Cartographie électrique en continu : Apport à la connaissance d'une couverture de sol développée sur matériaux deltaïques.

M. Dabas, Odile Duval, Ary Bruand, Bernard Verbèque

▶ **To cite this version:**

M. Dabas, Odile Duval, Ary Bruand, Bernard Verbèque. Cartographie électrique en continu : Apport à la connaissance d'une couverture de sol développée sur matériaux deltaïques.. Étude et Gestion des Sols, 1995, 2, pp.4, 257-268. hal-00088955

HAL Id: hal-00088955
https://insu.hal.science/hal-00088955

Submitted on 7 Aug 2006

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.

Cartographie électrique en continu : Apport à la connaissance d'une couverture de sol développée sur matériaux deltaïques

M. Dabas*, O. Duval**, A. Bruand** et B. Verbèque***

* : Centre de Recherches Géophysiques, CNRS 58150 Garchy
** : Centre de Recherches d'Orléans, INRA, Unité de Science du Sol, SESCPF 45160 Ardon
*** : Chambre d'Agriculture du Loiret, 13 avenue des Droits de l'Homme, 45000 Orléans

RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est de déterminer si une prospection électrique utilisant un dispositif équipé d'un déplacement continu et d'un enregistrement automatique des données, permet de connaître rapidement et sans destruction l'organisation spatiale des sols. Une cartographie électrique avec un tel dispositif a été mise en œuvre (quadripôle carré de un mètre de côté) sur une parcelle de 9 000 m^2 où les sols se sont développés sur des formations deltaïques du Burdigalien. Cinquante neuf profils linéaires de 150 mètres de long et équidistants de un mètre ont ainsi été réalisés avec une mesure tous les 10 centimètres. Les résistivités apparentes enregistrées varient de 10 à 600 Ω.m. Les cartes en résistivité révèlent des zones de résistivités apparentes très différentes. Ces résultats ont été comparés avec ceux d'une prospection pédologique : les variations de résistivité apparente sont liées à la profondeur des matériaux argileux présents sous les horizons superficiels sablo-argileux. L'utilisation future d'un dispositif équipé de plusieurs quadripôles nous permettra d'envisager des corrélations avec l'épaisseur de ces mêmes matériaux.

Les résultats actuels montrent qu'il est possible d'acquérir de façon très détaillée et en un temps très court des informations sur l'organisation des sols, sans perturber la couverture pédologique par de nombreux sondages ; le nombre de ces derniers peut en effet être réduit à seulement quelques-uns, placés judicieusement d'après les résultats de la cartographie électrique.

Mots-clés

Géophysique, pédologie, cartographie, grande échelle, résistivité, Orléanais

SUMMARY

A GEOELECTRICAL SURVEY WITH CONTINUOUS RECORDING : CONTRIBUTION TO THE KNOWLEDGE OF A SOIL COVER DEVELOPED ON DELTAIC DEPOSITS

This study concerns soils which developed on Burdigalian deltaic deposits (Miocene, Berger and Desprez, 1969) in the southern of the Paris Basin. These soils, which previously appeared highly variable because of the heterogeneity of the parent materials (Arrouays, 1987), are distributed in the landscape in accordance with the topography (Lamotte et al., 1988 and 1990). Nevertheless, at the scale of a plot, their mapping still requires a detailed pedological survey with many auger holes which damage the soil cover, thus preventing the study afterwards of both water and solute flow within this soil cover.

Numerous studies have shown that electrical resistivity survey (Tabbagh, 1992) enables the study of soil variation (e.g. Bottraud et al., 1984 ; Chéry et al., 1995 ; Dabas et al., 1989 ; Hesse et al., 1986 ; Tabbagh, 1986 ; Lamotte et al., 1994) but the size of the studied

Manuscrit reçu : juin 1995 ; accepté : novembre 1995

area was usually limited because of the time which was required by manual displacement of the quadrupole. The aim of this study is to show that electrical resistivity survey carried out with a quadrupole which makes possible a continuous displacement and an automatic recording of data enables the knowledge of the spatial organization of the soil quickly and without damage to the soil cover (Dabas, 1989 ; Tabbagh, 1992).

The study area was located a few kilometers North of Orléans. The surface was 9.000 m^2 and the slope was less than 1 % (Fig. 1). An electrical survey was achieved with a quadrupole constituted of four electrodes 1 m spaced, towed by a vehicle (Fig. 2). Fifty nine linear transects were realized, and measurements were recorded each ten centimeters along each transect (Dabas, 1995).

A pedological survey was achieved on the same area. Auger holes were realized at the nodes of a quadrangular grid (10 x 5 m) according to the results of a preliminary soil survey (Verbèque, 1994). Thus, 160 auger holes were achieved but numerous were less than 55 cm depth in order to avoid to damage the soil cover in a zone where an agronomical experiment should take place later. The soil was described in details and analysed in two pits (Fig. 1, Tabs. 1 and 2). The soils in pit 1 and 2 are an eutric Planosol and a stagnic eutric Cambisol (FAO).

The recorded resistivity ranged from 10 to 600 Ω. m (Figs. 3 and 4). The resistivity map, which was obtained by spline bicubic interpolation, showed high contrasted areas (Fig. 5). These results were compared with those obtained from the pedological survey. Cross sections were established from the data of auger holes. They presented high vertical and lateral variations of the horizons as illustrated in figure 6. The comparison of the soil variation with electrical resistivity measurements showed that the latter is related to the depth of clayey horizons located underneath the superficial sandy horizons (Figs. 5 and 7). In close connection with that, the histogram of the depth of clayey horizons showed a ressemblance to the one obtained for the electrical resistivity (Figs. 3 and 8).

Spatial relationship between apparent resistivity and the depth of clayey materials is pictured by a graphic superposition of both maps which shows a very good correlation (Fig. 9). Quantification of this relationship is shown by the plot of apparent resistivity versus depth of clayey materials (Fig. 10). The shape of the curve which was obtained can be predicted by a simple model which consists of two layers of which the upper layer could span over a broad range of resistivities.

This study shows the possibility to obtain, with details and quickly (two days of field work for two people), information on the soil cover, without disturbing it with numerous auger holes. Indeed, their number can be reduced down to a few, using the results from the electrical survey for determining their location in the surveyed area.

Finally, automated quadrupoles constituted of electrodes with different spacing will enable soon to describe the location of several horizons within the soil cover, i. e. to give much more information than the depth of a clayey horizon alone.

Key-words

Geophysics, pedology, soil survey, large scale, D.C., resistivity, Orléanais.

RESUMEN

CARTOGRAFÍA ELÉCTRICA EN CONTINUO : CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO DE UNA COBERTURA DE SUELO DESARROLLADA SOBRE MATERIALES DELTÁICOS

El objetivo de este estudio es de determinar si una prospección eléctrica usando un dispositivo equipado de un desplazamiento continuo y de un registro automático de datos, permite conocer rapidamente y sin destrucción la organización espacial de los suelos. Una cartografía eléctrica con un tal dispositivo fue probado (cuadripolo cuadrado de un metro de costado) sobre una parcela de 9 000 m^2 donde los suelos se desarrollaron sobre formaciones deltáicas del Burdigalien. 59 perfiles lineares de 150 m de largo y equidistantes de un metro fueron realizados con una medida cada 10 cm. Las resistividades aparentes varían de 10 a 600 Ω.m. Los mapas de resistivad muestran zonas de resistividades aparentes muy diferentes. Estos resultados fueron comparados con los de una prospección pedológica : las variaciones de resitividad aparente están ligadas a la profundidad de los materiales arcillosos presentes bajo los horizontes superficiales areno-arcillosos. El uso futuro de un dispositivo equipado de varios cuadripolos nos permitira considerar posibles correlaciones con el espesor de estos mismos materiales. Los resultados actuales muestran que es posible adquirir de manera muy detallada y en un tiempo muy corto informaciones sobre la organización de los suelos, sin perturbar la cobertura pedológica con numeros sondeos ; el numero de estos últimos puede entonces ser reducido a solamente algunos, localizados judiciosamente en relación con los resultados de la cartografía eléctrica.

Palabras claves

Geofísica, pedología, cartografía a gran escala, resistividad, Orléanais

Les sols développés sur matériaux deltaïques sont de nature très variable en raison de l'hétérogénéité des matériaux à partir desquels ils se sont formés. Les prospections pédologiques effectuées dans le cadre du programme de cartographie des sols à 1/50 000 de la Région Centre ont effectivement montré que sur les matériaux deltaïques du Burdigalien, les sols varient très fortement sur de très courtes distances (Arrouays, 1987). Les observations effectuées par la suite sur ces mêmes formations par Lamotte *et al.* (1988 et 1990) ont montré que des systèmes de sols peuvent être identifiés et que ceux-ci s'ordonnent à l'échelle du paysage. En revanche, au sein de ces systèmes, une étude très détaillée est ensuite nécessaire pour délimiter les différents types de sol et caractériser leur fonctionnement.

Les sondages nécessaires aux études détaillées perturbent les sols, particulièrement ceux de type planosol sur matériau sableux car, dans ce cas, ils font communiquer les horizons éluviés de la surface et les horizons sableux situés sous l'horizon imperméable B de planosol. Or, la mise en place de dispositifs expérimentaux sur de telles couvertures de sol pour en étudier le fonctionnement hydrique nécessite que les sols soient à la fois connus avec précision et aussi peu perturbés que possible. Il n'est alors pas souhaitable d'avoir recours à des sondages pédologiques, *a fortiori* lorsque la densité des observations doit être élevée, à cause de la complexité du terrain. Dans de telles situations, des prospections géophysiques peuvent être mises en œuvre pour étudier la couverture de sol sans la perturber (Tabbagh, 1992). Elles renseignent indirectement sur la nature du sol qu'il n'est alors nécessaire d'étudier directement que sur un nombre réduit d'observations sur sondages et fosses pédologiques localisés de façon pertinente (Bottraud *et al.,* 1984 ; Chéry *et al.,* 1995 ; Dabas *et al.,* 1989 ; Hesse *et al.,* 1986 ; Tabbagh, 1986 ; Lamotte *et al.,* 1994).

L'objectif de cet article est de montrer que la prospection électrique, après avoir été pratiquée avec de petits résistivimètres à courant alternatif impliquant une insertion manuelle des électrodes dans le sol, peut aujourd'hui être réalisée en utilisant des dispositifs de mesure permettant un déplacement continu et un enregistrement automatique des données (Dabas, 1989 ; Tabbagh, 1992). Un exemple d'application de ces dispositifs est présenté sur une parcelle expérimentale et l'intérêt pour la connaissance de l'organisation des sols est discuté.

PRÉSENTATION DU SITE

La parcelle étudiée est localisée au nord d'Orléans, sur le domaine du Service Régional de la Protection des Végétaux de la Région Centre *(figure 1)*. Sa superficie est d'environ 12 000 m^2 et elle est située sur les formations deltaïques du Burdigalien (Miocène) nommées "sables et argiles de Sologne" (Berger et Desprez, 1969).

La parcelle présente une pente très faible (0,5 % en moyenne, excepté dans la partie ouest où elle atteint 1 %). Sa végétation est constituée d'adventices qui se sont développées depuis 1991, date à laquelle la parcelle n'a plus été cultivée. Un secteur d'étude de forme rectangulaire de 9 000 m^2 de superficie a été délimité pour y réaliser successivement la prospection électrique et la prospection pédologique.

PROSPECTION ÉLECTRIQUE

Le dispositif de mesure (système RATEAU/CNRS) est un ensemble de quatre électrodes qui roulent sur le sol et qui sont tirées par un véhicule *(figure 2).* Un courant alternatif d'intensité régulée (10 mA) est injecté dans deux électrodes et la tension est mesurée sur les deux autres électrodes. Le rapport de ces deux quantités permet le calcul de la résistivité électrique apparente en un point donné. La distance entre chaque électrode qui est de 1 mètre (quadripôle carré), correspond à une profondeur d'investigation du sol voisine du mètre. Comme le dispositif se déplace en continu, un capteur de distance sans contact avec le sol (radar doppler) donne les repères de distance nécessaires au positionnement des mesures. Un sur-échantillonnage est effectué et seule une mesure tous les 10 cm est prise en compte lors du déplacement du dispositif. Les mesures sont visualisées et stockées en temps réel dans un ordinateur. 59 profils linéaires de 150 m de long, de direction est-ouest et équidistants de 1 mètre, ont été effectués (Dabas, 1995). La précision de positionnement des mesures est liée à la précision du radar employé et à la vitesse de réaction de l'opérateur sur le terrain. Sachant que le radar est étalonné par le constructeur pour donner un certain nombre d'impulsions par mètre, en comptant le nombre d'impulsions sur la distance fixe de 150 mètres, nous avons obtenu un écart de 0,8 % par rapport à la médiane, entre les quartiles 25 et 75 %.

Les profils ont été recalés afin de constituer une carte d'isorésistivité. Les mesures de résistivité étant obtenues sur une maille régulière (pas d'échantillonnage et distance entre profils constants), la valeur en chaque point est interpolée par une fonction spline bi-cubique. Plus de 100 000 mesures ont ainsi été utilisées. L'ensemble de la campagne a nécessité deux jours de terrain avec deux opérateurs.

PROSPECTION PÉDOLOGIQUE

La prospection pédologique a été faite sur une surface presque identique à celle étudiée en géophysique, c'est-à-dire sur un rectangle de 150 m de long et 45 m de large. La prise de données a été effectuée de façon systématique, selon un quadrillage régulier de maille 10 x 5 m. La dimension de la maille a été choisie suite à une reconnaissance préalable

Figure 1 - Topographie et localisation de la parcelle étudiée (A, B, C, D : repères entre les différentes cartes ; rectangle : secteur d'étude).

Figure 1 - *Topography and location of the studied area (rectangle). Points A, B, C and D are used as reference marks for comparison with the other maps.*

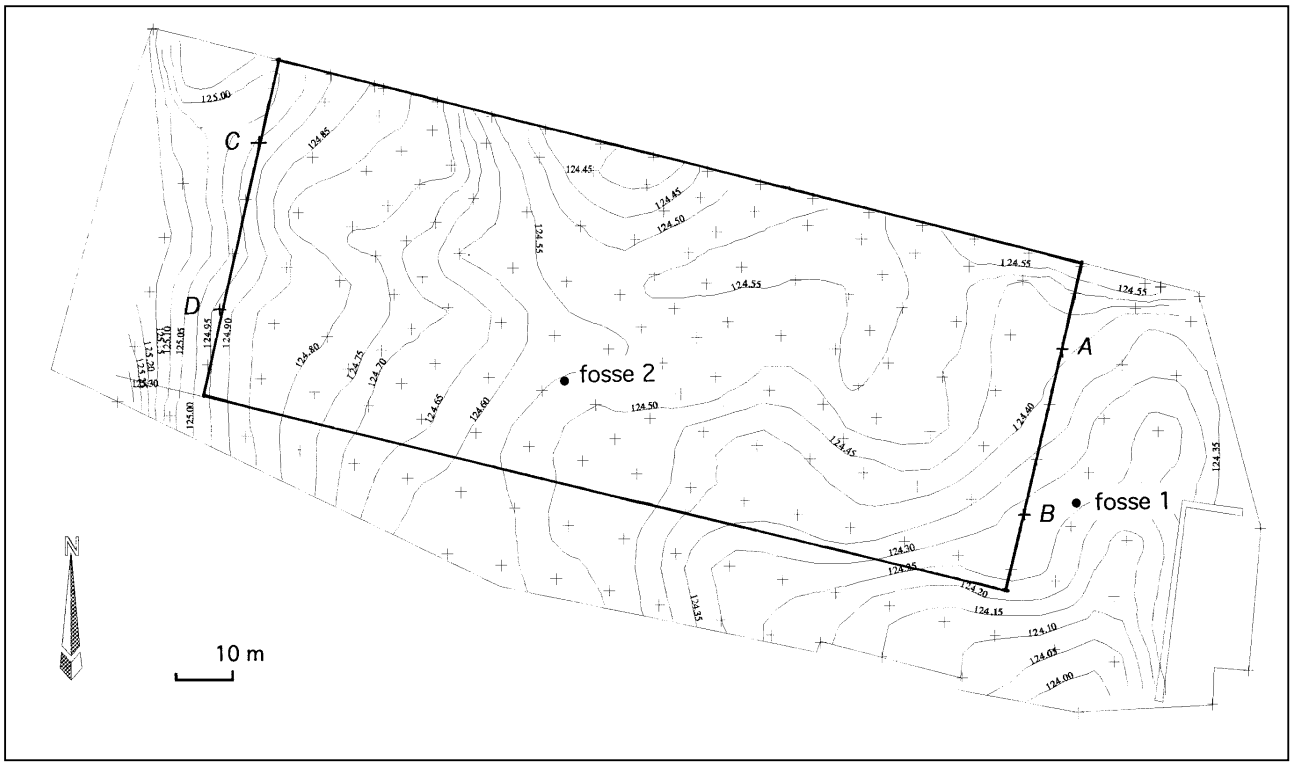
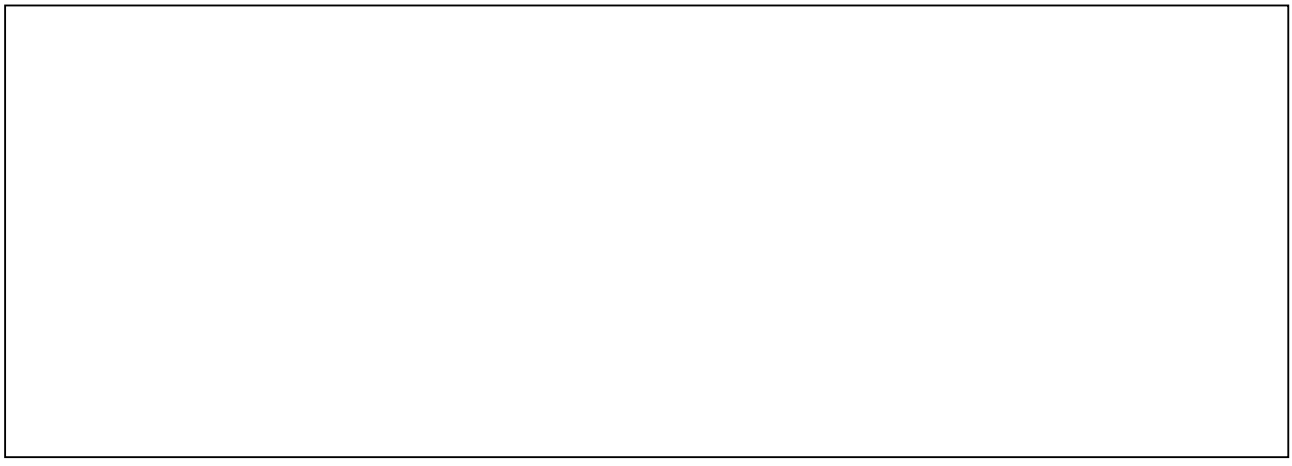


Figure 2 - Vue du quadripôle tracté, système RATEAU/CNRS.

Figure 2 - *View of the apparatus, towed quadrupole, RATEAU/CNRS device.*



(Verbèque, 1994) ayant montré l'existence de variations se développant sur une distance de l'ordre de la dizaine de mètres. Cela correspond à 160 observations. La profondeur de ces observations est variable. Dans la partie sud-ouest destinée à accueillir un dispositif expérimental pour l'étude des transferts de produits phytosanitaires, les sondages ont en moyenne 55 cm de profondeur, ceci afin d'éviter de "percer" un éventuel plancher hydrologique argileux et de perturber la circulation de l'eau de subsurface. Au nord et à l'est, les sondages ont en moyenne 1,20 m de profondeur. Une quinzaine de sondages profonds (2,20 m) ont été faits près de la limite nord. Deux fosses pédologiques ont été creusées et décrites ; des échantillons représentatifs des différents horizons ont été prélevés et analysés.

RÉSULTATS DE LA PROSPECTION ÉLECTRIQUE

Analyse des données

Les valeurs de résistivité électrique apparente enregistrées lors de la prospection varient de 10 à 600 Ω.m. L'histogramme des résistivités a une forme asymétrique marquée *(figure 3).* Les valeurs faibles (< 40 Ω.m) sont caractéristiques des milieux conducteurs (argiles dans notre cas) alors que les valeurs élevées jusqu'à 600 Ω.m sont caractéristiques des sables plus ou moins argileux. La valeur du pic principal à 40 Ω. m correspond aux valeurs de résistivité les plus fréquentes (i.e. superficie la plus importante sur le terrain). L'aspect discret, "en peigne", de cet histogramme est lié à la quantification du convertisseur de la chaîne de mesure.

La *figure 4* reproduit en perspective un sous-ensemble de 15 profils équidistants de un mètre. La résolution le long de l'axe du profil est de 10 cm. On remarque une zone extrêmement stable et de faible valeur (< 40 Ω.m) à l'ouest et au centre qui se finit brutalement par une zone de résistivités élevées (jusqu'à 400 Ω.m) avec des "longueurs d'onde" de 10 à 40 mètres. Pour associer ces profils entre eux et créer une carte, il a été nécessaire de filtrer les profils (filtrage par la médiane) afin d'éliminer les éventuelles valeurs aberrantes, puis de les réinterpoler avec un pas de un mètre pour obtenir un maillage régulier.

Représentation cartographique

Les résultats sont présentés sous la forme de plages en densité de gris *(figure 5)* ; les valeurs sombres représentent les zones les plus résistantes, tandis que les valeurs claires représentent les zones les plus conductrices. La transition entre les zones conductrice et résistante est rapide ; elle se marque par une forme géométrique bien définie (demi-ogive). Dans la zone résistante (60 à 400 Ω.m), il est possible d'identifier trois petits secteurs très résistants (classe 9) d'une surface voisine de 20 m^2.

RÉSULTATS DE LA PROSPECTION PÉDOLOGIQUE

Analyse des fosses pédologiques

Le sol de la fosse 1 est localisé à l'est du secteur d'étude *(figure 1).* Il présente un horizon superficiel (0-32 cm, horizon L, Référentiel pédologique, 1992) de texture sableuse (Jamagne, 1967 ; INRA-IRAT, 1982). Les racines y sont fines et nombreuses, la structure est très peu nette. Sous cet horizon, on observe un horizon également sableux (32-60/67 cm, horizon Eg) ; les racines y sont rares et la structure est particulaire. La limite avec l'horizon sous-jacent est nette et soulignée par la présence d'eau libre au-dessus du contact. Sous le contact apparaît un horizon peu poreux de texture sablo-argileuse à argilo-sableuse à sables grossiers (60/65-85 cm, horizon BTg), présentant

Figure 3 - Histogramme des valeurs de résistivités apparentes enregistrées sur le secteur d'étude.

Figure 3 - *Histogram of the apparent resistivity values recorded for the studied area.*

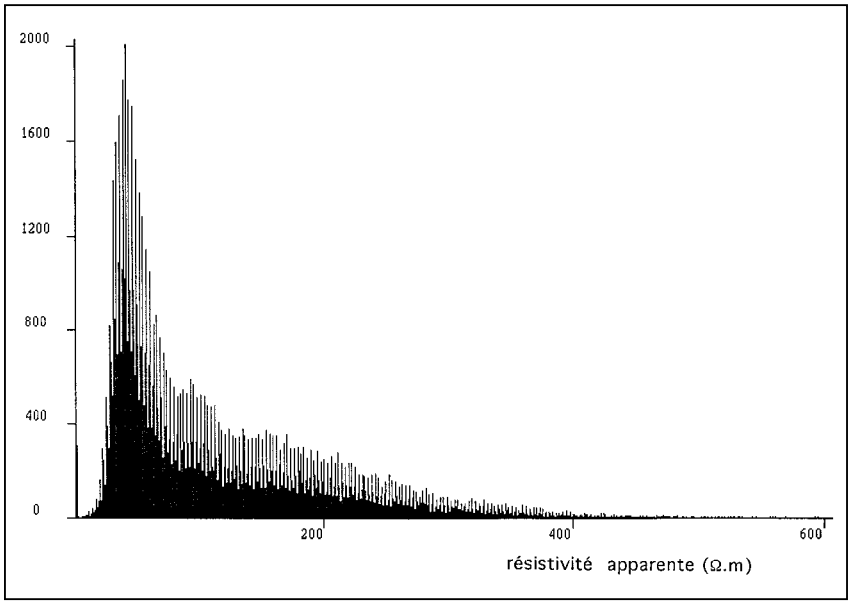


Figure 4 - Vue en perspective de 15 profils linéaires équidistants de 1 mètre.
Figure 4 - Perspective view of the 15 linear transects which are equidistant from 1 metre.

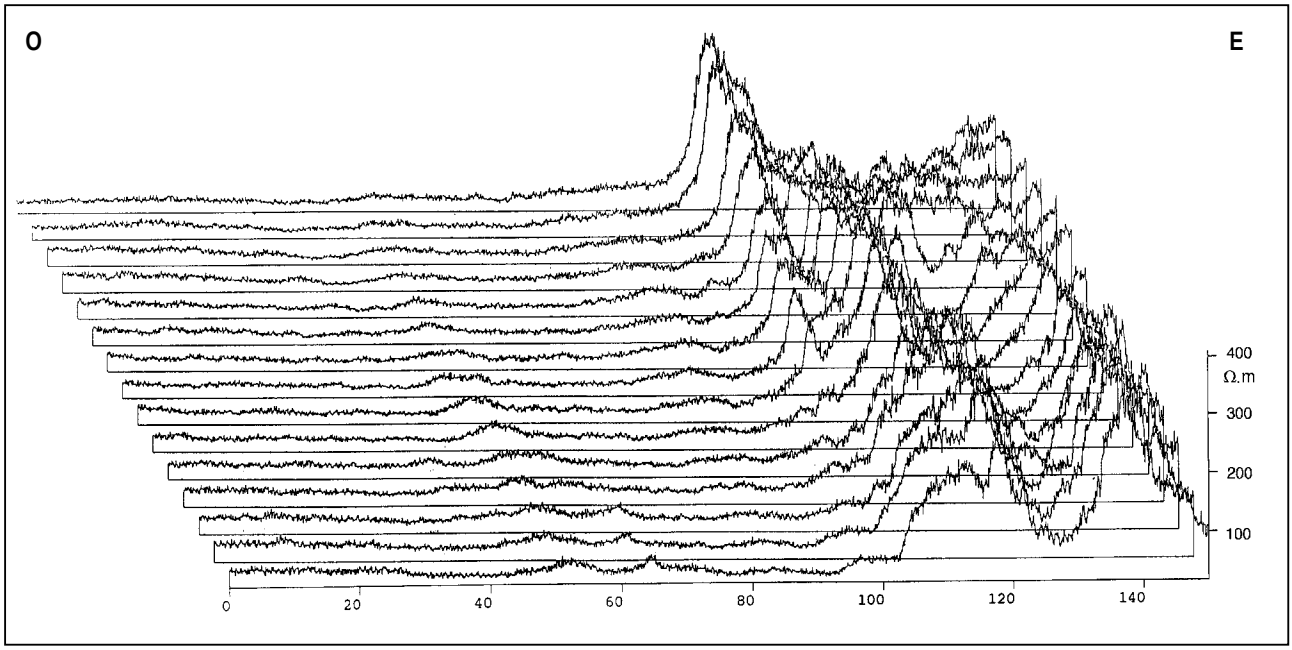
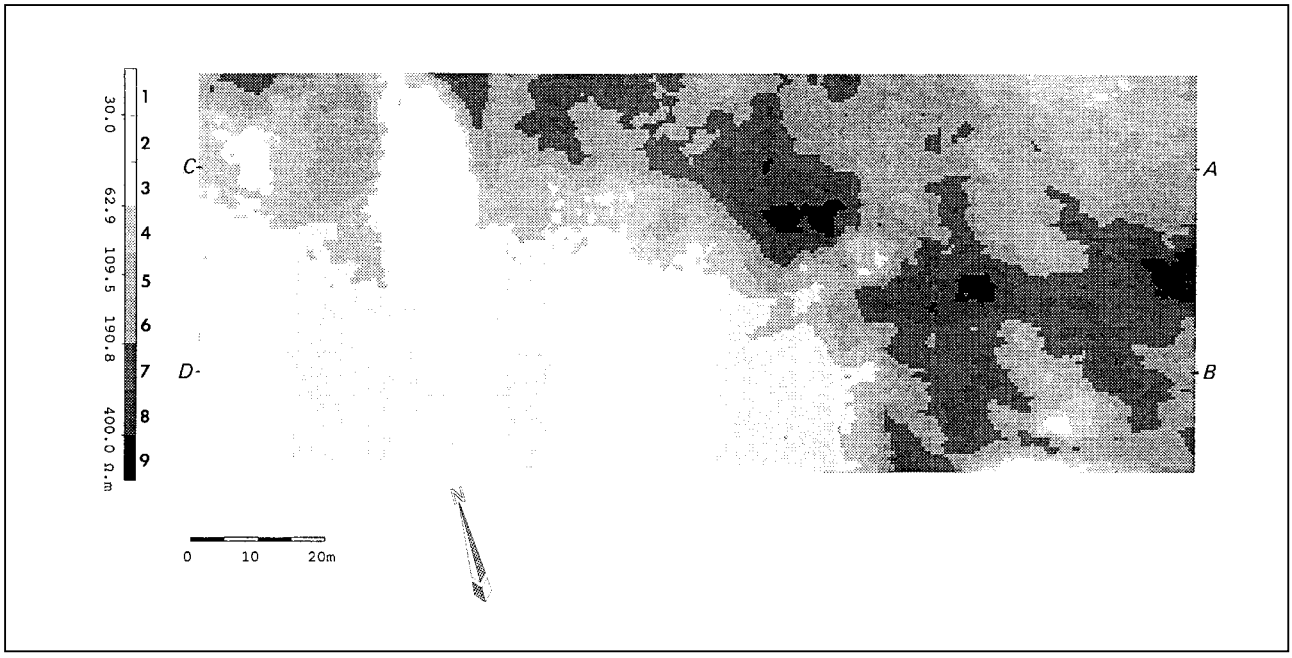


Figure 5 - Carte de la résistivité électrique apparente (valeurs de résistivité classées selon une progression géométrique : 9 classes en densités de gris).
Figure 5 - *Map of the apparent electrical resistivity (values of resistivity are expressed with different grey levels).*



peu de racines et une structure polyédrique assez nette à sur-structure prismatique. Au delà de 85 cm, une argile lourde (Alo grise, horizon Cv) apparaît ; sa structure est à tendance vertique, à sous-structure polyédrique fine. L'ensemble de l'horizon est peu poreux. Les caractéristiques morphologiques et analytiques *(tableau 1)* de ce sol permettent de le rattacher à un PLANOSOL typique (Baize *et al.,* 1992).

Le sol de la fosse 2 se caractérise par un horizon superficiel très poreux de texture sablo-argileuse (0-25 cm, horizons L) ; les racines y sont nombreuses et la structure est grumeleuse à polyédrique fine et nette. Ensuite, on observe un horizon poreux de texture argileuse à sables grossiers (25-43 cm, horizon Sg). Les racines sont fines et peu nombreuses et la structure est polyédrique subanguleuse peu nette. Enfin, plus en profondeur (43-80 cm, horizon Cvg), on observe un horizon peu poreux, marqué par des taches d'oxydation, de texture très argileuse à sables grossiers. Les racines sont fines et peu nombreuses et la structure est polyédrique moyenne et nette. Les caractéristiques morphologiques et analytiques de ce sol *(tableau 2)* ainsi que la comparaison avec des observations effectuées en forêt d'Orléans par Lamotte *et al.* (1988) permettent de le rattacher à un REDOXISOL argileux (Baize *et al.,* 1992).

Cartographie pédologique par sondages

Les caractéristiques morphologiques des sols ont été relevées lors des sondages, ce qui a permis l'identification d'un certain nombre d'horizons (Duval *et al.,* 1995 ; Verbèque, 1994). Ces observations ont permis d'établir dix coupes toposéquentielles de 150 m de long et espacées de 5 m, dont nous présentons un exemple *figure 6.*

Ces coupes permettent de relier les observations ponctuelles entre elles et de caractériser les successions verticales et l'arrangement latéral des horizons rencontrés. Elles illustrent l'hétérogénéité des dépôts sédimentaires et la complexité des différenciations pédologiques qui se sont surimposées. On rencontre ainsi des lentilles d'extension métrique (lentilles d'argile lourde dans une couche argilo-sableuse graveleuse, etc.) et des couches de faible épaisseur (5 à 10 cm de sable intercalé entre deux niveaux d'argile sableuse).

Tableau 1 - Résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur la fosse 1.
Table 1 - *Results of the physico-chemical analyses made on the pit 1.*

Horizon	Prof.	Hum.	Texture	Granulométrie %					Carbone	pH	Bases échangeables cmol /kg				
	échant. cm	%		A	LF	LG	SF	SG	%	eau	CEC	Ca^{++}	Mg^{++}	K^{+}	Na^{+}
L	12 - 22	0,9	S/SL^{+}	11,1	7,1	6,2	13,7	61,9	0,52	4,7	3,9	2,4	0,12	0,09	0,05
Eg	40 - 50	0,6	S/SL	8,6	7,3	4,8	10,6	68,7	0,16	5,9	2,6	2,2	0,10	0,08	0,04
BTg	63 - 73	3,3	SA^{+}	24,5	1,7	0,5	4,4	68,9	0,10	5,5	13,9	12,1	1,16	0,20	0,10
Cv	90 - 105	12,7	Alo^{+}	80,9	5,0	1,3	2,5	10,3	0,14	5,2	36,3	25,7	3,46	0,72	0,30

Résultats ramenés à 100 g de terre fine séchée à 105 °C
Analyses effectuées au Laboratoire d'Analyses de Sol, INRA Arras

Tableau 2 - Résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur la fosse 2.
Table 2 - *Results of the physico-chemical analyses made on the pit 2.*

Horizon	Prof.	Hum.	Texture	Granulométrie %					Carbone	pH	Bases échangeables cmol /kg				
	échant. cm	%		A	LF	LG	SF	SG	%	eau	CEC	Ca^{++}	Mg^{++}	K^{+}	Na^{+}
L	10 - 20	1,5	SA	15,3	14,4	9	16,8	44,5	0,72	5,4	7,8	5,9	0,44	0,32	0,06
Sg	34 - 43	6,0	A^{+}	45	10,3	5,9	13,1	25,7	0,41	6,3	20,1	19,0	2,17	0,25	0,09
Cvg	50 - 60	6,5	Alo-	47,9	14,7	10,6	9,6	17,2	0,23	5,0	24,3	16,3	3,00	0,20	0,11

Résultats ramenés à 100 g de terre fine séchée à 105 °C
Analyses effectuées au Laboratoire d'Analyses de Sol, INRA Arras

Figure 6 - Exemple de coupe toposéquentielle localisée dans la partie nord de la parcelle.
Caractérisation des horizons, essentiellement par la texture : Ap, horizon labouré ; SA, sable argileux ; SSm, sable moyen ; Sconc, sable concrétionné ; SSG, sable graveleux ; SASG, sable argileux graveleux ; LSASm, limon sablo-argileux à sable moyen ; ASbj, argile sableuse brun jaune ; ASSGocre + g, argile sableuse ocre et grise ; ASSGg, argile sableuse grise à sable graveleux ; Alobj, argile lourde brun jaune ; Alo beige, argile lourde beige ; Alog, argile lourde grise.
Figure 6 - *Example of one toposequencial cross section located in the northern part of the studied area.*

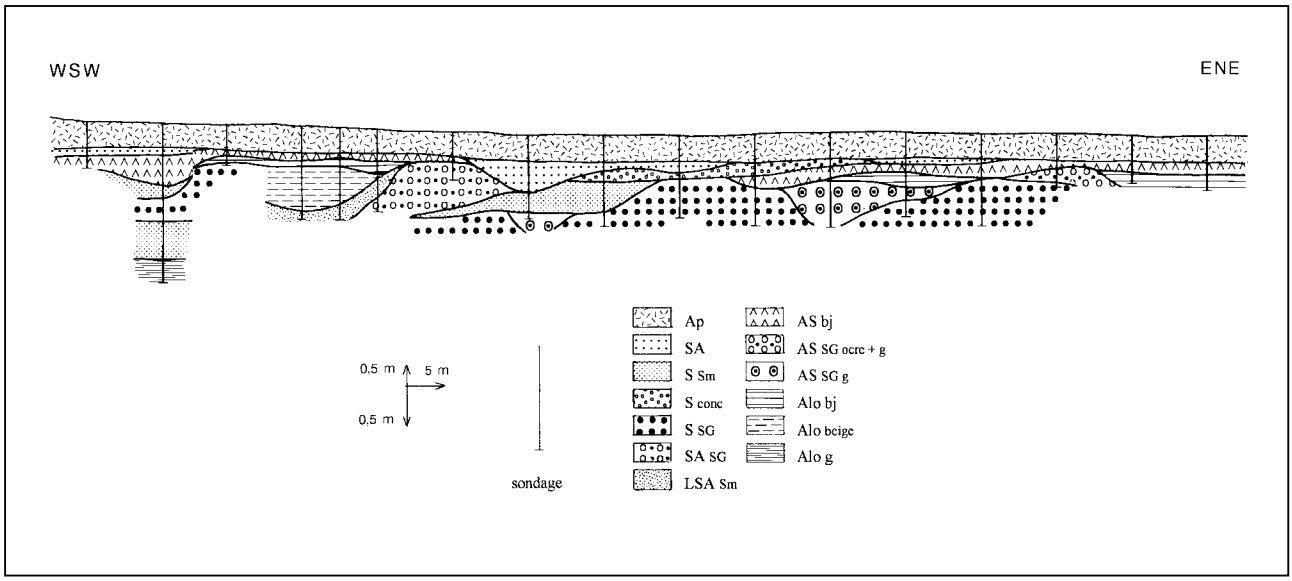
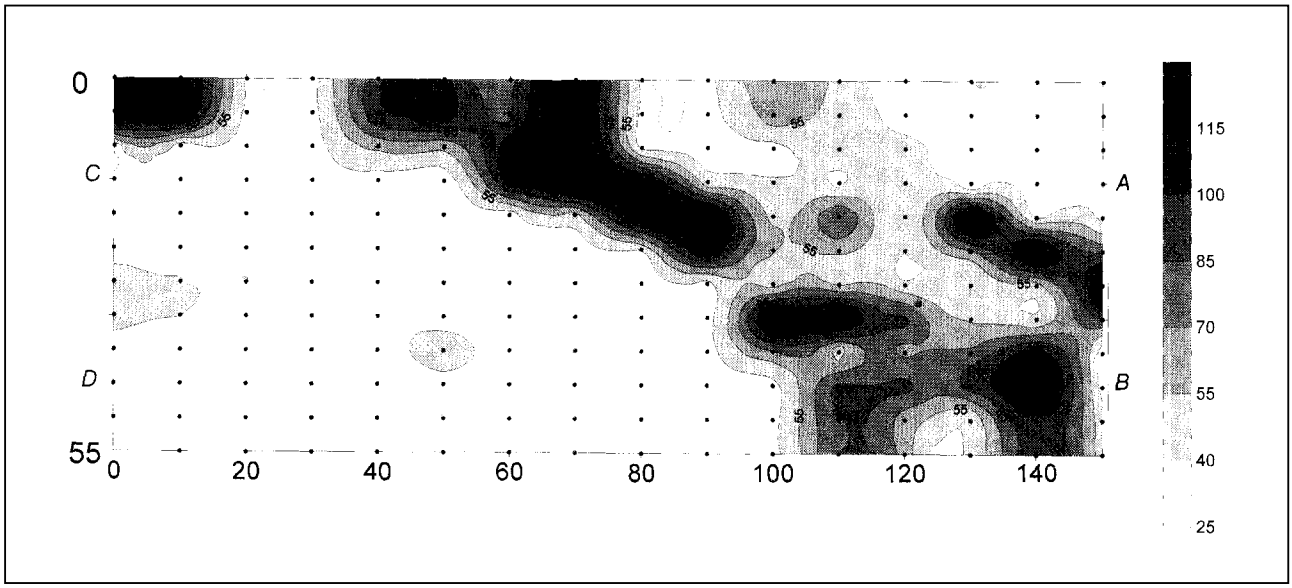


Figure 7 - Carte de la profondeur des matériaux argileux, en centimètres (quadrillage 10 x 5 m).
Figure 7 - *Map of the depth of clayey materials.*



COMPARAISON ENTRE LES RÉSULTATS DES PROSPECTIONS GÉOPHYSIQUE ET PÉDOLOGIQUE

La configuration du dispositif utilisé pour la prospection électrique correspond à une profondeur d'investigation du sol voisine du mètre, proche de la profondeur d'observation de la tarière de 1,20 m. Nous rappelons que 59 profils géophysiques distants de 1 m ont été effectués et que le long de ces profils, une mesure a été faite tous les 10 cm. Ceci donne un échantillonnage très serré qui est à comparer avec celui qui provient de la prospection pédologique associée : le rapport est de 100 sur 1. Les observations à la tarière ont en effet été effectuées tous les 10 m ; cette différence dans le pas d'échantillonnage apparaît nettement sur les cartes que nous allons comparer.

La carte de valeurs de résistivité apparente en densité de gris *(figure 5)* montre deux zones bien distinctes : au sud et à l'ouest, une zone de teintes claires correspondant à des résistivités apparentes faibles, donc zone conductrice et au nord et à l'est, une zone de teintes intermédiaires à sombres de résistivités moyennes à élevées, donc zone résistante. L'analyse des données recueillies lors de la prospection pédologique nous a conduits dans un premier temps à attribuer la présence de niveaux argileux (conducteurs) aux zones claires et la présence de niveaux sableux (résistants) aux zones sombres.

A partir des observations pédologiques, une carte a été établie *(figure 7)* en prenant en compte en chaque point de sondage, la valeur de la profondeur des matériaux argileux. Ces matériaux regroupent dans un même ensemble le matériau argileux supérieur (AS + Alo brun jaune) et l'argile très lourde beige *(figure 6)*. L'histogramme de la profondeur *(figure 8)* présente une répartition de la population similaire à celle trouvée pour la valeur de résistivité. La valeur du mode (profondeur = 35 cm) correspond effectivement aux valeurs de résistivité apparente les plus souvent rencontrées (40 Ω. m ou classe 2). La *figure 7* permet de retrouver les deux grands ensembles reconnus en géophysique. Il apparaît ainsi une bonne concordance entre le contour de la limite de classe 6/7 de résistivité (gris foncé, *figure 5*) et la courbe 70 cm d'iso-profondeur d'apparition de matériaux argileux. La corrélation spatiale entre les paramètres résistivité électrique apparente et profondeur des matériaux argileux peut être illustrée de façon qualitative par la *figure 9* obtenue par superposition des deux cartes précédentes en courbes de niveaux. Un nombre restreint de courbes a volontairement été sélectionné.

Afin de quantifier la corrélation entre ces deux paramètres, nous avons tracé la représentation graphique entre la profondeur des argiles et la résistivité apparente *(figure 10)*. Les valeurs portées sur la figure correspondent à une grille de maille 5 x 5 m. Elles ont été obtenues en utilisant un algorithme de courbure minimale. On observe bien une augmentation de la résistivité avec la profondeur des argiles puisque l'horizon superficiel est plus résistant que l'argile. La modélisation de la variation de résistivité pour un matériau "bicouche" aboutit à une courbe de type sigmoïde. Pour des profondeurs d'argiles tendant vers zéro, on devrait observer une résistivité apparente proche de celle des matériaux argileux, tandis que pour les grandes profondeurs (supérieures à la profondeur d'investiga-

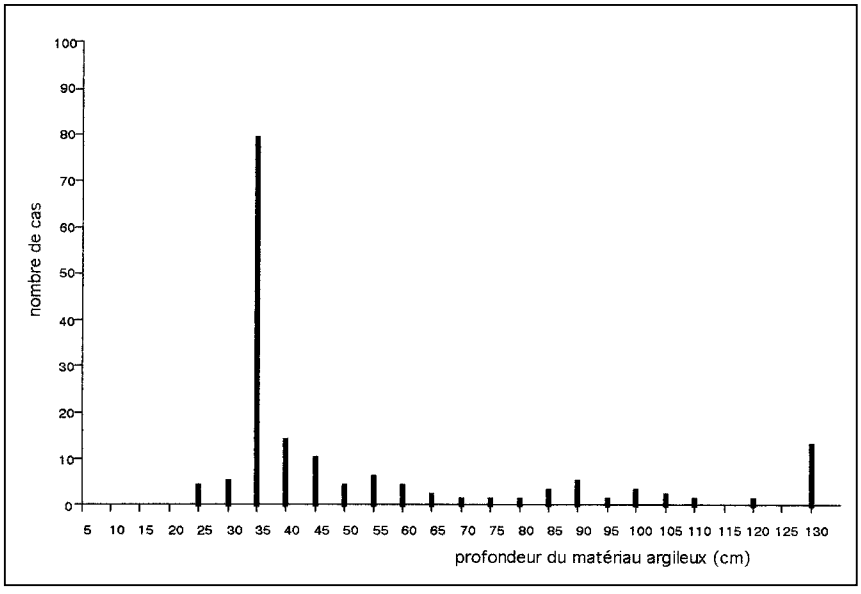
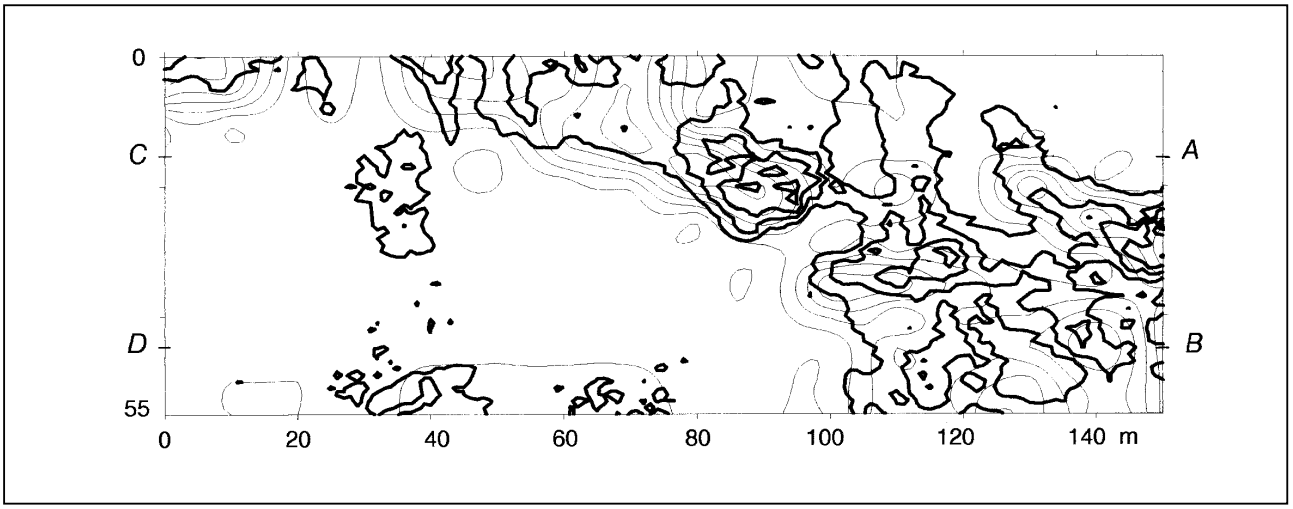


Figure 8 - Histogramme des valeurs de profondeur des matériaux argileux observés lors de la prospection pédologique.

Figure 8 - *Histogram of the values of the clayey materials depth observed during the pedological survey.*

Figure 9 - Comparaison entre la carte de résistivité électrique apparente (a = 1m) et la carte de la profondeur des matériaux argileux (tarière). Traits épais : résistivité apparente, traits fins : iso-profondeurs.

Figure 9 - *Comparison between the map of the apparent electrical resistivity and the map of the depth of clayey materials. Thick lines : apparent resistivity, thin lines : depth of the clayey materials.*



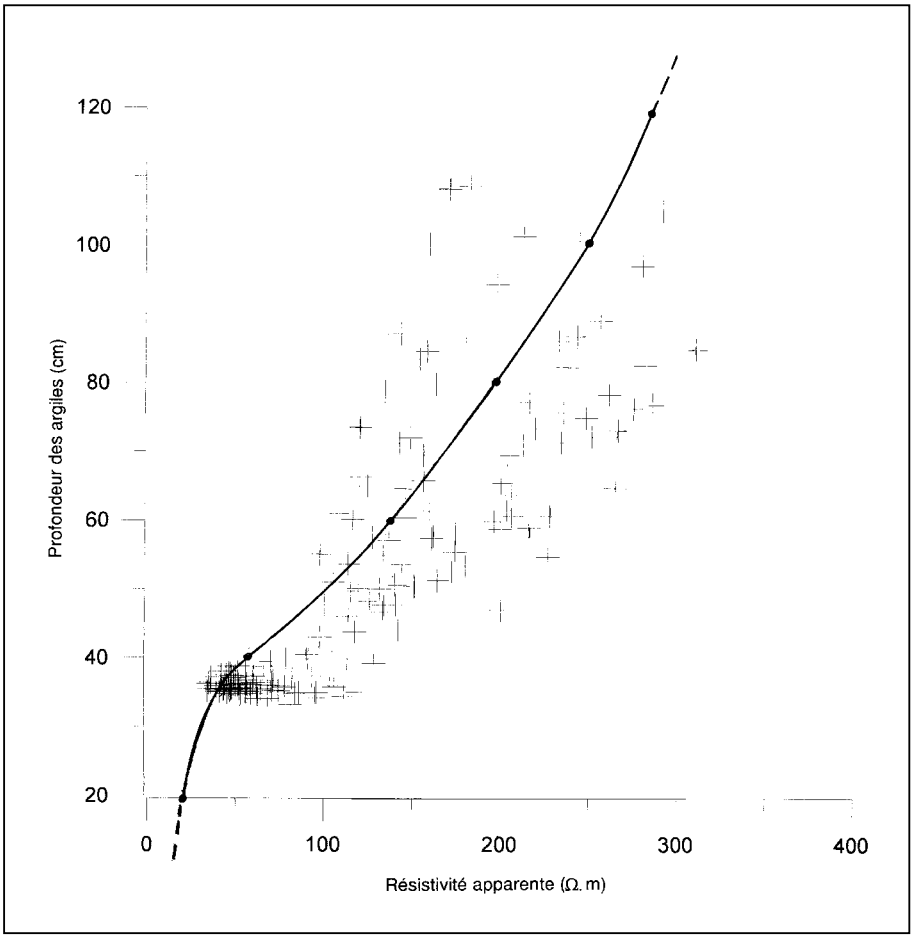


Figure 10 - Représentation graphique de la profondeur des argiles en fonction de la résistivité apparente obtenue pour chaque point issu d'une grille de maille 5 x 5 m. La courbe correspond à un essai de modélisation pour un matériau "bicouche".

Figure 10 - *Graph of the depth of the clayey materials versus the apparent resistivity, obtained for every point issued from a 5 x 5 m grid. The curve corresponds to a model consisting of two layers.*

tion du quadripôle utilisé), la valeur de résistivité devrait tendre vers celle de la couche superficielle. Entre ces deux cas limites, on observe des valeurs intermédiaires. Ceci n'est vrai que pour des couches homogènes et des interfaces planes et parallèles. Dans notre cas, nous observons que pour une même profondeur, 35 cm par exemple, on obtient des résistivités sur une plage de 80 Ω.m. Cette plage traduit la variabilité de l'horizon superficiel, d'éventuels problèmes de positionnement des mesures d'une carte par rapport à l'autre, et pose le problème de la comparaison entre une mesure ponctuelle à la tarière et une mesure intégrant un plus grand volume de sol à l'aide du quadripôle. Cette dispersion augmente d'ailleurs lorsque la profondeur des argiles augmente.

Après un essai de modélisation et à titre d'exemple, nous avons tracé sur le graphique la courbe sigmoïde qui correspondrait à un milieu théorique de 20 Ω.m pour les argiles et 350 Ω.m pour la formation superficielle. En fait, en faisant varier la valeur de résistivité de la formation superficielle, on obtiendrait une famille de courbes qui recouvrirait l'ensemble des points de cette figure.

Nous ne pouvons pas, dans le cadre de cet article, dépasser le stade descriptif de cette corrélation. Ce point fera l'objet de recherches plus approfondies quand nous disposerons d'un large jeu de données de résistivité obtenues avec des quadripôles de plusieurs géométries.

Enfin, le caractère méthodologique de l'étude a nécessité un nombre élevé de sondages pédologiques. Si l'objectif de l'étude s'était limité à la seule obtention d'une carte de résistivité apparente avec des éléments d'interprétation permettant de distinguer les zones sableuses profondes de celles où les horizons argileux sont proches de la surface, un nombre très restreint de sondages pédologiques (vraisemblablement moins d'une dizaine) aurait été alors nécessaire.

L'étude pédologique montre que les variations de résistivité apparente sont liées à la *profondeur d'apparition* des matériaux argileux rencontrés. Une relation encore plus étroite pourrait être envisagée avec *l'épaisseur* de ces matériaux sur une tranche de sol correspondant approximativement à celle concernée par la prospection géophysique. Cependant, dans le cadre de ce travail, la comparaison avec la variable épaisseur n'a pas pu être effectuée puisque de nombreux sondages ont été arrêtés vers 70 cm, en particulier dans la zone où la résistivité apparente est uniformément faible.

CONCLUSION

Les résultats de cette étude confirment l'intérêt d'un dispositif autotracté de mesures électriques automatiques. Un tel dispositif fournit une information précise, rapidement acquise, sur les variations de nature des sols, qu'un nombre réduit de sondages pédologiques suffit à compléter.

Notons enfin que, pour étudier le fonctionnement hydrique de la couverture de sol, il est nécessaire de connaître la distribution des différents horizons au sein de cette couverture. C'est plus particulièrement nécessaire lorsqu'il s'agit d'horizons à propriétés hydrauliques très contrastées comme ceux de cette étude. Nous avons montré qu'avec le dispositif utilisé (écartement des électrodes de 1 mètre), on obtient une information liée à la profondeur des horizons argileux présents sur 1,2 mètre. En revanche, en procédant avec un quadripôle de géométrie fixe, la localisation des horizons argileux reste imprécise lorsque des intercalations sableuses sont présentes en profondeur. Plusieurs quadripôles autotractés, de géométrie et donc de profondeurs d'investigation différentes seront utilisés simultanément pour une reconnaissance encore plus précise de la distribution spatiale des horizons au sein de la couverture de sol. Ce développement est en cours de réalisation.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le SRPV (Service Régional de la Protection des Végétaux) de Fleury-les-Aubrais pour le soutien financier qui leur a été apporté, Mmes M. Hanrion (SRPV), S. Lochon (SRPV) et B. Remy (FREDEC) pour les facilités qui leur ont été accordées lors de cette étude. Ils remercient également MM C. Le Lay et B. Renaux (INRA Orléans) ainsi que M. Lamotte (ORSTOM Niamey) pour leur aide lors de l'acquisition des données. Cette étude a été réalisée dans le cadre des activités du GREPPPES (Groupe Régional pour l'Étude de la Pollution par les Produits Phytosanitaires des Eaux et des Sols en Région Centre) et de celles du groupement de recherche GEOFCAN (approche GÉophysique et structurale de l'Organisation spatiale et du Fonctionnement des Couvertures pédologiques Anthropisées ou Naturelles).

BIBLIOGRAPHIE

Arrouays D., 1987 - Carte des sols de la Région Centre à 1/50 000. Feuille de Bellegarde du Loiret. Notice explicative. INRA-Chambre d'Agriculture du Loiret. 183 p.

Baize D., Girard M-C, coord., 1992 - Référentiel pédologique. Principaux sols d'Europe. AFES-INRA. INRA, Paris. 222 p.

Berger G., Desprez N., 1969 - Carte géologique à 1/50 000, feuille d'Orléans. Notice explicative. BRGM, Orléans. 8 p.

Bottraud J.C., Bornand M., Servat E., 1984 - Mesures de résistivité appliquée à la cartographie en pédologie. Science du Sol, 4, 279-294.

Chéry P., Dabas M., Bruand A., Voltz M., 1995 - Épaisseur de la couverture de sol et prospection géophysique par des méthodes électriques : étude de cas en Petite Beauce. Géologues. sous presse

Dabas M., 1989 - Comportement magnétique des sols dans les domaines fréquentiel et temporel (ARV). Application à la prospection des sites archéologiques. Thèse d'Université, Paris VI, 274 p.

Dabas M., Hesse A., Jolivet A., Tabbagh A., 1989 - Intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle. Science du Sol, 27, 1, 65-68.

Dabas M., 1995 - Prospection d'une parcelle dans l'enceinte du SRPV par

méthode électrique. Rapport interne, Centre de Recherches géophysiques, CNRS Garchy. 13 p.

Duval O., Bruand A., Le Lay C., Renaux B., 1995 - Étude pédologique de la parcelle expérimentale du SRPV. Rapport interne, INRA, Orléans. 19 p.

Hesse A., Jolivet A., Tabbagh A., 1986 - New prospects in shallow depth electrical surveying for archaeological and pedological applications. Geophysics, 51, 3, 585-594.

INRA - IRAT, 1982 - S.T.I.P.A. Notice pour l'entrée des descriptions et analyses de sols en banque de données. INRA, Orléans, Montpellier.137 p.

Jamagne M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. Ann. Agron., vol. 18, n° hors série. 142 p.

Lamotte M., Bruand A., Duval O., Humbel F.X., 1988 - Un système planosol-sol hydromorphe en forêt d'Orléans. Science du Sol, 26, 3, 139-155.

Lamotte M., Bellier G., Duval O., Jamagne M., 1990 - Une démarche itérative entre caractérisation et cartographie de sols en Orléanais. Cas d'un système planosols-sols hydromorphes à substrat argileux. Science du Sol, 28, 2, 109-122.

Lamotte M., Bruand A., Dabas M., Donfack P., Gabalda G., Hesse A., Humbel F.X., Robain H., 1994 - Distribution d'un horizon à forte cohésion au sein d'une couverture de sol aride du Nord-Cameroun : apport d'une prospection électrique. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 318, sér. II, 961-968.

Tabbagh A., 1986 - Sur la comparaison entre la prospection électrique et trois méthodes de prospection électromagnétique pour la détection de contrastes de résistivité associés aux structures archéologiques. Prospezioni Archeologiche, 10, 49-63.

Tabbagh A., 1992 - Méthodes géophysiques appliquées à la prospection archéologique. Mém. soc. géol. France, 161, 9-15.

Verbèque B., 1994 - Étude pédologique pour l'implantation d'un verger expérimental à la protection des végétaux de Fleury-les-Aubrais. Rapport

interne, Chambre d'Agriculture du Loiret. 13 p.