



HAL
open science

Épaisseur de la couverture du sol et prospection géophysique par des méthodes électriques: étude de cas en Petite Beauce

Michel Dabas, Philippe Chéry, Ary Bruand, Marc Voltz

► **To cite this version:**

Michel Dabas, Philippe Chéry, Ary Bruand, Marc Voltz. Épaisseur de la couverture du sol et prospection géophysique par des méthodes électriques: étude de cas en Petite Beauce. *Géologues*, 1996, 109, pp.17-23. hal-02926260

HAL Id: hal-02926260

<https://hal.science/hal-02926260>

Submitted on 10 Sep 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.

ÉPAISSEUR DE LA COUVERTURE DE SOL ET PROSPECTION GÉOPHYSIQUE PAR DES MÉTHODES ÉLECTRIQUES

Étude de cas en Petite Beauce

par Philippe Chéry*, Michel Dabas**, Ary Bruand*, Marc Voltz***

Résumé

La connaissance de l'épaisseur de la couverture de sol est indispensable pour estimer les quantités d'eau qui sont retenues par cette couverture et celles qui sont drainées vers l'aquifère en période hivernale. En Petite Beauce, la description des variations d'épaisseur de la couverture de sol est rendue difficile par la forte variabilité spatiale de ce caractère. Cette étude a pour objectif de décrire de telles variations d'épaisseur du sol en utilisant des données de résistivités issues de sondages électriques couplées à des mesures réalisées par sondages mécaniques à la tarière. Sur le secteur étudié (100 ha), les sols sont développés dans une couverture limono-argileuse susjacent à un calcaire fréquemment cryoturbé. Une étroite corrélation existe entre les mesures d'épaisseur obtenues par sondage mécanique et celles calculées par inversion des sondages électriques. Localement, sont intercalés entre les matériaux limono-argileux et le calcaire de Beauce, des matériaux argilo-sableux. L'épaisseur des formations argilo-sableuses est étudiée sur une trentaine d'hectares en réalisant un profilage électrique. Les résultats de ce travail montrent que les méthodes électriques constituent un outil efficace pour l'étude de la variabilité spatiale de l'épaisseur de la couverture de sol et des formations superficielles.

Mots clefs : Résistivité électrique, Variographie, Formations superficielles, Cartographie des sols, Variabilité spatiale.

Abstract

Soil thickness is required for estimation of water storage properties and their consequences on bypass flow occurrence and water transfers down to aquifer. In the Beauce area (France), accurate mapping of soil thickness is difficult because of its high spatial variability. This study aims at describing soil thickness variation by using electrical resistivity survey and auger boring data on an area of 100 ha. The soils are mainly loamy soils on a cryogenic calcareous bedrock with local karstic areas. Results showed a close relationship between soil thickness and electrical resistivity. Locally, a karstic depression filled by sandy clayey materials was shown. Thickness of these sandy clayey materials was studied by using systematical electrical resistivity profiling on an area of 30 ha. Results demonstrate that electrical resistivity

determinations can provide a useful tool for detailed study of thickness variability.

Keywords : Electrical resistivity, Variography, Superficial deposits, Soil survey, Spatial variability.

Introduction

La gestion de l'eau dans les milieux calcaires filtrants et cultivés de façon intensive pose, depuis de nombreuses années, des problèmes d'ordre à la fois quantitatif et qualitatif. Ces dernières années, l'irrigation des cultures s'est généralisée ; elle affecte aujourd'hui le bilan des aquifères et ce d'autant plus que plusieurs déficits pluviométriques annuels se sont succédés. Associée à cette dégradation quantitative de la réserve, on constate avec le temps une dégradation croissante de la qualité de l'eau. Cette dernière se caractérise par des teneurs en nitrate qui atteignent fréquemment des valeurs qui rendent l'eau impropre à la consommation humaine. Des composés directement issus de traitements utilisant des herbicides et pesticides sont aussi de plus en plus fréquemment identifiés dans les aquifères les plus sensibles. Devant l'ampleur prise par cette dégradation de la ressource en eau, des programmes d'action destinés à réduire les flux de produits polluants vers les aquifères ont été mis en place en Région Centre (ces programmes auxquels participent la Chambre Régionale d'Agriculture, les Chambres Départementales, la Direction Régionale de l'Environnement, l'INRA, le CNRS et l'Université d'Orléans font l'objet d'un soutien financier de la part du Conseil Régional de la Région Centre, du Ministère de l'Agriculture et des Agences de Bassin Loire-Bretagne et Seine-Normandie).

Dans le cadre de ces programmes, plusieurs secteurs situés en Petite Beauce sont l'objet d'études menées conjointement par l'INRA d'Orléans et le CNRS de Garchy. Le choix de ces secteurs est motivé par le fait qu'ils se situent dans un milieu où la qualité de l'eau est directement liée aux pratiques agricoles. En effet, la faible profondeur de l'aquifère (nappe des cal-

* INRA Orléans, SESCOF, Unité Sciences du Sol, 45160 Ardon

** Centre de Recherches Géophysiques, CNRS, 58150 Garchy

***INRA, Laboratoire Sciences du Sol, 34060 Montpellier Cedex

caires de Beauce), la faible épaisseur des sols et l'existence d'un calcaire sous-jacent à faible fonction capacitive vis à vis de l'eau, le caractère intensif des cultures et l'irrigation quasi généralisée font de cette partie de la Beauce un terrain d'expérimentation adéquat (Jordana, 1992 ; Ould-Mohamed, 1991).

Dans un tel contexte, la connaissance du fonctionnement hydrique de la couverture de sol en période hivernale est essentielle. C'est en effet pendant cette période que les eaux drainées par le sol contribuent à la recharge de l'aquifère. Ce fonctionnement est essentiellement déterminé par l'état hydrique de la couverture de sol et son épaisseur. Les études réalisées actuellement le sont à deux niveaux. A un niveau micrométrique à décimétrique, on cherche à mettre en relation les caractéristiques des transferts avec les caractéristiques du milieu poreux que constitue le sol. A un second niveau, - métrique à hectométrique - c'est-à-dire à l'échelle de la parcelle, voire de l'unité fonctionnelle élémentaire de paysage, on analyse les variations d'épaisseur de la couverture de sol pour mieux rendre compte de son fonctionnement hydrique. Notre étude géophysique se rapporte à ce dernier niveau. *In fine*, ces études visent à améliorer les modèles dont on dispose pour connaître quantitativement et qualitativement la recharge des aquifères durant la période hivernale.

1. Présentation du secteur et objectif de l'étude

Le secteur étudié est d'une superficie de 100 ha. Il est localisé dans la partie nord-est de la Petite Beauce, entre les lieux-dits Liconcy et Machelainville, approximativement à mi-chemin entre Orléans et Châteaudun. Le paysage présente une morphologie générale faiblement ondulée, les pentes sont peu marquées et les dénivellations faibles (127 à 133 m).

La carte pédologique au 1/10 000 établie par l'INRA d'Orléans (Isambert et Duval, 1992) indique que les sols du secteur sont faiblement différenciés verticalement et qu'ils se sont développés dans des formations limono-argileuses. Seul le profil des carbonates est nettement différencié. En règle générale, les sols sont non carbonatés en surface et présentent des horizons riches en réprécipitations carbonatées en profondeur. A noter que pour les sols peu épais, la mise en culture entraîne une recarbonatation de l'horizon superficiel. L'épaisseur de la couverture limono-argileuse (déterminée par sondages mécaniques lors de la prospection pédologique) varie de quelques décimètres à un peu plus d'un mètre. Pour ces différentes raisons, l'épaisseur de la couverture de sol se confond avec celle de la formation limono-argileuse. A la base de la formation limono-argileuse, on observe des matériaux calcaires cryoturbés fréquemment organisés en poches, puis les premiers niveaux du calcaire de Beauce non réorganisés par les phénomènes de cryoturba-

tion. Localement, des observations ont mis en évidence des matériaux argilo-sableux à sablo-argileux très hétérogène, intercalés entre les formations limono-argileuses et les calcaires d'âge aquitanien. De telles formations correspondraient à une extension occidentale de matériaux d'origine fluviatile d'âge burdigalien constituant plus à l'est les formations des sables et argiles de Sologne (Macaire, 1972). Ces matériaux constituent fréquemment les remplissages des dépressions karstiques du calcaire de Beauce (Gigot et Fedoroff, 1973 ; Gigout, 1973). L'objectif de ce travail était par conséquent double. Il s'agissait :

- de déterminer l'épaisseur de la formation limono-argileuse (LA) dans laquelle s'est différenciée la couverture de sol et de caractériser sa variabilité à l'échelle métrique sur un ensemble de parcelles adjacentes représentatives de la Petite Beauce ;
- d'étudier l'extension des formations argilo-sableuses intercalées entre le LA et le calcaire, et qui influence le fonctionnement hydrique de la couverture de sol.

2. Méthodes d'études

Travaux préliminaires

Un ensemble de sondages mécaniques effectués à la tarière et répartis uniformément (grille de 106 x 106 m) sur les 100 ha ont été réalisés. Les épaisseurs de LA mesurées lors de cette campagne ont permis d'établir une carte d'isopaques. Cependant, le pas d'échantillonnage choisi *a priori* s'est avéré insuffisant pour rendre compte de la variabilité de l'épaisseur du LA. En effet, des études géostatistiques (variographie) sur le paramètre "épaisseur" révèlent un effet important de pépite sur le variogramme (fig.1) (46% de la variance totale). Sur ces 46%, 16% sont estimés comme étant dus aux incertitudes de mesures. Il reste donc une variance de 30% pouvant être expliquée par une variabilité inférieure au pas d'échantillonnage. Il ressort de ceci que le pas d'échantillonnage utilisé est trop grand pour obtenir une description satisfaisante des variations d'épaisseur du LA. Plutôt que d'accroître le nombre déjà élevé de sondages sur le secteur et ceci de façon à diminuer le pas d'échantillonnage, nous avons choisi d'effectuer une prospection géophysique en utilisant des méthodes électriques qui ont montré que des relations étroites entre épaisseur du sol et résistivités électriques pouvaient être établies (Bottraud, 1983 ; Dabas *et al.*, 1989 ; Lamotte, 1993).

2.1. Interprétation des sondages électriques à l'aide d'un modèle bicouche

Une série de sondages électriques (quadripôle Wenner) a été implantée en différents endroits de l'ensemble du secteur d'étude, en particulier aux emplacements où la carte des erreurs issue du krigeage prévoyait les plus fortes variations. 42 sondages ont ainsi été effectués dans le but

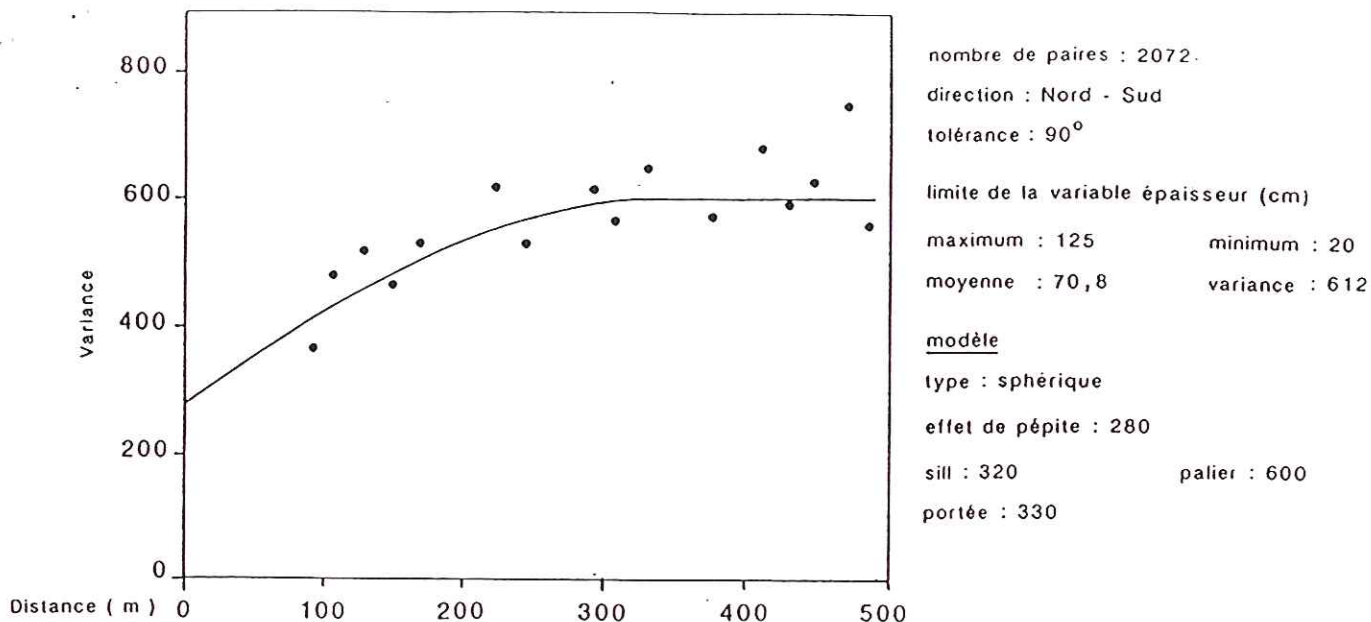


Figure 1 - Variogramme de l'épaisseur de la formation limono-argileuse.

de définir les unités électrostratigraphiques du secteur d'étude. Nous avons utilisé pour cela les méthodes électriques (résistivimètre RMCA4 - SEPTA/CNRS). Les données obtenues par sondage électrique ont été interprétées avec un modèle électrique tabulaire en terme de résistivité et d'épaisseur de couche, et ceci, entre autres raisons, pour être comparées aux sondages mécaniques à la tarière réalisés conjointement. Les résistivités apparentes mesurées varient entre 40 Ωm ($a = 10$ cm) et 400 Ωm pour les plus grands écartements ($a = 15$ m).

La presque totalité des sondages a pu être interprétée par un modèle bi-couche dont la couche superficielle est la plus conductrice. La résistivité électrique de la couche conductrice supérieure calculée à partir du modèle est remarquablement uniforme et voisine de 35 Ωm . Cette grande uniformité associée à la valeur de 35 Ωm permet de faire correspondre cette couche à celle du LA. La couche sous-jacente étant électriquement très hétérogène, nous l'avons rapprochée du calcaire de Beauce plus ou moins cryoturbé dans sa partie supérieure. La figure 2 fait apparaître une étroite corrélation entre les

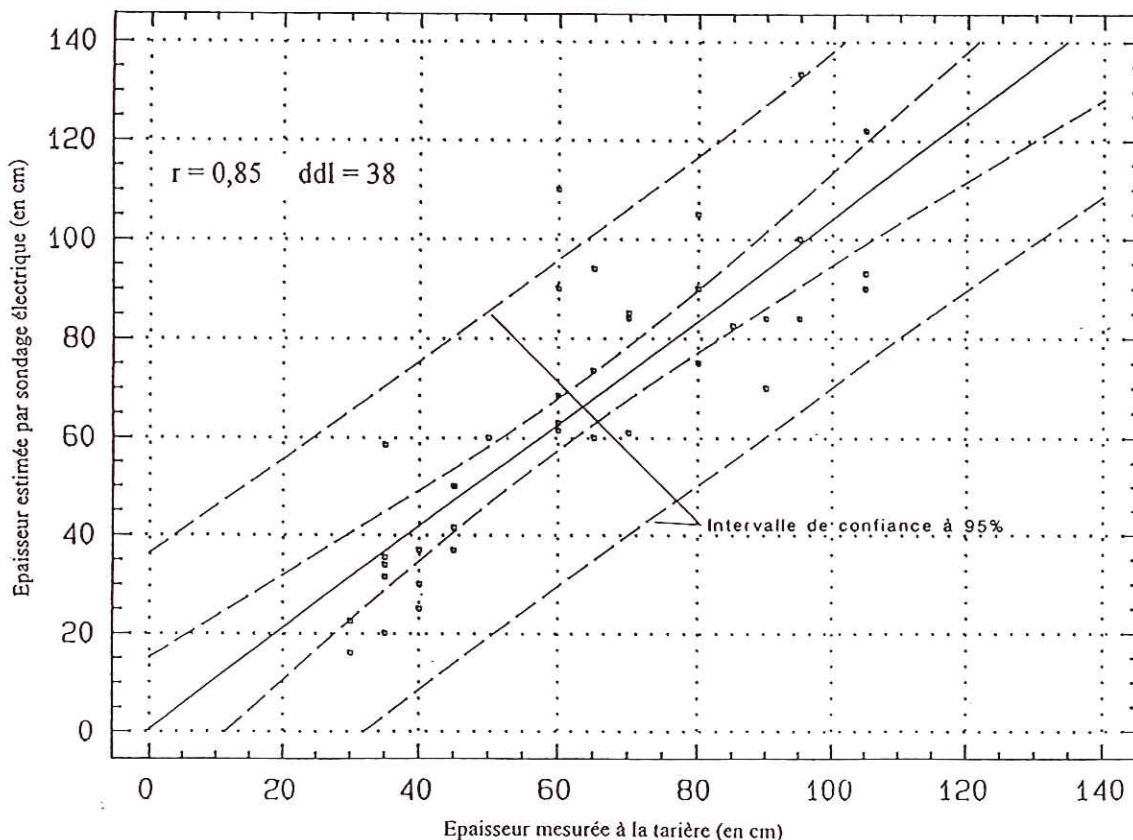


Figure 2 - Corrélation entre les épaisseurs mesurées à la tarière et les épaisseurs estimées par inversion des sondages électriques (en cm).

épaisseurs calculées par l'inversion des sondages électriques et celles mesurées à la tarière. Les sondages électriques permettent donc de caractériser l'épaisseur du LA de manière aussi précise que lors des sondages mécaniques. L'implantation des sondages électriques sur les parcelles a été réalisée en fixant une distance de manière arbitraire à partir d'un point origine, et en faisant varier aléatoirement la direction. Chaque point est ainsi obtenu à partir du précédent en se déplaçant initialement de 0,5 m puis en doublant la distance jusqu'à 128 m (fig. 3). Cette méthode d'échantillonnage nous a permis de mettre en

2.2. Cartographie de la formation argilo sableuse par profilage

Une zone de 30 ha sur laquelle les variations de résistivité ont été enregistrées le long de profils équidistants (profilage électrique) a été sélectionnée. Cette zone comporte les trois matériaux rencontrés sur le secteur d'étude. Des sondages à la tarière ont en effet montré que dans cette zone, le LA reposait soit directement sur des calcaires aquitaniens cryoturbés, soit sur des formations argilo-sableuses d'épaisseur pouvant dépasser 6 m, elles-mêmes sus-jacentes

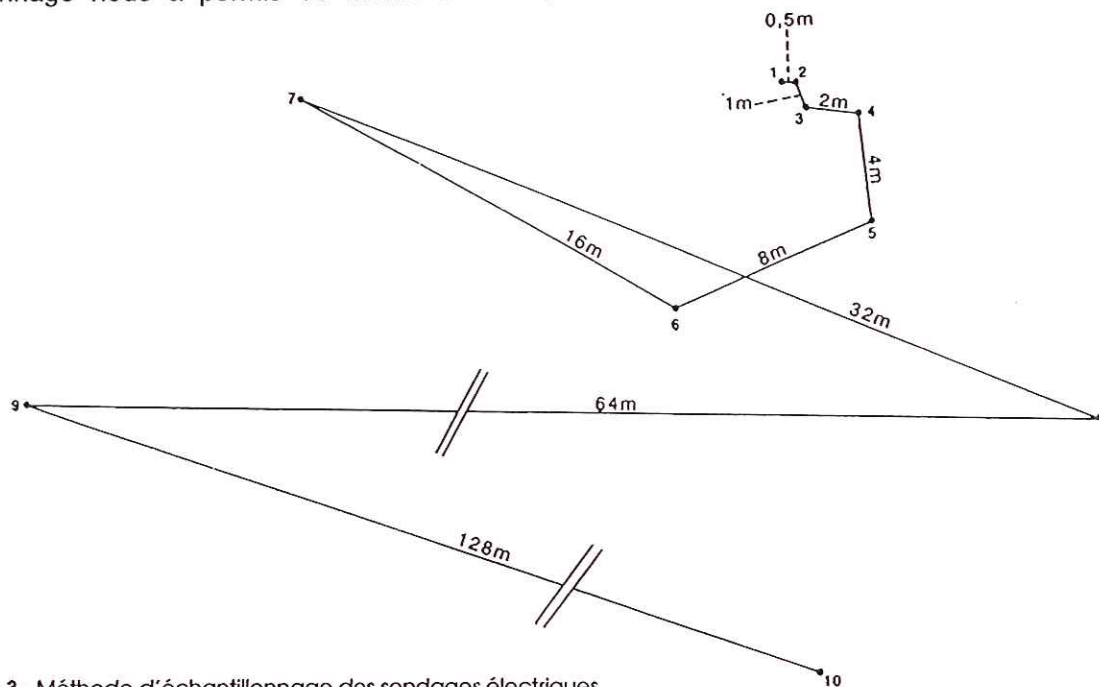


Figure 3 - Méthode d'échantillonnage des sondages électriques.

évidence un pas de variation latérale de l'épaisseur du LA de l'ordre de 20 m, c'est-à-dire inférieure au pas d'échantillonnage adopté lors des sondages à la tarière initiaux. Cette variabilité est cohérente avec les résultats de l'analyse géostatistique. De ce fait, une généralisation à l'ensemble du secteur de 100 ha de sondages électriques permettrait d'établir une carte précise de l'épaisseur du LA. Néanmoins, compte tenu du nombre de sondages nécessaires pour y parvenir, cela n'est envisageable qu'en utilisant des méthodes d'acquisition de données automatisées.

au Calcaire de Beauce. Des profils de 400 m de longueur ont été réalisés avec un quadripôle Wenner de $a = 3$ m. Le choix de cette géométrie a été fixé après avoir réalisé une pseudo-section électrique (Wenner) (figure 4). Rappelons que la pseudo-section (Hallof, 1957 ; Edwards, 1977) est tracée en associant les mesures de résistivité électrique apparente sur un même profil mais avec différents écartements d'électrodes (dans notre étude $a = 1, 2, 3$ et 6 m). Les valeurs de résistivités électriques apparentes sont représentées avec une échelle arbitraire pour l'axe des ordonnées qui correspond à la profondeur.

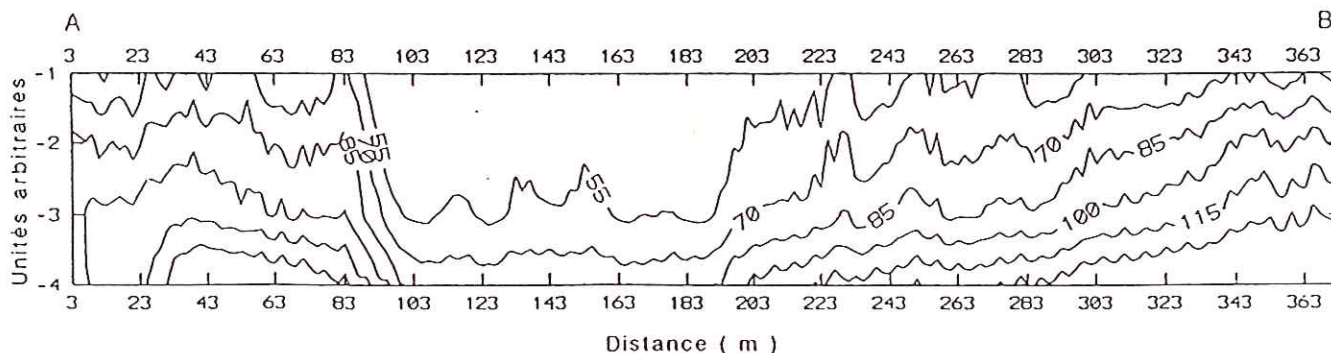


Figure 4 - Pseudo-section électrique Wenner entre les points A et B de la figure 5. (Courbes d'égalité de résistivité en Ω m).

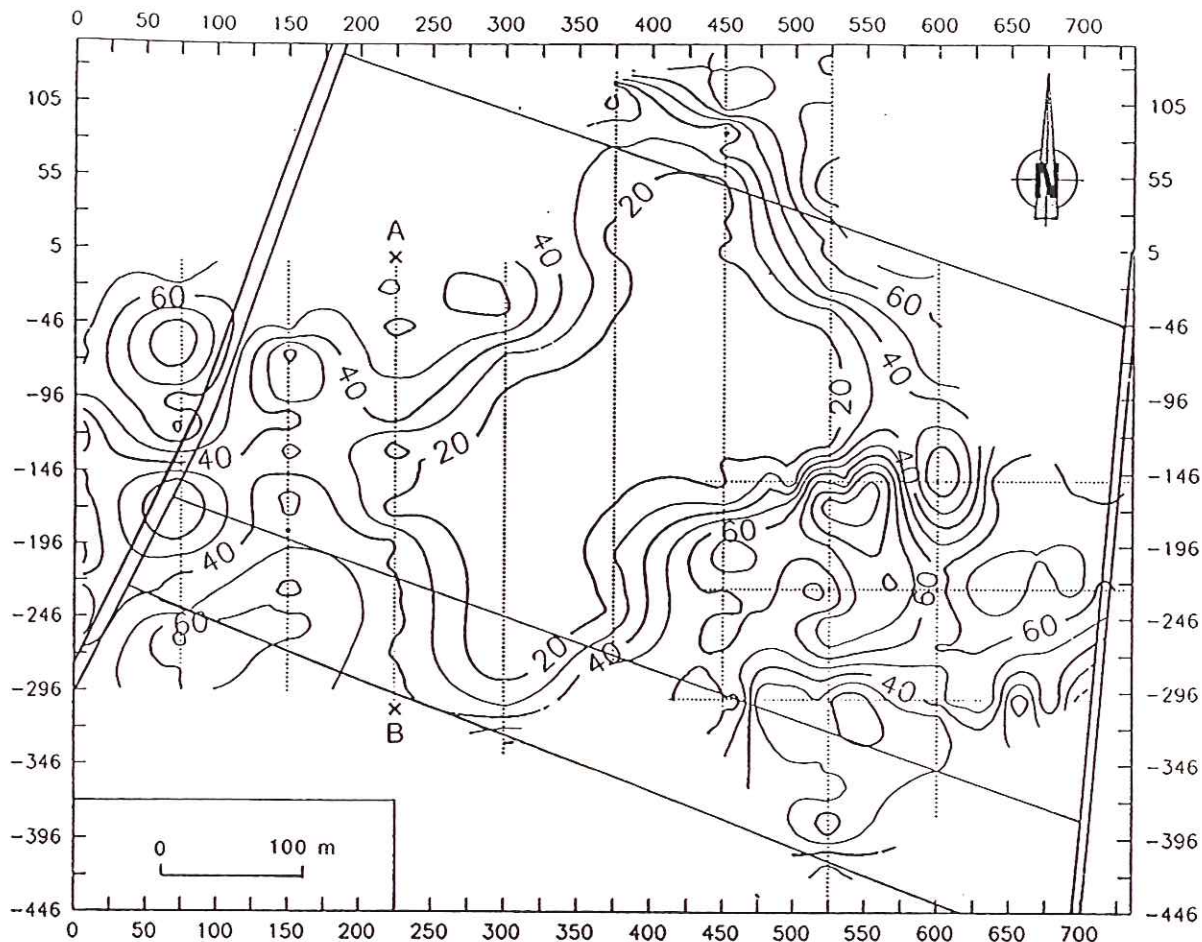


Figure 5 - Carte d'isoresistivité électrique apparente (Ωm).
Les limites de parcelles et les routes sont figurées en trait plein. Les profils de mesure sont figurés en traits pointillés.

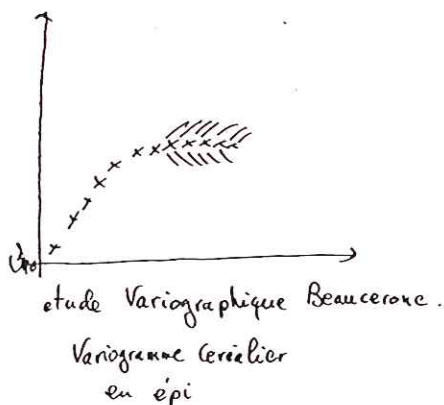
Cette pseudo-section révèle un approfondissement local des matériaux recouvrant le calcaire dans la zone sélectionnée. Le profilage électrique nous a permis de réaliser la carte présentée figure 5. La zone de faible résistivité (inférieure à 30 m) correspond à l'apparition de matériaux argilo-sableux. Les très faibles valeurs de résistivité (jusqu'à 15 Ωm) sont en effet en accord avec l'existence de matériaux argileux.

2.3. Epaisseur de la formation argilo-sableuse

Nous avons ensuite corrélié la résistivité électrique apparente (Wenner $a = 3$ m) et la profondeur d'apparition du calcaire mesurée à la tarière en 47 points régulièrement répartis. La régression linéaire simple est la suivante (fig. 6) :

$$P = 3,8 W_3 - 287,4 (r^2 = 89\%)$$

avec P = profondeur d'apparition du calcaire en centimètres et W_3 = résistivité apparente Wenner ($a = 3$ m) en Ωm . Grâce à cette relation, nous avons pu estimer les profondeurs d'apparition du calcaire sur la zone de 30 ha à partir des données de résistivité (fig. 7). L'étroite corrélation obtenue autorise en effet cette transformation. Cependant, des restrictions doivent être prises en compte pour qu'une telle transformation puisse être réalisée. Compte tenu de la gamme de variations d'épaisseur à partir de laquelle la relation a été calculée, nous avons appliqué cette relation pour des profondeurs comprises entre - 20 et - 240 cm. En ce qui concerne la limite inférieure, la géométrie du dispositif mis en place ($a = 3$ m), ainsi que les conditions du milieu (teneur en eau) ont restreint la profondeur d'investigation à - 240 cm. Quant à la limite supérieure, les zones les moins fiables du point de vue de la détermination de la résistivité électrique



La récolte sera bonne!

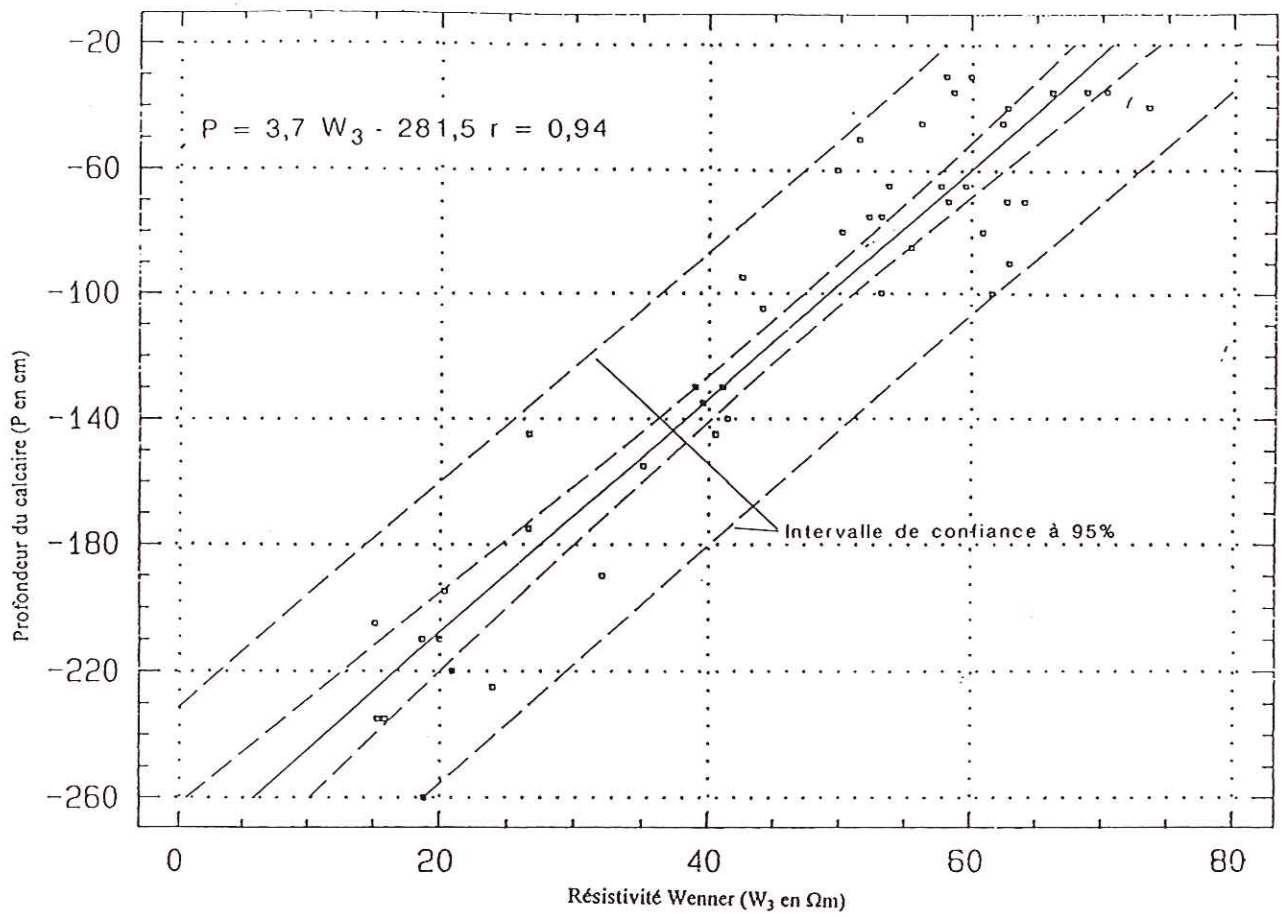


Figure 6 - Régression linéaire entre la profondeur d'apparition du calcaire et la résistivité apparente Wenner obtenue avec $a = 3$ m.

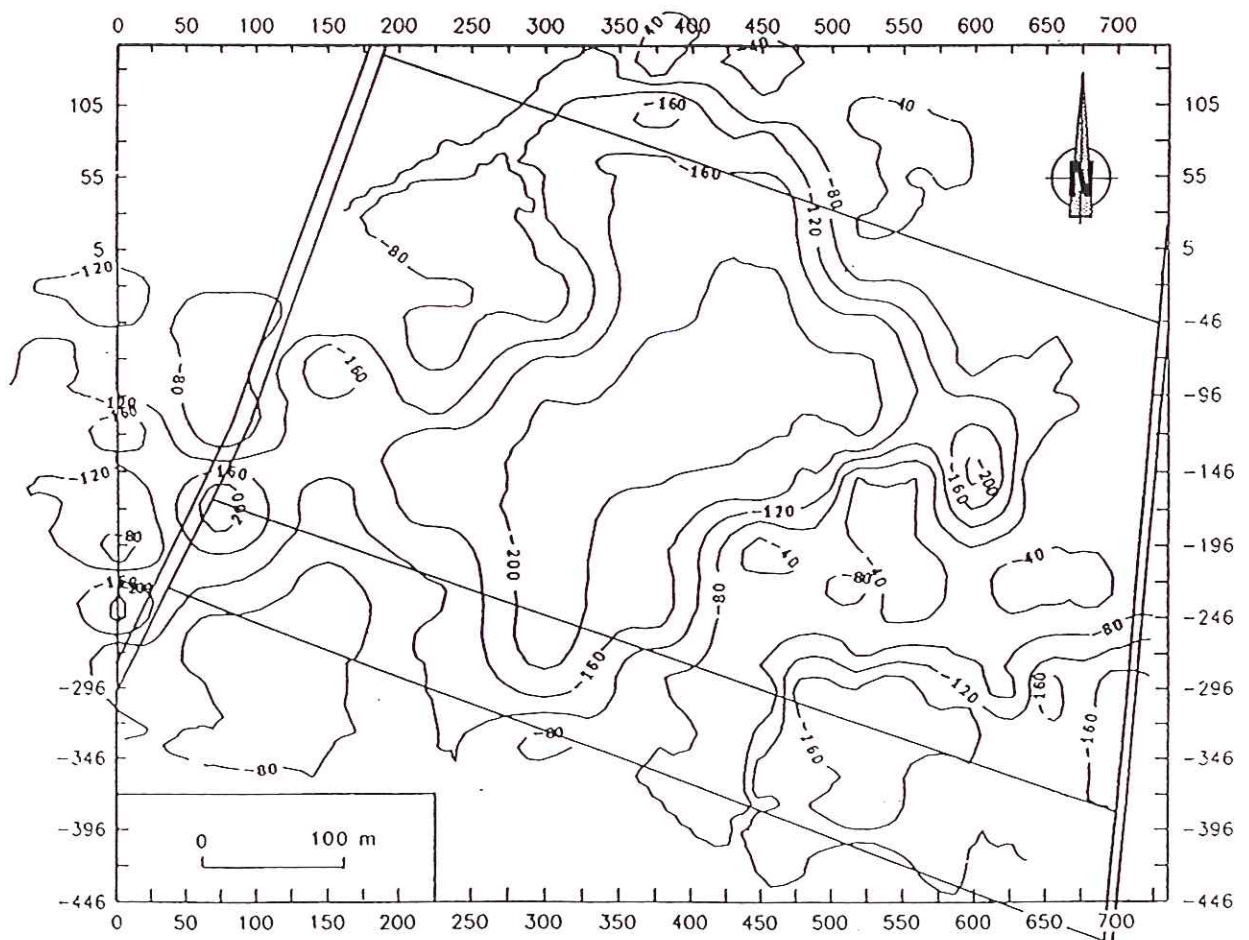


Figure 7 - Carte en isovaleurs de la profondeur d'apparition du calcaire (profondeur en cm).

sont celles où le calcaire affleure (épaisseur 20 cm). Rappelons à ce propos, que lors de la détermination des unités électro-stratigraphiques, nous avons fait apparaître la remarquable homogénéité électrique de la couche limono-argileuse (environ 35 Ω m) et celle, très variable, des formations calcaires cryoturbées. Les zones les plus fiables pour notre interprétation (avec le dispositif à géométrie fixe utilisé) sont donc les zones où les matériaux limono-argileux sont les plus épais. Ainsi, pour obtenir les données de profondeur d'apparition du calcaire à partir du modèle calculé par régression, nous avons éliminé de notre jeu de données initial, les résistivités inférieures à 12 Ω m et celles supérieures à 71 Ω m qui correspondent respectivement à des profondeurs supérieures à - 240 et inférieures à - 20 cm. Deux remarques concernant l'amplitude des valeurs de résistivité et la linéarité du modèle peuvent être formulées :

- le fait que l'on obtienne des résistivités variant de 15 à 40 Ω m est en contradiction avec la faible variation des valeurs de résistivité enregistrées pour les matériaux limono-argileux ; les valeurs les plus faibles de résistivité correspondraient plutôt à des matériaux plus argileux ;
- un modèle théorique bi-couche avec une couche superficielle de résistivité voisine de 35 Ω m et un substratum plus résistant ne peut prédire ni l'amplitude, ni la forme de la loi empirique linéaire calculée. Par conséquent, le modèle ne permet de prédire l'épaisseur du LA que lorsque les couches argilo-sableuses sont absentes. En revanche, il permet de calculer la profondeur d'apparition du calcaire. L'établissement d'un autre modèle théorique prenant en compte non plus deux mais trois couches nécessite trop de paramètres pour que nous puissions les contraindre correctement avec les mesures disponibles. C'est pourquoi nous ne pouvons pas encore "séparer" la contribution du LA de celle des couches argilo-sableuses dans les valeurs de résistivités enregistrées.

Conclusion - Perspectives

L'apport des méthodes électriques dans ce travail permet de répondre à la question concernant l'épaisseur de la couverture de sol et des formations superficielles auxquelles elle est associée. Le dispositif utilisé pour les sondages électriques et la méthode d'échantillonnage nous ont permis de préciser la variabilité de l'épaisseur de la formation limono-argileuse. Les délimitations de l'extension latérale des matériaux argilo-sableux et de la profondeur d'apparition du calcaire, lorsque ces matériaux sont présents,

ont été étudiées à l'aide de profilages électriques. Par la suite, la combinaison des deux informations (épaisseur du LA et profondeur du calcaire) nous permettra par différence d'évaluer l'épaisseur des matériaux argilo-sableux. La méthode employée, pour déterminer la profondeur d'apparition du calcaire, limite le nombre de sondages mécaniques rapprochés. Cependant, nous n'avons pas tenu compte d'éventuelles dépendances spatiales pouvant exister entre les points de mesure. Des techniques de cokrigage seront employées ultérieurement de façon à améliorer le modèle. D'autre part, une généralisation du profilage électrique par des méthodes automatisées (Système RATEAU, CNRS Garchy) sera mise en œuvre sur l'ensemble du secteur. Enfin, l'emploi de méthodes électromagnétiques (EM31) est aussi envisagé pour la généralisation de ce type d'étude à des échelles plus petites (c'est-à-dire sur de plus grandes surfaces).

Bibliographie

- Bottraud J. C. (1983). - Résistivité électrique et étude des sols. Application à la cartographie et à la caractérisation du fonctionnement hydrique. - Thèse, Université de Montpellier II, 191p.
- 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.
- Edwards L.S. (1977). - A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. - *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- Gigot C. & Fedoroff N. (1973). - Carte géologique de la France au 1/50 000. Notice explicative de la Feuille de Patay (XXI-19). - Orléans : B.R.G.M.
- Gigout M. (1973). - L'altération périglaciaire du Calcaire de Beauce in Le Calcaire de Beauce. - Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Spécial U, 78 p.
- Hallof P.G. (1957). - On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. - Thesis, MIT, Cambridge, MA (unpubl.).
- Isambert M. & Duval O. (1992). Notice explicative de la carte pédologique de Villamblain (Beauce) au 1/10 000. - Contrat de recherche site expérimental de Villamblain. - Rapport période 1991-1992. - S.E.S.C.P.F. INRA. 38 p et annexes.
- Lamotte M. (1993). - Les sols sableux à forte cohésion des zones tropicales arides. Etude du Hardé Lagadgé au Nord Cameroun. - Thèse, Université de Paris VI, 281 p.
- Jordana S. (1992). - Introduction à l'étude des transferts des nitrates dans la zone non saturée de l'aquifère des calcaires de Beauce : site expérimental de Villamblain. - Mémoire de DEA, Université de Paris VI, Laboratoire de Géologie appliquée. 67 p.
- Macaire J.J. (1972). - Sur le limon de la Beauce au Nord-Ouest d'Orléans (Loiret). - C.R. Acad. Sci., Paris, t 274, 1892-1895 - (27 mars 1972).
- Ould-Mohamed S. (1991). - Prise en compte de l'organisation du sol dans l'étude des transferts d'eau et de solutés. - Mémoire de DEA de pédologie, Université de Nancy I. 55 p.