

# La prospection électrique : une méthode adaptée à la cartographie et à la connaissance de l'état hydrique des sols

## Cas des sols de Lorraine

F. Gras<sup>(1)</sup>, A. Hesse<sup>(2)</sup>, C. Tillier<sup>(3)</sup>, D. Tessier<sup>(3)</sup> et D. Zimmer<sup>(4)</sup>

- (1) Centre de Pédologie Biologique du C.N.R.S., UPR 6831 associée à l'Université Henri Poincaré (Nancy I), BP 5, F- 54501 Vandœuvre- lès- Nancy CEDEX  
(2) Centre de Recherches Géophysiques du C.N.R.S., Garchy, 58150 Pouilly-sur-Loire  
(3) INRA, Science du Sol, Route de Saint- Cyr, 78000 Versailles  
(4) CEMAGREF, Division Ouvrage pour le Drainage et l'Etanchéité, 92185 Antony CEDEX

### RÉSUMÉ

La prospection pédologique conventionnelle permet généralement de stratifier la couverture pédologique en un nombre plus ou moins important d'unités cartographiques à partir d'unités typologiques. Si cette approche est adaptée pour des échelles moyennes à grandes, une difficulté subsiste cependant pour délimiter des unités cartographiques à très grande échelle. Pour répondre à cet objectif, une méthode de prospection électrique basée sur la mesure des résistivités apparentes du sol, la méthode WENNER, a été utilisée suivant deux variantes, à savoir WENNER Normal et WENNER Dipôle-Dipôle. Elle a permis de réaliser des profils électriques et des cartes de résistivité sur un même site. La comparaison entre les dispositifs a montré que le dispositif WENNER Normal est adapté aux unités de sol dont la dimension dépasse le décimètre. Le dispositif WENNER Dipôle-Dipôle apparaît plus approprié à l'étude de la couverture pédologique quand la variabilité spatiale est à l'échelle métrique. Les profils électriques contribuent à localiser rapidement les unités cartographiques telles qu'elles se succèdent le long d'une toposéquence. Les cartes de résistivité, de leur côté, confortent les informations précédentes et permettent de localiser à très grande échelle des unités cartographiques de faible dimension et des discontinuités pédologiques locales. Les auteurs montrent que la résistivité dépend étroitement de l'état hydrique du sol. Les cartes de résistivité permettent en particulier de localiser les nappes peu profondes.

### Mots clés

Géophysique - résistivité - pédologie - cartographie - variabilité spatiale - eau du sol

### SUMMARY

#### **THE ELECTRICAL PROSPECTING : A METHOD FOR SURVEYING AND KNOWLEDGE OF WATER STATE OF SOILS Application to soils of Lorraine (Eastern France)**

Conventional soil survey usually stratifies the pedological continuum in soil units on the basis of a soil unit typology. Because this approach does not always allows to draw accurate limits, the authors measured the electrical soil resistivity by using the WENNER method. Two configurations of the device were used and two types of investigations were conducted : electrical profiles and resistivity

mapping. The study was made in an area near Vittel, a small town of Eastern France. The geological substratum is characterized by the short-distance succession of limestone, marl, dolomite and recents deposits (Fig. 1). Eight types of soils were identified and their profiles were described and analysed along a toposequence (table 1, table 2). The method was used according to two configurations. The first one, called WENNER Normal, is efficient when the dimensions of the mapping units are larger than ten meters. The second one is the WENNER Dipôle-Dipôle which better fitted for very short-distance variability, particularly for separating strong differentiations along the soil profile and soil types (Fig. 2, 3, and 5). The different electrical profiles allow to locate, with a good accuracy, the main mapping units along the toposequence (Fig 4). The resistivity maps secur the previous informations and allow to survey the mapping units at a very large scale, even in an heterogeneous area (Fig 6). Moreover, it appears that the soil resistivity depends on soil water potential and on the watertable depth (Fig 7, tab 3). It is concluded that resistivity maps can be used for locating shallow-depth water table in soils, especially when used in appropriate period, for instance during winter in Vittel area..

#### **Key-words**

Geophysics, resistivity, soil survey, spatial variability, water in soil

#### **RESUMEN**

#### **LA PROSPECCIÓN ELÉCTRICA : UN MÉTODO ADAPTADO A LA CARTOGRAFÍA Y AL CONOCIMIENTO DEL ESTADO HÍDRICO DE LOS SUELOS**

#### **El caso de los suelos de " Lorraine, Francia "**

La prospección pedológica convencional permite generalmente estratificar la cubierta pedológica en un numero más o menos importante de unidades cartográficas a partir de unidades tipológicas. Si este enfoque está adaptado para escalas medias y grandes, una dificultad subsiste sin embargo para delimitar unidades cartográficas a muy grandes escalas. Para responder a este objetivo, un método de prospección eléctrico basado sobre la medida de las resistividades aparentes del suelo; el método Wenner fue usado según dos variantes, el Wenner normal y el Wenner "bipolo-bipolo". Ha permitido realizar perfiles eléctricos y mapas de resistividades sobre el mismo sitio. La comparación entre los dispositivos mostró que el dispositivo bipolo-bipolo aparece más apropiado al estudio de la cubierta pedológica cuando la variabilidad espacial se sitúa a la escala métrica. Los perfiles eléctricos contribuyen a localizar rápidamente las unidades cartográficas como se suceden a lo largo de una toposecuencia. Los mapas de resistividades confirman las informaciones precedentes y permiten localizar a muy grande escala unidades cartográficas de pequeñas dimensiones y discontinuidades pedológicas locales. Los autores muestran que la resistividad depende estrechamente del estado hídrico del suelo. Los mapas de resistividades permiten, en particular, localizar los mantos freáticos poco profundos.

#### **Palabras claves**

Geofísica, resistividad, pedología, variabilidad espacial, agua del suelo.

On sait que les propriétés de rétention et de transfert de l'eau dans les sols dépendent fortement du type de sol. Ces propriétés peuvent cependant varier très fortement à l'intérieur même d'une unité typologique et on observe alors une variance importante de leurs propriétés (Wilding et Drees, 1983; Bouma, 1989; Burrough *et al.*, 1994). Des études récentes ont permis de montrer la pertinence et l'efficacité d'une carte pédologique dans la prévision des propriétés hydriques et hydrauliques à l'échelle d'un territoire donné. La fiabilité de la prédiction n'est cependant pas indépendante de la typologie des sols à laquelle on se réfère et dont la qualité dépend de l'échelle à laquelle s'est effectuée la prospection (Leenhardt *et al.*, 1994). A grande échelle on remarque souvent que la prise en compte de critères intrinsèques aux sols comme la granulométrie, la capacité d'échange en cations ou la densité apparente apparaît pertinente dans l'évaluation des propriétés. Quant à la méthode de prospection pédologique, son choix joue directement sur la précision des unités cartographiques et la spatialisation des données exige souvent la collecte d'un grand nombre d'échantillons pour être crédible. Le pédologue est alors confronté à des problèmes de coût et de temps pour l'élaboration de cartes thématiques. Ainsi, "la principale pierre d'achoppement de meilleures études de la variabilité spatiale est le manque de données. Les méthodes doivent être développées pour rassembler rapidement les données pertinentes en quantité importante" (Burrough *et al.*, 1994).

C'est à l'échelle décimétrique, voire à des niveaux d'organisation beaucoup plus fins que doivent souvent être déterminées certaines structures pour rendre compte des propriétés hydriques et hydrauliques des sols (Van Lanen *et al.*, 1992). Or les méthodes basées sur l'imagerie satellitaire ne donnent pas une résolution suffisante ni dans le temps ni dans l'espace. En revanche, un certain nombre d'études ont montré l'intérêt des méthodes géophysiques de surface. Les méthodes de mesures électromagnétiques basées sur la réponse électrique des constituants du sol à des impulsions électromagnétiques ont surtout été utilisées par des chercheurs anglo-saxons (Rhoades *et al.*, 1976; Brus *et al.*, 1992; Kachanoski *et al.*, 1988). Les méthodes de mesures de la résistivité électrique ont plutôt été mises en œuvre en France et en Afrique (Bottraud *et al.*, 1984; Dabas *et al.*, 1989; Lamotte *et al.*, 1994; Dabas *et al.*, 1995).

Pour atteindre rapidement les objectifs d'une étude sur les transferts d'eau et de nitrates vers un aquifère d'eau minérale, nous avons cherché à appliquer une de ces dernières méthodes à l'étude de la couverture pédologique d'une région carbonatée fissurée et karstifiée de la Lorraine.

Une cartographie pédologique conventionnelle à l'échelle du 1/25000 (Gras *et al.*, 1993) a montré la très grande variabilité spatiale de cette couverture. L'échelle d'étude s'est très vite révélée comme trop imprécise pour choisir l'emplacement de

stations de mesures tensiométriques. Après étude des matériaux en laboratoire, nous avons opté pour une méthode de mesure de la résistivité électrique appelée "méthode WENNER" (Hesse, 1978). Deux variantes de cette technique désignées par "Wenner Normal" et "Wenner dipôle- dipôle" ont été utilisées.

Jusqu'à présent, contrairement aux méthodes de mesure électromagnétiques (Kachanoski *et al.*, 1988), les méthodes de résistivité ont été peu envisagées pour rendre compte de l'état hydrique. Dans cette perspective, la méthode a été utilisée au cours de la période hivernale et après des épisodes pluvieux. Nous pouvons ainsi comparer les valeurs de résistivité obtenues au champ avec les données sur la réserve en eau des sols obtenues en laboratoire (Tessier et Berrier, 1979) et avec les pressions de l'eau du sol mesurées sur le terrain par tensiométrie (Zimmer, 1988 a et b).

L'objectif de cet article est triple :

- Etablir dans une zone représentative du territoire étudié, l'aptitude de la méthode de résistivité à identifier et à délimiter les différentes unités typologiques avec une précision comprise entre le mètre et le décimètre.
- Déterminer la fiabilité d'une cartographie électrique pour réaliser une carte pédologique sur la base d'une classification conçue pour une cartographie à très grande échelle.
- Mettre en évidence, en période hivernale, la relation entre l'état hydrique et la résistivité électrique du sol, au même moment.

## LA MÉTHODE DES RÉSISTIVITÉS ÉLECTRIQUES

La mesure des résistivités électriques a été réalisée en utilisant des courants basse fréquence injectés dans le sol. Cette méthode de surface est souvent employée pour l'étude du sous-sol proche et plus particulièrement pour la reconnaissance archéologique (Hesse, 1978; Hesse *et al.*, 1986). Elle n'a été adaptée aux études pédologiques que dans de rares occasions (Bottraud *et al.*, 1984; Dabas *et al.*, 1989; Lamotte *et al.*, 1994; Dabas *et al.*, 1995). Son principe consiste à injecter un courant d'intensité (I) connue entre deux électrodes A et B introduites dans le sol. Le potentiel créé par la circulation du courant est mesuré aux bornes de deux autres électrodes M et N sous forme d'une différence  $\Delta V$ . La résistance R opposée par le sol au passage du courant est caractérisée par le rapport  $\Delta V/I$  et la résistivité apparente du sol peut être calculée par la formule suivante :

$$\rho = K (\Delta V/I),$$

où  $\rho$  = résistivité ( $\Omega m$ ) et K = coefficient géométrique dépendant de la configuration du quadripôle.

Deux configurations ont été adoptées : la configuration Wenner Normal (WN) dans laquelle les 2 électrodes de

mesures sont placées entre les électrodes d'injection suivant l'ordre AMNB, et la configuration Wenner Dipôle-Dipôle (WDD) dans laquelle les électrodes de mesure sont décalées par rapport aux électrodes d'injection suivant l'ordre ABMN. Les deux mesures ont été réalisées successivement avec les mêmes électrodes alignées et équidistantes. A cet effet, il suffit de permuter les connexions en utilisant un double commutateur.

La distance ( $a$ ) séparant deux électrodes permet d'estimer empiriquement la profondeur d'investigation, au maximum égale à  $3a/4$  (Hesse, 1978). En fait, la résistivité apparente intègre les différentes résistivités rencontrées sur tout le volume concerné par le passage du courant injecté. La différence de volume prospecté dans les deux configurations explique les écarts plus ou moins importants entre les valeurs de WN et WDD.

Concrètement, trois modalités de prospection ont été réalisées au cours de cette étude :

- des profils électriques, en WN et WDD appelés aussi traînés, en déplaçant le quadripôle de station en station suivant un tracé rectiligne. La distance  $a$  est égale à 2 mètres et le pas de mesure séparant les stations est variable (2 ou 4 mètres),

- des cartes de résistivité en WN sur des zones tests, en déplaçant le quadripôle suivant des profils parallèles les uns aux autres, l'écartement des électrodes  $a$  étant de 2 mètres et les pas de mesure de 4 m.,

- des sondages électriques en déplaçant les électrodes symétriquement par rapport à un point fixe, de sorte que l'écart entre les électrodes augmente progressivement. Ainsi le volume de la zone prospectée croît avec l'écartement des électrodes et la valeur obtenue est affectée à la profondeur estimée en dessous du point central du quadripôle.

## LA RÉGION ET LE SITE D'ÉTUDE

La région de Vittel, célèbre pour ses eaux minérales, se trouve dans le département des Vosges (Est de la France). Elle est constituée d'un plateau de 4000 ha, d'altitude comprise entre 400 et 450 m, entaillé par deux petites rivières et de nombreuses vallées sèches.

Le substratum appartient au Muschelkalk supérieur et comprend les formations suivantes, depuis les plus anciennes jusqu'aux plus récentes : alternance de marnes et de bancs calcaires (couches à cératites), dolomie (dolomie de Vittel), argiles et couches de dolomie (Lettenkohle). Les épaisseurs moyennes de ces unités sont respectivement de 26, 7 et 7 mètres. La structure générale est monoclinale avec un pendage de 2 à 4° vers le N.O. Deux accidents tectoniques majeurs qui ont engendré une forte fracturation du substratum sont susceptibles d'affecter les mouvements d'eau en profondeur : la faille de Vittel, orientée N85- 90 E, et la faille d'Esley, orientée N360°E et N30°E.

Pour ce qui est des sols, huit unités typologiques ont été identifiées (Gras *et al.*, 1993) :

- Sols bruns calcaires et bruns calciques (classification CPCS 1967), [Calcareous et Calcic CAMBISOL, classification FAO-Unesco] sur les marnes et calcaires des couches à cératites;

- Sols bruns calcimagnésiques et sols bruns lessivés, [Calcic CAMBISOL et Orthic LUVISOL] sur la dolomie,

- PÉLOSOLS et PSEUDOGLEYS-PÉLOSOLS [Vertic CAMBISOL et Distric GLEYSOL] sur argile de la Lettenkohle,

- Sols bruns et sols bruns à pseudogley [Calcic CAMBISOL et Eutric FLUVISOL] sur dépôts récents.

La représentation cartographique au 1/25 000 de ces huit unités typologiques a soulevé des difficultés en raison de la très grande variabilité spatiale des sols. A dix unités cartographiques simples, il a été nécessaire d'ajouter quatre unités cartographiques complexes associant chacune deux unités typologiques; ces unités complexes recouvrent 37 % de la superficie totale du périmètre.

Afin de déterminer l'origine systématique ou aléatoire de cette variabilité et de la caractériser du point de vue de son amplitude et de sa localisation, une toposéquence de plusieurs centaines de mètres a été choisie (toposéquence de Lignéville) en raison de sa représentativité : relief faiblement incliné, affleurements des deux formations géologiques (couches à cératites et dolomie) et présence de dépôts alluviaux récents. La figure 1 donne une représentation schématique de la structure géologique de la zone étudiée et permet de localiser les profils pédologiques.

On distingue les sols suivants :

### sur les couches à cératites

- Unité 1 : Sol généralement calcaire moyennement profond plus ou moins caillouteux en profondeur à texture limono-argileuse reposant sur la marne.

- Unité 2 : Sol peu ou pas calcaire sans cailloux à texture argilo-limoneuse ou argileuse développé à partir de la marne.

- Unité 3 : Sol très superficiel, caillouteux et calcaire reposant à faible profondeur sur les bancs de calcaires durs et fracturés ;

### sur dolomie de Vittel

- Unité 5 : Sol moyennement profond, parfois caillouteux, carbonaté dès la surface, à texture limono-argileuse.

- Unité 6 : Sol sans éléments grossiers, moyennement profond à profond, totalement décarbonaté jusqu'à l'horizon d'altération de couleur crème de la dolomie, à texture argilo-limoneuse à argileuse;

### sur dépôts superficiels récents

- Unité 7 : Sol de pente moyennement profond à profond, carbonaté ou non, à texture limono-argileuse, avec un horizon à pseudo-gley plus ou moins profond.

- Unité 8 : Sol de fond de vallée très profond, carbonaté ou

non, à texture limono-argileuse avec un horizon à pseudo-gley plus ou moins profond.

Les caractéristiques morphologiques, physiques et chimiques les plus importantes observées sur les sols de cette toposéquence sont reportées dans le *tableau 1*.

Les propriétés physiques et hydriques du sol ont été déterminées sur les différents horizons des sols présents sur la toposéquence, à raison d'un profil par unité de sol. Les mesures de densité apparente ont été effectuées avec des cylindres de 250 cm<sup>3</sup>. L'étude de la rétention de l'eau a été faite sur des échantillons non remaniés à - 3 kPa (Tessier et Berrier, 1979) et - 1500 kPa (Richards, 1949). Les valeurs obtenues sur les horizons (B) et sur quatre matériaux de profondeur (marne, dolomie, dépôts superficiels), ainsi que les valeurs de la réserve en eau proche de la capacité au champ (- 3 kPa) et de la réserve en eau utile jusqu'à la roche-mère sont données *tableau 2*.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Profils électriques le long d'une toposéquence

Ils ont été réalisés suivant deux types de configurations, Wenner Normal (WN) et Wenner dipôle-dipôle (WDD) (*figure 2*).

Les valeurs de résistivités enregistrées peuvent être considérées comme moyennes à faibles si on les compare à celles enregistrées avec la même méthode sur d'autres sols de France (Dabas *et al.*, 1989; Dabas *et al.*, 1995). Sur les tracés, WN et WDD, on peut distinguer, d'une part, des oscillations d'amplitude importante (quelques dizaines d'ohms-mètres) et, d'autre part, des pics d'amplitude plus faible (quelques ohms-mètres) et de plus grande fréquence. Les profils de résistivité sont similaires pour les deux configurations; par contre, les amplitudes sont toujours plus importantes avec WDD. Il est particulièrement intéressant de confronter les résultats obtenus avec WDD et l'organisation du système litho-morpho-pédologique. Nous pouvons distinguer quatre sections :

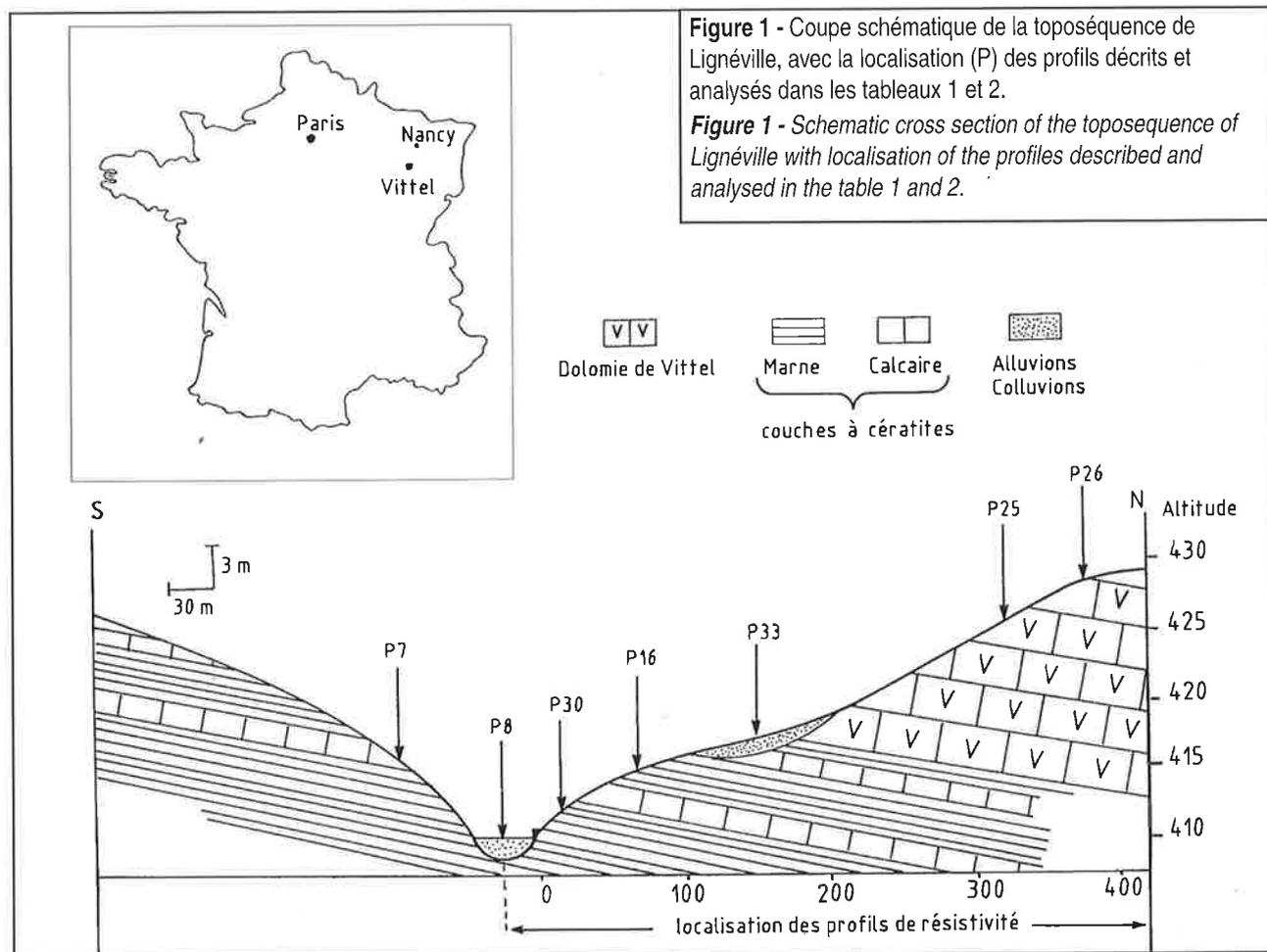


Tableau 1 - Principaux caractères des sols de la toposéquence de Lignéville

Table 1 - Main soil characteristics of the catena of Lignéville

Roches	Unité de sol	N° profil	Horizon	Epaisseur moyenne (m)	Cailloux %	Argile %	Limon %	Carbonate %	CEC me/100 g	Mg éch. (Ca+Mg) éch.
Couches à Cératite	1	30	A	0,15	0	26	60	43	9,7	0,07
			(B)	0,30	0	26	54	50	9,0	0,05
			(B)k	0,20	10	60	34	57	8,4	0,03
	2	16	Ap	0,15	0	35	56	21	13,9	0,30
			(B)	0,40	0	48	43	27	15,1	0,34
			M	?	0	53	39	16,3	0,36	
	3	7	Ap	0,15	25	32	62	3	14,4	0,06
			(B)	0,25	25	46	48	40	13,6	0,04
			(B)Ck	0,15	50	21	48	53	6,0	0,03
Dolomie de Vittel	5	26	Ap	0,15	0	27	67	11	15,6	0,33
			(B)	0,25	0	21	73	9	16,2	0,27
			(B)Cf	0,20	25	16	76	61	10,8	0,35
	6	25	Ap	0,15	0	40	53	0	15,6	0,33
			(B)g	0,75	0	41	53	0	17,8	0,31
			(B)Cf	0,20	25	16	76	61	10,8	0,35
Dépôts colluviaux	7	33	Ap	0,15	0	29	57	0	18,7	0,30
			(B)	1,00	0	29	60	0	16,9	0,36
Dépôts alluviaux	8	8	Ap	0,25	0	29	65	7	17,4	0,26
			(B)	0,70	0	24	69	10	12,5	0,29
			(B)g	1,00	0	32	62	0	12,0	0,26

Tableau 2 - Propriétés physiques et hydriques des sols de la toposéquence de Lignéville.

Table 2 - Soil Air-Water properties of the catena of Lignéville

Unité de sol ou matériau	Densité apparente	$\Theta(3Kpa)$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\Theta(1500 Kpa)$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	AWC cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> d'eau a	RV (3Kpa) mm b	RU mm c
1	1,60	0,34	0,24	0,10	183	60
3		0,34	0,24	0,10	103	30
marne	1,85	0,33	0,27	0,06		
5	1,36	0,37	0,27	0,10	226	98
6	1,47	0,39	0,35	0,04	307	76
dolomie	1,70	0,40	0,29	0,11		
colluvions	1,36	0,31	0,23	0,08	250	67
alluvions	1,42	0,37	0,20	0,17	306	138

a  $AWC = \Theta(3Kpa) - \Theta(1500Kpa)$ 

b Réserve en eau du sol à la capacité au champ pour tous les horizons du sol, jusqu'à la roche-mère :

$$RV(3Kpa) = \sum_{k=1}^{k=K} \Theta_k(3Kpa) \times Z_k \times (1 - C)_k$$

avec :  $\Theta_k(3Kpa)$  : teneur en eau des mottes à la capacité au champ dans l'horizon k

Zk : épaisseur de l'horizon k C : charge en cailloux de l'horizon k

K : nombre d'horizons du sol c : Réserve utile du sol depuis la surface jusqu'à la roche-mère.

**Section A** (de 0 à 150 m) : elle débute dès la limite des dépôts alluviaux de fond de vallée et correspond approximativement aux affleurements de marnes et de calcaires des couches à cératites. Les valeurs de résistivités WDD les plus faibles se distribuent autour d'une valeur modale de 30  $\Omega\text{m}$  et les plus élevées entre deux valeurs modales de 47 et 53  $\Omega\text{m}$ .

**Section B** (de 150 à 205 m) : elle correspond à la partie médiane du versant où apparaît le contact entre couches à cératites et dolomie de Vittel. Les deux formations géologiques disparaissent sous des dépôts colluviaux limoneux. Les valeurs de résistivité WDD subissent des variations brutales passant successivement de 18  $\Omega\text{m}$  à 40  $\Omega\text{m}$  puis de nouveau à 20  $\Omega\text{m}$ .

**Section C** (de 207 m à 321 m) : c'est la partie la plus inclinée du versant, où affleure la base de la dolomie. Les valeurs de résistivité WDD diminuent très progressivement, de 40  $\Omega\text{m}$  à 25  $\Omega\text{m}$  (29  $\Omega\text{m}$  en moyenne).

**Section D** (de 323 m à 425 m) : c'est la partie supérieure du versant reposant sur la dolomie supérieure. La résistivité WDD est en moyenne plus élevée que précédemment (43  $\Omega\text{m}$ ), mais présente des oscillations importantes sur des distances faibles, de l'ordre de 15 à 20 m (deux valeurs modales de 35 et 45  $\Omega\text{m}$ ).

### Analyse des variogrammes

Sur la distance de 200 mètres correspondant à l'ensemble des deux profils WN et WDD, des variogrammes ont été construits (figure 3, WN global et figure 3, WDD global). L'intérêt des variogrammes est d'approcher la variabilité spatiale du sol (Wilding et Drees, 1983). On peut préciser l'erreur aléatoire qui revient à l'échantillonnage (effet pépité) pour chacune des techniques utilisées (WN ou WDD), ainsi que la portée, c'est à dire la distance à partir de laquelle la variance observée entre les mesures se trouve proche de la variance maximale. En ce qui concerne la portée, il apparaît d'abord qu'elle est plus faible pour WDD (10 m) que pour WN (16-18 m) (Figure 3). Les mesures WDD marquent mieux les variations latérales que les mesures WN et se traduisent en bonne logique par une amplification de la variance.

Trois sections ont fait, en outre, l'objet d'un examen détaillé et leurs variogrammes, établis sur des distances de quelques dizaines de mètres, sont représentées, également sur la figure 3.

**Section A** (figure 3 : courbe A) : l'absence d'effet de pépité indique un échantillonnage spatial suffisant (54 classes, 50 couples par classe). Par contre, la pente très forte et les valeurs élevées de variance, pour une distance de 30 m, indiquent une très forte variabilité spatiale dès la surface du sol. La variabilité systématique correspondant à la portée de 30 m est à mettre en relation avec la structure géo-morpho-pédologique, caractérisée ici par la présence de matériaux alternativement peu et fortement conducteurs.

**Section C** (figure 3 : courbe C) : sur cette section, le variogramme est bien structuré et l'échantillonnage nettement suffisant (33 classes, 50 couples par classe). L'effet de pépité, très faible, et l'augmentation faible et régulière de la variance indiquent que la structure du matériau est continue et correspond au passage progressif observé sur le profil d'une résistivité moyenne à une résistivité faible. La portée de 60 m est de l'ordre de grandeur de la section.

**Section D** (figure 3 : courbe D) : le variogramme présente un aspect chaotique, avec un effet de pépité important par rapport aux paliers. Nous en avons déduit que l'échantillonnage n'est pas satisfaisant.

Au total ceci indique que le dispositif WDD est mieux apte à mettre en évidence les frontières et les discontinuités de la couverture pédologique que le dispositif WN. On note aussi que l'écart entre WDD et WN est plus important pour les faibles distances que pour les plus fortes car WDD prend en compte la variabilité spatiale des horizons les plus superficiels du sol, alors que WN intègre la variabilité spatiale du sous-sol proche. Cette aptitude de WDD à mieux mettre en évidence les discontinuités du sol est à imputer à l'écart plus réduit des électrodes d'injection. Ainsi, *compte tenu du système étudié, le dispositif WDD apparaît beaucoup plus sensible aux variations de résistivité dans le volume de détection.*

### Relations avec la structure de la couverture pédologique

La confrontation entre les profils de résistivité dans chacune des sections et les observations recueillies au cours de la prospection pédologique conduit à proposer une répartition détaillée des différentes unités de sols décrites plus haut (figure 4).

En bas de pente, (section A), les deux "dômes" dont les résistivités sont voisines de 50  $\Omega\text{m}$  correspondent aux affleurements de bancs calcaires sur lesquelles se développent les sols de l'unité 3. De part et d'autre de ces "dômes", les valeurs de résistivités de l'ordre de 30  $\Omega\text{m}$  correspondent à la présence des niveaux marneux auxquels sont associées les unités de sol 1 et 2.

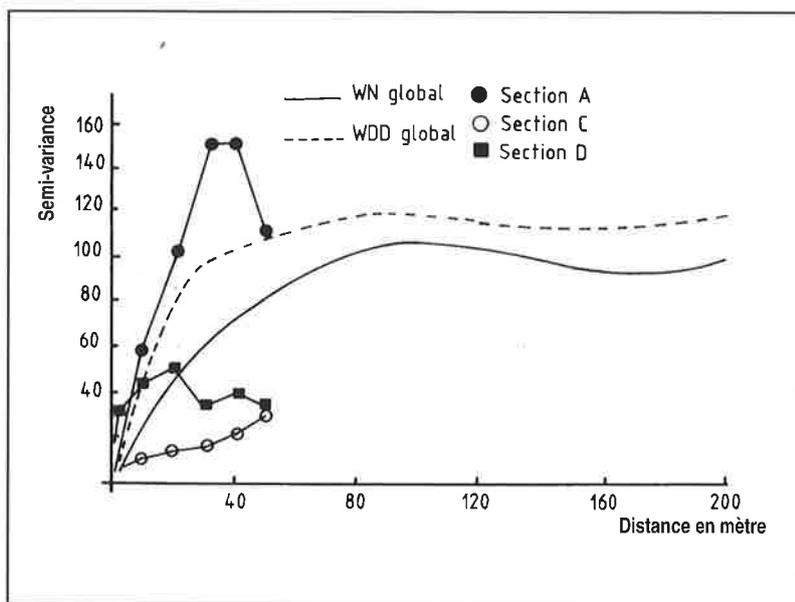
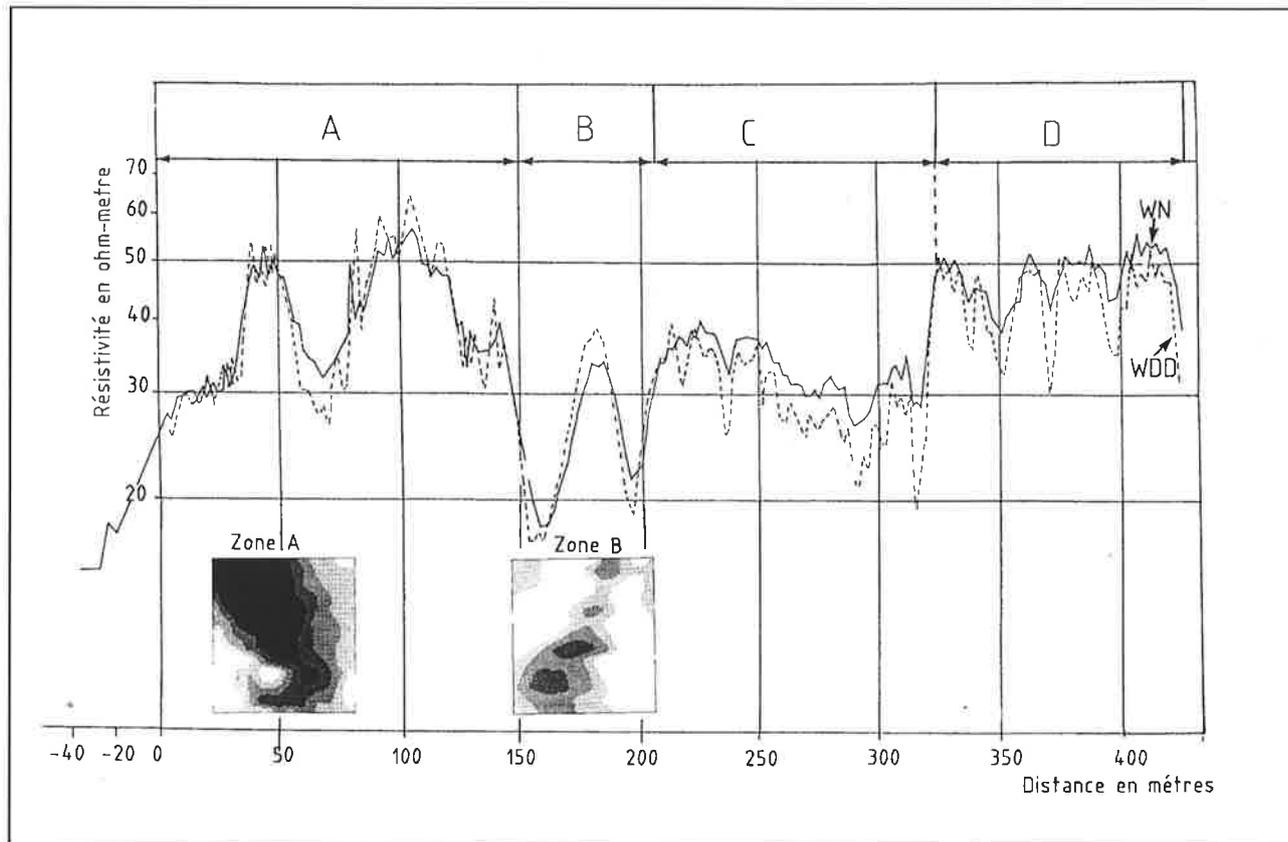
A mi-pente (section B), le contact entre couches à cératites et dolomie de Vittel disparaît sous un dépôt colluvial plus ou moins épais (unité 7) dans lequel les variations rapides de résistivité trouveront plus loin l'explication dans la présence d'une nappe plus ou moins profonde.

Plus haut dans le versant (section C) on atteint la base de la dolomie. Les variations de résistivité sont de faible amplitude et traduisent la présence d'une couverture pédologique relativement homogène identifiée à l'unité 6.

Dans la partie supérieure du versant, (section D), les deux profils WN et WDD sont beaucoup plus difficiles à interpréter. Une étude précise de la couverture pédologique a été réalisée à partir de 96 sondages à la tarière répartis le long de deux

**Figure 2** - Profils électriques dans la configuration Wenner Normal (trait plein) et dans la configuration Wenner Dipôle-Dipôle (trait discontinu). Les emplacements des deux zones cartographiées (A et B) sont également indiqués.

**Figure 2** - Electrical profiles in the normal Wenner configuration (continuous line) and in the dipole-dipole configuration (broken line). The places of the two surveyed areas (A and B) are pointed to.

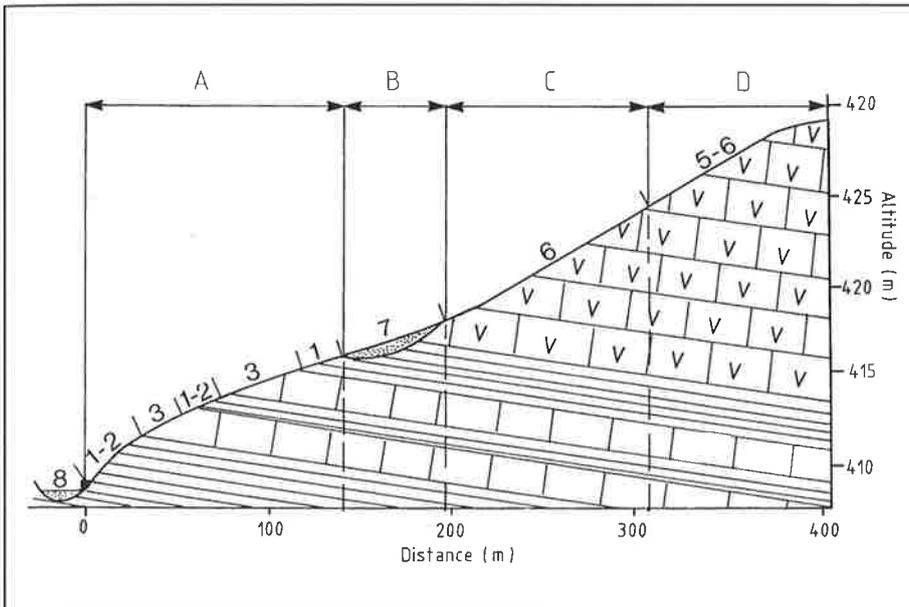


**Figure 3** - Variogrammes des résistivités électriques pour l'ensemble du profil (WN global et WDD global) et pour chacune des sections A,C,D..

**Figure 3** - Variograms of the resistivity measurements on the whole electric profile (WN global and WDD global) and for each section, A, C, D.

**Figure 4** - Distribution des unités de sol sur la toposéquence de Lignéville, établie en interprétant le profil de résistivité.

**Figure 4** - Spatial distribution of soils in the toposequence of Lignéville, as the result of the electrical profile interpretation



*Sols bruns sur couches à céralites*

1 - Sols moyennement profonds, peu caillouteux, généralement calcaires, à texture limono-argileuse, sur marne

2 - Sols moyennement profonds, sans cailloux, peu ou pas calcaires, à texture argilo-limoneuse à argileuse, sur marne

3 - Sols peu profonds, caillouteux, calcaires à texture limono-argileuse, sur dalle calcaire

*Sols bruns calcimagnésiques sur dolomie de Vittel*

5 - Sols moyennement profonds, peu caillouteux, moyennement carbonatés, à texture limono-argileuse, sur dolomie fissurée et altérée

6 - Sols moyennement profonds à profonds, sans cailloux, décarbonatés, à texture argilo-limoneuse à argileuse, sur dolomie fissurée et altérée

*Sols bruns sur dépôts récents*

7 - Sols profonds, sans cailloux, carbonatés ou non, à texture limono-argileuse, à hydromorphie temporaire de profondeur, sur dépôt colluvial

8 - Sols profonds, sans cailloux, carbonatés ou non, à texture limoneuse à argilo-limoneuse, à hydromorphie temporaire de surface, sur dépôt alluvial

transects de 74 m de long, parallèles au profil électrique et distants du transect de respectivement 50 et 60 m. Les deux coupes ainsi reconstituées (figure 5) permettent de se faire une idée de l'extrême variabilité de l'épaisseur de l'horizon (B) dans les deux unités 5 et 6, qui sont ici étroitement imbriquées. La morphologie "en poches" plus ou moins larges (entre 1,5 m et 20 m) et profondes (0,5 à 3 m) est une des caractéristiques des formations superficielles sur dolomie de cette région. La structure chaotique du variogramme est de toute évidence en relation avec cette structure en poches de la couverture pédologique. Celle-ci ne peut être appréhendée de façon fine par la mesure de la résistivité, qu'en utilisant la configuration WDD et en adoptant pour la distance "a" une valeur égale à un mètre (Gras et al., 1996)

### Etude de l'organisation spatiale des sols à l'aide de la cartographie électrique

Deux cartes de résistivité ont été réalisées dans deux zones témoins rectangulaires de même dimension (48 x 44 m), de part et d'autre du profil de résistivité et à proximité de certaines anomalies mises en évidence par ce profil (figure 6, zone A et zone B). Le dispositif mis en œuvre est WN 2 m, le pas de mesure sur chaque traîné et entre les traînés étant de 4 m.

- Dans la zone A, les variations de résistivité sont nettes, avec des gradients appréciables. La carte de résistivité confirme la présence d'une zone d'anomalie résistante de 60 à

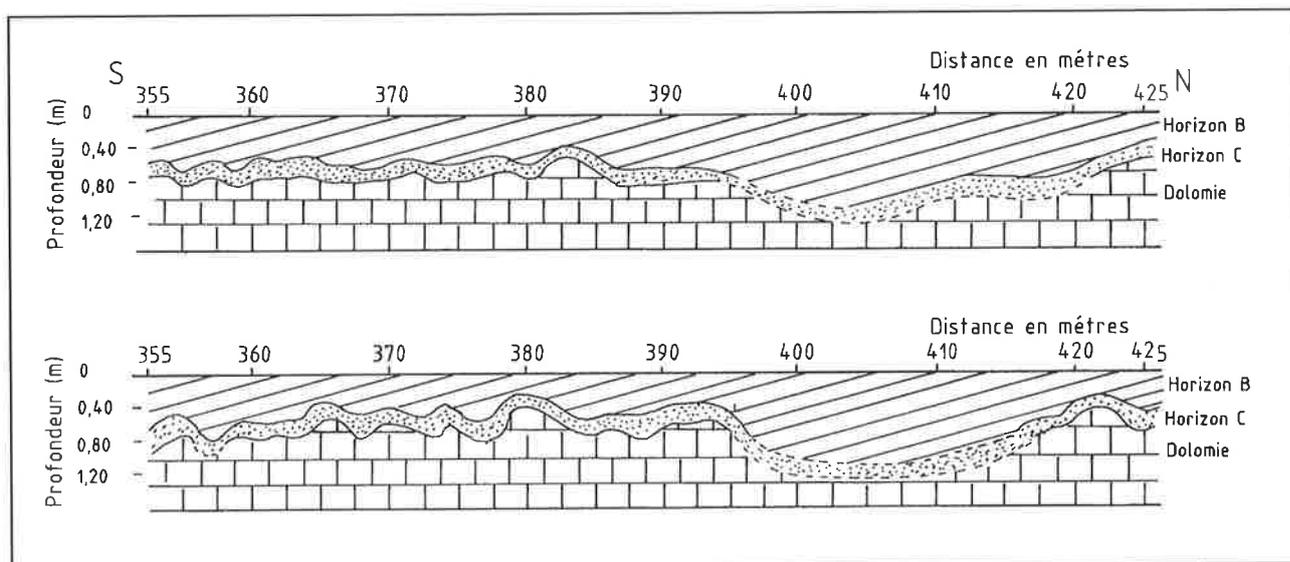
105  $\Omega\text{m}$  se présentant sous la forme d'une plage orientée NE/SO, large de 25 m environ. De part et d'autre de cette zone résistante existent deux zones de résistivité plus faible (40 à 60  $\Omega\text{m}$ ) se caractérisant par un gradient très progressif, orienté NO/SE.

- Dans la zone B, la cartographie met en évidence une bande étroite (8-12 m) de résistivité moyenne (52 à 77  $\Omega\text{m}$ ) séparant deux zones de résistivité beaucoup plus faible, inférieure à 50  $\Omega\text{m}$ .

Ces données ont été confrontées aux cartes pédologiques réalisées à très grande échelle et aux mêmes endroits (figure 6). Dans la zone A, la plage résistante centrale est clairement associée à l'existence d'une dalle calcaire recouverte de sols caillouteux superficiels appartenant à l'unité 3. Dans la partie moins résistante, les variations de résistivités sont plus graduelles. Elles permettent, néanmoins, la délimitation des deux unités 1 et 2 dont le seul caractère distinctif est la présence ou l'absence de cailloux. Cette interprétation a été confirmée par deux sondages géophysiques réalisés dans le sens Est-Ouest et recoupant cette zone. Ces sondages indiquent la présence dans sa partie médiane d'une couche résistante (100  $\Omega\text{m}$ ) entre 0,5 m et 2,5 m de profondeur et correspondant à un banc de calcaire dur, fortement fracturé par un réseau de diaclases subverticales, soit vides, soit remplies d'argiles d'illuviation. Nous en concluons que les diaclases jouent un rôle important en diminuant considérablement la

Figure 5 - Deux coupes longitudinales du sol à proximité du profil de résistivité (section D).

Figure 5 - Two longitudinal cross section of soil in the neighbour of the electric profile (section D)



résistivité de cette formation calcaire. Notons qu'à l'échelle du 1/25 000 et sur la base d'une prospection pédologique traditionnelle, ces trois unités n'avaient pu être délimitées.

Dans la zone B, la bande centrale est constituée par un sol limoneux profond décarbonaté, sans taches d'oxydo-réduction visibles, tandis que les secteurs peu résistants correspondent à un sol limoneux profond carbonaté, à taches d'oxydo-réduction visibles dès 15 cm (unité 7). Ici, c'est l'humidité et le degré d'hydromorphie du sol qui déterminent la résistivité.

*Cette expérience confirme donc que la cartographie électrique permet de déterminer, avec une très grande précision, les limites des unités de sol mises en évidence suivant les critères utilisés en cartographie pédologique.*

La méthode Wenner de mesure de la résistivité apparaît donc ici comme une méthode précise et rapide pour cartographier les sols à très grande échelle. La configuration WN est particulièrement adaptée pour localiser les unités cartographiques correspondant à des types de sols bien différenciés, si toutefois les limites sont suffisamment nettes et si l'extension en surface est de l'ordre du décimètre. En revanche, la configuration WDD est à conseiller chaque fois que l'on se trouve en présence d'une couverture de sol discontinu dans laquelle les variations spatiales sont à l'échelle métrique.

### Relations entre l'état hydrique du sol et la résistivité électrique

Une relation satisfaisante apparaît entre la réserve totale en eau du sol à la capacité au champ et la résistivité électrique WDD mesurée en décembre 1990 (figure 7). Il apparaît que la résistivi-

té la plus élevée correspond aux sols de l'unité 3 peu épais et caillouteux, tandis que les résistivités les plus faibles caractérisent les sols profonds, généralement hydromorphes, sur alluvions et colluvions. En revanche, les résistivités intermédiaires correspondent à des sols dont les réserves en eau à la capacité au champ varient de façon assez nette (entre 185 mm et 305 mm).

Au cours de l'hiver 90/91, des tensiomètres ont été installés sur onze sites de la toposéquence de Lignéville et ce, depuis l'horizon de surface jusqu'à l'horizon d'altération de la roche. Les relevés tensiométriques ont été effectués à un rythme bi-hebdomadaire. En outre, les pressions de l'eau ont servi à déterminer la cote du toit de la nappe (Zimmer, 1988a et b; Tillier, 1991).

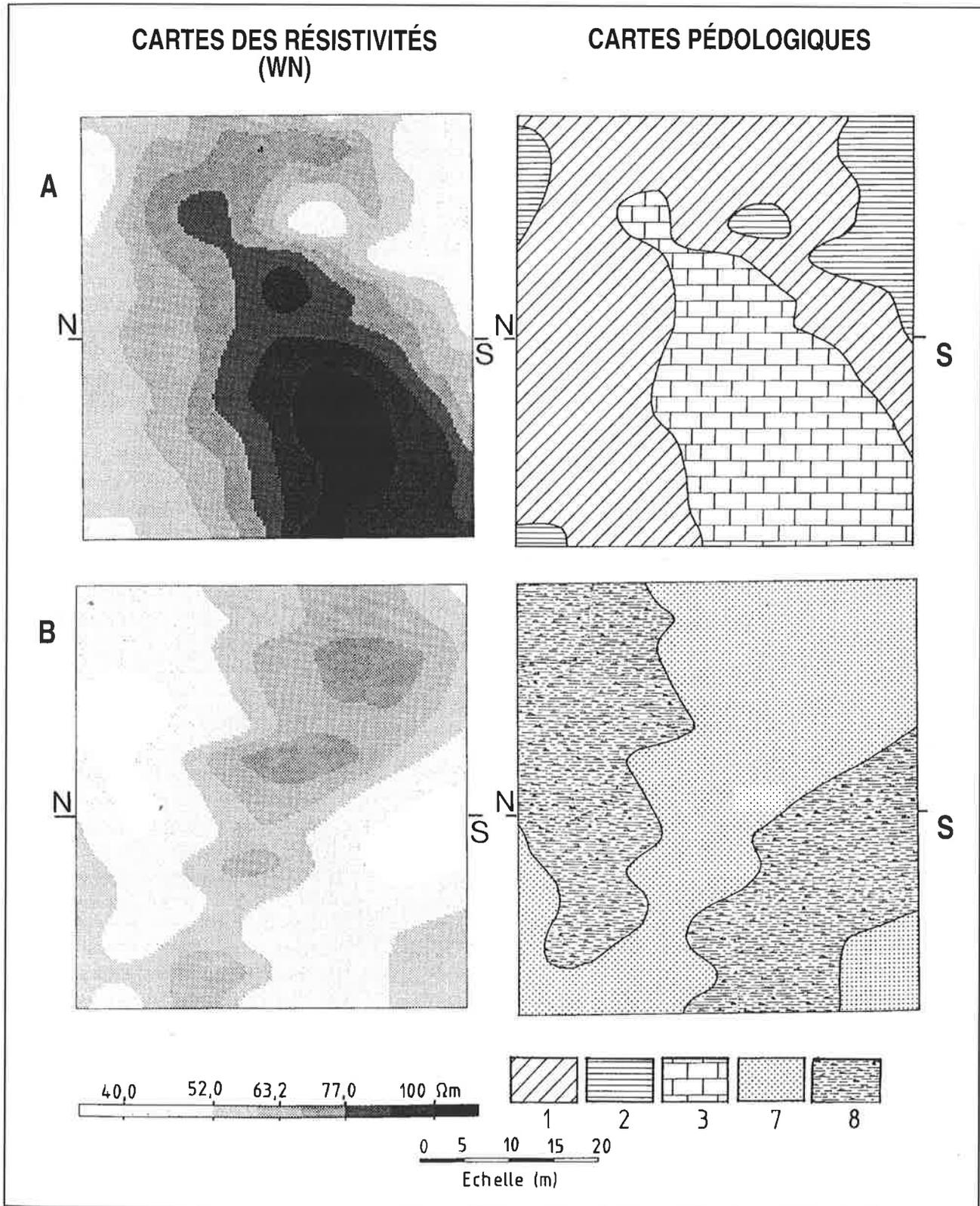
Les valeurs de la résistivité WDD et les gammes de pression d'eau mesurées entre le tensiomètre le plus proche de la surface du sol et le tensiomètre le plus profond pour les sites les plus caractéristiques, ainsi que la profondeur de la nappe, sont reportées dans le tableau 3.

Sur la marne, la résistivité est moyenne, le sol de l'unité 1 étant légèrement désaturé dans les horizons supérieurs et complètement saturé en dessous. Sur le banc calcaire, la résistivité élevée de l'unité 3 est à mettre en relation avec une désaturation beaucoup plus nette du sol.

Sur la dolomie, la résistivité est plus forte sur l'unité 5, où le sol est totalement ressuyé, que sur l'unité 6, où l'humidité du sol est proche de la saturation en eau dès 0,3 m de profondeur.

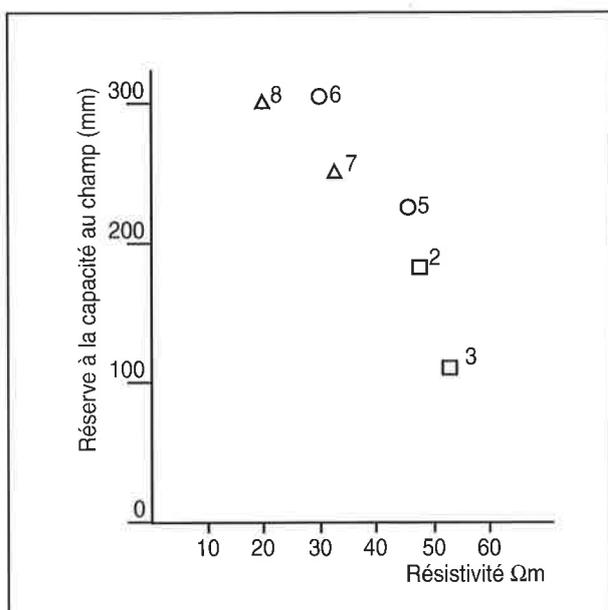
Enfin, sur les dépôts alluviaux, le maintien d'une nappe dès la surface du sol se traduit par des valeurs de résistivité très faibles. La situation des dépôts colluviaux de pente est proche de celle sur marne.

Figure 6 - Cartographie comparée des zones A et B. A gauche, cartes des résistivités; A droite cartes des unités de sol.  
 Figure 6 - Electrical survey (Left) compared with soils survey (Right) in the A and B areas.



**Figure 7** - Relation entre la résistivité et la réserve en eau du sol à la capacité au champ (Les chiffres indiquent les unités de sol correspondantes.)

**Figure 7** - Relationship between the soil resistivity and the available water reserve at the field-capacity (The numbers refer to the soil units.)



**Tableau 3** - Relations entre la résistivité du sol (WDD), la pression de l'eau des horizons supérieurs et la profondeur de la nappe (le 5 décembre 1990).

**Table 3** - Relationship between the soil resistivity (wdd), the water-pressure in the top-soil and the depth of the water-table (the 5th of december 1990)

Roche	Unité de sol	Résistivité Ωm	Pression cm d'eau	Profondeur de la nappe (cm)	
Couche à Cératites :	- marnes	1	30	- 20	saturation à - 70 cm ?
	- calcaire	3	80	- 50	
Dolomie	5	53	- 30 à - 50	absente	
	6	31	- 10 à - 20	- 1,30 m	
Dépôts colluviaux et alluviaux	7	23	- 10 à - 20	- 1,20 m	
	8	16,5	+ 150	submersion	

De cette étude, il ressort donc clairement que les variations de la résistivité du sol sur la toposéquence suivent, à une date donnée, les variations de la profondeur de la nappe et de la pression de l'eau à l'intérieur du profil pédologique. Comme la méthode Wenner intègre plus spécialement la « zone non saturée », elle est particulièrement apte à étudier les variations hydriques du profil pédologique. Dans la présente étude, l'écartement des électrodes (valeur de "a" égale à 2 mètres) nous apparaît la plus appropriée pour caractériser des sols relativement profonds, c'est à dire jusqu'à 1,5 m environ.

## CONCLUSIONS

Les variations du sol dans l'espace, qu'elles soient systématiques ou aléatoires, identifiées par une prospection pédologique à moyenne échelle, ont été confirmées et précisées localement par une prospection électrique à grande échelle.

La méthode des résistivités peut constituer un outil simple et efficace d'analyse de la variabilité spatiale sous les conditions suivantes :

- choix du dispositif (Wenner normal ou Wenner Dipôle-Dipôle) et choix de la distance "a" entre électrodes et du pas de mesure en fonction de la structure du système géo-morpho-pédologique (profondeur du sol, amplitude des variations, ..),
- choix de la période de mesure en fonction des contrastes

de résistivité entre les unités de sols à identifier, qui dépendent tout particulièrement de la profondeur de la nappe d'eau et de l'état du drainage du sol.

Les différents types de prospection ont leur intérêt propre :

- Les profils électriques, réalisés le long de toposéquences et lithoséquences préalablement repérées, permettent d'établir un parallélisme entre les anomalies de résistivité et les différentes unités de sols, ceci à très grande échelle. Il est également possible, grâce à l'analyse géostatistique, de juger de la qualité des mesures et de leur possible amélioration à l'aide d'une configuration et d'un pas de mesure appropriés.

- Les cartographies électriques localisées peuvent ensuite apporter des informations utiles pour la cartographie des unités complexes, à condition, encore une fois, que les dimensions des unités simples qui les constituent soient suffisantes, compte tenu de la portée des mesures de résistivité.

La prospection électrique de surfaces plus importantes peut alors être réalisée, en utilisant notamment un quadripôle mobile tracté, avec enregistrement en continu des variations de résistivité (Dabas *et al.*, 1989).

L'étude présente montre que dans un certain nombre de cas (séquence de roches alternativement marneuses et calcaires, contact entre deux matériaux de perméabilité différente), l'approche de la variabilité spatiale par la méthode des résistivités permet une meilleure différenciation des erreurs systématiques par rapport aux erreurs aléatoires. En revanche, cette distinction devient plus difficile lorsque la taille des unités pédologiques devient trop faible (poches d'argiles par exemple). Dans ce dernier cas, un meilleur ajustement des paramètres de mesure (écarts entre électrodes et pas de mesure) permet d'augmenter la précision. C'est ainsi que dans une expérience récente, la méthode des résistivités électriques a permis aux auteurs de délimiter des pédons dont la surface était comprise entre 10 et 100 m<sup>2</sup> (Gras *et al.*, 1996). Ce gain de précision a en même temps permis de vérifier que l'existence des poches d'altération n'était pas aléatoire, mais en relation avec un facteur de pédogenèse qui avait échappé au pédologue lors de la prospection.

Nous avons également montré l'intérêt de la mesure de la résistivité du sol en raison de l'influence de la profondeur de la nappe d'eau et de l'état de drainage. Certes, la prospection électrique ne remplace pas des mesures tensiométriques. Elle aide néanmoins, dès l'instant qu'une identification assez précise de la variabilité spatiale a été réalisée, à localiser les nappes de surface ou de subsurface.

La méthode semble pouvoir être adaptée à toute surface présentant des unités de sols alternativement perméables et imperméables. Au delà de la connaissance de ces régions hétérogènes, elle permet d'établir des corrélations entre les variations spatiales de l'état de drainage du sol avec les rendements d'une culture ou d'une succession culturale. Ainsi, l'approche spatiale, à l'aide de la cartographie électrique, devrait être introduite dans les méthodes quantitatives ou qualitatives d'évaluation physique des terres.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Société Générale des Eaux Minérales de Vittel, qui a contribué, par son aide financière et technique, à la réalisation de cette étude.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bottraud J.C., Bornand M. et Servat E., 1984 - Mesures de résistivité appliquées à la cartographie en pédologie. *Science du sol*, 4, 279-292.
- Bouma J., 1989 - Using soil survey data for quantitative land evaluation. In : *Advances in Soil Science*. (ed. B.A. Stewart), pp. 177-213. Springer Verlag, Berlin
- Burrough P.A., Bouma J. et Yates S.R., 1994 - The state of the art in pedometrics. *Geoderma*, 62, 311-326
- Brus H.J., Knotters M., van Dooremolen W.A., vankernebeek P., et van Seeters R.J.M., 1992 - The use of electromagnetic measurements of apparent soil conductivity to predict the boulder clay depth. *Geoderma*, 55, 79-93.
- 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*, 27, 65-68.
- Dabas M., Duval O., Bruand A. et Verbeque B., 1995 - Cartographie électrique en continu : apport à la connaissance d'une couverture de sols développés sur matériaux deltaïques. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 257-268.
- Gras F., Gury M. et Faivre P., 1993 - Les sols du périmètre de Vittel. Description, caractérisation, régime hydrique. In : *Agriculture et qualité des eaux ; diagnostic et propositions pour un périmètre de protection*. 334 p. Carte Pédologique en annexe. INRA-SAD, Paris.
- Gras F., Hesse A., Panissod C., Deffontaines B. et Tillier C., 1996 - La cartographie électrique et son apport à l'étude de la variabilité spatiale du sol et à la connaissance des transferts de nitrates : application à une région carbonatée fracturée, Vittel (Est de la France). *Journées de l'A.F.E.S.*, Rennes 23-25 Avril 1996.
- Hesse A., 1978 - Manuel de prospection géophysique appliquée à la reconnaissance archéologique. Université de Bourgogne, Centre de Recherche sur les Techniques Gréco-romaines, 127 p.
- Hesse A., Jolivet A. et Tabbagh A., 1986 - New prospects in shallow depth electrical surveying for archaeological and pedological applications. *Geophysics*, 51, 585-594.
- Kachanoski R.G., Grégorish E.G., Vanwesenbeeck I.J., 1988 - Estimating spatial variations of soil water content using non contacting electromagnetic inductive methods. *Can.J. Soil Sci.*, 68 : 715-722.
- Lamotte M., Bruand A., Dabas M., Donfack P., Gabalda C., Hesse A., Humbel F.X. et Robain H., 1994 - Distribution d'un horizon à forte cohésion au sein d'une couverture de sol aride du Nord Cameroun : apport d'une prospection électrique. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 318, série II, 961-968.
- Rhoades J.D., Roats P.A.C., et Prathers R.J., 1976 - Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society Journal*, 40, 651-655
- Richards L.A., 1949 - Methods of measuring soil moisture tension. *Soil sci.*, 68 : 95-112
- Tessier D. et Berrier J., 1979 - Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols humides soumis à différents pF. *Science du Sol*, 1, 67-82.
- Tillier C., 1991 - Dynamique de l'eau dans le périmètre d'alimentation de la source de Vittel. Relation avec la distribution des sols dans le paysage et la géologie. *Mémoire de D.E.A.*, Université Paris VI.
- Van Lanen H.A.J., Hacktenbroeke M.J.D., Bouma J., et de Groot W. J.M., 1992 - A mixed qualitative/quantitative physical land evaluation methodology. *Geoderma*, 55, 37-54.
- Wilding L.P., et Drees L.E., 1983 - Spatial variability and pedology. In *Pedogenesis and soil taxonomy*. Part I. Concepts and interactions. *Developments in soil Science*, 11A, pp. 83-113. Elsevier Amsterdam.
- Zimmer D., 1988 a - Comparaison de mesures de hauteurs de nappe par tensiomètres et piézomètres. *Bulletin du G.F.H.N.*, 23, 53-75.
- Zimmer D., 1988 b - Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. *Thèse Université Paris VI*, 321 p.