

Cartographie des sols à grande échelle : Intégration explicite d'une mesure de résistivité apparente spatialisée à l'expertise pédologique

J. Moeys⁽¹⁾⁽²⁾, B. Nicoulaud^{(1)*}, A. Dorigny⁽¹⁾, Y. Coquet⁽²⁾ et I. Cousin⁽¹⁾

(1) INRA, UR0272, Science du Sol, Centre de Recherche d'Orléans, BP 20619, F-45166 Olivet Cedex

(2) U.M.R. Environnement et Grandes Cultures INRA / INA-PG - Equipe « Sol ». BP 01, 78850 Thiverval-Grignon

* Auteur correspondant : bernard.nicoulaud@orleans.inra.fr

RÉSUMÉ

La cartographie des sols est une étape incontournable pour de nombreux travaux d'évaluation agronomique et environnementale. Les méthodes de prospection, qui reposent en grande partie sur l'expertise de terrain des pédologues, sont aujourd'hui très proches des travaux formalisés il y a plus de 30 ans. De nouveaux outils sont venus récemment renforcer la « panoplie » du pédologue. Nous avons testé l'un d'eux, la mesure de la résistivité électrique apparente du sol par l'outil MUCEP, sur une parcelle de 22 ha en Beauce chartraine. Cet appareil tracté permet une mesure quasi-simultanée pour des écartements inter-électrodes de 50, 100 et 200 cm.

Nous avons intégré cette mesure géophysique au travail de cartographie des sols de la parcelle. Cette intégration s'est déroulée en plusieurs étapes. Après avoir utilisé les contrastes révélés par la mesure de résistivité pour orienter la prospection pédologique, nous avons procédé à une analyse statistique des corrélations entre les variables pédologiques et la résistivité électrique apparente. Le paramètre utilisé est le coefficient de corrélation bisériale. Ce dernier nous a permis de comparer simultanément l'effet des variables pédologiques quantitatives et qualitatives sur la résistivité. Il en ressort que la mesure de la résistivité électrique apparente est liée à de nombreuses propriétés du sol. Alors que la résistivité des écartements 50 cm et 100 cm est surtout sensible à la pierrosité de surface et à la profondeur d'apparition du calcaire, la résistivité de l'écartement 200 cm est d'abord sensible à la profondeur d'apparition du niveau argileux. Le résultat de cette analyse statistique a été exploité lors du tracé des limites entre les unités cartographiques de sol, en suivant un schéma de décision explicite. Ce dernier permet d'adapter localement, et au cas par cas, l'utilisation de la mesure de résistivité combinée au jugement d'expert.

Cette étude montre que la mesure de résistivité électrique apparente MUCEP, complétée par une analyse statistique simple, peut apporter un gain de précision au travail de cartographie des sols. Ce constat est d'autant plus intéressant que le contexte géo-pédologique de cette étude est peu favorable au pédologue comme au géophysicien.

Mots clés

Cartographie des sols, variabilité spatiale, variables pédologiques, résistivité électrique apparente, corrélation bisériale, Beauce.

SUMMARY

LARGE-SCALE SOIL MAPPING:

Explicit use of a specialised apparent resistivity measurement together with pedological expertise

Soil cartography is an essential stage for agronomical or environmental evaluations. Nowadays, prospecting methods, which mainly rely on the field expertise of soil scientists, are very similar to those formalised more than 30 years ago. Nevertheless, new devices have recently been added to the soil scientist toolbox. We have tested one of them, the measurement of soil electrical apparent resistivity with the MUCEP device (figure 2), on a 22 ha plot in the 'Beauce chartraine' region in France (figure 1). The MUCEP is a pulled-device that allows quasi-simultaneous measurements at 50, 100 and 200 cm inter-electrodes spacings.

We have introduced this geophysical measurement (figure 5) into the soil mapping process. This integration was conducted in several steps. After using the resistivity contrasts to direct auger holes prospecting (table 1), we have conducted a statistical analysis of the correlations between pedological variables and the apparent resistivity by using the point biserial correlation coefficient (figure 3, table 3). It makes it possible to simultaneously compare the effects of quantitative and qualitative pedological variables on resistivity. We demonstrated that apparent resistivity was correlated to many soil properties: whereas the resistivity measured with 50 and 100 cm spacing was mainly correlated to the stone content at the soil surface and the depth of limestone, the resistivity measured with 200 cm spacing was mainly correlated to the clay layer depth. These results were used for plotting the limits between the soil map units, according to an explicit decision tree (figure 6) that combines, case by case, the use of resistivity measurements with expert judgement. The use of point biserial correlation coefficient makes it possible to take into account important qualitative variables that couldn't be integrated in Pearson correlation coefficient (table 2) or linear regression analysis (table 4).

This study shows that the measurement of the soil electrical apparent resistivity with MUCEP, together with a simple statistical analysis can provide a gain in precision to the soil mapping process (figure 7). This statement is of specific interest in the studied geo-pedological context that was not favourable for both the soil scientist (figure 4) and the geophysicist.

Key-words

soil cartography, spatial variability, pedological variables, apparent electrical resistivity, point biserial correlation, Beauce

RESUMEN

CARTOGRAFÍA DE SUELOS A GRANDE ESCALA :

Integración explícita de una medida de resistividad aparente espacializada a la peritación pedológica

La cartografía de suelos es una etapa inevitable para numerosos trabajos de evaluación agronómica y de medio ambiente. Los métodos de prospección, que se basan en gran parte sobre la peritación de terreno de los edofólogos, son hoy en día, muy cercanos de los trabajos formalizados hace más de 30 años. Numeras herramientas reforzaron recientemente la panoplia del pedólogo. Hemos probados uno de estas, la medida de la resistividad eléctrica por la herramienta MUCEP, en una parcela de 22 ha en la zona Beauce de Chartres. Este aparato remolcado permite una medida casi simultanea para distancias entre electrodos de 50, 100 y 200 cm.

Integramos esta medida geofísica al trabajo de cartografía de suelos de la parcela. Esta integración se desarrolló en varias etapas. Después de usar los contrastes revelados por la medida de resistividad para orientar la prospección pedológica, procesamos a una análisis estadística de las correlaciones entre las variables pedológicas y la resistividad eléctrica aparente. El parámetro usado es el coeficiente de correlación biserial. Este último nos permitió comparar simultáneamente el efecto de las variables pedológicas cuantitativas y cualitativas sobre la resistividad. Resulta que la medida de la resistividad eléctrica aparente es ligada a numerosas propiedades del suelo. Mientras que la resistividad de las distancias 50 cm y 100 cm es sobre todo sensible a la pedregosidad y a la profundidad de aparición de la caliza, la resistividad de la distancia 200 cm es en primer lugar sensible a la profundidad de aparición del nivel arcilloso. El resultado de este análisis estadístico fue explotado al momento del trazado de los límites entre unidades cartográficas de suelo, siguiendo un esquema de decisión explícita. Este último permite adaptar localmente, y caso por caso, el uso de la medida de resistividad combinada al juicio de experto.

Este estudio muestra que la medida de resistividad eléctrica aparente MUCEP, completado por un análisis estadístico, puede llevar una ganancia de precisión al trabajo de cartografía de suelos. Esta constatación es tanto más interesante que el contexto geo-pedológico es poco favorable al pedólogo como al geofísico.

Palabras clave

Cartografía de suelos, variabilidad espacial, variables pedológicas, resistividad eléctrica aparente, correlación biserial, Beauce

En Beauce, une dégradation de la qualité des eaux souterraines par l'accroissement des teneurs en nitrate et en produits phytosanitaires est constatée dans de nombreux secteurs. La directive 2000/60/CE (Parlement européen et Conseil, 2000) du Parlement européen impose aux états membres de prévenir la détérioration de toutes les eaux (cours d'eau, lacs, eaux souterraines, eaux littorales) et de restaurer la qualité des ressources dégradées d'ici 2015. Lorsque les objectifs visés « ont peu de chances d'être atteints » l'article 11 stipule que « les États membres veillent à ce que les causes de l'éventuelle absence de résultats soient recherchées (...) ». Dans l'optique de réduire la pollution des eaux par les polluants d'origine agricole, l'agriculture de précision - modulation des intrants agricoles en fonction des spécificités intra-parcellaire du sol et des cultures - est une alternative prometteuse (voir Blondlot *et al.*, 2005 et Wijkmark *et al.*, 2005 pour le cas de fertilisants). Cette approche augmente fortement la demande en informations spatiales sur les sols et leur variabilité à courte distance (Robert, 1999). De la même manière, la mise au point de ces techniques par la recherche nécessite la mise en oeuvre conjointe d'une modélisation des processus de transferts de polluants et d'une représentation de la couverture pédologique. L'ampleur des transferts est en effet directement dépendante des propriétés du sol (épaisseur du sol, caractéristiques hydriques). Les méthodes de cartographies habituellement utilisées par les pédologues permettent d'accéder directement à certains paramètres du sol recherchés mais sont en général lourdes à mettre en oeuvre (sondages et fosses), destructives et difficilement opérantes pour certains milieux (zones caillouteuses).

Depuis une dizaine d'années, le pédologue cartographe dispose d'outils supplémentaires, notamment les méthodes qui permettent de mesurer d'une façon quasi continue la résistivité électrique du sol. La mesure de la résistivité électrique apparente, fiable et facile d'interprétation, est un moyen non destructif d'étude du sol et de ses variations latérales ou verticales (Hesse, 1978 ; Tabbagh *et al.*, 2000). Cette propriété dépend de caractéristiques intrinsèques du sol (texture, teneur en CaCO_3 , teneur en éléments grossiers, nature et profondeur d'apparition du substrat) relativement stables dans le temps et de caractéristiques plus conjoncturelles, très variables dans le temps : citons la température du sol, la teneur en eau, la concentration de la solution du sol et la structure. Certaines de ces propriétés déterminent la valeur agronomique du sol (Johnson *et al.*, 2001 ; Rémy, 2005) ou influencent le transport et la rétention des polluants. De nombreuses études portent sur les relations entre une de ces caractéristiques et les propriétés électriques des sols (Besson *et al.*, 2004, Dampney *et al.*, 2003, Lund *et al.*, 1999, Lück *et al.*, 2001, Sudduth *et al.*, 2001).

La mesure de résistivité électrique peut donc permettre la détection de variations spatiales à courte distance ou de changements temporels d'une propriété du sol. Cependant, l'interprétation des mesures se complique sérieusement quand plusieurs propriétés du sol sont susceptibles de varier simultanément (Lück *et al.*, 2005) ce qui est un cas fréquent. Non seulement une variation de résistivité

électrique peut avoir plusieurs sources, mais l'effet de la variation d'un paramètre pédologique sur la résistivité peut aussi se trouver atténué par le changement concomitant d'un autre paramètre ayant un effet opposé sur la résistivité (Johnson *et al.*, 2001).

Les applications de la mesure de résistivité apparente en pédologie couvrent des domaines variés. La résistivité a été utilisée (i) pour détecter des variations spatiales et/ou temporelles d'état hydrique des sols (Bottraud *et al.*, 1984b ; Gras *et al.*, 1997 ; Michot, 2003) ; (ii) pour estimer des variations verticales d'épaisseur ou de profondeur d'apparition d'un matériau, comme un toit calcaire (Dabas *et al.*, 1989 ; Chéry, 1995 ; Bourennane, 1997 ; Bourennane *et al.*, 1997), un horizon argileux (Dabas *et al.*, 1995), un encroûtement calcaire (Bottraud *et al.*, 1984a), un horizon graveleux (Dabas *et al.*, 1989) ou encore un niveau à « grisons » (Michot *et al.*, 1997) ; (iii) pour cartographier des variations latérales de propriétés physiques du sol (Bottraud *et al.*, 1984a ; Banton *et al.*, 1997 ; Robain *et al.*, 1996) ; (iv) pour mesurer ou cartographier la salinité de la solution du sol (Corwin et Lesch, 2003). Certaines approches utilisent la résistivité pour définir de manière globale la variabilité spatiale et temporelle des propriétés physico-chimiques du sol, avec pour objectif une mise en oeuvre de techniques de l'agriculture de précision (Johnson *et al.*, 2001 ; Mueller *et al.*, 2003).

Différentes méthodes de mesures en continu des propriétés électriques et électromagnétiques des sols par instrument tracté ont été développées au cours des 20 dernières années parmi lesquelles nous citerons comme exemples la méthode électrique simple dite « galvanique », la méthode de conductivimétrie Slingram et les méthodes de radio magnéto-tellurie. Concernant la méthode galvanique, le développement de nouveaux appareillages mobiles (Hesse *et al.*, 1986) a permis d'effectuer des mesures à une vitesse suffisante pour couvrir dans un temps assez court des surfaces d'une dizaine d'hectares. Plus récemment, un système multipôle permettant de prospecter le sol à 3 niveaux d'investigation différents a été développé : le MUCEP (Multi Continuous Electrical Profiling) (Panissod *et al.*, 1997). Autre alternative, la mesure de conductivimétrie Slingram permet de mesurer la conductivité* du sol sans contact avec ce dernier (* : la conductivité est l'inverse de la résistivité). Cette méthode est particulièrement adaptée aux sols conducteurs tels les sols argileux, mais il est difficile de faire varier la profondeur d'investigation, qui est elle-même difficile à évaluer (Dabas et Tabbagh, 2003). Néanmoins, cette méthode est très utilisée pour décrire la variabilité spatiale des sols (Bobert *et al.*, 2001 ; Domsch et Giebel, 2001 ; King *et al.*, 2001). Les mesures par Magnéto-Tellurie Artificielle (MTA) permettent de déduire la résistivité apparente des terrains à partir de la mesure simultanée des champs électriques et magnétiques à la surface du sol, ces derniers étant émis par des émetteurs radio (Chaplot *et al.*, 2001). Des difficultés d'interprétation liées à la directivité du champ des émetteurs et de la profondeur réelle de sol prise en compte en limitent l'utilisation (Dabas *et al.*, 2000). Nous avons utilisé, dans cette étude, la méthode galvanique MUCEP

en raison de sa relative facilité d'emploi, de la résistance des terrains étudiés et de la disponibilité du matériel.

Nous présentons ici une démarche simple et robuste permettant d'intégrer une mesure de résistivité électrique apparente en traînés (dispositif MUCEP) à un travail de cartographie des sols à l'échelle parcellaire. Cette dernière a été mise en oeuvre dans le cadre d'un programme de recherche sur des risques de transferts de produits phytosanitaires à la base du sol (programme ESHEL), mais pourrait aussi s'appliquer à une démarche d'agriculture de précision.

L'approche que nous avons mise au point se déroule en plusieurs étapes : (1) Mesure de la résistivité électrique apparente en traînés sur la parcelle et spatialisation de cette dernière ; (2) Utilisation des contrastes de résistivité révélés par cette mesure pour positionner une première série de sondages à la tarière (3) Réalisation de sondages tarière supplémentaires, indépendamment de la résistivité, pour compléter la prospection (4) Réalisation d'une typologie des sols de la parcelle ; (5) Analyse statistique des liens entre la résistivité apparente et les variables pédologiques mesurées sur le terrain (variables quantitatives et qualitatives) ; (6) Utilisation combinée des résultats statistiques, des cartes de résistivité apparente et du raisonnement du pédologue pour placer les limites entre unités cartographiques de sol. Cette dernière étape a été modulée au cas par cas selon un schéma de décision explicite. Nous discuterons de la pertinence de la démarche adoptée et de chacune des étapes qui la jalonnent.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Description du site

Le site étudié est une parcelle de 22,5 ha, au Sud-Est de Chartres (Coordonnées géographiques Lambert 1 carto : E : 558,2 km ; N : 1 075,3 km), sur la commune de Ouarville (Eure-et-Loir). Ce secteur fait partie de la Beauce, région agricole de grandes cultures. Le sous-sol est constitué des formations lacustres et laguno-lacustres des calcaires de Beauce (Lorain, 1973). Ces calcaires accueillent le système aquifère de Beauce, un des principaux réservoirs d'eau souterraine de France, soumis à une exploitation intense pour l'irrigation des cultures et menacé par divers polluants, dont les nitrates (Schnebelen *et al.*, 2004) et les pesticides.

La parcelle étudiée s'étend sur une longueur de 982 m suivant une direction E.SE - O.NO, pour une largeur de 236 m (*figure 1*). Un lever topographique de la parcelle a été réalisé à l'aide d'un dGPS de précision centimétrique en effectuant une mesure tous les trois mètres sur des lignes espacées tous les six mètres, soit 14 000 mesures environ. Un léger vallon traverse la parcelle dans sa largeur, et la divise ainsi en deux versants opposés avec un côté situé à l'E-SE (que nous appellerons « versant Est ») et un côté à l'O-NO (nommé « versant Ouest »). Les pentes plutôt faibles (inférieures à 2 % sur 89 % de la surface) atteignent au maximum 4

à 5 % dans le bas du versant Est. Les deux versants sont dissymétriques, avec à l'Ouest des pentes généralement inférieures à 1,5 % qui s'accroissent légèrement en bas de pente (1,5 à 2 %), et à l'est un bas de versant plus pentu (de 2 à 4,8 %) qui laisse rapidement place à un plateau aux pentes très faibles (<1 %). Deux dolines sont présentes, au milieu du versant Ouest et au tiers inférieur du bord sud de la parcelle.

Mesure de la résistivité électrique apparente (dispositif MUCEP)

Le MUCEP (MUlti Continuous Electrical Profiling) permet une mesure quasi-continue de la résistivité apparente du sol, suivant 3 écartements de mesure (Panissod *et al.*, 1997) et donc 3 profondeurs d'investigation. Son principe est le suivant : trois paires d'électrodes (M1N1 ; M2N2 ; M3N3), d'écartement respectif 50, 100 et 200 cm, mesurent une différence de potentiel (V1 ; V2 ; V3). Elles sont disposées « en vol de canard » à la suite des électrodes d'injection (A-B) suivant une configuration apparentée à un dipôle-dipôle équatorial (*figure 2*). Un courant $I = 2 \cdot 10^{-3}$ A est appliqué au niveau des électrodes d'injection. Le dispositif est tracté par un véhicule et, tous les 10 cm, un radar à effet Doppler déclenche une mesure de la différence de potentiel sur les 3 paires d'électrodes (résistivimètre RMCA4, EUROCIIM / CNRS). Les données sont stockées dans un fichier sous forme de mesure de la résistance R telle que :

$$R = \frac{V_i}{I} \quad (\text{équation 1})$$

La localisation géographique des points de départ et d'arrivée de chacun des transects de mesure est connue avec une précision centimétrique (mesures dGPS). Après un premier filtrage passe-haut et passe-bas des mesures, destiné à éliminer les valeurs aberrantes (dues à des défauts d'injection ou de réception), une correction linéaire est appliquée sur celles-ci (calibration de l'appareil de mesure). La résistivité électrique apparente (ρ_i , pour l'écartement inter-électrodes $MN = i$) est ensuite calculée à partir des mesures de résistance. Cette dernière opération tient compte de la géométrie du dispositif de mesure :

$$\rho_{MN=i} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta V_i}{I} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{AM_i} - \frac{1}{BM_i}\right) - \left(\frac{1}{AN_i} - \frac{1}{BN_i}\right)} \quad (\text{équation 2})$$

Soit pour le MUCEP, comme $AM_i = BN_i$ et $AN_i = BM_i$, et en utilisant l'équation 1 :

$$\rho_{MN=i} = \pi \cdot \frac{AN_i \cdot AM_i}{AN_i - AM_i} \cdot R \quad (\text{équation 3})$$

Avec : AM_i , AN_i , MiB et NiB désignant respectivement la distance entre les électrodes A et M_i , A et N_i , M_i et B, N_i et B ; I le courant injecté aux bornes des électrodes (A-B) et V_i la différence de potentiel mesurée aux bornes des électrodes ($M_i N_i$). Par convention, on considère que la position de la mesure est à l'intersection des diagonales AN_i et BM_i (soit le barycentre de $ABMiNi$).

La zone à étudier est prospectée en réalisant plusieurs transects de mesure parallèles (encore appelés traînés électriques) dans le sens de la longueur est-ouest et espacés de 6 mètres dans le sens de la largeur nord-sud, (soit au total 40 transects). Les mesures ont été réalisées les 24 et 25/07/2003 sur un chaume d'orge de printemps non irriguée. Les sols de la parcelle étaient alors très secs (teneurs en eau pondérales de 90 à 150 g.kg⁻¹ en surface et de 90 à 195 g.kg⁻¹ en profondeur).

Nous utiliserons par la suite le terme résistivité pour désigner la résistivité électrique apparente ($\Omega.m$) du sol. De même, ρ_{MN50} , ρ_{MN100} et ρ_{MN200} désignent respectivement la mesure de résistivité apparente pour les écartements 50, 100 et 200 cm.

Panissod (1997) a estimé que les profondeurs d'investigation des mesures de résistivité MUCEP sont de l'ordre de 50 cm, 100 cm et 150 cm respectivement pour le MN = 50 cm, MN = 100 cm et MN = 200 cm.

Réalisation de sondages à la tarière et ouverture de fosses pédologiques

Cent quarante sondages à la tarière (de 120 cm de profondeur maximum) ont été réalisés (figure 1) en trois campagnes, afin de comprendre la répartition spatiale des matériaux pédologiques et géologiques et de disposer d'un support à l'interprétation des mesures géophysiques. Les deux premières prospections - durant l'automne 2003 et de février à mars 2004 - ont été raisonnées selon 3 éléments : la topographie, les différences de résistivité le long de 5 transects correspondants à des lignes de

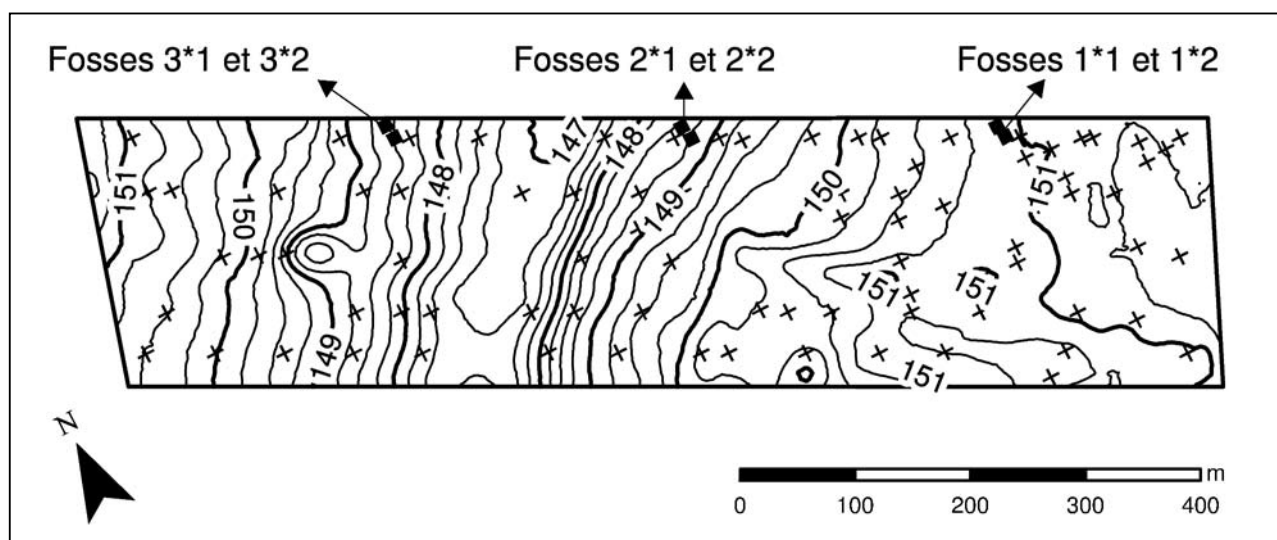
passage du MUCEP et la pierrosité* de surface (* : Dans cet article le terme de 'pierrosité' désigne la charge en éléments grossiers de surface, > 2 mm, évaluée en pourcentage de surface occupée). Une prospection complémentaire a été raisonnée en fonction des types de sols identifiés précédemment (avril - mai 2004).

Chaque sondage a été géoréférencé à l'aide d'un théodolite avec une précision de ± 5 cm. La description des sondages inclut : la pierrosité de surface autour du point de sondage et la nature lithologique des éléments grossiers (pourcentage surfacique évalué visuellement) ; la profondeur d'apparition (en cm) de chacun des horizons identifiés ; et pour chaque horizon : la texture ; la charge en éléments grossiers, leur nature lithologique et leur taille ; la couleur dominante ; la présence de signes d'hydromorphie et d'autres traits pédologiques identifiables à la tarière (concrétions) ; l'intensité de l'effervescence à l'acide chlorhydrique (présence de carbonates). Ces estimations ont été réalisées visuellement ou de manière tactile. L'estimation des classes de textures a été basée sur le triangle du service de la carte des sols de l'Aisne (Jamagne, 1967). Les abréviations de classes de texture utilisées dans cet article s'y réfèrent.

Il est important de connaître la précision de l'évaluation *in situ* des propriétés du sol par le pédologue, notamment pour les traitements statistiques qui sont utilisés ensuite. Cette dernière est malheureusement difficile à évaluer. La profondeur d'apparition des horizons a été systématiquement mesurée avec une tarière graduée tous les 10 cm, nous estimons donc l'erreur maximale sur la profondeur à 5 cm environ. Pour la pierrosité de surface, on admet généralement que l'erreur d'estimation peut avoisiner les 20 % de la valeur estimée (Gras, 1994).

Figure 1 - Carte topographique de la parcelle (courbes de niveau équidistantes de 25 cm) d'après les mesures dGPS ; Localisation des sondages à la tarière (+) utilisés pour les calculs ; localisation des fosses pédologiques (■).

Figure 1 - Topographic map of the plot (25 cm equidistant contour lines) from dGPS measurements ; Localisation of the auger holes (+) used for calculations ; localisation of pedological excavations (■).



Six fosses pédologiques ont été ouvertes dans la partie nord de la parcelle (figure 1) afin d'échantillonner les principaux horizons de la parcelle (caractérisations complètes non présentées dans cet article, à l'exception des teneurs en argile et en éléments grossiers). La description de ces fosses permet de mieux comprendre la variabilité des sols à courte distance et complète ainsi la prospection à la tarière.

Une typologie des sols a été élaborée, en discriminant ces derniers selon : la nature et les propriétés des horizons, leur succession, leur épaisseur et la nature du ou des matériaux géologiques parentaux dans lequel le sol s'est développé. Les sols ont ainsi été rattachés à un type de sol du Référentiel Pédologique français (AFES, 1995).

Spatialisation de la mesure de résistivité électrique apparente

Notre choix est une spatialisation de la mesure de résistivité sur un raster dont les cellules font 3 mètres de côté. La valeur de la cellule est la moyenne pondérée par l'inverse du carré de la distance des 12 mesures de résistivité les plus proches de son centre. Les valeurs obtenues subissent ensuite un lissage par la médiane dans un rayon de 7 mètres (incluant 21 cellule). Chacun des 3 écartements de mesure du MUCEP donne ainsi une carte raster de résistivité (soit 3 cartes).

Pour notre analyse statistique, nous attribuons à chaque sondage tarière les 3 valeurs de résistivité de la cellule dans laquelle il se trouve (1 valeur par écartement de mesure).

Analyse statistique des liens entre propriétés du sol et résistivité

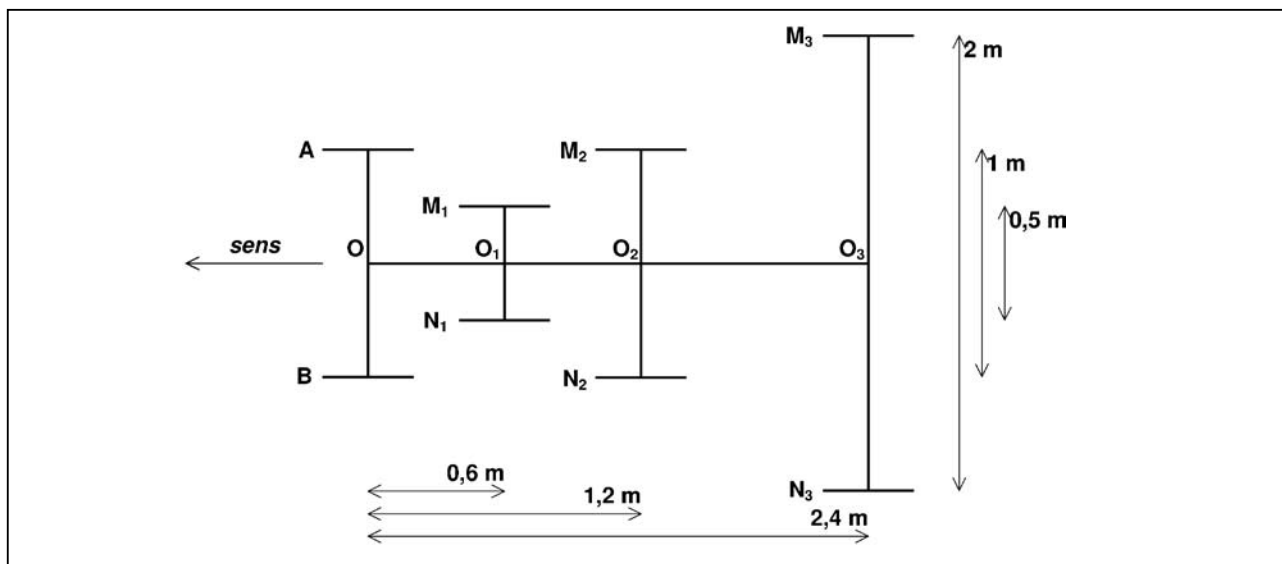
L'utilisation des mesures de résistivité pour aider la cartographie des sols nécessite de connaître le degré de corrélation entre les variables pédologiques d'intérêt et la résistivité. Or, les variables pédologiques mesurées ou estimées sur le terrain sont de nature différente, quantitatives ou qualitatives. De plus, le nombre de modalités considérées par les variables qualitatives diffère d'une variable à l'autre. Toutes les variables pédologiques d'intérêt ont donc été transformées en variables binaires, de manière à pouvoir les analyser ensemble et les comparer (voir ci-dessous). La méthode statistique que nous avons retenue est la « corrélation bisériale » (en anglais : point biserial correlation coefficient) qui mesure la corrélation entre une variable binaire (dichotomique) et une variable quantitative (continue). Dans notre cas nous testerons les variables pédologiques binaires (Y, avec deux valeurs possibles A ou B) par rapport à la mesure de résistivité quantitative (X). La formule de la corrélation bisériale r_{bis} est la suivante (Dagnélie, 1992) :

$$r_{bis} = \frac{\bar{x}_{Y=A} - \bar{x}_{Y=B}}{s_x} \cdot \frac{\sqrt{n_{Y=A} \cdot n_{Y=B}}}{n} \quad (\text{équation 4})$$

avec : n le nombre de sondages considérés ; $n_{Y=A}$ le nombre de sondages où $Y = A$; $n_{Y=B}$ le nombre de sondages où $Y = B$; $\bar{x}_{Y=A}$ la résistivité moyenne des sondages où $Y = A$; $\bar{x}_{Y=B}$ la résistivité moyenne des sondages où $Y = B$; s_x l'écart type de la résistivité des n sondages. Les différentes étapes du test sont illustrées dans la figure 3.

Figure 2 - Vue schématique et dimensions de l'outil tracté MUCEP. Les roues dentées sont aussi des électrodes d'injection du courant (A et B) ou de mesure de la différence de potentiel (M et N ; 1, 2, et 3).

Figure 2 - Sketch view and dimensions of the MUCEP pulled device. Cogged wheels are also current injection electrodes (A and B) or electrodes for potential difference measurements (M and N; 1, 2 and 3).



La transformation des variables quantitatives en variables binaires implique le choix d'un seuil pour séparer les sondages en deux catégories ($Y = A$ ou $Y = B$). Ce seuil a été systématiquement choisi de manière à maximiser la valeur du coefficient de corrélation bisériale pour la variable (optimisation manuelle pas à pas, en suivant des intervalles de plus petite taille que la précision supposée des mesures). De la même manière, la transformation des variables qualitatives comportant plus de deux catégories implique de regrouper certaines d'entre elles de manière à n'en obtenir que deux. Ces regroupements ont eux aussi été choisis de manière à maximiser la valeur de la corrélation bisériale (optimisation manuelle). Les seuils comme les regroupements varient selon la mesure de résistivité considérée (ρ_{MN50} , ρ_{MN100} ou ρ_{MN200}).

Le signe de la corrélation bisériale apporte aussi une information. Dans l'équation 4 la moyenne des résistivités du groupe B est soustraite à la moyenne des résistivités du groupe A. Une corrélation négative signifie donc que la résistivité du groupe A est inférieure à celle du groupe B. Nous avons choisi de mettre systématiquement la modalité qui présente la résistivité la plus faible dans le groupe A.

Onze variables pédologiques ont ainsi été testées : La pierrosité totale en surface ; la pierrosité de calcaire en surface ; la pierrosité de meulière en surface ; la profondeur d'apparition du matériau calcaire ; le type de sol ; la profondeur d'apparition du niveau argileux ; l'épaisseur du niveau argileux ; la classe texturale de l'horizon de surface ; la présence d'argile de décarbonatation ; la présence d'argile à meulière ; la présence de calcaire de type cryoturbé.

La corrélation peut être testée par un test de Student : la valeur t_0 (voir le calcul ci-dessous) doit être comparée avec la valeur seuil de la loi de Student pour un test unilatéral, avec $\alpha = 0,05$ et $n-2$ degré de liberté (Bouyer, 1996) :

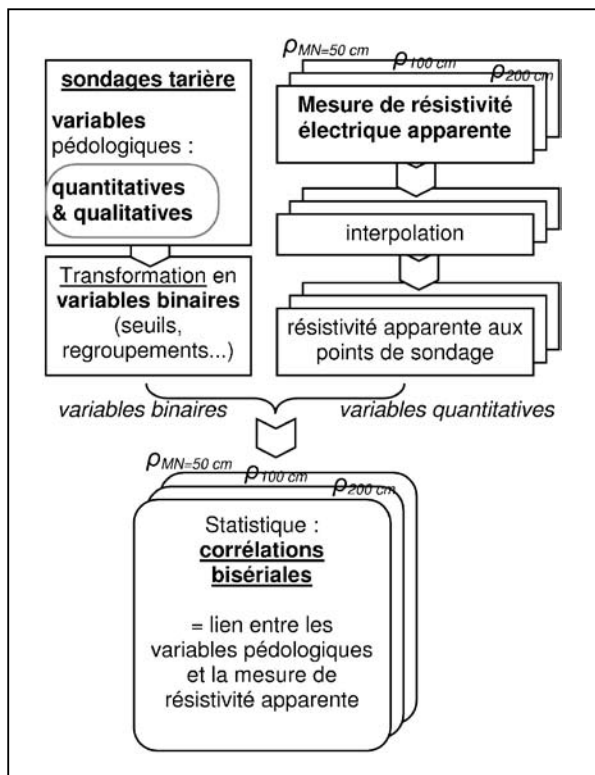
$$t_0 = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (\text{équation 5})$$

La corrélation bisériale ne nous permet cependant pas de connaître les corrélations des variables pédologiques entre elles ou des mesures de résistivité entre elles. Cette information est utile pour comprendre la formation de la couverture pédologique, c'est pourquoi le coefficient de corrélation de Pearson, que nous notons r_p , a aussi été calculé pour les principales variables quantitatives. Avant le calcul des coefficients de corrélation r_p , nous nous sommes assurés que les variables ne s'écartaient pas significativement de la normalité par un test du χ^2 et un test de Henri.

Le coefficient de corrélation nous informe sur la force du lien entre les variables pédologiques et la résistivité, mais pas sur l'amplitude de leurs variations concomitantes. Ce renseignement est pourtant lui aussi important pour interpréter la mesure de résistivité. Pour cette raison, nous avons calculé les termes des régressions linéaires entre les principales variables pédologiques quantitatives et les mesures de résistivité apparente. Un test de Fischer a été effectué pour s'assurer que les pentes des régressions sont bien

Figure 3 - Schéma du traitement des données préalable au calcul des corrélations bisériales.

Figure 3 - Sketch of data treatments preceding the 'point biserial correlation' calculation.



significatives. Deux variables pédologiques ont été retenues pour ce test, en plus des 3 mesures de résistivité : la profondeur d'apparition du matériau calcaire et l'épaisseur du niveau « argileux » superposé au matériau calcaire (quand il est présent).

RÉSULTATS

Matériaux parentaux et horizons pédologiques

La campagne de sondages tarière, ainsi que l'ouverture et la description de fosses pédologiques, ont permis de relever les grands traits du contexte pédologique et géologique de la parcelle. La figure 4 présente une description simplifiée des 6 fosses pédologiques.

Le substrat, invariablement un matériau calcaire (au sens lithologique), est recouvert de sols dont l'épaisseur varie de 0,30 m à plus de 1,2 m (tableau 1). La charge en éléments grossiers (de calcaire et/ou de meulière) et l'état d'altération du matériau calcaire

sont très variables. Le toit du matériau calcaire présente un faciès qui résulte de phénomènes de gélifraction, de cryoturbation, et de solifluxion (Gigout, 1973), et a probablement aussi été soumis à une dissolution karstique, comme le montre la présence des petites dolines. Le résultat de ces phénomènes est une ondulation ample et rapide du toit calcaire dans certains secteurs de la parcelle (ondulations de 20-30 cm de battement pour 100-150 cm de large, voir des 'poches' de cryoturbation). Ces matériaux ont donné les horizons IIC ou IIS (*figure 4*). Plusieurs autres matériaux, d'épaisseur variable, peuvent se superposer au calcaire. Ils se succèdent dans un ordre précis, mais l'un ou l'autre peut manquer.

Un premier niveau, identifié comme de l'argile de décarbonatation, peut recouvrir le calcaire. Cette argile n'est présente que dans certains secteurs de la parcelle. Très peu chargée en éléments grossiers, elle est généralement peu épaisse (une quinzaine de cm), mais peut localement être importante (30 cm). Au-dessus de cette dernière, ou directement sur le calcaire, on trouve en de nombreux points de la parcelle une formation d'argile à meulière. La formation de ce matériau est associée à des phénomènes d'altération karstique sur un calcaire, ayant entraîné une dissolution, puis une précipitation de silice et d'argiles dans le calcaire (Menillet, 1987). Cette formation s'est peut-être accumulée dans les dépressions du calcaire. L'argile de décarbonatation et/ou l'argile à meulière ont donné les horizons IIC et IIS présents sur toutes les fosses à l'exception de la 1*2 (*figure 4 ; tableau 1*).

Une couverture de limon éolien (Gigot et Desprez, 1976), peu ou pas chargée en éléments grossiers, vient recouvrir les matériaux précédemment cités (soit directement sur le calcaire, soit sur l'argile à meulière et/ou sur l'argile de décarbonatation). Appelée localement « limon de Beauce », cette couverture est plus ou moins épaisse (30 à 70 cm), et elle peut présenter une différenciation texturale en différents horizons, attribuée à un lessivage des argiles et/ou à une contamination lors du dépôt du loess sur les matériaux plus argileux. Certains horizons plutôt argilo-limoneux, mais char-

gés en meulière, présentent un faciès intermédiaire entre l'argile à meulière et le limon. Les horizons L et BT dérivent du limon éolien et/ou de l'argile à meulière.

Une dernière formation, alluviale cette fois, vient se surimposer à ce tableau déjà complexe. Des graviers, essentiellement quartzeux, que nous rattachons à la formation du Burdigalien des « sables et graviers de Lozère », se trouvent en quantités très variables dans une partie des sols de la parcelle. Ils peuvent être présents depuis la surface jusqu'au matériau calcaire, mais les charges les plus importantes sont associées à l'argile à meulière (et parfois au calcaire). Il n'est pas impossible qu'une partie des argiles soit associée à cette formation : il pourrait s'agir des « argiles brun-rouge à gros grains de quartz » décrites par Fédoroff (1973).

Cinq types de sols ont été identifiés sur la parcelle : des NEOLUVISOLS, des CALCOSOLS, des CALCISOLS, des BRUNISOLS et des COLLUVIOSOLS (AFES, 1995). Aucune fosse n'est disponible pour une description des CALCOSOLS, CALCISOLS et COLLUVIOSOLS.

Les coefficients de corrélation (de Pearson) entre les propriétés du sol confirment la cohérence du système pédologique (*tableau 2*). Ainsi, plus le calcaire est profond, plus le niveau argileux qui le surmonte est épais (quand il est présent, $r_p = 0,74$). Fort logiquement la pierrosité de surface augmente quand le calcaire est plus proche de la surface, ainsi que la teneur en argile de l'horizon de surface (probablement du fait de l'affleurement des horizons BT ou d'argile à meulière).

Variabilité spatiale des horizons

L'ouverture de 2 fosses distantes de quelques mètres sur chacune des 3 placettes de mesure nous permet de visualiser la variabilité spatiale des sols à 3 niveaux (*figure 4*): (i) Variabilité des horizons et de leurs limites au sein d'une fosse (échelle infra-métrique). Les horizons IIS2, IIC1 et IIC2 de la fosse 2*1 en

Tableau 1 - Caractéristiques des principales variables quantitatives utilisées.

Table 1 - Characteristics of the main quantitative variables used for the study.

	Unités	Moyenne	Min.	Max.	S	Err. Type	CV
Profondeur du calcaire	cm	64	30	115	20,6	0,23	32 %
Épaisseur d'argile ¹	cm	24	0	70	20,9	0,24	85 %
$\rho_{MN} = 50$ cm	$\Omega \cdot m$	79	38	112	15,8	0,18	20 %
$\rho_{MN} = 100$ cm	$\Omega \cdot m$	80	42	118	17,0	0,19	22 %
$\rho_{MN} = 200$ cm	$\Omega \cdot m$	185	135	226	20,5	0,23	11 %

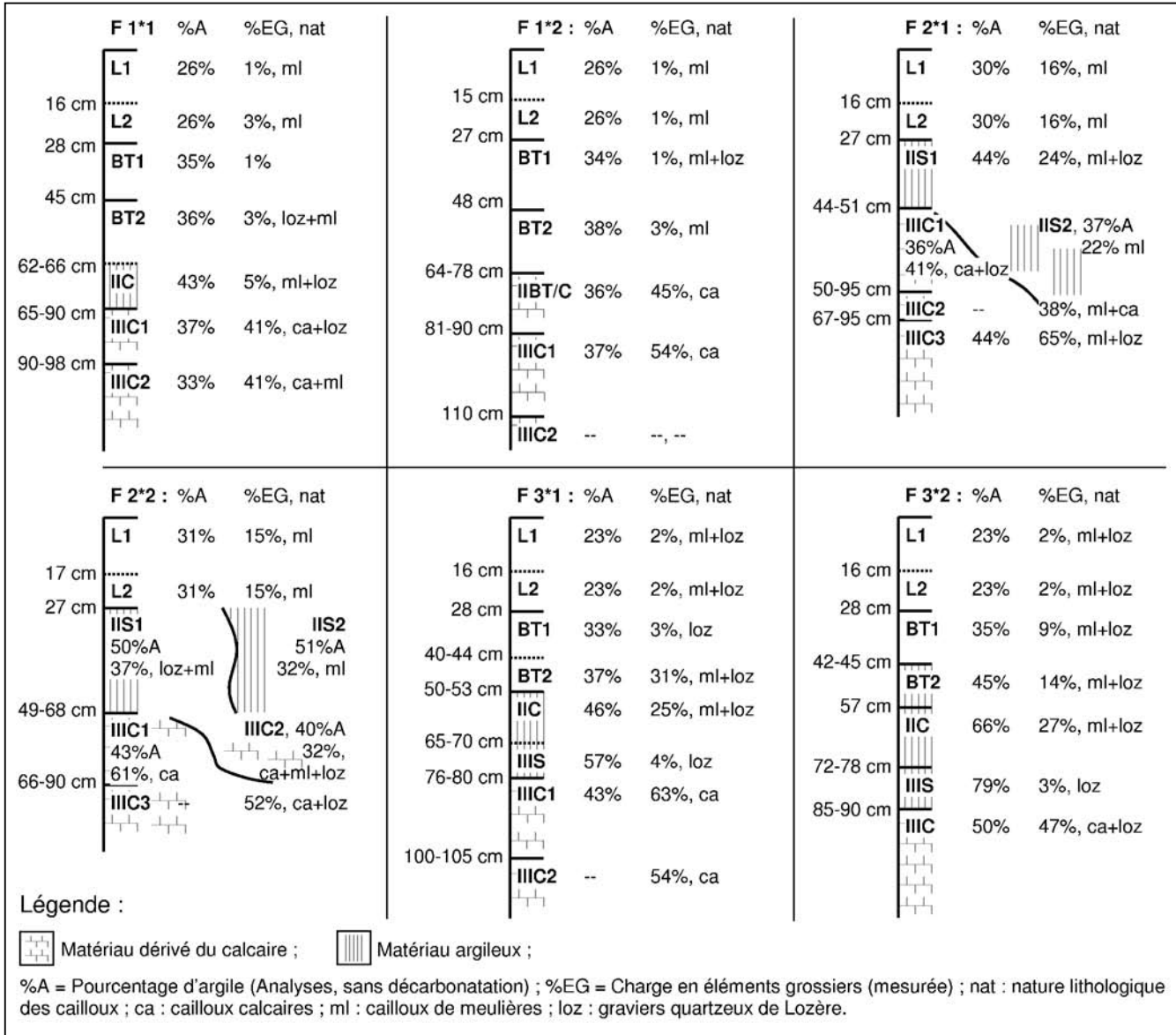
S : Ecart Type ; Err. Type : Erreur type = $(s^2 / n)^{1/2}$; CV = Coefficient de variation = écart type / moyenne

¹ : Épaisseur du niveau argileux ;

ρ : Résistivité électrique apparente ; Données sur 88 points.

Figure 4 - Schémas simplifiés des 6 fosses (F) ouvertes sur la parcelle : profondeurs des horizons, types d'horizon, teneurs en argile et en éléments grossiers.

Figure 4 - Simplified sketches of the 6 excavations (F) dug on the plot: soil layers depth, pedological type, clay and stones content.



NB : Les Lettres indiquent le type d'horizon d'après le RP (AFES, 1995) L : horizon labouré, BT : horizon argilluvial, S : horizon structural, C : matériau parental évolué mais sans structuration pédologique. Les chiffres romains indiquent un changement de matériau parental. Les chiffres arabes (1,2) indiquent les variantes d'un même type d'horizon. Fosse 1*1 : NEOLUVISOL sur argile à meulière (IIC) et calcaire altéré (IIC1) ; fosse 1*2 : NEOLUVISOL, « limon de Beauce » typique, sur calcaire altéré (IIC1) ; fosses 2*1 et 2*2 : BRUNISOLS sur argile à meulière (IIS) et calcaire cryoturbé (IIC1) ; fosses 3*1 et 3*2 : NEOLUVISOLS sur argile à meulière (IIC), argile de décarbonatation (IIS) et calcaire altéré (IIC1). [AFES, 1995]. Les fosses 2*1 et 2*2 présentent des changements latéraux de types d'horizons dont les limites sont symbolisées sur les schémas par les traits obliques.

sont un exemple ; (ii) Variabilité des caractéristiques d'un horizon entre les 2 fosses d'une même placette (échelle décimétrique), et parfois même disparition d'un horizon. Les horizons BT2 et IIC des fosses 3*1 et 3*2 illustrent bien ces variations ; (iii) Variabilité des sols entre les différentes placettes (échelle hectométrique).

Inversement, l'extension des différents matériaux géologiques et horizons pédologiques présentés plus haut n'est généralement pas limitée à un secteur de la parcelle. On retrouve ainsi sous divers faciès des horizons dérivés de l'argile à meulière dans toutes les fosses, excepté la 1*2.

Tableau 2 - Matrice des coefficients de corrélations entre les différentes variables pédologiques étudiées. Les valeurs significatives au seuil de 5 % sont en gras. Résultats sur $n = 85$ sondages (soit $r_{\text{seuil}} = \pm 0,213$ pour $\alpha = 5 \%$).

Table 2 - Correlation coefficient matrix between the different pedological variables studied. Significant values at the 5 % threshold are in bold. Results with $n = 85$ auger holes ($r_{\text{threshold}} = \pm 0,213$ for $\alpha = 5 \%$).

	Profondeur du calcaire	Épaisseur d'argile ¹	Pierrosité totale ²	Pierrosité de calcaire ²	Pierrosité de meulière ²
Épaisseur d'argile ¹	0,74	-			
Pierrosité totale	- 0,53	-0,17	-		
Pierrosité calcaire	- 0,37	-0,07	0,86	-	
Pierrosité meulière	- 0,48	-0,21	0,67	0,19	-
Pourcentage d'Argile ³	- 0,44	-0,14	0,45	0,40	0,28

1 : Épaisseur du niveau argileux ; 2 : évalué en surface ; 3 : de l'horizon de surface.

Mesure de la résistivité électrique apparente

Malgré un faible coefficient de variation (*tableau 1*), la gamme des valeurs de résistivité permet de visualiser des contrastes intéressants dans la parcelle. La *figure 5* présente les mesures de résistivité apparente des 3 écartements inter-électrodes.

Pour une $\rho_{MN} = 100$ cm, une première zonation apparaît nettement : depuis le milieu du talweg jusqu'au-dessus de la doline, le versant ouest présente des valeurs de résistivité faibles (30 à 70 $\Omega.m$), tandis que le reste de la parcelle présente des valeurs de résistivité généralement moyennes ou élevées (60 à 110 $\Omega.m$). On observe aussi un secteur dont la résistivité est très faible au sud-est de la parcelle. Le bas du versant Est, au niveau de sa rupture de pente, est marqué par des résistivités élevées. Juste au-dessus de cette rupture de pente, la mesure de résistivité varie beaucoup, avec un secteur moins résistif au milieu de la parcelle. La résistivité révèle aussi la petite doline située au milieu du versant est, contre la bordure sud de la parcelle.

Pour ρ_{MN200} , la mesure présente des valeurs de résistivité plus élevées (*figure 5*, *tableau 1*), mais dont les contrastes sont très similaires à ce qu'on observe pour ρ_{MN100} (le coefficient de corrélation r_p entre les deux mesures est de 0,88). Le versant ouest montre toujours une résistivité faible (relativement à l'ensemble des valeurs de ρ_{MN200}). Le versant Est présente des valeurs élevées, moins contrastées que pour ρ_{MN100} .

Pour ρ_{MN50} , les valeurs semblent plus bruitées même si elles sont en moyenne similaires à celles de ρ_{MN100} (*figure 5*). On remarque aussi une anisotropie longitudinale des valeurs. Elle peut s'expliquer par une acquisition beaucoup plus dense en longueur qu'en largeur, par des problèmes de contacts des électrodes - dûs à la pierrosité de surface ou à la teneur en eau très faible du sol - ou un passage parallèle aux traces de roues des engins agricoles. On remarque que dans certains secteurs, les résistivités de ρ_{MN50} sont plus élevées que celles de ρ_{MN100} . ρ_{MN50} est assez corrélée à ρ_{MN100} ($r_p = 0,61$), et moins à ρ_{MN200} ($r_p = 0,47$).

Analyse des liens entre propriétés du sol et résistivité électrique apparente

Les corrélations bisérialles calculées apportent une information sur l'influence relative des variables pédologiques sur les résistivités apparentes mesurées. Elles permettent donc de classer les variables pédologiques selon leur corrélation avec la résistivité. Le *tableau 3* présente les résultats de cette analyse par écartement de mesure de la résistivité (seules les corrélations statistiquement significatives sont présentées).

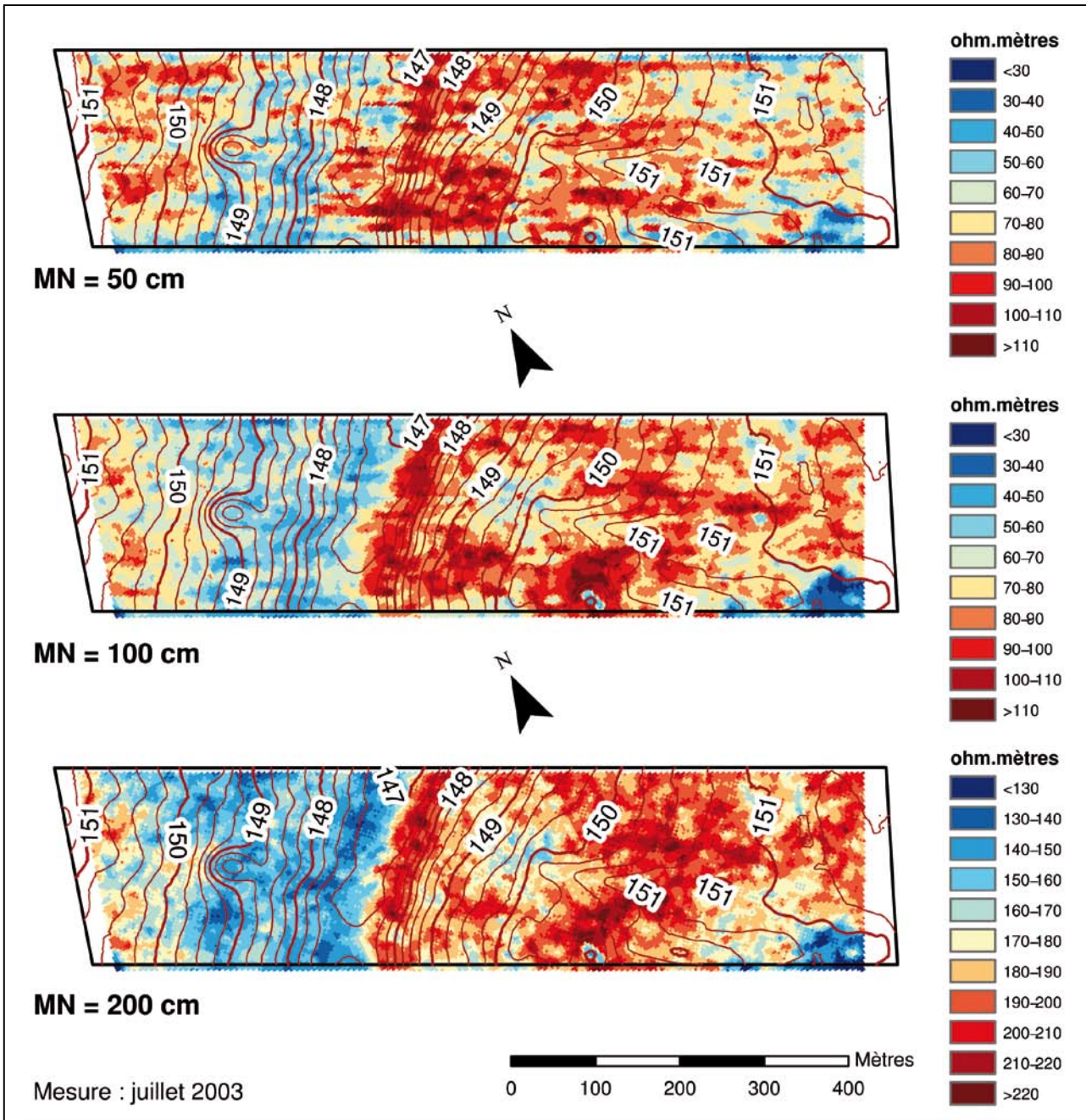
Pour la ρ_{MN50} , la pierrosité totale en surface est le facteur le plus corrélé ($r_{\text{bis}} = -0,41$). Viennent ensuite dans l'ordre, la profondeur d'apparition du matériau calcaire, le type pédologique et l'épaisseur du niveau argileux. La texture de surface n'apparaît pas comme très influente, mais l'estimation de cette propriété s'est révélée délicate du fait de sa faible variation sur l'ensemble de la parcelle. De plus, une estimation peut varier entre pédologues ou au cours de la saison (conditions sèches ou froides).

Pour ρ_{MN100} , la pierrosité de calcaire en surface est la plus corrélée ($r_{\text{bis}} = -0,47$), suivie de la profondeur d'apparition du matériau calcaire et du type de sol. Si ρ_{MN50} fait ressortir les NEOLUVISOLS (épais ou non) par rapport aux CALCISOLS et CALCOSOLS, ρ_{MN100} distingue les NEOLUVISOLS moyennement épais des autres types de sol. La corrélation bisériale s'avère assez sensible au jeu de données utilisé, car l'effectif des groupes distingués est parfois restreint. Les différences assez faibles de corrélation bisériale entre les facteurs pédologiques pour ρ_{MN100} concordent avec le constat que les données pédologiques sont très corrélées (*tableau 2*).

Pour ρ_{MN200} , l'analyse donne des résultats quelque peu différents. La profondeur d'apparition du niveau argileux devient le facteur le mieux corrélé à la résistivité ($r_{\text{bis}} = -0,59$). La profondeur du calcaire est le 2^e facteur le plus corrélé avec ρ_{MN200} ($r_{\text{bis}} = -0,56$), puis la pierrosité de surface ($r_{\text{bis}} = -0,51$), et la présence d'argile à

Figure 5 - Cartes de résistivité apparente pour $\rho_{MN} = 50$ cm, $\rho_{MN} = 100$ cm et $\rho_{MN} = 200$ cm, après traitement des données (grille de 3 m de côté). NB : la gamme des couleurs ne correspond pas aux mêmes valeurs de résistivité entre les 3 cartes ; Isolignes topographiques (équidistance 25 cm).

Figure 5 - Apparent resistivity maps for $\rho_{MN} = 50$ cm, $\rho_{MN} = 100$ cm and $\rho_{MN} = 200$ cm, after data treatment (3 m wide raster). Note that colour scales are different between the 3 maps; 25 cm equidistant contour lines.



meulière. Le seuil (optimum pour r_{bis}) de la profondeur du calcaire change aussi pour cet écartement : il passe de 50-60 cm (ρ_{MN50} et ρ_{MN100}) à 95 cm (ρ_{MN200}).

Plus la pierrosité de surface est élevée, plus la résistivité est forte.

De même, plus le calcaire est profond, ou plus le niveau argileux est épais, plus la résistivité est faible. Pour les mêmes raisons, les sols courts (CALCOSOLS, CALCISOLS, et NEOLUVISOLS tronqués) sont plus résistifs que les sols plus épais (NEOLUVISOLS).

Tableau 3 - Corrélations bisérialles entre les 3 mesures de résistivité électrique apparente (variables quantitatives : ρ_{MN50} , ρ_{MN100} ou ρ_{MN200}) et les variables pédologiques (variables binaires). Seules les corrélations significatives sont présentées.

Table 3 - Biserial correlations between the 3 electrical resistivity measurements (as quantitative variables: $\rho_{MN = 50 \text{ cm}}$, $\rho_{MN = 100 \text{ cm}}$ or $\rho_{MN = 200 \text{ cm}}$) and the pedological variables (as binary variables). Only significant correlations are presented.

$\rho_{MN = 50 \text{ cm}}$ / Propriété du sol :	groupe A	groupe B	n_A	n_B	r_{bis}
Pierrosité de meulière et/ou de calcaire en surface	< 4 % ou 1 % (*)	≥ 4 % ou 1 % (*)	45	40	-0,41
Matériau calcaire	à partir de 50 cm	avant 50 cm	64	21	-0,30
Type de sol	NEOLUVISOLS ; NEOLUVISOLS tronqués	CALCISOLS ; CALCOSOLS	63	22	-0,29
Niveau argileux	à partir de 40 cm	avant 40 cm ou absent	27	58	-0,27
Texture de surface	LM+ ou LA-	Autre	50	35	-0,21

(*) Seuils pour la pierrosité de meulière ou de calcaire respectivement, exprimés en %tage surfacique.

$\rho_{MN = 100 \text{ cm}}$ / Propriété du sol :	groupe A	groupe B	n_A	n_B	r_{bis}
Pierrosité calcaire en surface	< 1 %	≥ 1 %	68	17	-0,47
Matériau calcaire	à partir de 60 cm	avant 60 cm ou absent	52	33	-0,46
Type de sol	NEOLUVISOLS	NEOLUVISOLS tronqués ; CALCISOLS ; CALCOSOLS	40	45	-0,44
Niveau argileux	à partir de 45 cm	avant 45 cm ou absent	17	68	-0,43
Texture de surface	LM+ ou LA-	Autre	50	35	-0,42
Argile à meulière	présente	absente	37	48	-0,39
Épaisseur du niveau argileux	≥ 15 cm	< 15 cm	54	31	-0,30

$\rho_{MN = 200 \text{ cm}}$ / Propriété du sol :	groupe A	groupe B	n_A	n_B	r_{bis}
Niveau argileux	à partir de 45 cm	avant 45 cm ou absent	17	68	-0,59
Matériau calcaire	à partir de 95 cm	avant 95 cm	9	76	-0,56
Pierrosité calcaire en surface	< 1 %	≥ 1 %	68	17	-0,51
Argile à meulière	présente	absente	37	48	-0,47
Texture de surface	LM+ ou LA-	Autre	50	35	-0,46
Type de sol	NEOLUVISOLS	NEOLUVISOLS tronqués ; CALCISOLS ; CALCOSOLS	40	45	-0,43
Épaisseur du niveau argileux	≥ 15 cm	< 15 cm	54	31	-0,32
Calcaire de type cryoturbé	absent	présent	19	66	-0,28

NB : $r_{\text{seuil}} = 0,213$ pour $\alpha = 5 \%$. n_A et n_B sont le nombre de sondages pour lesquels la variable pédologique prend la valeur A ou la valeur B respectivement ; 85 sondages ont été utilisés au total. LM+ correspond à un Limon Moyen tendant vers le Limon Argileux, et LA- à un Limon Argileux tendant vers le Limon Moyen (Classes de Texture du triangle de l'Aisne).

Tableau 4 - Coefficients des régressions linéaires établies entre les principales variables pédologiques et la résistivité (sur 88 sondages).
Table 4 - Linear regression coefficients established between main pedological variables and resistivity (with 88 auger holes).

Y	$\rho_{MN=50\text{ cm}}$		$\rho_{MN=100\text{ cm}}$		$\rho_{MN=200\text{ cm}}$		épaisseur d'argile ¹	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Profondeur du calcaire	- 0,31	98,1	- 0,43	107,2	- 0,46	214,4	0,71	- 21,8
	$r_p = - 0,40$		$r_p = - 0,52$		$r_p = - 0,46$		$r_p = 0,70$	
Épaisseur d'argile ¹	pas significatif		- 0,26	85,7	- 0,25	191,1		
			$r_p = - 0,31$		$r_p = - 0,26$			

Y les variables expliquées et X les variables explicatives ; ρ : Résistivité électrique apparente ; ¹ : Épaisseur du niveau argileux ; a : pente ; b : ordonnée à l'origine ; r_p : coefficient de corrélation linéaire de Pearson ; r_{seuil} ($n = 88$; $\alpha = 5\%$) = $\pm 0,210$.

La parcelle peut être divisée en trois secteurs (d'après la topographie comme d'après la résistivité) : moitié haute du versant Ouest ; moitié basse du versant Ouest et talweg ; partie Est de la parcelle (versant compris). En les intégrant sous forme de variables binaires, il est possible de calculer la corrélation bisériale entre ces secteurs et la résistivité. Les 2 modalités retenues sont : moitié basse du versant Ouest et talweg pour le groupe A ; moitié haute du versant Ouest + partie Est de la parcelle pour le groupe B. La corrélation entre la variable « secteur » et les résistivités ρ_{MN100} et ρ_{MN200} est systématiquement plus forte qu'avec les autres variables pédologiques précédemment utilisées (r_{bis} de -0,65 et -0,82 respectivement), la moitié basse du versant Ouest se distinguant particulièrement. On peut supposer que chaque secteur se caractérise par la prédominance de certains facteurs pédologiques, dont l'effet couplé influe beaucoup sur la résistivité. La prospection pédologique va dans ce sens.

Les pentes des régressions (tableau 4) qui ont été calculées complètent l'analyse des corrélations bisériales (uniquement pour les variables quantitatives). Pour ρ_{MN100} et ρ_{MN200} la variation de résistivité induite par une même variation de profondeur d'apparition du calcaire est plus grande qu'avec ρ_{MN50} (pentes de -0,43 et -0,46 contre -0,31, respectivement). Elle est en revanche similaire pour ρ_{MN100} et ρ_{MN200} , de même que pour les variations d'épaisseur du niveau argileux. Ces pentes, ainsi que les coefficients de corrélation de Pearson calculés (tableau 4), confirment que plus le calcaire est profond - et plus le niveau argileux qui le surmonte est épais - plus la résistivité est faible. Mais ces régressions n'expliquent qu'une partie des variations de résistivité observées, ce qui les rend difficilement utilisables comme modèle statistique de prédiction des variables pédologiques (par la résistivité). Des estimations d'erreurs croisées ou par 'Jack-knife' confirment ce constat, avec par exemple une erreur moyenne de 28 cm en valeur absolue pour les régressions entre résistivité et ρ_{MN100} .

Nous avons tenté d'affiner ces régressions en distinguant les « NEOLUVISOLS développés dans les limons de Beauce » et « sols sur argile à meulière ». Si les pentes obtenues sont significatives

dans les deux cas, la différence entre les deux ne l'est pas (test de Student). Elles montrent cependant que les sols sur argile à meulière sont un peu moins résistants, et que leur résistivité est moins influencée par la profondeur du toit calcaire que dans les cas des limons de Beauce (la régression de la résistivité en fonction de la profondeur d'apparition du calcaire a une pente plus faible).

Tracé des limites entre Unités Cartographiques de Sol à l'aide de la résistivité

Les analyses statistiques présentées ci-dessus montrent que les relations entre la typologie de sols et les mesures de résistivité sont complexes. Il n'est pas possible d'isoler une variable pédologique dont l'influence serait prépondérante sur la résistivité. Il n'est pas non plus réaliste de modéliser le terrain comme une succession d'horizons de résistivité homogène. Nous avons néanmoins pu hiérarchiser les variables pédologiques en fonction de leur lien avec la résistivité grâce aux corrélations bisériales. Cette hiérarchie varie en fonction des profondeurs d'investigation et donne le sens de variation de la résistivité selon les variables. Ces informations peuvent donc être utilisées comme variables externes pour aider au tracé des limites des unités cartographiques de sols (UCS) définies préalablement à partir des sondages pédologiques. En effet, malgré le nombre de sondages réalisés, les variations spatiales des propriétés du sol sont souvent très importantes - et les indices de surface insuffisants - pour tracer de manière fiable les limites entre les UCS. Cependant cette utilisation présente aussi ses limites, ce qui nous a amenés à choisir certaines règles de décision permettant d'ajuster au cas par cas l'utilisation des cartes de résistivité. La figure 6 illustre et formalise la démarche que nous avons adoptée. Elle présente un cas théorique d'utilisation locale de la mesure de résistivité.

Le pédologue décide de faire passer une limite entre deux groupes de sondages quand il les a rattachés à deux UCS dis-

tinctes. Ces UCS se différencient par une ou plusieurs propriétés pédologiques. Dans un premier temps le pédologue vérifie si la résistivité change entre les deux groupes de sondages, et ce pour au moins un des écartements de mesure (*figure 6, étape 1*). Si tel n'est pas le cas, il doit s'appuyer sur des indices de surface (topographie, éléments grossiers, etc.) comme il le ferait sans mesure de résistivité apparente. Mais si la résistivité est différente, il faut alors vérifier qu'au moins une des propriétés des sols est corrélée à une ou plusieurs mesures de résistivité apparente (*figure 6, étape 2*). Dans le cas contraire, le pédologue doit placer la limite sans l'aide de la résistivité. Si les propriétés d'intérêt sont liées à la résistivité, le pédologue se base sur la mesure de résistivité la plus corrélée à la propriété du sol pour tracer sa limite (*figure 6, étape 3*). Il place cette dernière sur le changement de résistivité (la valeur de résistivité intermédiaire entre celle des deux groupes de sondages).

Dans la dernière étape (choix d'une des mesures de résistivité), les secteurs de la parcelle décrits plus haut se sont avérés très pertinents. En effet, la mesure ρ_{MN100} , pour laquelle les facteurs les plus discriminants sont la pierrosité et la profondeur d'apparition du calcaire, a généralement servi d'aide à la cartographie du versant Est, occupé en grande partie par les calcaires et limons de Beauce. La mesure ρ_{MN200} , pour laquelle les facteurs les plus discriminants sont les profondeurs d'apparition du niveau argileux et du calcaire, a été principalement utilisée pour le versant Ouest où l'argile à meulière est souvent présente au dessus du calcaire.

La *figure 7* présente la carte des sols résultant de ce travail. Les limons de Beauce occupent 36 % de la parcelle et sont surtout situés sur le plateau Est. La variabilité de la profondeur du calcaire est peu élevée pour ces sols (coefficient de variation de 10 %). Les CALCOSOLS et CALCISOLS caillouteux, qui reposent sur un substrat calcaire très peu profond, représentent 15 % de la surface, notamment dans le bas du versant Est. Les sols pour lesquels le calcaire apparaît au-dessus de 60 cm occupent 34 % de la surface. Le bas du versant Ouest est quant à lui dominé par des sols sur argile à meulière plutôt profonds. Ces derniers occupent 44 % de la parcelle, mais se déclinent en de nombreuses variantes (selon la charge en éléments grossiers et la profondeur d'apparition du calcaire). Les sols sur argile à meulière pour lesquels le calcaire apparaît avant 75 cm occupent 15 % de la surface de la parcelle. Certaines unités cartographiques comme le complexe de CALCISOLS et de NEOLUVISOLS moyennement profonds ou les CALCISOLS et CALCOSOLS caillouteux présentent une profondeur du calcaire très variable (coefficients de variation de 23 et 26 % sur les valeurs obtenues par sondages tarière).

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les résultats exposés ci-dessus montrent que les différences relatives de mesure de résistivité apparente - liées aux propriétés du sol - sont des variables auxiliaires aux observations de sol qui peuvent apporter un gain de précision lors de la cartographie des

sols. Les données de résistivité nous ont permis d'élaborer une prospection pédologique plus efficace basée en partie sur les changements de résistivité. Ces derniers ont révélé des changements de propriétés de sol souvent indécélables par manque d'indices de surface (pierrosité, topographie).

Dans un second temps, c'est le tracé des limites entre les unités cartographiques de sol qui a été facilité. L'apport de la résistivité est d'autant plus intéressant que le contexte pédologique est difficile à appréhender par une cartographie des sols standard. En effet, même si le nombre de matériaux géo-pédologiques est limité, on note que : (1) leur répartition dans la parcelle est complexe ; (2) les horizons présentent une hétérogénéité interne non négligeable ; (3) leur profondeur d'apparition et leur épaisseur peuvent changer en quelques mètres ; (4) les indices de surface permettant de détecter ces changements sont peu nombreux ou absents. Les phénomènes périglaciaires de gélifraction, de cryoturbation et de solifluxion qui ont affecté les matériaux expliquent en grande partie ce niveau élevé de variabilité.

L'analyse statistique que nous avons présentée est assez simple. Elle n'en a pas moins plusieurs avantages : (a) elle exploite pleinement les nombreuses variables pédologiques évaluées lors d'une prospection par des sondages tarière ; (b) elle est relativement robuste ; (c) elle fournit au pédologue des éléments de compréhension supplémentaires sans limiter l'application de son « jugement d'expert ». Plusieurs éléments de la démarche doivent cependant être discutés.

Nous n'avons pas travaillé sur le logarithme de la résistivité apparente, alors que c'est généralement l'usage. Les tests statistiques montrent que la distribution des valeurs de résistivité ne s'écarte pas significativement de la normalité. Cette normalité étant requise pour de nombreux tests statistiques, il ne nous a donc pas semblé utile de transformer la variable.

La méthode utilisée pour interpoler la mesure de résistivité n'est pas sans influence sur les tests statistiques que nous avons mis en œuvre. L'interpolation par l'inverse du carré de la distance et le filtrage par la médiane réduisent le poids des valeurs extrêmes, mais ils retirent aussi une partie de l'information portée par la mesure. Le traitement nous semble justifié au regard de la différence de « support » de mesure entre la résistivité et le sondage tarière. Si la première englobe un volume de sol dont la profondeur est approximativement de l'ordre de l'écartement inter-électrodes (0,5 m, 1 m et 1,5 m pour MN = 0,5 m, MN = 1 m et MN = 2 m respectivement), le sondage tarière est lui très ponctuel. Quand une propriété du sol varie à courte distance, le sondage tarière ne sera pas forcément représentatif des quelques mètres carrés alentour, tandis que la mesure géophysique va intégrer cette variabilité.

Nous n'avons pas évalué précisément les conséquences possibles des erreurs de mesure sur les résultats des tests que nous avons effectués. Il est certain que les mesures des propriétés du sol sont loin d'être exactes, notamment celles qui sont estimées par le pédologue. Il est intéressant de noter que des variables dont nous savons qu'elles sont évaluées de manière relativement imprécises

Figure 6 - Schéma des règles de décision appliquées pour tracer les limites entre unités cartographiques de sol à l'aide des cartes de résistivité électrique apparente.

Figure 6 - Sketch of decision rules applied when tracing the limits between soil cartographic units using apparent electric resistivity maps

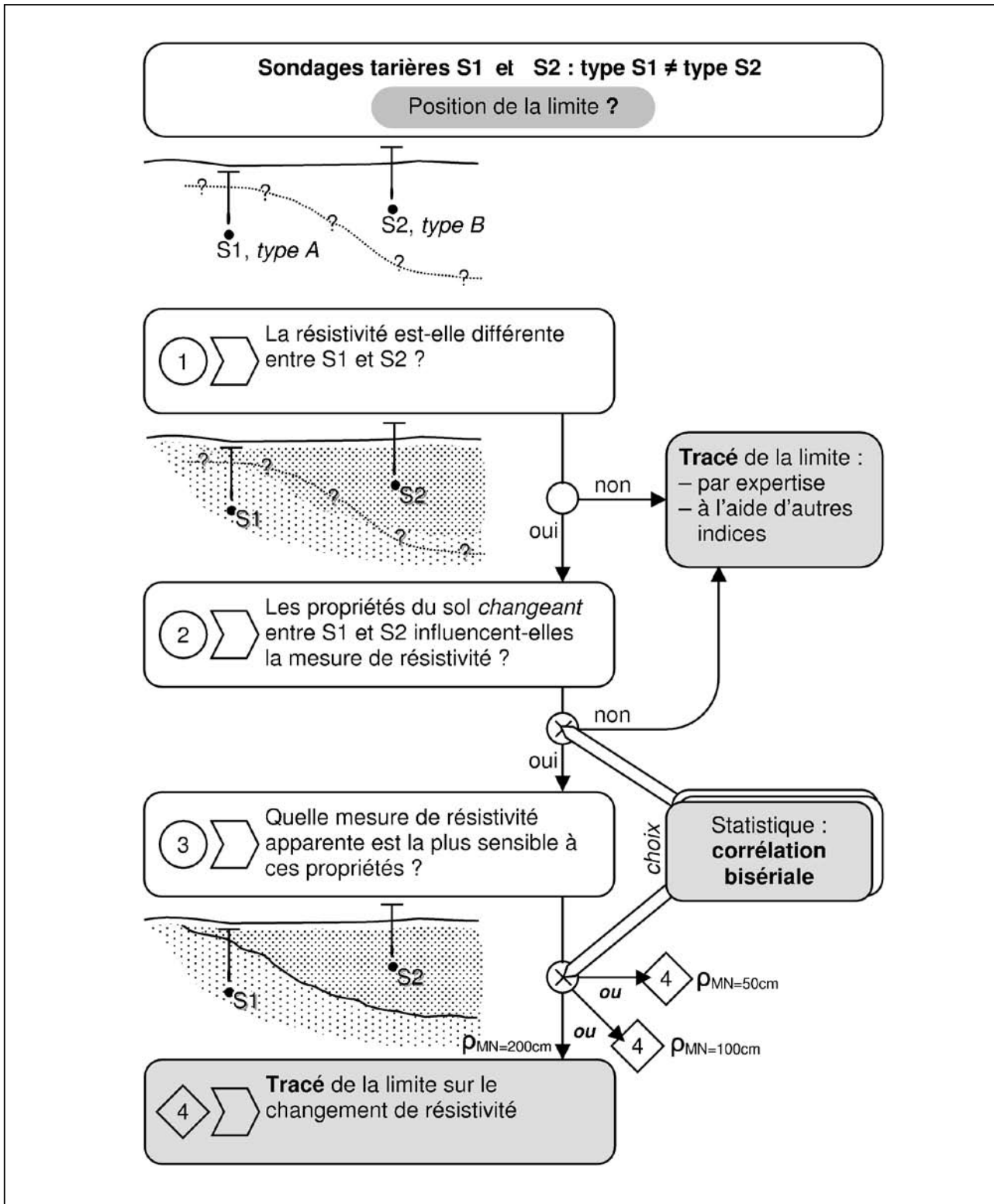
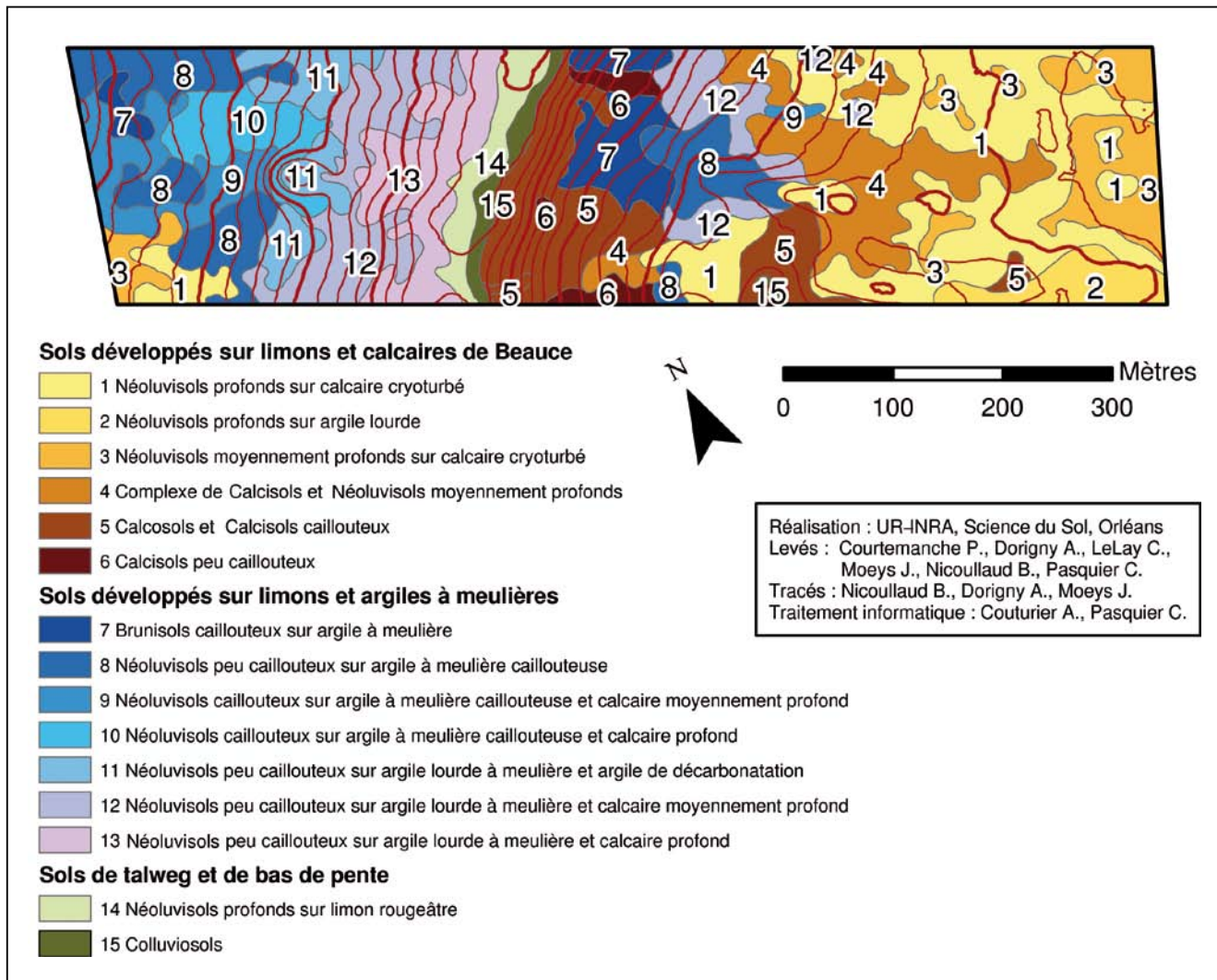


Figure 7 - Carte des sols de la parcelle expérimentale.

Figure 7 - Soil map of the experimental plot.



donnent parfois des corrélations bisérialles très correctes (la teneur en éléments grossiers par exemple). Cela montre que l'évaluation de ces variables respecte l'importance relative de la propriété entre les différents sondages, ce qui est important pour la corrélation bisériale. Au contraire, cette dernière ne sera pas sensible aux erreurs absolues, d'où sa robustesse. La mesure de résistivité apparente comporte aussi des erreurs, soit du fait de l'appareillage, soit du fait d'un mauvais contact des électrodes avec le sol quand celles-ci touchent un caillou (seuls les dysfonctionnements les plus évidents sont éliminés lors des opérations de traitement des données). L'interpolation de la mesure de résistivité est elle aussi source d'erreurs, du fait de la forte asymétrie horizontale de la densité de mesures de résistivité (un transect de mesure tous les 6 mètres contre une mesure tous les 10 cm le long des transects).

Concernant l'analyse statistique elle-même, l'utilisation de la corrélation bisériale a pour inconvénient de dégrader l'information portée par les variables pédologiques, du fait de la transformation en variables binaires. L'optimisation préalable des seuils ou des regroupements choisis pour ces dernières réduit quelque peu cet inconvénient. De plus, elle apporte une information intéressante sur les valeurs seuils de ces propriétés vis-à-vis de la résistivité. La régression linéaire n'est probablement pas la méthode la plus pertinente pour préciser le lien entre la résistivité et les variables pédologiques. Mais, au vu de la dispersion des mesures autour des droites de régression et de leur relative linéarité, on peut supposer que des modèles statistiques plus complexes n'apporteraient pas d'informations plus précises ou pertinentes. Ces tests statistiques n'ont d'ailleurs pas pour but de modéliser la mesure de résistivité

électrique. En effet, plusieurs variables d'état très importantes pour cette dernière n'ont pas été mesurées d'une façon exhaustive, comme par exemple la teneur en eau des sols. Cependant, les différences de teneur en eau sont, à cette période, minimales. La période de mesure (sèche), l'homogénéisation de la teneur en eau par le précédent cultural (orge non irrigué) et les propriétés de rétention du sol expliquent ce constat. Ces dernières dépendent d'ailleurs dans le contexte étudié de la texture, de la charge en cailloux et de la profondeur de sol, propriétés prises en compte dans notre analyse.

La mise en évidence des relations résistivité / propriétés de sol demande un investissement important, tant pour la prospection pédologique que pour la mesure géophysique. Les études portant sur un « secteur de référence » - où les règles de répartition des sols et de leurs propriétés doivent être établies avant d'être extrapolées à un secteur plus étendu - pourraient néanmoins bénéficier d'approches telles que celle que nous présentons. Par contre, la généralisation de la démarche à des secteurs plus larges ne peut se concevoir que dans les limites de la zone prospectable par un outil comme le MUCEP sans variations majeures des conditions géo-pédologiques, climatiques et agronomiques. Tout changement de ces dernières invaliderait en effet les relations statistiques utilisées. S'il semble évident qu'un nombre minimum de sondage est nécessaire pour établir les relations statistiques utilisées (corrélations bisérialles), la densité de sondages - et donc l'échelle cartographique - pourrait sans doute être réduite. La très nette partition de la parcelle en trois secteurs géo-pédologiques de résistivité différentes nous montre qu'une étude, à plus petite échelle, portant sur plusieurs parcelles serait possible (dans la mesure où le précédent agronomique des parcelles n'influence pas trop leur état hydrique).

La conclusion de notre travail est qu'il existe une complémentarité évidente et non exclusive entre la mesure de résistivité apparente en traînés et la prospection pédologique à la tarière. L'adoption d'une démarche rigoureuse d'interprétation des différentes données collectées a permis d'améliorer la démarche de cartographie malgré un contexte géo-pédologique peu favorable pour le pédologue comme pour le géophysicien.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été rendue possible par le soutien financier du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, dans le cadre de son programme Pesticides. Nous remercions Nicolas Chigot, Pierre Courtemanche, Alain Couturier, Hervé Gaillard, Christophe Labat, Christian Lelay et Catherine Pasquier pour leurs contributions à ce travail. Nous remercions Henri Robain pour sa relecture attentive et ses conseils avisés.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 1995 - Référentiel pédologique - Principaux sols d'Europe. Paris : INRA éd., col. Techniques et Pratiques. 332 p.
- Banton O., Seguin M. K. et Cimon M. A., 1997 - Mapping field scale physical properties of soil with electrical resistivity. *Soil Science Society of America Journal*, 61, pp. 1010-1017.
- Besson, A., Cousin, I., Samoulian, A., Boizard, H., Richard, G., 2004 - Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. *Soil et Tillage Research* 79(2), pp. 239 -249. Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands. Special issue: International workshop on soil physical quality, Pulawy, Poland, 2003. Dexter A.R. Ed.
- Blondlot A, Gate P et Poilvé H, 2005 - Providing operational nitrogen recommendations to farmers using satellite imagery. *In: Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture*, Uppsala, Sweden. pp. 345-352. J.V. Stafford Ed., Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Robert J., Schmidt F., Gebbers R., Selige T. et Schmidhalter U., 2001 - Estimating soil moisture distribution for crop management with capacitance probes, EM-38 and digital terrain analysis. *In: Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture*, Montpellier, France. pp. 349-354. Grenier G. and Blackmore S. Eds.
- Bottraud J.-C., Bornand M. et Servat E., 1984(a) - Mesures de résistivité appliquées à la cartographie en pédologie. *Science du Sol*, 4, pp. 279 -294.
- Bottraud J.-C., Bornand M. et Servat E., 1984(b) - Mesures de résistivité et étude du comportement agronomique d'un sol. *Science du Sol*, 4, pp. 295-308.
- Bourennane H., 1997 - Étude des lois de distribution spatiale des sols de Petite Beauce - Application à la cartographie d'un horizon par couplage de méthodes morphométriques et géostatistiques. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, Science de l'Univers - Pédologie. 229 p.
- Bourennane H., King D., Isambert M. et Le Parco R., 1997 - Utilisation de la prospection géophysique par résistivité pour l'étude de la variabilité spatiale du sol et des matériaux géologiques d'un site de Petite Beauce. 23-28. *In: Colloque GEOFCAN. Géophysique des sols et des formations superficielles*. BRGM, INRA, ORSTOM, UPMC. Bondy, France.
- Bouyer J., 1996 - Méthodes statistiques - Médecine - Biologie. ESTEM, éd. INSERM. 351 p.
- Chaplot V., Walter C., Curmi P., Hollier-Larousse A. 2001 - Mapping field-scale hydromorphic horizons using Radio-MT electrical resistivity. *Geoderma*. 102(1-2), pp. 61-74.
- Chéry P., 1995 - Variabilité de l'épaisseur de la couverture de sol. Conséquence pour le bilan hydrique hivernal d'un secteur de Petite Beauce. Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy 1, Science de la terre - Pédologie. 286 p.
- Corwin D. L. et Lesch S. M., 2003 - Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. *Agronomy Journal*, 95, pp. 455-471.
- Dabas M., Hesse A., Jolivet A., Tabbagh A. et Ducomet G., 1989 - Intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle. *Science du Sol*, pp. 27, pp.65-68.
- Dabas M., Duval O., Bruand A. et Verbèqque B., 1995 - Cartographie électrique en continu : Apports à la connaissance d'une couverture de sol développée sur matériaux deltaïques. *Étude et Gestion des Sols*, 2(4), pp. 257-268.
- Dabas M., Brisard A., Tabbagh J., Boigontier D., 2000 - Use of a new sub-metric multi-depth soil imaging system (MuCEP). *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*, Bloomington, Minnesota, USA. Robert P.C., Rust R.H., Larson W.E. Eds.
- Dabas M. et Tabbagh A., 2003 - A comparison of EMI and DC methods used in soil mapping - Theoretical considerations for precision agriculture. *In: Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture*, Berlin, Germany. pp. 121-127. Stafford J.V. and Werner A. eds. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.

- Dagnélie P., 1992 - Statistique Théorique et Appliquée. Tome 1, les bases théoriques. 2^e éd. Les Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique. 492 p.
- Dampney P.M.R., King, J.A., Lark, R.M., Wheeler, H.C., Bradley, R.I., Mayr, T.R., 2003 - *In: Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture*, Berlin, Germany, pp. 135-140. Stafford, J.; Werner, A. eds. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, Netherlands.
- Domsch H., Giebel A., 2001 - Electrical conductivity of soils typical for the state of Brandenburg in Germany. *In: 3rd European Conference on Precision Agriculture*, Montpellier, France. pp. 373-378. Grenier G. and Blackmore S. Eds.
- Fedoroff N., 1973 - notice sur la Pédogenèse dans le secteur de Pathay. pp. 6-7, *In: Gigot Cl., Desprez N., Fedoroff N., Ferdière A.* 1973. Carte géologique à 1/50 000. Patay. XXI-19. Notice.
- Gigot C. et Desprez N., 1976 - Carte géologique de la France à 1/50 000 - Voves, XXI-17. BRGM, Orléans. + Notice (Gigot, C., Desprez, N. et Ferdière, A.)
- 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. pp. 54-59.
- Gras R., 1994. Sols caillouteux et production végétale. Éditions INRA, Paris. 175 p.
- Gras F., Hesse A., Tillier C., Tessier D. et Zimmer D., 1997 - La prospection électrique : une méthode adaptée à la cartographie et à la connaissance de l'état hydrique des sols - Cas des sols de Lorraine. *Étude et Gestion des Sols*, 4(3), pp. 161-174.
- Hesse A., 1978 - Manuel de prospection géophysique appliqué à la reconnaissance archéologique. Centre de Recherches sur les Techniques Gréco-Romaines 8, Université de Dijon, 127 p.
- Hesse A., Jolivet A., Tabbagh A., 1986 - New prospects in shallow depth electrical surveying for archaeological and pedological applications. *Geophysics* 51(3) pp. 585-594.
- Jamagne M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Annales Agronomiques*, vol. 18, n° hors série - en collaboration avec Maucorps J., Hébert J., Bliet L., Boutemy R., Rivière J.-M. et Mathieu C. - Paris - INRA - Station agronomique, 02, Laon. 142 p.
- Johnson C. K., Doran J. W., Duke, H. R., Wienhold, B. J., Eskridge K. M. et Shanahan, J. F., 2001 - Field-Scale Electrical Conductivity Mapping for Delineating Soil Condition. *Soil Science Society of America Journal*, 65(6), pp. 1829-1837.
- King J.A., Dampney P.M.R., Lark R.M., Mayr T.R. et Bradley R.I., 2001 - Sensing Soil Spatial Variability by Electromagnetic Induction (EMI) : Its Potential in Precision Farming. *In: Proceeding of the 3rd European Conference on Precision Agriculture*, Montpellier, France. pp. 419-424. Grenier G. and Blackmore S. Eds.
- Lorain J.-M., 1973 - la géologie du calcaire de Beauce. pp. 14-49, *In: Le Calcaire de Beauce. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées. Spécial U*, 78. pp. 54-59.
- Lück E., Eisenreich, M., 2001 - Electrical Conductivity mapping for precision agriculture. *In: Proceeding of the 3rd European Conference on Precision Agriculture*, Montpellier, France. pp. 425-429. Grenier G. and Blackmore S. Eds.
- Lück E, Rühlmann J. and Spangenberg U., 2005 - Physical background of soil EC mapping: laboratory, theoretical and field studies. *In: Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture*, Uppsala, Sweden. pp. 417-424. Stafford J.V. Ed., Wageningen Academic Publishers, The Netherlands.
- Lund E.D.; Christy, C.D.; Drummond, P.E., 1999 - Practical applications of soil electrical conductivity mapping. *In: Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture*, Odense, Denmark. pp. 771-779. Stafford, J.V. Ed. Sheffield Academic Press, Sheffield, UK.
- Menillet F., 1987 - Les meulrières du bassin de Paris (France) et les faciès associés - Rôle des altérations supergènes néogènes au Quaternaire ancien dans leur genèse. Thèse Dr. ès Sc., Institut de Géologie, Strasbourg. 485 p.
- Michot D., 2003 - Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, Sc. de la Terre - Pédologie - Géophysique. 388 p. + annexes.
- Michot D., Panissod C., Dorigny A., Bourennane H., Renaux B., Couturier A., Isambert M., King D. et Tabbagh A., 1997 - Cartographie géophysique des sols et des formations superficielles - Cas du "Grisson" en forêt de Fréteval (Loir et Cher). pp. 53-57. *In: Colloque GEOFCAN. Géophysique des sols et des formations superficielles*. BRGM, INRA, ORSTOM, UPMC. Bondy, France.
- Mueller T. G., Hartsock N. J., Stombaugh T. S., Shearer S. A., Cornelius P. L. et Barnhisel R. I., 2003 - Soil Electrical Conductivity Map Variability in Limestone Soils Overlain by Loess. *Agronomy Journal*, 95, pp. 496-507.
- Panissod C., 1997 - Prospection électrique et électrostatique à faible profondeur à l'aide de systèmes multipôles permettant la description directe des structures en 3-D. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 238 p.
- Panissod C., Dabas M., Jolivet A. et Tabbagh A., 1997 - A Novel Mobile Multipole System (MU.C.E.P.) for shallow (0-3m) geoelectrical investigation: The 'Vol-de-canards' arrays. *Geophysical Prospecting*, 45, pp. 983-1002.
- Parlement européen et Conseil, 2000 - Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Journal officiel des Communautés européennes*, Édition de langue française, 43^e année, 22/12/2000 (L327 ; ISSN 0378-7060). 72 pp.
- Rémy J.-C., 2005 - Méthodologie pour l'évaluation des terres : contraintes pédologiques et facteurs limitant l'utilisation des sols. pp. 694-714, *In: Sols et Environnement (ouvrage) ; Girard M.-C., Walter C., Berthelin J., Morel J.-L.* Eds., Dunod, Paris, France. 832 p.
- Robain H., Descloîtres M., Ritz M. et Atangana Q. Y., 1996 - A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *Journal of Applied Geophysics*, 34, pp. 237-253.
- Robert P.C., 1999 - Precision Agriculture: Research needs and status in the USA. *In: Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture*, Odense, Denmark. pp. 19-34. Stafford J.V. Ed. Sheffield Academic Press, Sheffield, UK.
- Schnebelen N., Nicoullaud B., Bourennane H., Couturier A., Verbègue B., Revalier C., Bruand A., Ledoux E., 2004 - The STICS model to predict nitrate leaching following agricultural practices. *Agronomie*, 24(6-7), pp. 423-235.
- Sudduth K.A., Drummond, S.T., Kitchen, N.R., 2001 - Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31(3), pp. 239-264.
- Tabbagh A., Dabas M., Hesse A. et Panissod C., 2000 - Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation. *Geoderma*, 97(3-4), pp. 393-404.
- Wijkmark L., Lindholm R. et Nissen K. 2005 - Uniform potato quality with site-specific potassium application. *In: Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture*, Uppsala, Sweden. pp. 393-400. Stafford J.V. Ed. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.