe de mesure de la résistivité électrique décrit dans la *partie 1*. Pour cela, une analogie a été faite avec un circuit électrique dans lequel le sol est considéré comme une résistance. Cette analogie permet de remobiliser dans la plupart des cas des connaissances acquises

au cours de la scolarité pour les adultes. Pour les jeunes enfants, l'explication et le vocabulaire sont adaptés.

Le deuxième cartel (*figure 9*) présente des applications et des dispositifs de mesure de résistivité électriques utilisés en science du sol. L'exemple sur la cartographie intraparcellaire de ce cartel permet d'amener le propos vers la maquette qui peut être présentée comme une parcelle agricole miniature.

Manipulation

Tout au long de l'expérience, le manipulateur est soumis aux consignes de sécurité. L'expérience est guidée suivant 4 étapes :

Étape 1: Observation de la maquette de sol

Dans un premier temps, la personne qui réalise l'expérience est invitée à observer le sol afin de prendre conscience des différents états. Pour cela, les bandes de sols tassées sont apparentes à la surface du sol et matérialisées par la présence de l'engin agricole. Pour la zone de sol enrichie en éléments grossiers, les cailloux ont été rendus visibles sur les parois latérales du bac. L'apparence de la surface du sol dans cette zone caillouteuse a été laissée volontairement homogène de manière à montrer l'intérêt des observations pédologiques et géophysiques. Cette première phase d'observation permet d'introduire les notions de variabilité spatiale de la couverture pédologique.

Étape 2: Choix de l'emplacement du quadripôle d'électrodes

Le manipulateur est ensuite invité à choisir des positions dans le bac pour positionner le quadripôle électrique et ainsi faire la mesure de résistivité électrique. L'objectif est de lui faire faire la mesure au droit des trois états créés (témoin – tassé – caillouteux).

Étape 3: Réalisation de la mesure

Une fois le quadripôle bien positionné, le manipulateur peut réaliser la mesure en utilisant le résistivimètre, selon les consignes du présentateur.

Étape 4: Questionnement sur le résultat escompté et discussion

Pendant la réalisation de la mesure qui dure quelques secondes, le manipulateur est interrogé sur les résultats escomptés : le sol sera-t-il plus ou moins résistant par rapport au témoin dans la zone tassée et dans la zone caillouteuse ?

Résultats et interprétation

Le *tableau 1* décrit les résultats obtenus pour les mesures réalisées sur les trois états de sols et les explications données.

Figure 10 - Réalisation de l'expérience : a) positionnement du quadripôle d'électrodes à la surface du sol b) mesure et lecture de la résistivité électrique avec le résistivimètre (INRA, 2011).

Figure 10 - Experimental steps : a) installing the quadri-pole in the soil surface b) measurements.



Tableau 1 - Résultats de résistivité en ohm.mètre ($\Omega.m$) obtenus sur les trois états de sols créés et explications fournies.

Table 1 - Results obtained (in $\Omega.m$) for three different status of the created soils and accompanying explanations.

Etat du sol	Résistivité moyenne mesurée ($\Omega.m$)	Explication
Témoin	20	Il s'agit de la valeur de résistivité de la zone témoin, cohérente avec les ordres de grandeurs de la résistivité électrique des sols argilo-limoneux. On explique au public que cette valeur aurait pu être différente dans un autre état d'humidité : lorsque la teneur en eau du sol augmente en période hivernale, la valeur de la résistivité diminue. Au contraire, en période estivale, sur des sols secs, la résistivité est plus importante. La résistivité peut donc être utilisée comme un indicateur de l'état hydrique du sol.
Sol tassé	10	A teneur en eau du sol égale, la résistivité est plus faible que dans la zone témoin (non tassée) car le sol présente une porosité moindre et le courant électrique circule mieux. En effet, l'air contenu dans les pores du sol est un isolant électrique : plus il y a d'air dans la porosité du sol plus celui-ci est résistant.
Sol caillouteux	50	La résistivité est supérieure à la zone témoin (sans cailloux) car les cailloux ont pour effet de perturber le passage du courant électrique dans le sol générant un milieu plus résistant. Par ailleurs le calcaire qui compose les cailloux est un matériau plus résistant que la terre fine argilo-limoneuse.

3 - CONCLUSION

À travers l'utilisation de cette maquette pédagogique, nous avons pu démontrer facilement et à moindre coût au grand public l'intérêt des méthodes géophysiques et en particulier celui de la méthode électrique. La conception de la maquette et le déroulé de l'expérimentation permettent au visiteur d'être sensibilisé à la notion de variabilité spatiale des propriétés du sol et de découvrir une technologie géophysique utilisée dans le domaine de la pédologie et de l'agriculture. Le fait de participer par la manipulation et de se questionner rend l'expérience attractive et ludique.

BIBLIOGRAPHIE

- Buvat S., Thiesson J., Michelin J., Nicoullaud B., Bourennane H., Coquet Y., Tabbagh A., 2014 - Multi-depth electrical resistivity survey for mapping soil units within two 3 ha plots. *Geoderma*, 2014, 232/234 : 317-327.
- Morari, F., Castrignano, A., Pagliarin, C., 2009 - Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68, 97-107.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005 - Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil & Tillage Research*, 83, 173-193.

