

# MESURES DE RESISTIVITE APPLIQUEES A LA CARTOGRAPHIE EN PEDOLOGIE

J.C. BOTTRAUD<sup>1</sup>, M. BORNAND<sup>1</sup>, E. SERVAT<sup>1</sup>

---

## RESUME

*La résistivité électrique est un paramètre encore peu utilisé pour la caractérisation des sols. Dans un premier temps, les principes de mesures de la résistivité électrique et de leur interprétation en cartographie sont brièvement rappelés. Puis, quelques-unes des particularités d'utilisation de ces techniques dans l'étude des sols et des formations superficielles sont dégagées. Enfin, au travers de quelques exemples concrets d'application, les auteurs montrent l'intérêt que peut présenter le recours à des méthodes électriques pour le pédologue-cartographe ; elles lui apportent, notamment, un ensemble d'informations sur certains types de structures verticales et horizontales des sols dans quelques milieux difficilement accessibles aux techniques classiques d'investigations.*

*L'intérêt de ces méthodes ne se limite d'ailleurs pas à cet aspect purement cartographique, car elles offrent également la possibilité de suivre la dynamique d'évolution dans le temps des structures ainsi mises en évidence et délimitées spatialement.*

## INTRODUCTION

Bien que les méthodes géophysiques de prospection soient d'un emploi courant dans toutes les applications de la géologie (que ce soit en hydrogéologie, en prospection minière...), leur apparition en pédologie ne s'est effectuée que récemment et de façon timide. Cependant, les applications déjà réalisées laissent prévoir que ces méthodes ont de nombreuses potentialités dans ce domaine.

En effet, elles permettent une investigation rapide, quelle que soit la profondeur à atteindre, en opérant à partir de la surface du sol. Non destructives, il est possible de les répéter souvent : on peut donc espérer suivre des phénomènes évolutifs. En définitive, leur utilisation se tournerait vers deux aspects :

— application à la cartographie (seule abordée ici), avec les possibilités d'obtenir des informations sur les structures profondes difficilement atteintes par les observations classiques ;

— approche des variations au cours du temps des unités cartographiées, cet aspect touchant déjà aux études du fonctionnement des unités (J.C. Bottraud, 1983).

Ces matériels font donc écho aux préoccupations actuelles des pédologues, préoccupations visant à intégrer dans la cartographie une caractérisation du comportement des sols (comportement hydrodynamique en particulier) qui permettrait une description des différents fonctionnements rencontrés dans les zones cartographiées.

Il est donc tout naturel que ces techniques aient fait l'objet d'investigations particulières dans les laboratoires de Science du Sol, sensibles à ce type d'approche.

Pour une efficacité réelle d'utilisation, un certain nombre de conditions doivent cependant être réunies. Il convenait d'étudier sérieusement les potentialités de chaque méthode et ses conditions d'applications, avant de vouloir étendre leur emploi. C'était d'autant plus nécessaire que l'on rencontre en pédologie de nombreux problèmes spécifiques n'intéressant pas le géologue et l'on pouvait espérer traiter quelques-uns d'entre eux à l'aide de la géophysique. Nous avons donc engagé notre étude dans ce but, en la limitant toutefois aux méthodes électromagnétiques et plus précisément à celles utilisant les mesures de résistivité (qui nous paraissaient les plus prometteuses, compte tenu des travaux déjà existants).

## I. LES MESURES DE RESISTIVITE ET LEURS APPLICATIONS

Il convient tout d'abord de présenter brièvement les principes et les caractéristiques de ces méthodes. Des informations plus complètes et plus détaillées pourront être obtenues dans les ouvrages spécialisés, notamment dans KUNETZ (1966), ASTIER (1971) ou KOEFOELD (1979) pour les principes généraux, mais aussi dans HESSE (1978) pour l'emploi dans les formations superficielles.

### A) Résistivité des matériaux

La résistivité d'un corps (ou son inverse : la conductivité  $\sigma = 1/\rho$ ) caractérise la propriété de ce corps à conduire le courant. Elle s'exprime en  $\Omega\text{m}$ . Elle peut être de deux natures différentes, suivant que le courant électrique est dû à un déplacement d'électrons (conductivité métallique) ou à un déplacement d'ions (conductivité électrolytique).

C'est de ce dernier cas que relèvent pratiquement tous les matériaux rencontrés sur le terrain. Il s'agit d'un déplacement d'ions dans l'eau d'imbibition des roches. Ceci a deux conséquences importantes :

- la résistivité d'une roche, mesurée in situ, dépend beaucoup plus de sa teneur en eau et de la concentration en ions de cette eau que de sa nature ;
- cette résistivité peut donc varier pour une même roche, suivant les conditions où elle se trouve. Les résistivités que l'on peut rencontrer sur le terrain varient de 0,1 à  $10^6 \Omega\text{m}$ .

### B) Mesures de la résistivité

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour les mesures de résistivité. La plus courante est encore celle employant un quadripôle et l'injection de courants électriques dans le sol. C'est aussi une des plus simples et des plus anciennes, et c'est celle qui a fourni la plupart des résultats présentés ici. La mesure est effectuée de la façon suivante : quatre électrodes AMNB (piquets métalliques) sont enfoncés dans le terrain à étudier. Elles sont le plus souvent alignées et disposées de façon symétrique (fig. 1). Les deux électrodes externes, A et B, servent à envoyer un courant d'intensité connue dans le sol, les deux électrodes en M et N à mesurer la différence de potentiel ainsi créée entre ces deux points (par une méthode d'opposition).

L'application de la loi d'Ohm permet alors de montrer que dans le cas où l'on se trouve sur un matériau homogène, sa résistivité est donnée par la formule :

$$\rho = \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{BM} \right)^{-1} \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Cette mesure est attribuée au centre du dispositif, bien qu'elle concerne en fait un volume de sol dépendant de la distance entre les électrodes et de leur géométrie d'implantation.

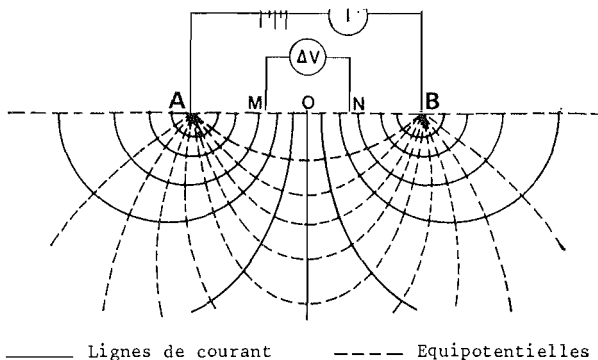


Figure 1 : Principe de la mesure des résistivités

*Principle of resistivity measurements*

Parmi les autres méthodes utilisables pour la mesure de la résistivité sont à considérer surtout celles qui permettent un gain de temps lors des relevés systématiques (résistivité par exemple). A l'échelle de profondeur où nous travaillons, la magnéto-tellurique V.L.F. (M.T.A. en abrégé), méthode de prospection rapide, dérivée de la magnéto-tellurique, semble actuellement la plus intéressante. Elle met en œuvre des mesures des composantes du champ électrique et du champ magnétique d'une même onde électromagnétique, cette dernière étant émise par un émetteur artificiel situé à une grande distance du lieu de mesures (émetteur Radio-France d'Allouis) - Guineau, 1974. La comparaison de ces grandeurs et la référence à un modèle de sol homogène et semi-infini permet de déterminer une résistivité apparente, ainsi qu'une profondeur de pénétration de l'onde. Nous avons pu utiliser un appareil construit à partir de ces principes et permettant la réalisation de profils continus (prototypes du laboratoire de Géophysique CNRS de Garchy)\*.

### C) Résistivité apparente : sondages électriques et trainés

La plupart des terrains étudiés ne correspondent évidemment pas à des sols homogènes. La valeur obtenue à l'aide des dispositifs précédents est alors appelée « *résistivité apparente* ».

Dans la plupart des cas cependant, le sol peut être représenté par un empilement de couches de matériaux différents, les limites entre couches étant plus ou moins nettes.

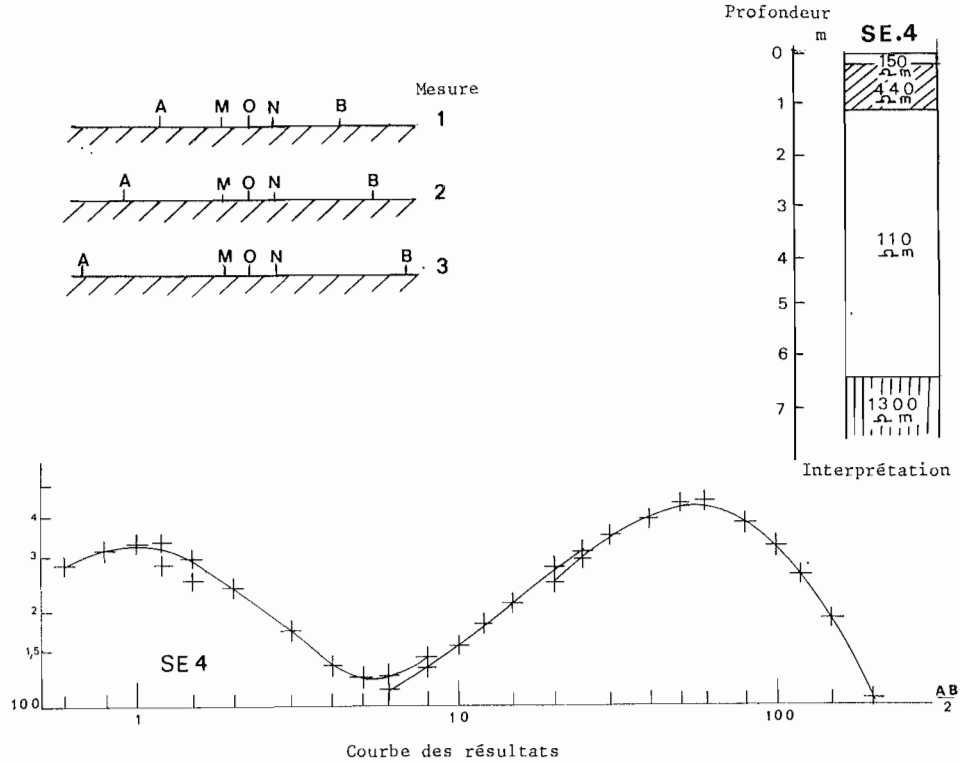
Sur ces terrains hétérogènes, une variation des caractéristiques du dispositif utilisé pour la mesure a pour conséquence une variation dans les valeurs obtenues, variations qui permettront de rendre compte des changements dans le sol.

Deux types d'observations peuvent ainsi être réalisées :

— si l'on s'intéresse à l'évolution du profil avec la profondeur, on conservera le même point de mesure, en modifiant les caractéristiques du dispositif (écartement des distances entre les électrodes, par exemple). On effectue ainsi un sondage électrique (figure 2).

\* Les mesures réalisées ici en Magnéto-Tellurique-Artificielle correspondaient à un test en vraie grandeur de cette méthode. Les résultats obtenus étant comparables à ceux de la méthode électrique classique ; cette méthode beaucoup plus rapide a pu être employée pour étendre spatialement les mesures électriques réalisées sur des superficies plus limitées.

Théoriquement, dans cette méthode, le volume pris en compte par la mesure est infini. En pratique, la densité des courants diminue rapidement avec la profondeur. On peut alors définir une profondeur d'investigation ou « profondeur maximum » à laquelle un changement dans le matériau est détectable.



**Figure 2 : Sondage électrique**  
*Electrical sounding*

— par contre, si l'on veut étudier les variations latérales dans une épaisseur donnée de terrain, on conservera au dispositif les mêmes caractéristiques en le déplaçant à la surface du sol, de façon à couvrir au mieux la zone à étudier (maillage). C'est le principe du « trainé ». Les caractéristiques du dispositif sont alors fixées en fonction de la profondeur de la structure à étudier et des objectifs recherchés (figure 3).

Pour ces deux systèmes de mesures, on peut donc obtenir une image de la structure verticale du sol (par les sondages) et de ses variations horizontales (par les trainés). Ces images doivent cependant être interprétées pour être utilisables.

## D) Interprétation des mesures de résistivité dans la cartographie

(voir en particulier Koefoeld, 1980 et Bourdin, 1979)

En ce qui concerne les *sondages*, les données brutes sont généralement présentées sous forme d'un graphe montrant les variations de la résistivité apparente en fonction d'une caractéristique du dispositif lié à sa profondeur d'investigation (écartement des électrodes AB pour un quadripôle - cf. figure 2). L'interprétation de ces résultats

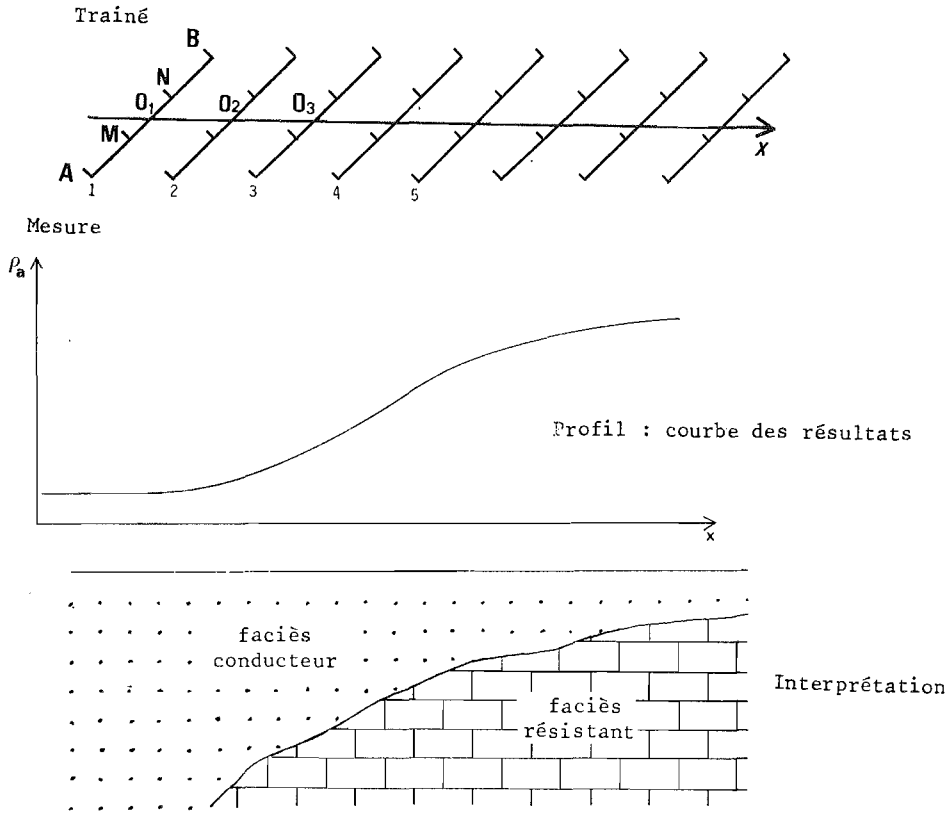


Figure 3 : Trainé de résistivité

Resistivity

à l'aide d'abaques précalculés ou de programmes adaptés va alors permettre de représenter le sol sous forme d'un empilement des couches de résistivités différentes et d'épaisseurs connues. Cela présuppose évidemment qu'une telle représentation soit applicable au sol étudié, c'est-à-dire que celui-ci peut raisonnablement être assimilé à un tel modèle. Si ce n'est pas le cas (matériaux hétérogènes, variations progressives, surfaces de séparation non planes...) il est nécessaire d'en tenir compte dans l'interprétation, qui peut s'en trouver notablement compliquée.

Pour les « trainés », les valeurs de résistivité mesurées sont portées en fonction des coordonnées du point de mesure, de façon à obtenir des profils ou des cartes (figure 3). L'interprétation est ensuite effectuée en s'aidant notamment des résultats fournis par les sondages électriques. On peut, par exemple, mettre ainsi en évidence des variations dans la profondeur d'apparition d'une couche.

La difficulté de cette interprétation augmente évidemment avec la complexité du milieu, ce qui fait que tous les sites ne se prêtent pas avec un égal bonheur à ces méthodes.

On voit immédiatement que ces deux méthodes sont en fait difficilement dissociables et qu'elles constituent une méthode d'observation très intéressante car permettant d'obtenir une visualisation en trois dimensions de la structure à analyser.

Cette image n'est cependant pas directement utilisable par le pédologue. Il est encore nécessaire d'établir les correspondances entre la structure électrique mise en évidence et celle du sol telle qu'elle est appréhendée sur le terrain par le cartographe. C'est là *une des étapes les plus délicates et les plus importantes* correspondant à un calage des observations géophysiques.

Quelle que soit la méthode géophysique utilisée, on rencontre d'ailleurs les mêmes types de problèmes et on passe par ces étapes (mesures sur le terrain, interprétation et calages). L'utilisation pour des études à faible profondeur va cependant poser des problèmes spécifiques.

## **E) Particularités dues à l'utilisation dans des formations superficielles**

Elles tiennent essentiellement à deux problèmes :

- les variations qu'entraînent les phénomènes climatologiques (teneur en eau, température...);
- l'adaptation des dispositifs de prospection aux dimensions des structures mises en cause.

En effet, la variabilité des caractères hydrodynamiques du sol au cours du temps entraîne des fluctuations dans la valeur de sa résistivité. Celles-ci sont plus ou moins importantes suivant les sols et les fluctuations des conditions climatiques; elles peuvent s'avérer gênantes lorsque la prospection s'étend sur une longue période. C'est donc un facteur à ne pas négliger, si l'on veut que la comparaison soit possible et facilement réalisable entre les différentes données recueillies sur le terrain.

De la même façon, les variations journalières de température peuvent entraîner des modifications de la résistivité du sol. Cependant l'importance de ce phénomène va dépendre des caractères de la surface du sol (présence d'une couverture, couleur propre du sol...). En climat tempéré, l'effet correspondant devrait être pratiquement négligeable dans la plupart des études, pour des profondeurs d'investigation supérieures à 30 cm. Pour des mesures s'étalant sur une longue période (entre l'hiver et l'été), ou portant sur de très faibles profondeurs, il faudra toutefois envisager une correction et pour cela réaliser des mesures de température au sein des différents milieux prospectés. L'usage de tables (cf. Handbook of saline and sodic soils USDA) permet alors d'évaluer un coefficient de correction.

Le second point a essentiellement pour conséquence l'obligation d'utiliser des dispositifs adaptés aux faibles profondeurs, ce qui peut poser des problèmes relatifs à la précision (implantation des électrodes pour de petits quadripôles sur des surfaces labourées par exemple). D'autre part le volume de sol pris en compte étant relativement faible, la densité des points de mesure doit être suffisante pour permettre en particulier de bien cerner l'influence d'hétérogénéités localisées. Ceci peut devenir très contraignant lorsque la surface à explorer est importante.

Enfin, il faut noter l'importance que peut prendre le relief (pentes ou versants) voir le microrelief (sillons de labour par exemple) pour des études intéressant les formations très superficielles. Dans de nombreux cas, l'hétérogénéité de la surface peut expliquer une bonne part des variations d'aspect aléatoire (cf. Hesse, 1978).

Toutes ces contraintes peuvent être levées en respectant un minimum de précautions; ceci permet de rendre possible l'application de la prospection électrique à la cartographie pédologique.

## **F) Premières applications en science du sol**

Quelques auteurs se sont déjà intéressés à ces méthodes et ont publié des résultats intéressants. Notons en particulier :

- la détermination et l'étude de contact sol/roche dure (granite) (Arousseau, 1976; Gaussen, 1977);

- la cartographie et l'analyse de taches de salinité (Halvorson et Rhoades, 1976), avec la démonstration de la possibilité d'utiliser les mesures de résistivité pour déterminer au champ la conductivité de la solution de saturation d'un sol (Rhoades et Ingvalson, 1971 ; Ledain, 1977 ; El Oumri, 1981) ;
  - l'étude de l'épaisseur des vertisols tropicaux, ainsi que de la dynamique de leurs fissurations (Cabidoche, travaux en cours).
- Ces exemples donnent déjà une idée de la variété des cas où ces méthodes peuvent être utiles.

Il reste cependant à définir :

- les principaux caractères que doivent posséder les milieux d'étude pour se prêter à l'emploi des techniques géophysiques ;
- la méthodologie qui devrait être employée ;
- le type de problèmes que l'on peut espérer résoudre par le recours à ces méthodes.

C'est l'objet des exemples qui vont être présentés ci-après.

## II. EXEMPLES DE PROTECTION ELECTRIQUE APPLIQUEE A LA CARTOGRAPHIE DES SOLS : POSSIBILITES ET LIMITES D'UTILISATION DE CES METHODES

### A) Domaine du Merle : Etude des variations verticales dans la constitution des matériaux du sol

Cette étude a été réalisée au Domaine du Merle, situé dans la plaine de la Crau, sur des alluvions quaternaires anciennes (alluvions de la Durance). Le sol est un sol fersiallitique très caillouteux, présentant en-dessous d'horizons superficiels assez meubles et poreux, un encroûtement calcaire à très forte cohésion et à faible porosité, qui apparaît entre 0,5 m et 1 m. On peut cependant distinguer les sols sous prairie artificielle, qui présentent un recouvrement superficiel limoneux (dont la formation est liée au mode d'irrigation par submersion) et les sols sous végétation naturelle où cet horizon limoneux n'existe pas. Dans tous les cas, c'est essentiellement la profondeur de l'encroûtement qui détermine les potentialités agricoles.

Deux questions se posaient alors :

- l'encroûtement existe-t-il partout ?
- quelle est la variabilité de sa profondeur d'apparition ?

Les premières mesures réalisées (Andrieux, 1981 ; Bottraud, 1983) ont rapidement montré que les sondages électriques permettaient efficacement de déterminer la profondeur de l'encroûtement non altéré (cf. fig. 4) qui est très compact et très

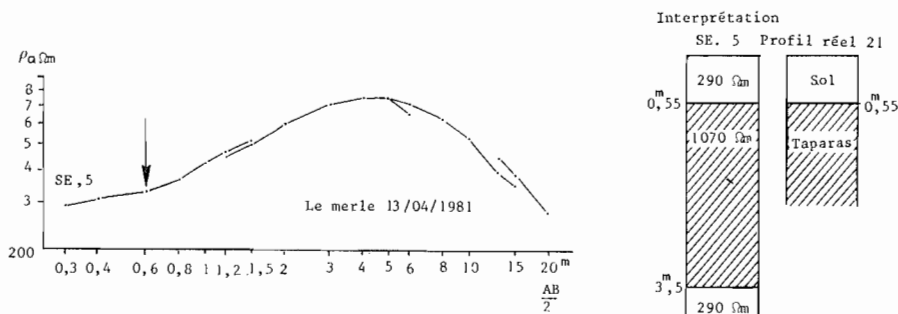


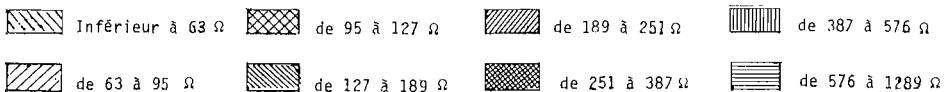
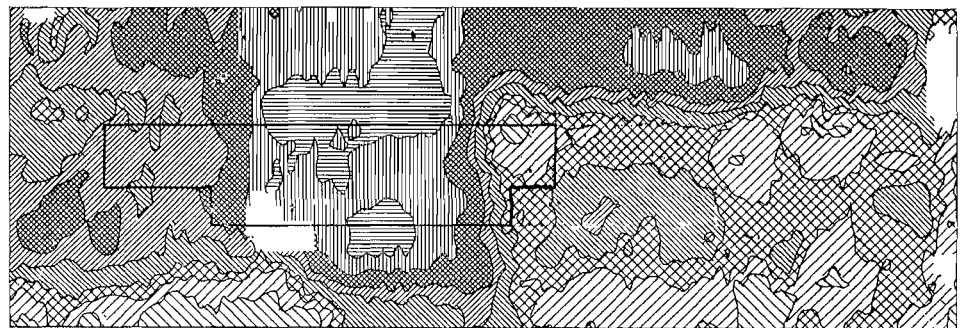
Figure 4 : Exemple de sondage électrique et d'interprétation  
*Exemple of electrical sounding and interpretation.*

dense. Les sondages donnent des courbes d'allure caractéristique, dont l'interprétation est assez aisée, ce qui permet de bien préciser les structures du sol présentes à cet endroit. La généralisation de ces mesures à une grande partie du domaine (Mortier, 1982) a permis de répondre aux questions initiales en montrant que cet encroûtement était présent dans toute la région étudiée, à une profondeur relativement constante, ne variant qu'entre 60 et 100 cm. Cette étude électrique a pu être complétée, à l'échelle du 1/5 000<sup>e</sup>, sur une superficie de plus de 100 ha, par une étude de « sismique-marteau » (Bottraud et al., 1984) qui précise les résultats obtenus.

Dans ces milieux caillouteux, où les techniques classiques de prospection par sondage à la tarière sont peu utilisables et où il existe une discontinuité résistive marquée entre horizon de surface peu dense et niveau profond compacté, les mesures de résistivité électrique permettent d'apprécier et de cartographier avec une bonne précision les variations de profondeur de ces encroûtements. L'intérêt pratique d'une telle approche est indéniable puisqu'elle permet de définir la meilleure stratégie à employer pour un éventuel approfondissement du sol par les techniques du sous-solage.

## B) Domaine de Vassal : Etude des variations latérales d'un sol

Cette étude réalisée au domaine de Vassal (Marseillan Plage, Hérault) porte sur des anomalies de croissance des végétaux apparaissant sous forme de taches claires sur les photos aériennes. L'une de ces taches a été étudiée en détail (Dridi, Piton, 1981) ; ce qui a permis de montrer que l'existence des problèmes de croissance de la vigne était liée à des particularités de comportement du sol. Ce sol est par ailleurs uniformément sableux, avec un profil relativement indifférencié. Le squelette minéral est formé presque exclusivement de cristaux de silice ou de calcite avec absence de plasma argileux. Il présente une nappe d'eau douce vers 1 m de profondeur surmontant la nappe salée en relation avec l'étang et la mer. Pour notre part, nous avons effectué des mesures électriques (Bottraud, 1983) comportant notamment la réalisation de cartes de résistivité avec suivi de ses variations au cours du temps. L'une de ces cartes est présentée sur la figure 5 : la tache correspond à des zones de fort gradient résistif ; ses limites apparaissent nettement et sont relativement étroites. La superposition spatiale des taches avec les zones présentant une résistivité différente de celle du milieu environnant est



(Les résistances peuvent être transformées en résistivité en les multipliant par un facteur K correspondant à la géométrie du dispositif utilisé).  $K = 10,73$ .

Figure 5 : Carte des résistances apparentes (dispositif carré  $a = 1$  m)

Map obtained from the electrical profiles using a square device ( $a = 1$  m)



bien une confirmation du fait que l'hétérogénéité du comportement végétal trouve son origine dans le sol. Le suivi dans le temps des variations de cette résistivité a permis en outre d'expliquer que ces anomalies de comportement étaient liées à une dynamique hydrique particulière en période de végétation active.

Dans la situation que nous venons de présenter, c'est parce que plusieurs conditions favorables étaient réunies que les études de résistivité entreprises ont pu déboucher de manière aussi pertinente. Soulignons notamment que :

- a) le sol présentait un squelette très grossier dont les propriétés électriques étaient pratiquement identiques au sein de toute la zone étudiée ;
- b) les caractères électriques de la solution du sol sont restés globalement invariants pendant toute la durée du suivi résistif ;
- c) par suite, les variations de résistivité que l'on a pu noter avaient bien pour seule cause les variations de teneur en eau du sol.

### C) Bois de la Vialle : étude des variations verticales et horizontales d'un sol de terrasse alluviale

#### 1. L'étude pédologique classique

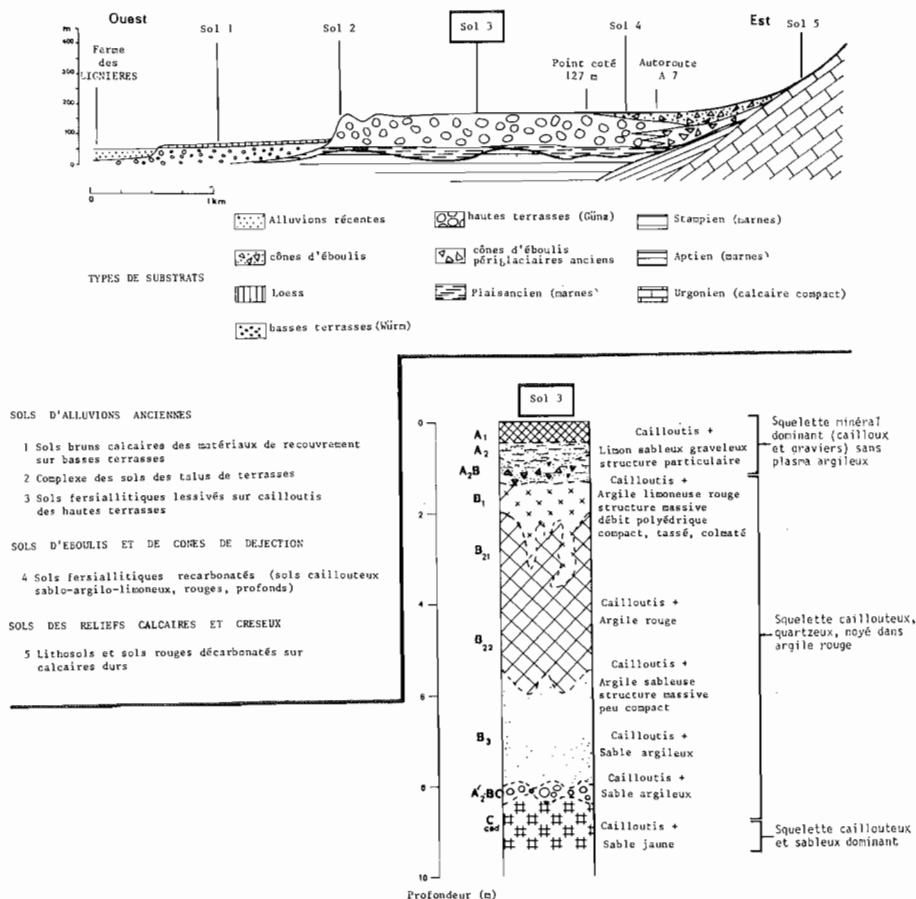


Figure 6 : Contexte géologique - Bois de la Vialle

*Pedological and geological environment (Bois de La Vialle)*

Le site étudié est celui du Bois de La Vialle, terrasse du Rhône située au nord de Donzère dans la Drôme, (niveau à rattacher au Günz dans la chronologie quaternaire alpine). Les sols que l'on rencontre sont schématisés sur la figure n° 6. Le sol le plus répandu (sol n° 3) est un sol fersiallitique désaturé à horizon B très épais (5 à 8 m) (Bouzigues, 1971 ; Bornand, 1972-1978). Il est composé de deux niveaux majeurs à contraste résistif bien marqué : un ensemble d'horizons de surface, très poreux, avec squellette minéral dominant (cailloux et graviers de quartz), sans plasma argileux ; un ensemble d'horizons B constitués d'argile rouge, enrobant un squelette de cailloux quartzeux. A l'Est, se développent des sols fersiallitiques recarbonatés (sol n° 4), nettement différents des précédents (profondeur plus faible, différenciation moins nette des horizons pédologiques, pourcentage d'argile beaucoup plus faible) et à l'Ouest existe un complexe de sols de talus à caractère colluvial (sol n° 2). Ces sols sont tous très caillouteux (graviers et cailloux forment toujours au moins 50 % du poids total), ce qui a évidemment empêché toutes observations à la tarière : les seules informations disponibles sur la structure du sol en profondeur viennent alors de l'observation des quelques carrières en bordure des terrasses et des fosses que l'on a dû ouvrir au tractopelle, augmentée des extrapolations physiographiques que le pédologue est capable de pratiquer en tenant compte de l'expérience cartographique acquise par l'étude détaillée de ces formations sur l'ensemble de la moyenne vallée du Rhône.

Il reste malgré tout des doutes sur :

- l'importance des fluctuations possibles de l'épaisseur des horizons B argilo-caillouteux ;
- le degré d'homogénéité spatiale de l'unité attribuée à la terrasse (sol n° 3), notamment précisions des limites et allure des transitions éventuelles avec les unités voisines (sol n° 4).

## 2. Etude résistive : structure et variations

Aborder ici en détail toutes les étapes de l'analyse des données électriques serait très long et fastidieux. Nous nous contenterons donc de rapporter les principaux points qu'il est important de bien dégager :

a — Les divers sondages électriques réalisées ont des allures caractéristiques que l'on peut schématiquement rassembler en trois groupes : groupes 1, 2 et 3 de la figure 7a, qui ont aussi une localisation géographique particulière : un à l'Est, en bordure de la terrasse ; un à l'Ouest, vers les piedmonts, enfin un au Centre, encadré par les deux précédents ;

b — Les limites de ces groupes peuvent être placées avec plus de précision à l'aide des cartes isorésistives, où l'on peut retrouver sans problèmes les trois zones correspondantes (cf. figure 7 b).

## 3. Interprétation pédologique

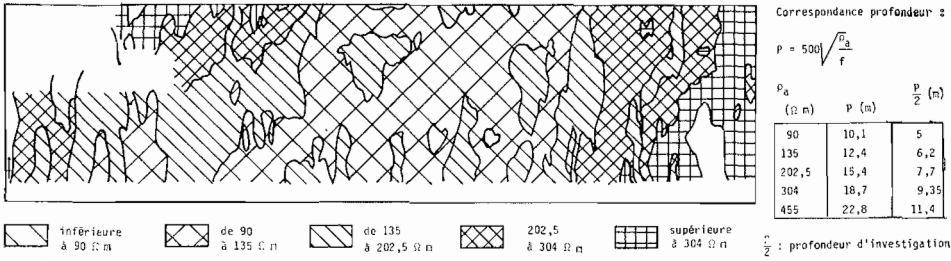
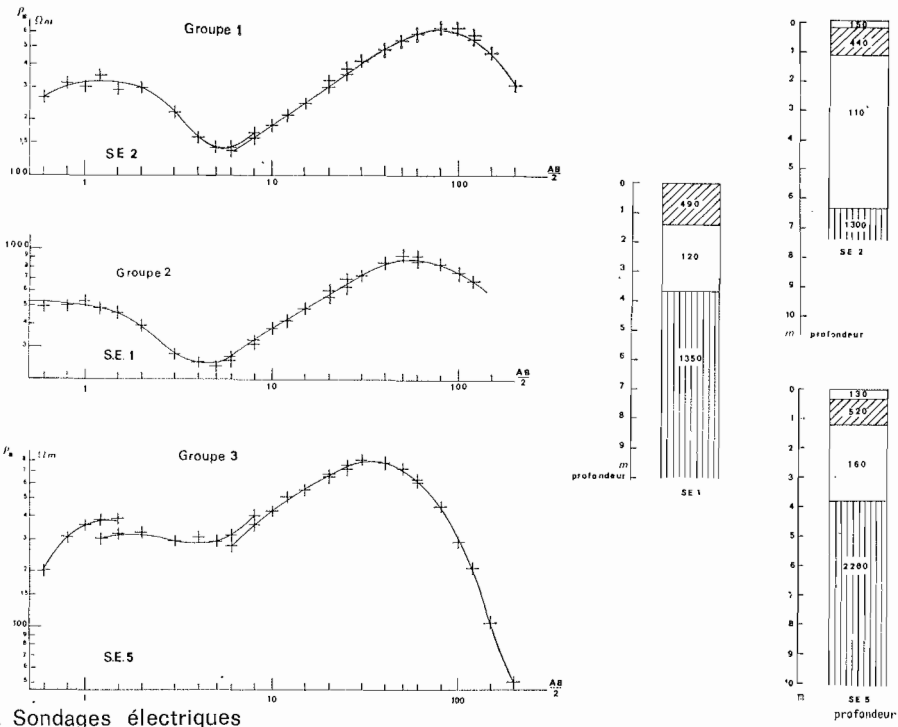
Cette interprétation a pu être effectuée en réalisant la synthèse des données obtenues à partir des mesures de résistivité d'une part et à partir des résultats de l'étude pédologique classique d'autre part. Il faut noter que l'obtention d'informations pédologiques complémentaires (fosses implantées d'après les résultats électriques notamment) a été jugée nécessaire pour assurer une utilisation optimale de toutes les données rassemblées.

La comparaison des données pédologiques et des données résistives montre alors que les variations de résistivité observées (principalement dans les sondages) sont dues essentiellement à deux facteurs :

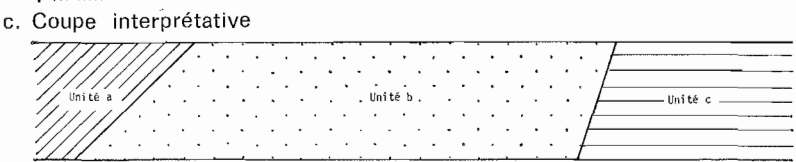
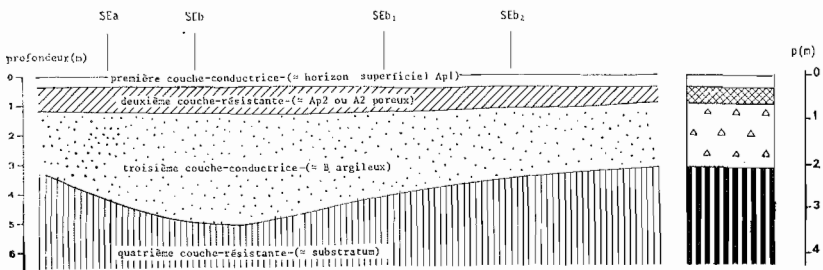
- différences de teneur en argile des couches observées ;
- différences dans le degré de compaction et la porosité associée.

Il devient alors aisé de relier structure résistive et structure pédologique. On obtient ainsi la coupe interprétative de la figure 7c.

# RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE ET CARTOGRAPHIE DES SOLS



**b. Carte isorésistive**



**Figure 7 : Etude du bois de La Vialle**  
*Studie of bois de La Vialle*

En définitive, il ressort de l'ensemble des données collectées que, seule la zone centrale correspond à l'unité étudiée telle qu'elle a été définie par les auteurs précédents (sols fersiallitiques profonds, désaturés). La zone Ouest représente une variation par rapport à cet orthotype, notamment dans l'épaisseur des horizons argileux, en liaison avec la proximité de la rupture de pente. Par contre, la « zone Est » représente une unité différente, vraisemblablement plus proche des sols fersiallitiques recarbonatés.

On aboutit donc ainsi à un redécoupage de la zone étudiée, correspondant à une nouvelle vision (schématisée dans la coupe et la carte figure 7c et 7d).

## D) Deux exemples de prospection électrique peu fructueuse

La réalisation de mesures de résistivité est loin de toujours apporter des résultats aussi nets et, dans certains cas, elle peut même être d'un intérêt très limité. Les deux études qui suivent en sont un exemple.

### 1. Etude dans un milieu alluvial complexe

La zone concernée, de faible superficie (15 ha) appartient au domaine INRA de la Madone (Mauguio - Hérault). Elle est cultivée en céréales et légumineuses et schématiquement, les sols se répartissent en deux grandes unités (Auge, 1980) :

- des sols sur alluvions modernes liés aux dépôts d'un ruiseau ;
- des sols rouges sur alluvions plus anciennes qui ont également subi des remaniements assez importants postérieurement à leur dépôt.

Les profils réalisés dans chacune de ces unités montrent :

- un gradient d'argile progressif,
- une variation aléatoire du taux de cailloux.

Il est possible de distinguer plusieurs horizons assez peu différenciés. A cause de cette absence de contraste structuré, les mesures électriques ne décèlent aucune de ces variations, si l'on excepte celle correspondant à la base de la couche travaillée. D'autre part, spatialement, elles permettent simplement de retrouver les limites correspondant aux deux ensembles de sols déjà cités mais n'apportent aucune information supplémentaire à celles que l'on peut lire beaucoup plus facilement et plus directement dans le paysage.

Par contre, elles mettent en évidence entre 5 et 10 m de profondeur l'existence d'une discontinuité sédimentologique correspondant à l'apparition des formations villafranchiennes, dont la présence sous les alluvions quaternaires plus récentes est liée à la post-villafranchienne de Vauvert.

### 2. Etude en milieu karstique

Dans l'étude qui suit, nous nous intéressons à une tache de régénération forestière, provenant d'un bosquet de cèdres au lieu-dit « Les Blacones » (près de Ryans - Var). Cette tache présente des irrégularités de reprise et de développement des arbres (échancrures et zones dénudées où ne pousse aucun cèdre) sans que l'on puisse incriminer le mode de dissémination des semences (Braesco, 1980). Il a alors paru naturel de penser à l'influence d'un facteur pédologique pour expliquer ces difficultés de reprise des cèdres.

Au niveau géopédologique, on se situe sur un karst, où les sols discontinus, accumulés par remplissage dans des poches non jointives, alternent avec de nombreux affleurements de calcaires durs (J.P. Barthes, 1979). Dans ce milieu, les réserves en eau sont limitées aux zones de remplissages argileux des fissures karstiques. Notre but était de voir si les variations de fissuration du karst pouvaient jouer un rôle important dans la formation des hétérogénéités de végétation.

Différentes mesures ont été effectuées pour essayer de déterminer la structure électrique des deux unités bien différenciés par la réponse de la végétation : l'une

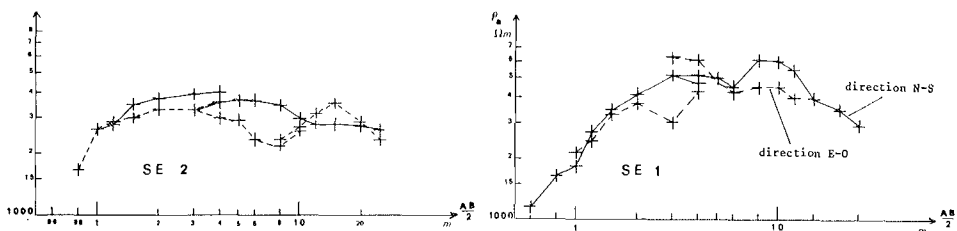


Figure 8 : Sondages électriques - Forêt de Blaconnes  
Electrical soundings (Forêt de Blaconnes)

où pousse le cèdre, l'autre où il ne pousse pas. Quatre sondages et deux trainés ont été réalisés qui permettent de recouper ces deux zones. Aucune donnée vraiment fiable ne peut être tirée de ces mesures. Ceci tient à deux causes essentielles :

- par suite de leur dimension même (20 m sur la plus grande longueur), les hétérogénéités du milieu sont très mal prises en compte à cause des dimensions imposées aux dispositifs de mesures électriques. Ainsi les sondages sont toujours à cheval sur les deux zones à différencier ;
- la grande variabilité du milieu considéré, notamment au niveau de la fracturation ajoute un niveau de complexité supplémentaire au problème précédent.

### III. DISCUSSION

Dans les quelques exemples que nous venons d'exposer, on a pu montrer l'intérêt que présente l'utilisation des méthodes électriques en cartographie et en pédologie. Ces méthodes sont susceptibles d'apporter des informations nouvelles sur la structure du sol, notamment de fournir un découpage vertical qui va insister sur certaines discontinuités et pourra apporter des informations sur la nature des terrains présents en profondeur, ainsi qu'un premier découpage horizontal, pouvant servir de premier zonage au cartographe.

D'autre part, le travail présenté ici permet également de dégager quelques-uns des problèmes ou des thèmes qui se prêtent bien à l'utilisation de ces méthodes. Il montre aussi qu'il est nécessaire de respecter certaines précautions :

a — l'objet de l'étude doit être aussi simple que possible. Une prospection visant des buts trop complexes ou se déroulant dans un milieu trop compliqué offrira trop d'interprétations possibles aux résultats des mesures obtenues ;

b — on doit pouvoir disposer d'une source de données indépendantes pour être capable de vérifier l'efficacité des relevés effectués, et pour pouvoir relier les résistivités aux facteurs pédologiques à observer ;

c — une bonne connaissance du milieu, tant géologique que pédologique est nécessaire, au moins au niveau global, de façon à pouvoir juger de l'opportunité d'un recours aux méthodes électriques et de fixer avec précision les objectifs à atteindre.

La méthodologie à adopter dans une prospection électrique devrait alors comporter les points suivants :

a — réalisation d'une première série de sondages électriques, destinée à obtenir un aperçu de la structure de la zone à étudier et de son environnement. Il s'agit ici notamment de vérifier que les structures à analyser se prêtent bien à une étude par les méthodes électriques : existence de comportements résistifs suffisamment contrastés au sein des matériaux dont on cherche à caractériser et à cartographier les structures, recherche des causes essentielles qui vont déterminer les variations résistives diachroniques dans le cas d'un suivi prolongé. Enfin, cette phase aura aussi pour but d'obtenir les informations nécessaires pour pouvoir choisir au mieux

les paramètres intervenant dans les phases ultérieures de cartographie électrique (possibilités réelles d'adaptation de la dimension des dispositifs de mesures à la dimension des structures à inventorier, choix des fréquences, etc.);

b — cartographie résistive, avec exécution des trainés électriques et éventuellement de sondages complémentaires ;

c — interprétation des données résistives. Il s'agit ici de transcrire les sondages sous forme de coupes électriques, puis de dégager à l'aide des cartes tirées des trainés, une première image de la structure électrique du milieu. A ce stade, des incertitudes et des manques peuvent subsister. L'étape suivante cherchera à les élucider.

d — recherche des données complémentaires :

- sondages et trainés nécessaires à l'affinage de l'interprétation précédente ;
- recherche des données pédologiques complémentaires (contrôle-terrain avec fosses implantées d'après la carte tirée des résultats de l'étude électrique).

e — interprétation pédologique : il s'agit ici d'exprimer les résultats de la prospection électrique en termes pédologiques et de les intégrer aux autres informations disponibles pour aboutir à une synthèse décrivant au mieux le milieu étudié.

Cette démarche est bien entendu à adapter aux objectifs de l'étude entreprise. Elle peut être considérablement allégée lorsque seules des informations ponctuelles sont demandées.

## CONCLUSION

Les méthodes d'origine géophysique présentées ici sont relativement simples, d'un emploi aisé et permettent une couverture de la zone à étudier avec une grande densité de points (puisqu'elles ne perturbent pas le milieu). Elles aboutissent dans nombre de cas à l'obtention d'une image en trois dimensions de la structure du sol en décelant en particulier les discontinuités les plus importantes. Toutefois, ces méthodes ne conviennent ni à tous les milieux, ni à tous les problèmes et il est nécessaire de raisonner leur emploi.

D'autre part, on peut noter que si dans les études présentées ici ces méthodes n'offrent que des informations qualitatives, le recours aux méthodes géostatistiques (cokrigage par exemple) peut dans certains cas permettre de quantifier ces informations (Bottraud, Rhoades, en préparation).

Enfin, le principal intérêt de ces méthodes ne réside pas uniquement dans leurs apports à la cartographie des sols, mais également dans l'ouverture d'une voie de recherche nouvelle en Science du Sol par la mise en évidence de relations liant les variations de la résistivité au comportement et au fonctionnement hydrique des unités que l'on peut identifier au sein des paysages (Bottraud J.C., 1983).

Reçu pour publication : Avril 84

Accepté pour publication : Janvier 85

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier :

- 1) Le laboratoire de Géophysique du Centre C.N.R.S. de GARCHY, en particulier Monsieur HESSE et toute son équipe.
- 2) Le laboratoire de Géophysique de la Faculté des Sciences de Montpellier (Prof. LOUIS) pour leur collaboration et l'aide précieuse qu'ils ont bien voulu nous apporter au cours des travaux de prospection et de mesures sur le terrain.

## MEASUREMENTS OF SOIL RESISTIVITY AS APPLIED TO SOIL SURVEY

— The soil electrical resistivity is not a parameter very much in use for the characterization of soils.

— The authors recall the principles of these measurements (fig. 1 and fig. 2) and the bases of the interpretation of these data in terms of soil mapping (fig. 3). The features of the application of these techniques to the studies of soils and superficial deposits are also described.

— Some examples of soil mapping in various situations are presented in order to point out the interest of these techniques in soil survey (fig. 4, fig. 5, fig. 6, fig. 7). They provide informations on particular vertical and horizontal structures in some sites and natural environments where classical techniques of investigation apply with difficulties.

— These methods are very interesting because they enable us to follow the evolution of these structures with time.

## BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIEUX P., 1981 — Etude des sols du Domaine du Merle : Méthodes et premiers résultats. DAA Science du Sol et du Bioclimat, option Science du Sol et Aménagement. E.N.S.A.M.
- ASTIER J.L., 1971 — Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Ed. Masson.
- AUGE G., 1981 — Etude pédologique du Domaine I.N.R.A. de Mauguio. D.A.A. Science du Sol et du Bioclimat. E.N.S.A. Montpellier.
- AUROUSSEAU P., 1976 — Morphologie et genèse des sols sur granite du Morvan. Thèse Docteur-Ingénieur. E.N.S.A. Rennes.
- BARTHES J.P., 1979 — Analyse géo-pédologique du massif forestier de la Gardiole de Rians (Var). I.N.R.A. Montpellier, S.E.S. n° 466.
- BORNAND M., 1972 — Etude pédologique de la moyenne vallée du Rhône. Publi. S.E.S.-I.N.R.A. Montpellier n° 152, 245 p. + 1 carte des sols au 100 000° + hors texte.
- BORNAND M., 1978 — Altération des matériaux fluvio-glaciaires, genèse et évolution des sols sur terrasses quaternaires dans la moyenne vallée du Rhône. Thèse Doctorat d'Etat, Mention Sciences - U.S.T.L. (Montpellier), 324 p. Publications S.E.S.-I.N.R.A., Montpellier n° 444.
- BOTTRAUD J.C., 1983 — Résistivité électrique et étude des sols. Applications à la cartographie et à la caractérisation du fonctionnement hydrique. Thèse 3<sup>e</sup> Cycle, U.S.T.L. Montpellier, 191 p. Publication S.E.S.-I.N.R.A. Montpellier.
- BOTTRAUD J.C., MEYER M., MOINEREAU J., 1984 — Application des méthodes géophysiques, résistivité et sismique-marteau à la reconnaissance des croûtes calcaires : Evaluation des nécessités et des possibilités de l'approfondissement du sol. B.T.I. n° 390, pp. 285-293.
- BOURDIN G., 1979 — Etude du problème inverse en sondage électrique et électromagnétique en milieu tabulaire. Thèse 3<sup>e</sup> cycle - Physique théorique U.S.T.L. (Montpellier).
- BOUZIGUES R., BORNAND M., 1971 — Etude pédologique dans la vallée du Rhône. Région de Pierre latte-Bourg-St-Andéol. S.E.S.-I.N.R.A., Montpellier n° 139. 139 pages + carte des sols au 1/25 000°.
- BRAESCO, 1980 — Rapport sur une tâche de régénération du cèdre (Gardiole de Rians) Recherche Forestière - I.N.R.A. Avignon.
- CABIDOUCHE Y.M. — Applications des mesures de résistivité électrique à la caractérisation des sols tropicaux à argile gonflante et de leur comportement poral in situ (à paraître, Sc. du Sol).

- CARNEZ J.L., 1976 — La prospection magnéto-tellurique adaptée aux problèmes du génie civil (capteur capacitif, étalonnage, exemples d'application). Thèse 3<sup>e</sup> cycle U.S.T.L. Lille - Géophysique appliquée.
- DRIBI B., 1980 — Contribution à l'étude hydrodynamique de sols sableux cultivés. Caractérisation physique. D.E.A. Agronomie, option Pédologie, U.S.T.L. Montpellier.
- GAUSSEN J.L., 1977 — Prospection géophysique en pédologie. D.E.A. I.N.A. Paris-Grignon.
- GUINEAU B., 1974 — Applications de la méthode magnéto-tellurique de prospection géophysique à l'étude des couches très superficielles du sous-sol. Thèse de Docteur d'Université, Paris VI, Mention Sciences.
- HALVORSON A.D. and RHOADES J.D., 1976 — Field mapping soil conductivity to delineate dryland saline seeps with four electrode technique. Soil Sci. Am. J. 40, pp. 571-575.
- HESSE A., 1978 — Manuel de prospection géophysique appliquée à la reconnaissance archéologique. Université de Dijon. Centre de Recherche sur les techniques gréco-romaines.
- HESSE A. et JOLIVET A., 1981 — Réalisation et expérimentation dun « résistivimètre-autotracte-enregistreur » R.A.T.E.A.U. « Compte-rendu de fin d'étude D.G.R.S.T. - 14 mars 1981 - Décision d'aide n° 78.7.0247.
- KOEFELD O., 1979 — Resistivity sounding measurements Geosounding principles 1. Elsevier scientific publishing compagny, Amsterdam - Orford - New-York.
- KUNETZ G., 1966 — Principes of direct current. Resistivity prospecting. Geopublication Associates.
- LE DAIN A.Y., 1977 — Origine et fonctionnement d'une tâche de salin en Camargue. Utilisation d'une méthode électrique de mesure in situ de la Salinité. D.E.A. Agronomie option Pédologie - U.S.T.L. Montpellier.
- NADLER A., 1981 — Field applications of the four electrodes techniques for determining soil solution conductivity. Soil Sci. Soc. of Am. Journal - Vol. 45. Janv.-Fév. 1981, n° 1, pp. 30-34.
- NEVEU D., 1981 — Essai d'application des méthodes géophysiques à la pédologie. D.E.A. géologie, option géophysique. U.S.T.L. Montpellier.
- PITON N., 1980 — Contribution à l'étude hydrodynamique de sols sableux cultivés. Fonctionnement hydrodynamique. D.E.A. Agronomie, option Pédologie, U.S.T.L. Montpellier.
- RHOADES J.C. and R.D. INGVALSON, 1971 — Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. Soil Sci. Am. Proc. vol. 35, pp. 54-60.