HAL
open science

Caractérisation de l'organisation spatiale de la couverture pédologique par mesure de la résistivité électrique

Solène Buvat

To cite this version:

Solène Buvat. Caractérisation de l'organisation spatiale de la couverture pédologique par mesure de la résistivité électrique : Application à la cartographie des sols en contexte agricole. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), 2012. Français. NNT : . tel-01591389

HAL Id: tel-01591389

https://theses.hal.science/tel-01591389

Submitted on 21 Sep 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

Spécialité :

Géophysique appliquée
Ecole doctorale Géosciences et Ressources Naturelles (ED 398)

Pour obtenir le grade de :

DOCTEUR de L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE (PARIS 6)

Sujet de la thèse :

Caractérisation de l'organisation spatiale de la couverture pédologique par mesure de la résistivité électrique

Application à la cartographie des sols en contexte agricole

Solène BUVAT

Soutenue le 14 décembre 2012 devant le jury composé de :

Mme. Isabelle Cousin	Chargée de recherche à l'INRA d'Orléans	Rapporteur
M. Marnik Vanclooster	Professeur à l'Université catholique de Louvain (Belgique)	Rapporteur
M. Christian Walter	Professeur à Agrocampus Rennes	Examinateur
M. Roger Guérin	Professeur à l'Université Paris 6	Examinateur
M. Yves Coquet	Professeur à l'université d'Orléans	Co-directeur de thèse
M. Alain Tabbagh	Professeur à l'Université Paris 6	Co-directeur de thèse

RESUME

L'importance croissante des problématiques environnementales entraîne un regain d'intérêt pour les sols. Les nombreux aléas auxquels ils sont soumis les fragilisent et affectent leurs propriétés. Une gestion et une protection optimales des sols passe par une connaissance approfondie de leur variabilité spatiale, y compris l'identification de zones vulnérables. L'objectif des travaux présentés est d'exploiter les données issues de la prospection électrique, afin d'exploiter le pouvoir discriminant de la résistivité électrique vis-à-vis des différents horizons d'une couverture pédologique, en vue d'en caractériser les propriétés géométriques.

Tout d'abord, une modélisation de mesures de résistivité électrique multi-profondeurs a été réalisée en vue 1)de définir une stratégie de prospection optimale, et 2)d'évaluer les performances et limites de la méthode électrique. Cette étape a permis d'évaluer les dimensions minimales détectables d'une hétérogénéité pédologique ainsi que l'impact, sur sa détection, de différents paramètres : espacement inter-profils utilisé lors des mesures, profondeur et épaisseur de l'hétérogénéité, contraste de résistivité entre celle-ci et l'encaissant.

L'étude expérimentale d'une tranchée ouverte sur plusieurs mètres, couplant prélèvements de sols et mesure de résistivité, a permis de caractériser la variabilité verticale et latérale des horizons de la couverture pédologique. Des relations entre résistivité électrique et propriétés pédologiques telles que teneur en eau massique, teneur en eau volumique ou masse volumique apparente de sol ont également été établies.

Enfin, une méthode originale d'exploitation de données électriques issues d'une prospection multi-profondeurs a été proposée. Basée sur une taxonomie géophysique et pédologique, elle a permis, par la cartographie de profils verticaux de résistivité apparente, de retrouver des délinéations concordantes avec celles d'une carte des sols. Cette approche constitue un outil précieux pour l'étude de la variabilité spatiale de la couverture pédologique.

Mots-clés : prospection électrique, couverture pédologique, cartographie, horizon de sol, variabilité spatiale

ABSTRACT

The increasing importance of environmental issues has led to a renewed interest in soils. Soils are subjected to numerous hazards that may threaten their quality and affect their properties. An optimal management and protection of soils goes through an accurate knowledge of their spatial variability and the identification of vulnerable areas. The goal of the presented work is to make use of electrical survey data through relying on the discriminating power of electrical resistivity towards the different horizons composing the soil cover in order to characterize their geometrical and typological properties.

First of all, modeling of multi-depth electrical resistivity measurements was performed in order to 1)define an optimal survey strategy and 2)assess the efficiency and limitations of electrical method. This step allowed us to estimate what were the minimal dimensions of a pedological heterogeneity that could be detected and the influence of the following different parameters on its detectability: inter-profiles spacing used during measurements, depth and thickness of the heterogeneity, resistivity contrast between heterogeneity and surroundings.
The experimental study of a trench dug along several metres, including soil sampling and resistivity measurements, permitted us to characterize the vertical and lateral variability of the soil cover's horizons. Relationships between electrical resistivity and pedological properties such as mass water content, volume water content or soil bulk density were established.
Finally, a new and original method for exploiting data generated by multi-depth electric resistivity survey was put forward. The method is based on the confrontation of geophysical and pedological taxonomies, and on the mapping of vertical apparent resistivity profiles. It allowed finding back soil cartographic unit outlines that were coherent with the previously available soil map. This approach is a valuable tool for studying soil cover spatial variability and has potential for setting up a (semi-)automated method of soil mapping.

Key words: electrical survey, soil cover, mapping, soil horizons, spatial variability

REMERCIEMENTS

Je tiens, en premier lieu, à remercier la Fédération Île-de-France de Recherche sur l'Environnement (FIRE) qui a permis le financement de cette thèse. Merci également à Pierre Ribstein de m'avoir accueillie à Sisyphe.

A mes directeurs de thèses : merci Alain Tabbagh d'avoir accepté d'encadrer cette thèse et de m'avoir aidée à affronter les obstacles administratifs de celle-ci, notamment sur sa fin ; merci Yves Coquet pour ta pédagogie et surtout pour ton intarissable optimisme. Merci pour votre confiance, vos critiques, vos multiples lectures de ce manuscrit, ainsi que votre aide sur le terrain.

Aux membres du jury : merci Isabelle Cousin et merci Marnik Vanclooster pour l'application et la minutie avec lesquelles vous avez commenté ce manuscrit ; merci Christian Walter de m'avoir éclairée sur le vocable pédologique ; merci Roger Guérin pour ton enthousiasme à participer à ce jury, de l'avoir présidé et d'avoir guidé mes premiers pas en méthodes électriques. Merci à tous pour vos rectifications et remarques constructives.

Aux membres de mon comité de pilotage de thèse : merci Arlène Besson, merci Cyril Kao, merci Marc Pessel, pour l'intérêt que vous avez porté à mon travail.

A mes plus proches collaborateurs : merci Julien Thiesson (presque troisième co-directeur de thèse), pour tant de choses, à commencer par ta conséquente contribution à ce travail, pour tes idées qui n'en finissent pas de fuser, pour les moments partagés sur le terrain, en colloque ou au labo, pour tes opinions tour à tour abruptes et rassurantes. J'espère que bien d'autres encore profiteront de ta créativité. Merci Joël Michelin de m'avoir fait découvrir la pédologie de terrain, pour ton expertise indispensable et ton aide à l'acquisition et au dépouillement des données.

A tous ceux qui ont prêté main forte sur le terrain pour les mesures électriques et prélèvements de sol : merci Thomas Jubeau, merci Christophe Labat, merci Jean-Marc Gilliot et merci Delphine Léobald.

Aux agriculteurs des parcelles étudiées : merci Damien Grosse et merci François Gilloots de nous avoir laissé, sans réserve, accomplir nos actes lombricides et esquinter quelque peu vos terres afin qu'à terme on cesse de les martyriser.

Merci à l'ensemble des sisyphiens (ou ex-sisyphiens) que j'ai côtoyés, de près, de loin voire pas du tout, qui font du labo un contexte de travail si agréable, et notamment :

▪ au personnel administratif : merci Dominique, merci Lisette, merci Nora, merci Valérie, la paperass'team qui s'occupe si bien de nous

▪ à l'équipe informatique que j'ai tant sollicitée et pas toujours aux bons moments : merci Bénédicte, merci Christophe, merci Maya

▪ à l'équipe géophy, doctorants compris : merci Christian, tu as été le commencement et le coach idéal pour la soutenance finale, merci Fayçal pour ton indéfectible altruisme, merci Ludovic pour tes apaisants coups de gueule, merci Nicolas pour les captivantes discussions d'ordre scientifique ou musical.
Merci Bruno d'avoir facilité ma fin de thèse et pour tes suggestions pertinentes sur ma présentation orale, merci Gaghik pour tes leçons de vie qui ne peuvent s'empêcher de s'incorporer à celles de sciences.
Merci Asal pour ta gentillesse, merci Samir et merci Mohamed-Amine de m'avoir accueillie, sans trop broncher, dans votre bureau déjà plein, merci Gonca pour tes expressions rigolotes du type "je t'ai rêvé" ou "arrêtez de me moquer", merci Amine pour ta vigueur à découper du sol, merci Rémi pour les pauses fructueuses en idées pour Surfer, merci François-Xavier pour pas grand-chose finalement, mais pas grand-chose c'est pas rien non plus, merci Claire si souvent à l'écoute ou la lecture de mes tourments, merci Pauline pour ton éternelle bonne humeur, et enfin, aux fraicheurs de vivre du bureau, merci Quentin, merci Sylvain. Je pars. Sonne l'heure de la passation du statut de chef du bureau des thésards. Voici ma proposition : l'un de vous sera désormais chargé de maintenir une atmosphère studieuse, tandis que l'autre fera en sorte de ne jamais perdre cette ambiance bon enfant dont vous êtes spécialistes. J'ajoute que l'interversion des rôles est possible.

Merci à tous mes proches, délaissés en cette fin thèse sans pour autant que leur soutien et leur affection faillissent : merci papa maman, vous qui avez suivi, parfois subi, mon parcours tellement sinueux ; merci mes poteaux, le terme est argotique mais il prend tout son sens dans ce contexte de thèse où le support moral est essentiel ; merci Simon, pour tout, tu as été précieux et parfait, d'un bout à l'autre de cette expérience doctorale.

Merci à tous d'être ceux que vous êtes.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I Prospection électrique : principe et application en science du sol 5

1. Principe de la méthode électrique 7

1.1. Introduction 7

1.1.1. Définition de la résistivité 7

1.1.2. Avantage de la mesure de résistivité 7

1.2. Des équations de Maxwell à l'équation de Laplace 8

1.2.1. Equations de Maxwell 8

1.2.2. Approximation sur la perméabilité magnétique 8

1.2.3. Régime continu ou approximation des régimes statiques 8

1.2.4. Equation de conservation de la charge 9

1.2.5. Equations de Maxwell réduites 9

1.2.6. Equation de Laplace 9

1.3. Distribution du potentiel électrique dans les sols 10

1.4. Mesure du potentiel créé par deux électrodes de courant 11

1.5. Notion de résistivité apparente 11

2. Mesure de la résistivité électrique des sols 12

2.1. Notion de profondeur d'investigation 12

2.2. Dispositif de mesure de la résistivité 12

2.2.1. Multipôles fixes 12

2.2.2. Cartographie multi-profondeur à l'aide de dispositifs tractés 13

3. Paramètres pédologiques influençant la résistivité électrique d'un sol 15

3.1. Variables pédologiques pérennes 16

3.1.1. Profondeur d'apparition du substrat 16

3.1.2. Texture et minéraux argileux 16

3.1.3. Pierrosité 16

3.2. Variables pédologiques dynamiques 17

3.2.1. Teneur en eau 17
3.2.2. Tassement et structure du sol 18
3.2.3. Salinité de la phase liquide 19
3.2.4. Température 19
3.2.5. Végétation et matière organique 20
4. Recherche bibliographique sur les valeurs de résistivité observées sur les matériaux géologiques du Bassin Parisien 20
CHAPITRE II Présentation des sites d'étude et des données géophysiques et pédologiques acquises sur les parcelles expérimentales 27
1. Site de Ouarville 29
1.1. Contexte régional : la Beauce 29
1.1.1. Localisation géographique 29
1.1.2. Contexte géologique 30
1.1.3. Hydrogéologie 31
1.1.4. Contexte pédologique 32
1.1.5. Climat 33
1.2. Présentation de la parcelle expérimentale et données disponibles 34
1.2.1. Situation géographique et géologie locale 34
1.2.2. Données de prospection géophysique et pédologique conduites sur la parcelle 35
2. Site d'Orgeval 37
2.1. Contexte régional : le bassin de l'Orgeval 37
2.1.1. Localisation géographique 37
2.1.2. Contexte géologique 39
2.1.3. Hydrogéologie 40
2.1.4. Pédologie 41
2.1.5. Climat 41
2.2. Présentation de la parcelle expérimentale et données disponibles 42
CHAPITRE III Problème direct 43
1. Matériels et méthode 45
1.1. Modélisation directe de mesures ARP® 45
1.1.1. Principe de la méthode des moments 45

1.1.2. Formulation du problème physique 45
1.1.3. Présentation de l'outil de calcul PELEC3D 47
1.2. Evaluation de la qualité de la détection d'un corps 48
1.2.1. Cartographie de résistivité apparente 48
1.2.2. Tracé du profil de résistivité à l'aplomb du corps 49
1.3. Paramètres testés 49
1.3.1. Espacement inter-profils 50
1.3.2. Profondeur et épaisseur du corps 50
1.3.3. Contraste de résistivité avec le milieu encaissant 52
2. Résultats 52
2.1. Evaluation des dimensions minimales détectables 52
2.2. Impact de l'espacement inter-profils sur la détection 54
2.3. Impact de la profondeur d'une structure sur sa détection 56
2.4. Impact de l'épaisseur d'une structure sur sa détection 59
2.5. Influence du contraste de résistivité entre le corps et l'encaissant 59
3. Synthèse sur la modélisation 60
CHAPITRE IV Etude de la différenciation d'horizons pédologiques à partir de mesures de résistivité électrique 65
1. Matériels et méthode 67
1.1. Site d'étude 67
1.2. Données pédologiques 69
1.2.1. Identification des horizons et description de la tranchée 69
1.2.2. Prélèvements d'échantillons de sol 70
1.3. Données géophysiques 71
1.3.1. Mesure de résistivité électrique apparente à l'aplomb de la tranchée avant son ouverture 71
1.3.2. Mesure de la résistivité pariétale par horizon 71
1.3.3. Modélisation de mesures électriques de surface sur une "tranchée synthétique" 72
1.4. Etude statistique 73
1.4.1. Etude de la distribution des données de teneur en eau, masse volumique apparente de sol et résistivité électrique pariétale 74

1.4.2. Mesure de la corrélation entre propriétés pédologiques et résistivité pariétale 74
2. Résultats 76
2.1. Prospection pédologique 76
2.1.1. Caractéristiques générales de la tranchée 76
2.1.2. Propriétés pédologiques de chaque horizon 76
2.1.3. Mesures de la teneur en eau et de la masse volumique apparente de sol 79
2.2. Données géophysiques 80
2.2.1. Mesures de résistivité électrique de surface et sur la paroi de la tranchée 80
2.2.2. Confrontation des résistivités apparentes mesurées et des résistivités apparentes modélisées 85
2.3. Etude statistique 86
2.3.1. Distribution des teneurs en eau massiques par horizon 86
2.3.2. Distributions des teneurs en eau volumiques par horizon 88
2.3.3. Distributions des masses volumiques apparentes de sol par horizon 88
2.3.4. Distributions des résistivités électriques par horizon 90
2.3.5. Corrélation entre résistivités pariétales et propriétés pédologiques 91
3. Synthèse 94
CHAPITRE V Etude de la cohérence entre prospection électrique à 3 profondeurs et répartition des sols sur 2 surfaces agricoles de 3 ha 97
1. Traitement préliminaire des données brutes 99
1.1. Ecrêtage 99
1.2. Interpolation 99
1.3. Impact sur les distributions de données et cartographie de résistivité apparente 101
2. Principe de la méthode 107
2.1. Taxonomies géophysique et pédologique 107
2.1.1. Classification des profils verticaux de résistivité apparente 107
2.1.2. Attribution d'un profil de résistivité aux unités cartographiques de sol 107
2.2. Discussion sur la valeur du paramètre différenciateur de couches α 110
2.3. Formalisme utilisé 110
2.3.1. "Matrice électrique" (ME) 110

2.3.2. "Matrice pédologique" (MP) ... 111
2.3.3. Principe du calcul de distance matricielle ... 112
3. Mise en œuvre sur les données de Ouarville ... 112
3.1. Balayage maximal du paramètre α ... 112
3.1.1. Vers des sondages électriques correspondant à un terrain homogène ... 112
3.1.2. Courbes de densité de profils-types ... 113
3.1.3. Comparaison avec taxons pédologiques et synthèse ... 118
3.2. Cartographie des profils verticaux de résistivité apparente pour α variant de 2 à 7 Ω.m ... 120
3.2.1. Organisation spatiale des profils-types dominants ... 120
3.2.2. Correspondance avec la carte des sols et synthèse ... 123
3.3. Mesure de la ressemblance entre ME et MP ... 126
3.3.1. Application du calcul de distance matricielle ... 126
3.3.2. Cartographie de ressemblance entre sondages électriques issus de la prospection et taxons établis ... 126
3.3.3. Synthèse et potentialité d'automatisation de la méthode ... 128
4. Mise en œuvre sur les données d'Orgeval ... 129
4.1. Cartographie des profils verticaux de résistivité apparentes pour 2 Ω.m < α < 7 Ω.m ... 129
4.2. Application du calcul de distance matricielle ... 131
4.3. Synthèse et discussion sur la valeur du paramètre α ... 132
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES ... 135
REFERENCES ... 139
TABLE DES ILLUSTRATIONS ... 149
LISTE DES TABLEAUX ... 153
ANNEXES ... 155

INTRODUCTION

Le sol, ou couverture pédologique, résulte de l'évolution au cours du temps d'un matériau minéral sous l'action combinée du climat et de l'activité biologique (Baize et Jabiol 1995). Il est non seulement le milieu de vie de nombreux organismes mais constitue également une ressource pour les besoins alimentaires, pour la production de matières premières végétales et désormais de biocarburants. Il tient aussi un rôle important dans la dégradation des déchets, dans le stockage de gaz à effet de serre ou encore dans le filtrage, l'épuration de l'eau et la régulation des nappes. Il est par conséquent utile à tous : aux particuliers qui subissent les conséquences de sa détérioration (inondations, dégradation de la qualité de l'eau et des aliments), aux agriculteurs pour améliorer la production, aux forestiers pour la production de bois, aux hydrologues pour la gestion des ressources en eau, aux archéologues, pour qui le sol est la principale archive de l'histoire.

Cependant, les sols, soumis à divers aléas, contamination par les polluants atmosphériques, érosion, compaction, surfertilisation, artificialisation, … (Auerswald et Kutilek 1998) voient leurs propriétés physiques, chimiques ou biologiques évoluer de manière significative. Ceci est notamment vrai pour les sols agricoles, qui, depuis quelques décennies, connaissent le développement d'une agriculture intensive adoptée comme remède à l'insécurité alimentaire. Cependant, les pratiques de ce type d'agriculture – monoculture, utilisation d'intrants chimiques, mécanisation poussée, mise en place de vastes surfaces – ont de nombreux impacts : pollution, érosion, appauvrissement des sols en matières organiques, pollution des nappes et rivières par les apports azotés et phosphatés (prolifération d'algues par eutrophisation), atteinte à la biodiversité (suppression des haies causant la disparition des insectes utiles mais également homogénéisation du paysage), développement d'espèces végétales ou animales devenant particulièrement résistantes voire insensibles aux produits phytosanitaires, *etc*. Ce modèle d'agriculture intensive, *qui artificialise, uniformise et standardise toujours plus et qui force le système biologique* (Cirad 2008) montre actuellement ses limites : la production stagne voire diminue.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse, dont l'objet d'étude est le sol agricole. Une des principales préoccupations vis-à-vis des sols agricoles est leur fonctionnement hydrodynamique (Curmi *et al.* 1997). Les transferts d'eau, primordiaux pour les cultures, et en conséquence ceux de l'ensemble des intrants agricoles, sont conditionnés par de nombreux paramètres : type de sol (structure, texture), topographie, alimentation en eau (précipitation, irrigation), état du sol (compaction, hydromorphie). Les problèmes de pollutions des sols ou des eaux souterraines peuvent ainsi trouver leur origine dans des

zones géographiques très localisées, en lien avec des caractéristiques particulières du sol. Pour pouvoir gérer et protéger les sols, il est nécessaire de disposer d'une information pédologique aussi précise que possible sur une large gamme d'échelles spatiales. Une connaissance précise de la variabilité spatiale des sols pourrait par exemple permettre de mieux identifier les zones vulnérables et réduire ainsi les risques de pollution diffuse liée aux intrants agricoles.

L'information spatialisée sur les sols est classiquement produite à l'aide d'une part, d'observations locales (sondages, fosses pédologiques), qui permettent la reconnaissance des types de sol et de leurs caractéristiques, et, d'autre part, en s'appuyant sur des relations qualitatives entre types de sols et facteurs du milieu (relief, géologie, etc.) qui permettent d'interpoler voire d'extrapoler spatialement les observations ponctuelles. Cependant, cette démarche trouve sa limite dès que les couvertures pédologiques sont hétérogènes (en Beauce, par exemple) ou lorsque la répartition spatiale des sols est peu dépendante des facteurs du milieu. Dans de telles situations, le recours à la prospection géophysique, et notamment à la méthode électrique, s'est révélé très efficace (Moeys *et al.* 2006), car elle permet une exploration rapide et quasi continue des sols (Dabas *et al.* 1989).

La cartographie des sols consiste à identifier les caractéristiques propres des horizons qui le constituent, la position de chacun dans la couverture pédologique, ainsi que leurs relations avec les horizons voisins.
L'objectif de ce travail de thèse est d'exploiter les données de résistivité afin de voir dans quelle mesure les horizons sont électriquement identifiables, et de développer une méthode permettant une première évaluation des caractéristiques géométriques – profondeur, nombre et épaisseur des horizons – du sol à partir des informations issues de la prospection électrique. A terme, ce travail devrait déboucher sur une méthode semi-automatique de cartographie, applicable à l'échelle parcellaire, en vue d'obtenir la représentation spatiale tridimensionnelle la plus probable de la couverture pédologique.

La présentation des travaux réalisés dans ces objectifs s'organise en cinq parties.

La première partie présente le principe et la mise en œuvre de la prospection électrique. Elle expose, à travers une étude bibliographique portant sur les applications de cette méthode en sciences du sol, les liens existants entre facteurs pédologiques et résistivité électrique ; elle montre combien la résistivité électrique peut être influencée par les effets combinés de différents paramètres pédologiques.

La deuxième partie présente les sites d'étude sur lesquels des prospections géophysique et/ou pédologique ont été menées dans le cadre de cette thèse. Elle replace chacune des deux parcelles expérimentales étudiées dans son contexte géologique, hydrogéologique et pédologique.

La troisième partie présente les résultats d'une modélisation de mesures de résistivité électrique multi-profondeurs réalisées en vue, d'une part, de définir une stratégie de prospection optimale, et, d'autre part, d'évaluer les performances et limites de la méthode électrique. Ce chapitre consiste en l'étude de la détectabilité d'une hétérogénéité, aux propriétés géométriques et électrique variables, confinée dans un environnement synthétique comparable à ceux rencontrés dans le Bassin Parisien.

La quatrième partie présente l'expérimentation menée sur une tranchée creusée dans une couverture pédologique et recoupant la limite séparant deux plages cartographiques de sol identifiées. A l'aide de mesures de résistivité sur la paroi de la tranchée mais également en surface, il s'agit de retrouver les propriétés de chacune des unités cartographiques recoupées par la tranchée. Des mesures de teneurs en eau, massique et volumique, et de masse volumique apparente sont également réalisées afin de préciser les relations entre propriétés pédologiques et résistivité électrique.

Enfin, la cinquième et dernière partie propose une méthode simple et originale d'exploitation de données électriques issues d'une prospection multi-profondeurs. Ces dernières, habituellement traitées sous forme cartes de résistivité apparente, sont ici considérées comme un ensemble de sondages électriques verticaux. Basée sur l'analyse des données de chaque sondage, cette méthode permet de proposer une taxonomie géophysique à confronter à la taxonomie pédologique. Les possibilités d'automatisation de la méthode sont esquissées à la fin de cette partie.

CHAPITRE I

Prospection électrique : principe et application en science du sol

Ce chapitre présente les fondements et les avantages de la méthode électrique ainsi que quelques dispositifs de la mesure de résistivité. A partir de cas d'applications en science du sol exposé dans la littérature, il met en avant les facteurs pédologiques qui influent sur la mesure de résistivité électrique. Enfin, pour servir de base au travail présenté dans ce manuscrit, une étude bibliographique a été réalisée sur les valeurs de résistivité qui ont pu être mesurée dans le cadre de prospections menées dans le Bassin Parisien, territoire qui nous intéressera en particulier.

1. Principe de la méthode électrique

1.1. Introduction

1.1.1. Définition de la résistivité

La grandeur mesurée par la méthode électrique est la résistivité électrique. La résistance R, mieux connue, mesure l'opposition d'un matériau au passage d'un courant électrique et peut permettre ainsi de le caractériser. Cependant, comme il s'agit d'une grandeur dépendante de la géométrie du corps concerné (Figure 1), il est d'usage de se baser sur une propriété qui ne l'est pas, la résistivité, notée ρ, qui est liée à la résistance par la relation :

$$R = \frac{\rho\, L}{A}$$

où R et ρ sont les résistance et résistivité du matériau, L et A ses longueur et section.

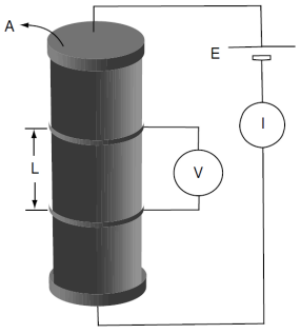


Figure 1. Mesure de la résistance électrique d'un matériau

La résistivité ρ est alors définie par la loi d'Ohm vectorielle $\vec{E} = \rho\, \vec{\imath}$ et caractérise comme R la capacité d'un matériau à laisser passer le courant. Son unité est l'ohm.mètre (Ω.m). Elle est l'inverse de la conductivité σ (en S.m^{-1}) plus couramment employée dans le formalisme présentant les propriétés électromagnétiques des milieux (cf. plus loin).

1.1.2. Avantage de la mesure de résistivité

La profondeur d'investigation d'une prospection électrique s'étend de quelques centimètres à plusieurs kilomètres de profondeur ce qui en fait une méthode utilisée dans divers domaines des sciences de la Terre : en recherche minière, en construction de bâtiment, en hydrogéologie, etc.

Cette grandeur physique est d'une part très liée à la teneur en argile qui présente un intérêt tout particulier pour les pédologues et montre d'autre part une gamme de variation extrêmement étendue (plusieurs décades) selon les matériaux géologiques. La méthode électrique est en outre une méthode fiable, robuste, non destructive et peu, voire non influencée, par les éléments extérieurs lors de la prospection (contrairement à la méthode électromagnétique). Sa mise en œuvre s'appuie sur un large choix de dispositifs dont les

configurations et parfois même la mécanisation permettent de prospecter des surfaces importantes rapidement ou encore d'investiguer plusieurs profondeurs (investigation par commutation d'électrode par exemple).

1.2. Des équations de Maxwell à l'équation de Laplace

1.2.1. Equations de Maxwell

Le comportement des phénomènes électrique et magnétique dans un milieu est régi par les équations de Maxwell :

$div\,\vec{E} = \frac{q}{\varepsilon}$	Maxwell-Gauss	(MG)
$div\,\vec{B} = 0$	Maxwell-"flux"	(Mf)
$\overrightarrow{rot}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	Maxwell-Faraday	(MF)
$\overrightarrow{rot}\,\vec{B} = \mu\,\vec{j} + \varepsilon\,\mu\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	Maxwell-Ampère	(MA)

dans lesquelles :

$\vec{E}$ est l'expression du champ électrique en V.m^{-1}

$\vec{B}$ celle de l'induction magnétique Wb.m^{-2}

$\vec{j}$ la densité volumique de courant de conduction en A.m^{-2}

q est la densité volumique de charge (en C.m^{-3})

ε (en F.m^{-1}) et μ (en H.m^{-1}) sont respectivement la permittivité électrique et la perméabilité magnétique absolues du milieu

1.2.2. Approximation sur la perméabilité magnétique

Dans un milieu linéaire la perméabilité absolue peut s'écrire :

$$\mu = \mu_0\,\mu_r$$

où μ_0 (en H.m^{-1}) est la perméabilité du vide et μ_r (sans unité) la perméabilité relative du milieu. Or, μ_r est liée à la susceptibilité magnétique du milieu par : $\mu_r = 1 + \chi$. Cette susceptibilité magnétique, inférieure à 0,01 pour les sols et les roches, devient négligeable dans l'expression ce qui conduit à l'approximation suivante :

$$\mu_r \sim 1 \text{ et } \mu \sim \mu_0$$

1.2.3. Régime continu ou approximation des régimes statiques

L'approximation des régimes statiques consiste à négliger les variations de toutes les gandeurs dans le temps. Cette approximation est valable dès lors que le régime est de suffisamment basse fréquence par rapport à la taille du dispositif employé (c'est-à-dire que la distance L entre la source et le point de mesure de potentiel implique un nombre d'induction $\sigma\,\mu\,\omega\,L^2 \ll 1$).

En prospection électrique, le champ électrique créé artificiellement est considéré de fréquence suffisamment basse pour que les courants injectés qui en sont à l'origine aient le temps de se stabiliser. Cette approximation implique que le courant déplacement $\overrightarrow{J_D} = \frac{\partial(\varepsilon\,\vec{E})}{\partial t}$, lié au phénomène de polarisation, est négligeable devant le courant de conduction $\vec{j}$:

$$\|\overrightarrow{J_D}\| \ll \|\vec{j}\|$$

Dans la loi d'Ohm $\vec{j} = \sigma\,\vec{E}$, la conductivité électrique σ en régime continu est alors réelle et indépendante de la fréquence et les termes en $\frac{\partial}{\partial t}$ des équations de Maxwell s'annulent.

1.2.4. Equation de conservation de la charge

La circulation d'un courant dans un volume obéit au principe de conservation de la charge qui s'écrit à l'aide de la relation de continuité suivante :

$$div\,\vec{j} + \frac{\partial q}{\partial t} = 0$$

Considérons un volume de sol homogène, dans lequel σ ne varie pas dans l'espace. Dans le cas d'une prospection électrique, où le régime est stationnaire, la quantité de charges électriques qui passent à l'intérieur de ce volume est égale à la quantité de charges qui le quittent. Le régime continu annule la relation de continuité :

qui, avec la loi d'Ohm : $\left.\begin{array}{l} div\,\vec{j} = 0 \\ \vec{j} = \sigma\,\vec{E} \end{array}\right\}$ donne $div\,\vec{E} = 0$

1.2.5. Equations de Maxwell réduites

L'ensemble des approximations et simplifications précédentes conduisent à une écriture réduite des équations de Maxwell dans lesquelles l'unique propriété variable est la conductivité σ :

$div\,\vec{E} = 0$	Maxwell-Gauss
$div\,\vec{B} = 0$	Maxwell-"flux"
$\overrightarrow{rot}\,\vec{E} = \vec{0}$	Maxwell-Faraday
$\overrightarrow{rot}\,\vec{B} = \mu_0\,\sigma\,\vec{E}$	Maxwell-Ampère

1.2.6. Equation de Laplace

Considérons toujours le cas d'un sol homogène où la conductivité σ est constante, l'équation de MF $\overrightarrow{rot}\,\vec{E} = 0$ implique que le champ électrique $\vec{E}$ dérive d'un potentiel scalaire V tel que :

qui, avec MG réduite : $\left.\begin{array}{l} \vec{E} = -\overrightarrow{grad}\,V \\ div\,\vec{E} = 0 \end{array}\right\}$ donne $-div\left(\overrightarrow{grad}\,V\right) = 0$

$$\Leftrightarrow\ \Delta\,\mathbf{V} = \mathbf{0}$$

Equation de Laplace

✓ **Remarque sur l'approximation des basses fréquences en régime harmonique**

En régime harmonique, le champ électrique engendré par un courant sinusoïdal au cours du temps et de pulsation ω s'écrit :

$$\vec{E} = \overrightarrow{E_0}\, e^{i\,\omega t}$$

alors : $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = i\,\omega\,\vec{E}$

qui, dans l'équation de MA : $\overrightarrow{rot}\,\vec{B} = \mu_0\,\vec{j} + \varepsilon\,\mu\,\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

$\Big\}$ donne : $\overrightarrow{rot}\,\vec{B} = \mu_0\,(\sigma + i\,\omega\,\varepsilon)\vec{E}$

A basses fréquences – f<<10 MHz – (10 MHz étant la fréquence qui égalise les 2 termes avec des valeurs courantes telles que σ=0,01 S.m^{-1} et ε_r=18), le terme de propagation $\mu_0\,i\,\omega\,\varepsilon\,\vec{E}$ devient négligeable et l'on retrouve :

$$\overrightarrow{rot}\,\vec{B} = \mu_0\,\sigma\,\vec{E}$$

ce qui permet de calculer le champ magnétique créé par la distribution de courant.

1.3. Distribution du potentiel électrique dans les sols

L'objectif étant de connaître le potentiel V correspondant à la présence d'un champ électrique $\vec{E}$ dans le sol, il est nécessaire de résoudre l'équation de Laplace :

$$\Delta\,V = 0$$

Dans le cas d'une prospection électrique où le potentiel est créé par un courant injecté au moyen d'une électrode à la surface d'un sol homogène et isotrope, le problème présente une symétrie demi-sphérique. En prenant les variables d'espace définies dans la Figure 2 et en prenant en compte les invariances par rotation d'angle θ et d'angle φ, le laplacien de V[1] est réduit à :

$$\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dV}{dr}\right) = 0$$

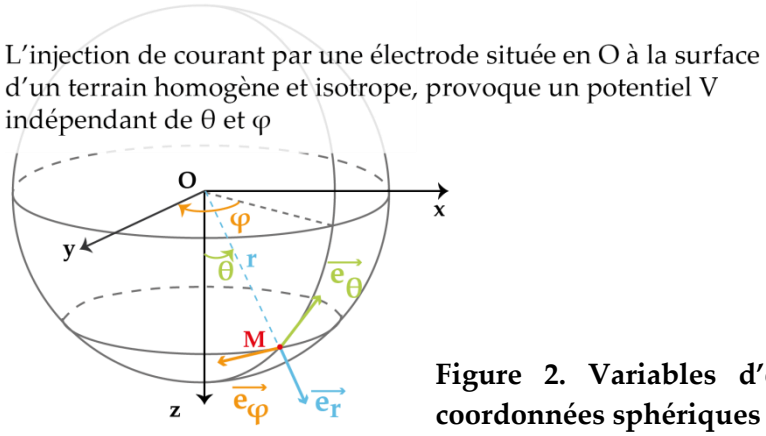


Figure 2. Variables d'espace utilisées en coordonnées sphériques

[1] Rappel : le laplacien d'un champ scalaire V en coordonnées sphériques s'écrit :

$$\Delta V = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial V}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin\theta}\left[\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial V}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial^2 V}{\partial\varphi^2}\right]$$

Le potentiel V ne dépend donc que de sa distance à l'électrode d'injection. En multipliant l'expression par r^2 et par intégration en prenant :
- un potentiel nul à l'infini ($V(r \to \infty) = 0$)
- et une densité volumique de courant j en un point quelconque à la distance r de l'électrode égale au courant total injecté traversant la surface demi-sphérique de rayon r :

$$\left.\begin{array}{l} j = \frac{I}{2\pi r^2} \\ \text{qui avec la loi d'Ohm : } \vec{j} = \sigma\,\vec{E} = -\sigma\,\overrightarrow{grad}\,V \end{array}\right\} \text{ donne } \quad V = \frac{I}{\sigma\,2\pi r} \quad \text{par intégration.}$$

L'expression du potentiel à une distance r d'une source de courant I dans un milieu demi-infini homogène et isotrope de résistivité ρ est donc donné par :

$$V(r) = \frac{\rho\,I}{2\pi r}$$

1.4. Mesure du potentiel créé par deux électrodes de courant

En pratique, 4 électrodes sont utilisées : deux électrodes appelées A et B, injectant $+I$ et $-I$, sont sources de courant ; deux autres, M et N, servent pour la mesure d'une différence de potentiel.
En appliquant le principe de superposition, la différence de potentiel s'écrit :

$$V_M - V_n = V_M(d\text{û à} + I\ en\ A) + V_M(d\text{û à} - I\ en\ B) - [V_N(d\text{û à} + I\ en\ A) + V_N(d\text{û à} - I\ en\ B)]$$

ce qui se traduit avec l'expression finale de la section 1.3 de la manière suivante :

$$V_M - V_N = \frac{\rho\,I}{2\,\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)$$

En définissant le coefficient géométrique K, qui dépend de la configuration du quadripôle utilisé :

$$K = \frac{2\,\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

la résistivité de l'espace demi-infini homogène et isotrope est donnée par :

$$\rho = K\,\frac{V_M - V_N}{I}$$

1.5. Notion de résistivité apparente

Lorsque le milieu est hétérogène ou anisotrope, la présence de discontinuités modifie la répartition des lignes de courants et la résistivité mesurée en un point n'est plus fonction uniquement de la distance de ce point à la source. La résistivité mesurée est alors appelée résistivité apparente du terrain ρ_a. Elle résulte de la contribution de tous les éléments constitutifs du sol traversés par le courant émis. Elle est par conséquent dépendante du volume investi par le courant (notion évoquée paragraphe 2.1), qui lui-même est conditionné par la configuration du dispositif utilisé.
La valeur de résistivité apparente ne peut donc avoir de signification que si elle est comparée à d'autres valeurs : seules les variations relatives sont significatives.

2. Mesure de la résistivité électrique des sols

2.1. Notion de profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation qualifie l'épaisseur de terrain prise en compte dans la mesure. Pour un quadripôle donné, elle dépend de l'écart existant entre l'électrode de mesure de potentiel et l'électrode d'injection les plus proches. Ainsi, un écartement inter-électrode important permettra d'investiguer un volume de sol plus conséquent qu'un dispositif avec un faible espacement entre les électrodes.

Cependant, la profondeur d'investigation est conditionnée par le terrain prospecté. Si celui-ci comporte des zones conductrices, notamment en surface, les lignes de courant vont être concentrées dans ces régions conductrices et ne pourront investir celles plus profondes.

Généralement, les profondeurs d'investigation théoriques sont considérées, suivant la répartition verticale des résistivités, égales à l'écartement ou au demi-écartement entre l'électrode de potentiel et l'électrode de mesure les plus proches ; si cette indication est couramment valable, car basée sur un panel de sites prospectés "moyens", il convient de garder en mémoire qu'elle n'est qu'une estimation grossière.

2.2. Dispositif de mesure de la résistivité

Il existe de nombreux dispositifs de mesure de résistivité électrique dont les configurations permettent d'intégrer des volumes de sol variables, qui sont plus ou moins sensibles aux contrastes verticaux ou latéraux ou encore aux irrégularités de surfaces et dont les rapports signal sur bruit diffèrent de l'un à l'autre (Dahlin et Loke 1998).

2.2.1. Multipôles fixes

a) Exploration verticale : le sondage électrique

Le sondage part de l'observation selon laquelle l'épaisseur du terrain où circule la part significative du courant dépend de l'écartement des électrodes. Le principe consiste, à l'aide de 4 électrodes, à accroître le volume investigué en augmentant progressivement l'écartement, le dispositif restant de même configuration et de même centre. Le résultat du sondage caractérise la variation de la résistivité apparente en fonction de l'écartement des électrodes, variation ensuite interprétée en fonction de la profondeur en un point donné.

b) Exploration horizontale

Pour restituer les variations latérales de résistivité apparente, il suffit de déplacer, selon un pas régulier, un quadripôle AMNB de géométrie fixe sur le site à explorer. Si le déplacement se fait le long d'une ligne, il s'agit de profilage ou trainé électrique (1D horizontal). Si le déplacement se fait le long de plusieurs lignes – avec toujours le même écartement inter-électrodes –, la technique permet de réaliser des cartes de résistivité apparente (2D horizontal).

c) Exploration verticale et latérale par tomographie électrique

- Panneau électrique 2D

Le panneau électrique combine les techniques de profilage et de sondage pour décrire les distributions latérale et verticale des résistivités. Une rangée de N (N=72, 96…) électrodes équidistantes est pré-implantée le long d'un profil. Par permutation des couples d'électrodes, le centre du dispositif est déplacé et l'écartement augmenté, en respectant ou non la configuration adoptée. Le résultat obtenu est une pseudo-section de résistivité apparente, interprétée ensuite en coupe géoélectrique.

- Panneau électrique 3D

Il correspond à une série de panneaux 2D parallèles utilisés simultanément. Les électrodes sont pré-implantées selon une grille régulière et le quadripôle de mesure peut alors prendre diverses configurations (carré, en ligne parallèle, …). Le résultat obtenu est un pseudo-bloc diagramme de résistivité apparente, interprété ensuite en bloc diagramme géoélectrique.

2.2.2. Cartographie multi-profondeur à l'aide de dispositifs tractés

L'emploi de multipôles électriques mobiles remonte aux années 30 avec des dispositifs pour lesquels des brevets ont été déposés aux Etat-Unis et au Canada (Panissod 1997). Différents outils ont également été envisagés au Centre de Recherche (CNRS) de Garchy des années 60 au années 90 (Hesse *et al.* 1986 ; Panissod *et al.* 1997b, 1998).

Le développement de dispositifs de mesure tractés répond à deux préoccupations majeures de la géophysique de subsurface :

- un pas d'échantillonnage suffisamment petit pour décrire les variations latérales brutales de résistivité,
- l'amélioration de rapport temps de prospection / surface couverte.

Ainsi, les dispositifs actuels permettent de prospecter rapidement des surfaces étendues avec une maille de mesure fine. Ils sont donc particulièrement intéressants pour l'étude de parcelles agricoles, de plus en plus vastes et dont la couverture végétale non pérenne ou limitée en hauteur permet le passage de ces appareils.

Figure 3. Exemples de sytèmes tractés utilisés pour la mesures de résistivité à grande échelle spatiale : dispositifs Veris 3100 (à gauche) et MUCEP (à droite)

Parmi les dispositifs tractés, trois sont présentés ici, dont le dernier (celui de l'ARP®) plus en détail, puisque les données traitées dans cette étude proviennent majoritairement de prospections réalisées au moyen de ce dispositif.

a) VERIS 3100

Le Veris 3100 est un système développé au Kansas (USA) par l'entreprise Veris technologies (Figure 3). Ce dispositif possède 3 dipôles dont un d'injection commun aux deux autres de mesures de potentiel. La configuration est celle d'un dispositif Wenner : 4 électrodes en ligne, équidistantes de 25 cm, dont les deux extrêmes sont celles qui injectent le courant. Ce sont des disques qui font office d'électrode. Les profondeurs théoriques d'investigation sont de 30 et 90 cm (Lund *et al.* 1999).

b) MUCEP : MUlti Continuous Electrical Profiling

Constitué d'un dipôle d'injection de courant commun à trois dipôles de mesures de potentiel, le système MUCEP (Figure 3) dispose d'une configuration dite en "Vol de Canard" assurant un bon rapport signal/bruit et la mesure simultanée de 3 résistivités (Panissod *et al.* 1997a). Des roues à picots font office d'électrode. Les espacements entre les électrodes d'injection et de mesures sont de 0,5, 1 et 2 m et permettent ainsi une acquisition intégrant des volumes de sols croissants. Ce dispositif est un prototype dont l'évolution a donné naissance à l'ARP.

c) ARP® : Automatic Resistivity Profiling

L'ARP® (Figure 4) est une version améliorée du MUCEP et mise en œuvre par la société Geocarta (Paris). Les écartements croissants entre les dipôles émetteur-récepteur (distances AM_i égales à 50 cm, 1 et 2 m, voir Figure 5) permettent d'intégrer des volumes croissants de sol et par extension des profondeurs de plus en plus importantes. Ces profondeurs d'investigation théoriques sont estimées à 50 cm, 1 m et 1,7 m.

Figure 4. Dispositif ARP® utilisé à Ouarville (28)

Avec une mesure tous les 13 cm environ, dans le sens de déplacement de l'appareil, celui-ci permet, pour des profils espacés de 1 m, près de 100000 mesures par hectare pour chacune des voies de mesure. Plusieurs milliers de "sondages" électriques par hectare sont alors disponibles et ce de manière très rapide.

✓ **Remarque**

D'après la formule du coefficient géométrique d'un quadripôle défini partie 1.4, comme $AN = BM$, celui de l'ARP® s'écrit :

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}}$$

Le dispositif possède donc un coefficient géométrique correspondant à chacune des voies de mesure et dont les valeurs sont :

k1=4,627 m

k2=10,726 m

k3=51,099 m

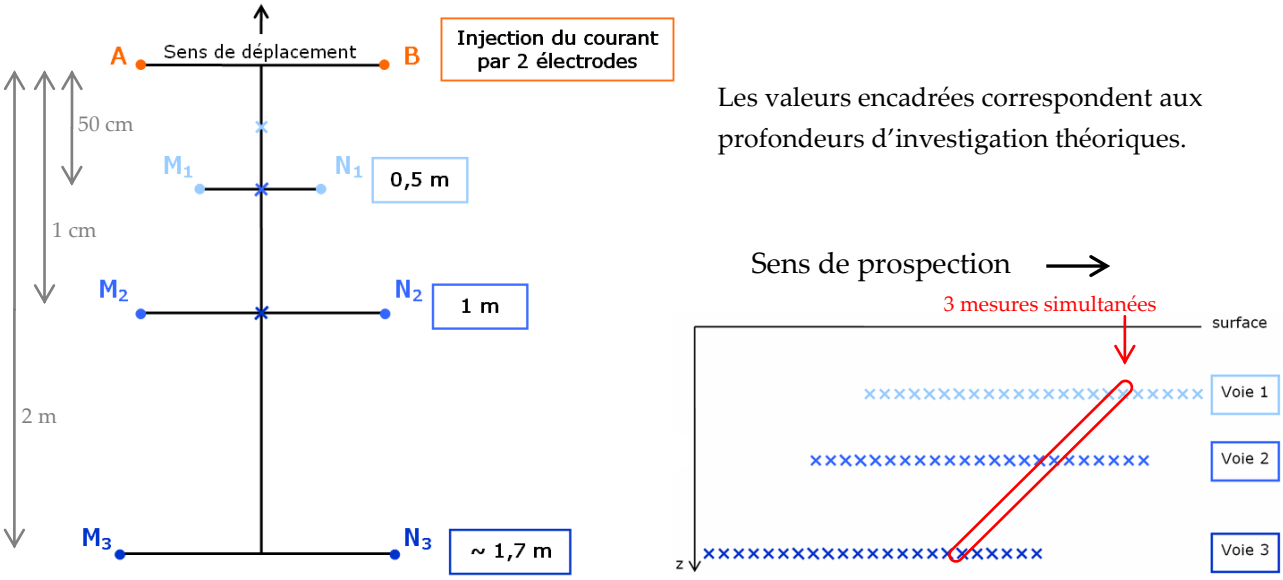


Figure 5. Configuration du dispositif (les croix indiquent l'aplomb des positions des 3 mesures) – Illustration du principe de mesures à 3 profondeurs

3. Paramètres pédologiques influençant la résistivité électrique d'un sol

De nombreuses variables pédologiques ont un impact sur la mesure de résistivité (Friedman 2005 ; Samouëlian *et al.* 2005). La littérature abonde d'études qui mettent en rapport les variations de résistivité avec les variables intrinsèques du sol (texture, organisation de la phase solide, …), avec les variables liées à l'eau qu'il contient (composition ionique, viscosité, …) ou encore avec des paramètres extérieurs (température, végétation, …). L'organisation choisie ici pour évoquer les liens entre résistivité et facteurs pédologiques repose sur l'idée mentionnée par Besson (2007) qu'il existe d'une part les variables pédologiques pérennes, dont l'évolution temporelle est suffisamment lente pour être considérée comme négligeable, et, d'autre part, les variables dynamiques, qui, au contraire, se caractérisent par une évolution rapide, comme c'est le cas pour la teneur en eau.

3.1. Variables pédologiques pérennes

3.1.1. Profondeur d'apparition du substrat

Dans le contexte des plateaux du Bassin Parisien, de nombreuses études, portant notamment sur la cartographie des sols (Chery 1995 ; Le Parco 1995), ont démontré l'utilité de la prospection électrique pour déterminer la profondeur d'un **substrat calcaire**. **Plus sa profondeur d'apparition est faible, plus la résistivité mesurée en surface est importante.**
A partir d'une interprétation conjointe de données pédologiques et géophysiques, Panissod (1997) obtient une bonne correspondance entre cartes de résistivités (apparentes et interprétées) et épaisseur d'horizons argileux ; il conclue à un lien fort entre variation de résistivité apparente et profondeur d'apparition et épaisseur des matériaux limono-argileux. Ce constat est confirmé par Dabas *et al.* (1995) ainsi que par Moeys *et al.* (2006), cette dernière étude précisant que la **diminution de résistivité due à l'épaisseur d'un niveau limono-argileux** est notamment visible sur les mesures par les plus grands quadripôles des systèmes de prospection électrique multi-profondeur.
De manière générale, la profondeur d'un sol est une propriété qui régit en grande partie la variabilité de résistivité (Zanolin 2003). **Ainsi, un sol court présente la plupart du temps de hautes valeurs de résistivité apparente tandis qu'un sol profond est plus conducteur**.

3.1.2. Texture et minéraux argileux

La texture du sol est le facteur qui a le plus d'impact sur la mesure de résistivité, du fait du rôle joué par l'argile. En effet, les minéraux argileux, comportant une surface électriquement non neutre, sont caractérisés par leur capacité d'adsorption des ions de l'électrolyte. Cette propriété leur confère une forte capacité d'échange cationique (CEC) (Waxman et Smits 1968) : elles fixent des cations, qui augmentent la densité de charge conductrice (Ward 1990), qui peuvent se déplacer à la surface des feuillets.
La résistivité apparente d'un sol est ainsi très fortement influencée par la proportion d'argile plus conductrice (Auerswald *et al.* 2001). Par conséquent, **une forte teneur en argile entraîne une diminution de la résistivité**. Les **mesures de résistivité électrique peuvent alors être une indication du degré d'évolution d'un sol**, car elles permettent, sur des luvisols, de **différencier l'horizon E éluvié de l'horizon BT** sous-jacent enrichi en argile : des mesures de résistivité sur des sols du Bassin Parisien (Nicole *et al.* 2003 ; Nicole 2006) ont donné des valeurs supérieures à 70 Ω.m pour les horizons E tandis que les horizons argileux BT avaient une résistivité comprise entre 30 et 60 Ω.m. Ces mesures ont en outre montré que le phénomène d'éluviation était plus important dans les micro-dépressions topographiques.
La résistivité peut donc être un indicateur de l'évolution pédogénétique des sols.

3.1.3. Pierrosité

La relation entre charge en éléments grossiers et résistivité électrique est connue depuis longtemps comme étant un inconvénient puisque la présence de cailloux est une gêne au

planté d'électrode et qu'elle engendre des mesures bruitées. **Plus un sol est caillouteux, plus sa résistivité est importante.** L'utilisation récente de cette corrélation pour estimer la teneur en cailloux permet d'une part une bonne correspondance entre zones de fortes résistivités sur une carte de résistivité apparente et types de sols caillouteux sur la carte des sols ; d'autre part l'exploitation du bruit des mesures de résistivité permet de quantifier le volume de cailloux dans le sol (Tetegan *et al.* 2012).

3.2. Variables pédologiques dynamiques

3.2.1. Teneur en eau

La conductivité des sols étant électrolytique, c'est-à-dire basée sur le déplacement des ions, **l'augmentation de la teneur en eau a pour incidence une diminution de la résistivité électrique**. Les premiers travaux montrant cette relation ont été réalisés par Archie (1942) qui a constaté que la résistivité d'une roche sédimentaire sans argile et saturée d'eau était liée à la résistivité de cette eau ; cette relation s'est révélé également valable dans la zone non saturée des sols et peut s'écrire :

$$\frac{\rho_f}{\rho_e} = \frac{a}{\Phi^m \, S_e^n}$$

où : ρ_f et ρ_e sont les résistivités de la formation et du fluide baignant cette formation

Φ est la porosité de la formation (volume des vides – volume des phases fluides et gazeuses – sur volume total)

S_e est la saturation en eau (volume de la phase liquide sur volume des vides)

a, m et n sont des constantes de valeurs moyennes égales respectivement à 1, 2 et 2

De nombreuses mesures en laboratoire (Fukue *et al.* 1999 ; Kalinski *et al.* 1993 ; Michot 2003) ont montré cette dépendance entre teneur en eau et résistivité (Figure 6). Le type de corrélation semble en revanche difficile à définir : il apparaît que leur relation n'est linéaire que pour une gamme de teneur en eau supérieure à un certain seuil, en dessous duquel la continuité de l'eau porale n'est plus assurée.

McCarter (1984) a également testé le degré de saturation pour différentes teneurs massiques en eau dans des argiles et a conclu que **la résistivité diminue lorsque le degré de saturation augmente**.

Cette propriété liant la résistivité à la teneur en eau a permis des études de suivi temporel à l'échelle de la saison (Besson 2007) ou sur quelques heures (Assi 2007) pour visualiser, par tomographie électrique, l'infiltration de l'eau dans un sol au cours de l'arrosage (Batlle-Aguilar *et al.* 2009 ; Michot *et al.* 2003) ou encore pour cartographier la distribution de la teneur en eau du sol afin d'en comprendre à plus long terme le fonctionnement hydrodynamique (Besson *et al.* 2010 ; Cousin *et al.* 2009).

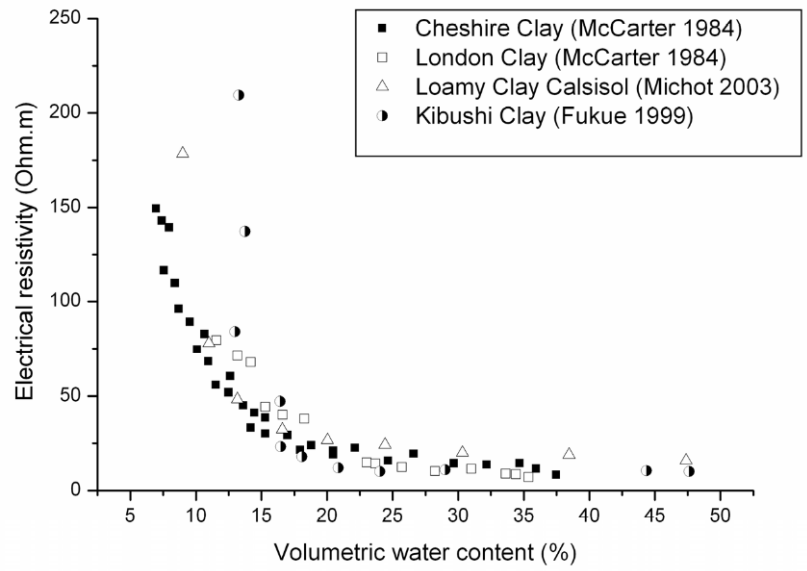


Figure 6. Relation entre la teneur en eau volumique et la résistivité électrique pour différents types de sol (d'après Samouëlian *et al.* 2005)

3.2.2. Tassement et structure du sol

La mesure de résistivité permet de distinguer les sols cohérents de ceux qui ne le sont pas. La prospection électrique sur des sols sableux du Cameroun (Lamotte 1993) a montré que **les horizons sableux peu cohérents sont associés à de fortes résistivités apparentes** – supérieures à 1000 Ω.m – **tandis que les horizons sableux très cohérents présentent de faibles résistivités apparentes** – inférieures à 80 Ω.m. La cartographie de tels types de sols a montré qu'ils se trouvaient dans des zones de dépression topographique, et qu'étant liés à la présence d'argile, qui cimente les grains, ils pouvaient être un facteur explicatif de la distribution de la végétation de surface (Tabbagh *et al.* 2000).

L'effet du tassement ou du compactage sur la résistivité électrique a fait l'objet de récentes études (Besson *et al.* 2004 ; Séger *et al.* 2009 ; Seladji *et al.* 2010). La croissance des plantes, le climat, le travail du sol, modifient la structure du sol et ont un impact sur la résistivité. Tandis que sur les sols grossiers, la résistivité augmente avec la masse volumique apparente du sol (Evans *et al.* 1996), on observe une évolution contraire pour les sols fins (Richard *et al.* 2001) dans lesquels les mottes Δ se montrent particulièrement conductrices (Souffaché *et al.* 2010). Ainsi, il est possible de visualiser, à l'aide de la tomographie électrique, le contraste de résistivité provoqué par le passage de roue d'engin agricole.

En outre, les fissurations dans le sol, favorisées notamment par le phénomène de retrait-gonflement des argiles, ont également un impact sur la résistivité. Identifiées comme des anomalies résistantes, ces fissurations sont localisées, à l'échelle centimétrique, dans plusieurs travaux (Samouelian *et al.* 2003, 2004 ; Tabbagh *et al.* 2007).

3.2.3. Salinité de la phase liquide

Les propriétés électriques des sols sont non seulement conditionnées par la teneur en eau qu'ils contiennent mais également par la salinité de cette eau. La conductivité de l'électrolyte σ_e augmente avec la concentration des solutés ionisables, elle est fonction de la mobilité m_i des ions i – et donc du type d'ions – ainsi que de leur concentration c_i :

$$\sigma_e = f\left(\sum_i m_i\, c_i\right)$$

Cette **diminution de la résistivité avec la salinité de l'électrolyte du sol** joue un rôle majeur pour l'étude des sols salés (Job 1992 ; Rhoades *et al.* 1999) et a notamment servi à l'étude de l'intrusion d'eau salée dans les aquifères côtiers (Pujari et Soni 2009) ou encore au suivi spatio-temporel de désalinisation de sols au Niger (Adam *et al.* 2012).

3.2.4. Température

La température du sol varie aux échelles journalière, annuelle, sous l'effet des conditions climatiques et météorologiques. En considérant son impact sur la phase liquide du sol seulement, il est connu qu'une augmentation de température d'un liquide entraîne une diminution de sa viscosité, et donc une augmentation de la mobilité de ses ions. Ainsi, **la résistivité électrique d'un sol diminue lorsque sa température augmente**, et certains auteurs (Campbell *et al.* 1949 ; Keller et Frischknecht 1966) indiquent que, dans le cas de roches sédimentaires, la résistivité électrique ρ_T d'un sol, à une température quelconque, est donnée, à l'aide d'une température de référence, généralement de 25°C, par :

$$\rho_T = \frac{\rho_{T\text{référence}}}{1 + \alpha\left(T - T_{\text{référence}}\right)}$$

où : α~0,02°C^{-1} est un paramètre empirique.

Beck (2008) a montré que cette loi pouvait également s'appliquer au cas d'un sol limoneux remanié et compacté (Figure 7). Cependant, la comparaison de plusieurs modèles de température (Besson *et al.* 2008) montre que la relation ci-dessus n'est pas forcément adaptée pour les sols non saturés.

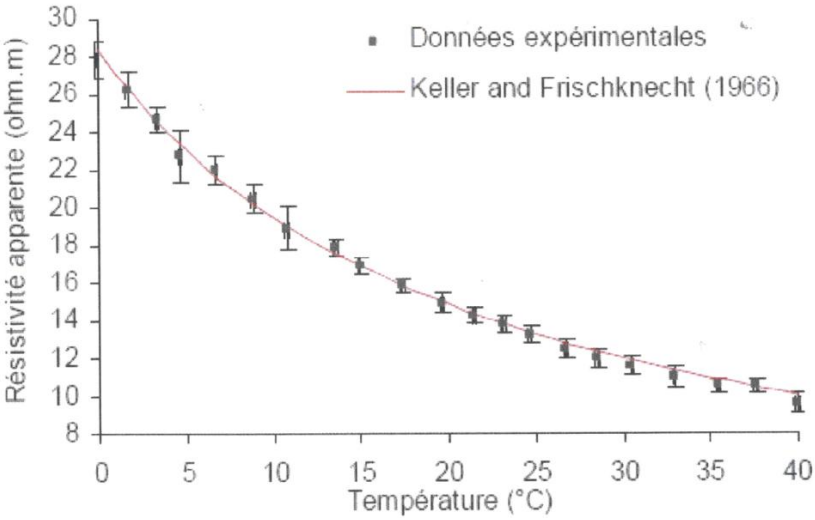


Figure 7. Influence de la température d'un échantillon reconstitué de sol limoneux sur la mesure de résistivité électrique - confrontation avec la loi de Keller et Frischknecht (1966)

(d'après Beck 2008 cité par Seladji 2010)

3.2.5. Végétation et matière organique

L'étude du lien entre présence de végétation et variation de résistivité est relativement récente (Amato *et al.* 2008 ; Hagrey 2007 ; Werban *et al.* 2008). Le développement des racines est à l'origine de modifications locales de la résistivité car il modifie les propriétés physiques ou hydriques du sol (création de macro-pores, redistribution de l'eau, …) ou perturbe la distribution des lignes de courant lors de la prospection électrique (Srayeddin 2009 ; Tabbagh *et al.* 2002).

Ainsi, des mesures de résistivité sur des échantillons de sol nu ou avec de la luzerne dans des containers ont montré que les racines des plantes herbacées sont capables d'affecter la résistivité d'un sol (Amato *et al.* 2009). Globalement, **la résistivité augmente avec le développement racinaire (densité et longueur des racines)** qui diminue la teneur en eau. Dans le cas particulier des sols tropicaux indurés (hardpans), Lamotte (1993) a également mis en relation la présence et le type de végétation avec la résistivité : les zones arborées correspondent à de fortes valeurs de résistivité – plusieurs centaine d'Ω.m –, les sols nus à de faibles valeurs – inférieures à 90 Ω.m – et les zones herbacées à des résistivités intermédiaires.

La matière organique influence également la résistivité, d'une manière qui peut différer selon que le sol est agricole ou forestier (Seladji 2010).

Cette liste d'éléments qui influent sur la mesure de résistivité ne peut être exhaustive tant il existe de caractères d'un sol. Si de nombreuses variables pédologiques sont à considérer, ce sont bien souvent des groupes de variables du fait des interactions complexes qui les lient, qui interviennent dans la mesure de résistivité. Il est par conséquent délicat d'isoler l'effet de chacun des facteurs ce qui explique pourquoi, il est parfois difficile, d'un contexte pédologique à un autre, de retrouver les mêmes corrélations entre une variable pédologique et la résistivité.

4. Recherche bibliographique sur les valeurs de résistivité observées sur les matériaux géologiques du Bassin Parisien

Les deux terrains qui ont fait l'objet d'expérimentations dans le cadre de cette étude sont situés, pour l'un, dans le sud-ouest du Bassin Parisien, au sud-est de Chartres, et, pour l'autre dans l'est, au nord de Coulommiers. Afin d'avoir une bonne connaissance des valeurs de résistivités qu'il est possible de rencontrer sur cette zone géographique, notamment pour les travaux de modélisation présentés dans le chapitre III, une recherche bibliographique a été réalisée.

Les sites expérimentaux concernés par la mesure de résistivité électrique et répertoriés dans cette étude bibliographique sont, pour beaucoup, localisés en région Centre, au nord et nord-ouest d'Orléans, dans des zones dédiées à la production agricole. Les prospections réalisées sur ces secteurs utilisent donc bien souvent des dispositifs tractés adaptés à la cartographie

des sols agricoles ; d'une part parce que la profondeur d'intérêt pour ces sols est limitée à 2 m, et, d'autre part, car l'emploi des dispositifs tractés permettent une prospection rapide de parcelles étendues.

La Figure 8 permet de localiser les sites expérimentaux dont les études ont fourni des valeurs de résistivité, tandis que le Tableau 1 répertorie les éléments importants de ces études, en précisant, pour chaque lieu de prospection, la méthode géophysique employée, les valeurs de résistivité apparente mesurées, les valeurs de résistivité interprétée s'il y a eu inversion de données, et la profondeur d'investigation approximative de la méthode de prospection utilisée.

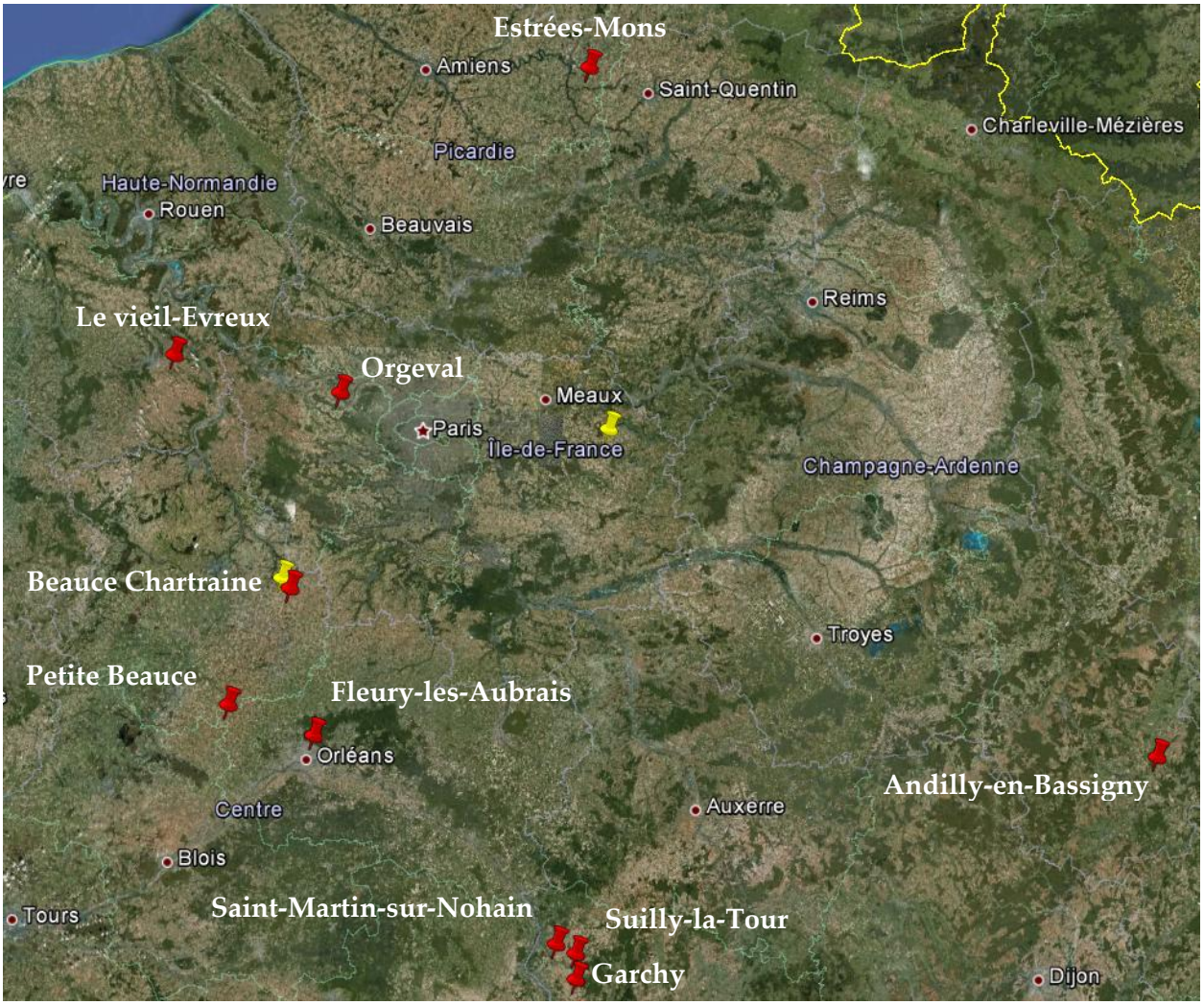


Figure 8. Localisation des sites évoqués dans la littérature (en rouge) et des sites prospectés dans cette étude (en jaune)

Pages suivantes :

Tableau 1. Synthèse sur les valeurs de résistivité rencontrées dans le Bassin Parisien

	ρ apparente		ρ		Source	Profondeur max	Méthode
	min	max	min	max			
Petite Beauce	49	242			Besson 2007	2 m	MUCEP
	34	146					
	10	180			Besson *et al.* 2010		
	40	400	30	400	Chery 1995	2,5 m	Elec 1D sondage
	35	170				6 m	Elec 2D panneaux
	10	96				3 m	Elec 2D carte
	22	225	15	445	Cousin *et al.* 2009	2 m	MUCEP – écartements 0,5, 1 et 2 m
	27	87			Le Parco 1995	1 m	RATEAU (quadripôle carré de 1 m de coté)
			25	120		10 m	Elec 1D sondage Wenner alpha
			30	100	Michot *et al.* 2001	3 m	Elec 2D panneau
			14	50		0,5 m	Elec 2D – 15 électrodes
			<10	>100	Michot *et al.* 2003	0,5 m	Elec 2D – 32 électrodes
	21	52			Zanolin *et al.* 2007	2 m	MUCEP

	ρ apparente		ρ		Source	Profondeur max	Méthode
	min	max	min	max			
Beauce Chartraine	20	80	35	150	Assi 2007	1,75m	Elec 3D – tomographie électrique 3D (dispositif PP PD DD et PP cross diagonal)
			10	120		60 cm	Elec 3D
	38	226			Moeys *et al.* 2006	1,5 m	MUCEP

	ρ apparente		ρ		Source	Profondeur max	Méthode
	min	max	min	max			
Fleury-les-Aubrais (45) **(alluvion de la Loire)**	30	500	100	1000	Panissod 1997	2 m	MUCEP
	10	600			Dabas *et al.* 1995 Tabbagh *et al.* 2000	~1 m	RATEAU (quadripôle carré de 1 m de coté)

	ρ apparente		ρ		Source	Profondeur max	Méthode
	min	max	min	max			
Garchy (58)	20	200			Cosenza *et al.* 2006	5 m	Elec 2D carte – Wenner alpha et beta
						6 m	EM 31
			20	550			Elec 1D – Sondage électrique (SE)
			20	400		z=2,7 m z=5,4 m	Elec 2D carte Tomographie électrique 2D (Wenner alpha)
	40	400			Meheni *et al.* 1996	5 m	Elec 2D carte – Wenner alpha et beta
			30	450			Elec 1D – SE
	30	270			Guérin *et al.* 1996		EM 31
			20	450			Elec 1D – SE
	20	200			Panissod *et al.* 1997b	0,5 m	Elec 2D carte – Wenner alpha (carte)
							Elec 2D carte – D-D
							Elec 2D carte – IFMPP (dispositif circulaire)
	50	150			Panissod *et al.* 1998	2 m	MUCEP

	ρ apparente		ρ		Source	Profondeur max	Méthode
	min	max	min	max			
St-Martin-sur-Nohain (58)	50	550			Meheni *et al.* 1996	5 m	Elec 2D carte – Wenner alpha et beta
			25	250			Elec 1D – SE
	<50	>200			Guérin *et al.* 1996		EM 31
			25	250			Elec 1D – SE
	0	1300			Panissod *et al.* 1997b	1 m	RATEAU
	90	270				1 m	Elec 2D carte – IFMPP (dispositif circulaire)
							Elec 2D carte – P-P transversal
							Elec 2D carte – P-P longitudinal

	ρ apparente		ρ		Source	Profondeur max	Méthode
	min	max	min	max			
Suilly-la-Tour (58)	50	200			Panissod *et al.* 1998	1 m	RATEAU carré de coté 1,2 m
	40	200			Panissod *et al.* 1997b	1 m	RATEAU
	95	160				0,5 m	Elec 2D carte – IFMPP (dispositif circulaire)
	75	125					Elec 2D carte – P-P

	ρ apparente		ρ		Source	Profondeur max	Méthode
	min	min	min	max			
Vieil–Evreux (27)	10	140			Thiesson *et al.* 2009	2 m	MUCEP
	20	50					Prospection magnétique – CS60
Orgeval (78)	20	40			Nicole *et al.* 2003	1 m	Elec 2D carte – Wenner alpha
			15	140		1,10 m	Elec 2D – panneau (Wenner)
Andilly-en-Bassigny (52)	10	50	5	95	Papadopoulos *et al.* 2009	2 m	MUCEP

	ρ apparente		ρ		Source	Profondeur max	Méthode
	min	max	min	max			
Estrée-Mons (80)			10	70	Besson *et al.* 2004	60 1ers cm	Elec 2D petit panneaux long de 3,20 m
	20	200	30	220	Séger *et al.* 2009	~40 cm	Elec 2D carte et élec 3D (2 profondeurs)
	30	230	30	200		~20 cm	

Les valeurs de résistivité généralement rencontrées varient en moyenne de 30 à 215 Ω.m pour les résistivités apparentes et de 25 à 300 Ω.m pour les résistivités interprétées.
Les valeurs particulièrement importantes (500-600 Ω.m) mesurées au nord d'Orléans sont dues à la présence de lentilles sableuses localisées (Dabas *et al.* 1995). Les sondages électriques peuvent atteindre des substrats à 500 Ω.m.

Puisque les travaux présentés dans la suite s'appliquent à des sols agricoles, les données traitées sont issues de prospections dont la profondeur d'investigation est estimée inférieure à 2 m. En se focalisant sur les mesures de résistivité correspondant à des volumes de sol investigué d'épaisseur inférieure à 2 m, le Tableau 1 rapporte des valeurs de résistivité interprétée comprises entre 15 et 160 Ω.m en moyenne. Ces observations constituent une bonne base sur ce à quoi s'attendre lors des prospections menées dans le cadre de cette étude, mais également pour la modélisation de mesure de résistivité multi-profondeur réalisée dans le chapitre III.

CHAPITRE II

Présentation des sites d'étude et des données géophysiques et pédologiques acquises sur les parcelles expérimentales

Ce chapitre présente les deux sites d'étude sur lesquels des prospections géophysiques et pédologiques ont été menées dans le cadre de cette thèse. Les deux parcelles expérimentales s'intègrent dans un contexte d'agriculture intensive, qui implique des pratiques pouvant impacter la qualité des sols et la ressource en eau. Ces deux sites ont fait l'objet de plusieurs travaux, dans une optique d'amélioration des pratiques agricoles du point de vue environnemental.

Le premier site d'étude est situé en Beauce chartraine, dans l'Eure-et-Loir (28), le second en Seine-et-Marne (77). Pour chacun d'eux, sont exposés les contextes géologique, hydrogéologique et pédologique. Enfin, les parcelles expérimentales sont présentées, ainsi que les données issues de leur prospection, qui ont servi de base au travail présenté dans ce manuscrit.

1. Site de Ouarville

1.1. Contexte régional : la Beauce

1.1.1. Localisation géographique

Le secteur d'étude est localisé en Beauce, zone géographique qui occupe principalement les départements d'Eure-et-Loir et du Loir-et-Cher mais qui s'étend également sur le Loiret, l'Essonne et les Yvelines (Figure 9b). Elle est délimitée au nord par la forêt de Rambouillet à l'est par l'Essonne et la forêt de Fontainebleau, au sud par le Val de Loire et à l'ouest par le Loir.
L'altitude moyenne de la Beauce est de 140 m. Avec un pendage très majoritairement inférieur à 1%, c'est une région au relief très peu marqué, notamment autour de Ouarville où la topographie est quasiment plane.

Autrefois activement exploitée pour l'extraction du calcaire et des marnes, la Beauce est aujourd'hui une région à vocation essentiellement agricole (Figure 9a). En effet, l'importance des surfaces agricoles utiles (SAU) font de la Beauce une région de culture intensive. Pour exemple, le département d'Eure-et-Loir possède une SAU couvrant plus des trois quarts du territoire. En outre, le nombre d'exploitations agricoles a considérablement diminué ces 25 dernières années, au profit de superficies croissantes : la surface moyenne d'une exploitation agricole est passée de 80 à 101 ha de 1988 à 2005 (Baraduc 2008) et 40% des exploitations occupent plus de 100 ha.

Souvent surnommée "le grenier à blé de la France", la Beauce s'étend sur deux des régions les plus productrices de céréales, la région Centre et l'Ile-de-France dont 53% et respectivement 61% des surfaces agricoles utilisées en 2010 ont été consacrées aux cultures céréalières (source INSEE 2012) : blé, maïs et orge, et en second lieu, colza et pois.

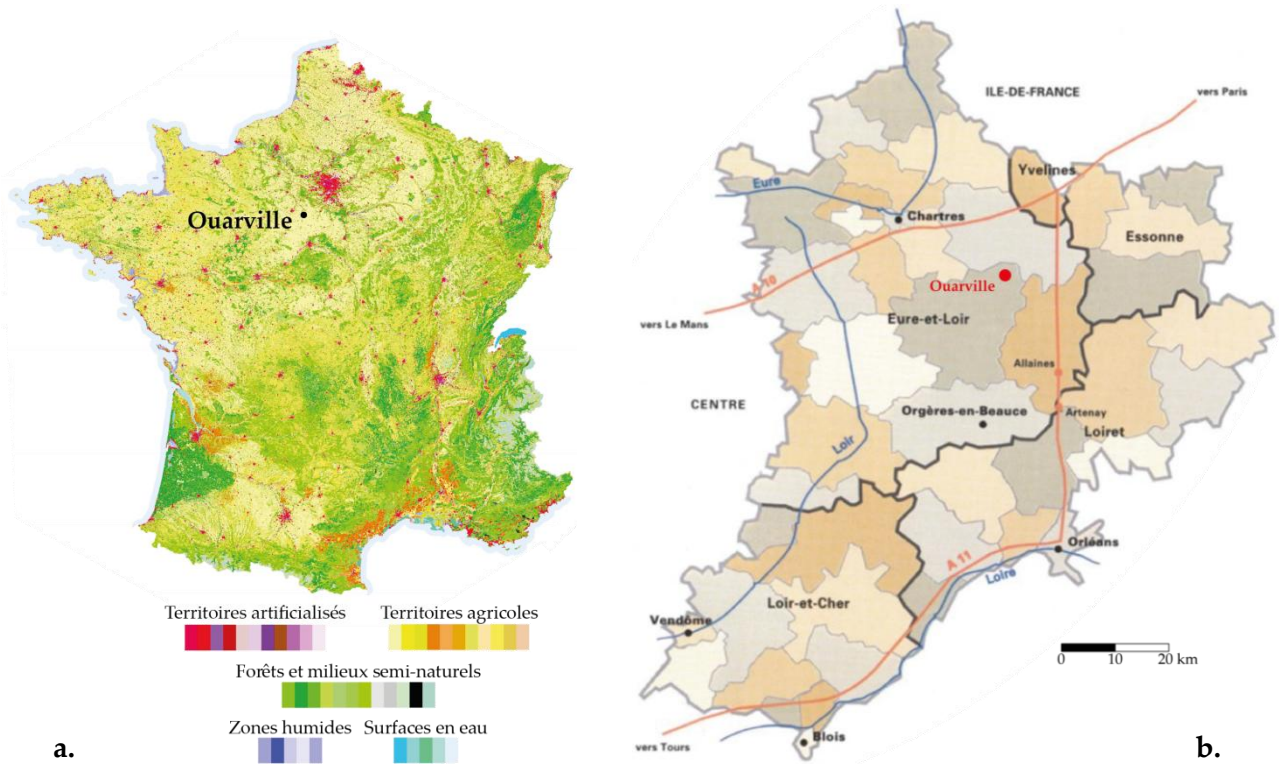


Figure 9. Situation géographique du secteur étudié (a) à l'échelle de la France sur la carte de l'occupation des sols de 2006 (source : UE-SOeS, CORINE Land Cover, 2006) **et (b) à l'échelle de la Beauce** (source : http://www.lamaisondelabeauce.com/beauce/)

1.1.2. Contexte géologique

L'histoire géologique sommaire de la région beauceronne présentée ici s'appuie principalement sur la carte géologique de Voves (Gigot *et al.* 1976), commune située à 15 km au sud-ouest de Ouarville.

Les formations géologiques constitutives de la Beauce reposent dans une vaste dépression crayeuse du Crétacé (Moeys 2007), formation qui ne présente aucun affleurement en Beauce. Du Crétacé supérieur jusqu'à l'Eocène, une influence continentale et l'activité météorique du passage à l'ère tertiaire provoque l'altération de la craie aboutissant à la formation d'un niveau d'argile à silex, d'une épaisseur estimée entre 15 et 27 m (Gigot *et al.* 1973).
Au Miocène inférieur (Aquitanien), un vaste lac occupe le centre du bassin parisien, recouvrant les dépôts détritiques éocène et oligocène d'une épaisse couche de calcaire largement étudiée (Desprez 1973 ; Gigout 1973 ; Lorain 1973) : la formation du calcaire de Beauce. D'une épaisseur inférieure à une dizaine de mètres dans la vallée de la Voise, à 7 km au nord-ouest de Ouarville, cette formation peut atteindre une centaine de mètres dans le sud de la Beauce. Un épisode humide du Burdigalien entraine le dépôt d'alluvions issues des cours d'eau du Massif Central. Ces formations d'origine fluviatile semblent exister de manière localisée dans le calcaire, sous forme de poche de remplissage karstique ou de comblement de chenaux (Michot 2003).

Les premiers mètres du calcaire de Beauce sont également affectés par la gélifraction due aux multiples périodes froides de l'ère quaternaire. Enfin, les vents de la dernière glaciation du Würm sont responsables du dépôt de fines poussières sur la Beauce, la dotant du manteau limoneux auquel elle doit son actuelle richesse agricole.

1.1.3. Hydrogéologie

Le principal réservoir de la région, communément appelé "nappe de Beauce", est constitué des formations lacustres du tertiaire à dominante calcaire, et le niveau d'argiles à silex, issu de la décalcification de la craie sous-jacente, joue le rôle de substratum imperméable.
Ce système aquifère, d'une surface couvrant environ 9000 km² en région Centre et Ile-de-France, et de puissance atteignant 190 m, est la réserve d'eau la plus importante d'Europe. Il constitue un réservoir dont la capacité de stockage est estimée à 20 milliards de m³ d'eau. Deux bassins versants souterrains se rencontrent au sein de l'aquifère : le bassin Loire-Bretagne et le bassin Seine-Normandie dont les directions d'écoulement sont respectivement NO-SE et SO-NE (Figure 10) avec un très faible gradient hydraulique régional (Schnebelen *et al.* 1999). La nappe est drainée par des cours d'eau comme la Loire, le Loir, le Loing ou encore la Seine, et par des vallées peu profondes comme celles de la Conie ou de l'Essonne (Martin 1999).

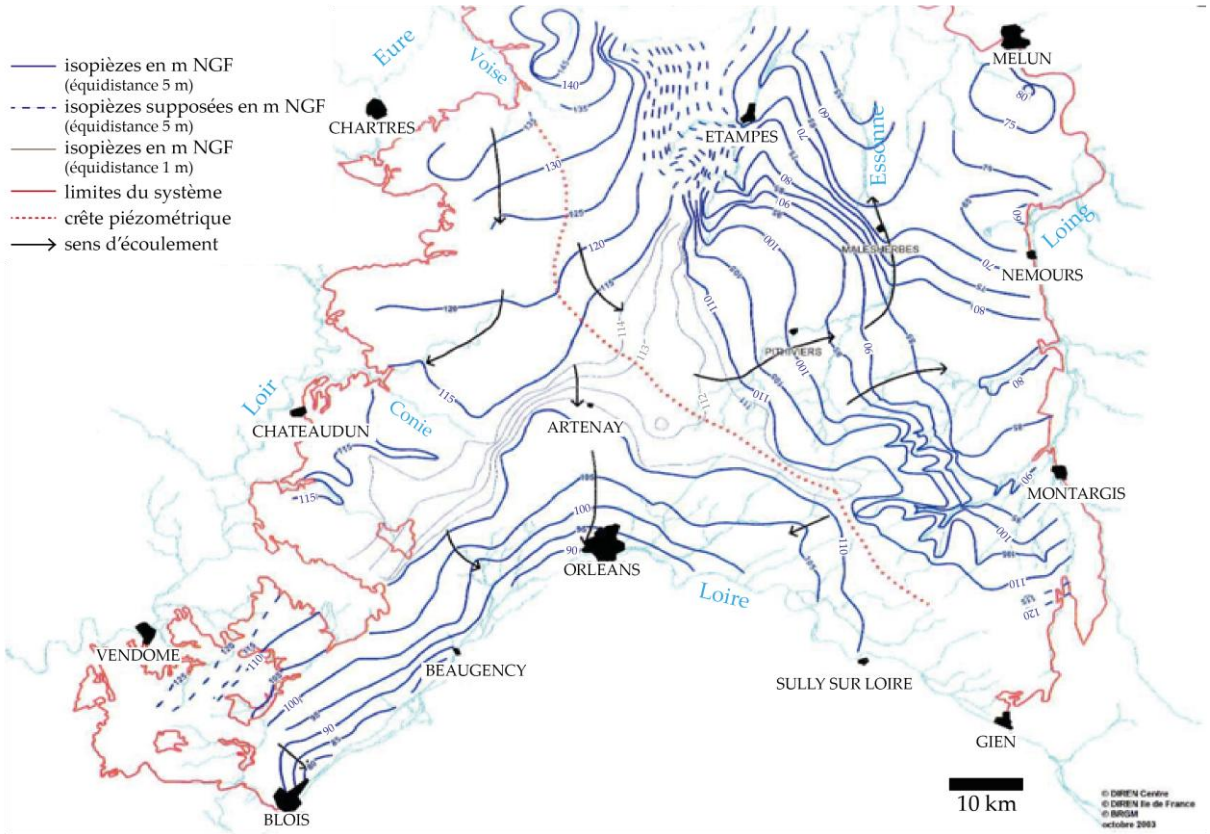


Figure 10. Nappe de Beauce en limite des bassins de la Seine et de la Loire
Piézométrie en hautes eaux – carte générale mars 2002 (source BRGM, DIREN Centre et Ile-de-France)

La nappe de Beauce est essentiellement utilisée pour l'irrigation. En 1974, le nombre de captage s'élevaient à 74 pour l'irrigation, 33 pour l'alimentation des collectivités et 3 forages pour alimentation en eau industrielles (Gigot *et al.* 1976). Les forages s'effectuent en moyenne à 50-60 m de profondeur avec une capacité moyenne de pompage pour l'irrigation de 140 $m^3.h^{-1}$. Selon les agences de l'eau Loire Bretagne et Seine Normandie, plus de 60% des prélèvements sur la nappe de Beauce sont destinés à l'irrigation (80% pour le seul département d'Eure-et-Loir), ce qui représente un volume d'eau de 150 à 450 millions de mètres cube selon les conditions climatiques ; l'alimentation en eau potable représente quant à elle environ 80 millions de mètres cube et l'industrie 20 millions.

Par ailleurs, le développement de l'agriculture intensive en Beauce en fait une région particulièrement sensible à la pollution diffuse d'origine agricole (Bruand *et al.* 1997). En effet, la nappe de Beauce étant majoritairement libre, la qualité de l'eau est directement sous la dépendance des pratiques agricoles : l'utilisation de fertilisants azotés et de produits phytosanitaires (Mariotti et Landreau 1986 ; Schnebelen *et al.* 2004) est à l'origine de la dégradation de la ressource en eau.

Des programmes sont menés depuis plusieurs décennies afin de gérer plus efficacement la ressource en eau, tant d'un point de vue qualitatif (surveillance accrue de la qualité de l'eau) que d'un point de vue quantitatif (mise en place de seuil d'alerte, installation de compteur pour régulation des volumes prélevés). Ainsi, la vulnérabilité de la Beauce quant à la ressource en eau, ainsi que sa vocation agricole intensive, lui confèrent un fort potentiel pour le développement d'un agriculture raisonnée (Zanolin 2003).

1.1.4. Contexte pédologique

Une carte des sols du secteur de Ouarville a été réalisée par un bureau d'étude indépendant (Figure 11).

Les types de sols les plus représentés dans le secteur cartographié sont les néoluvisols qui occupent la moitié de la surface, suivis des luvisols qui couvrent presque un tiers de la carte.

Il y a généralement coïncidence entre formations géologiques (Figure 13) et pédologiques, notamment dans les talwegs, largement présents dans le nord de la carte pédologique : ceux-ci marquent la présence de sols de types Rendisols, calcisols ou calcosols tandis que la carte géologique attribue à ces zones géographiques les formations m_1a_1 et m_1a_2 de l'Aquitanien, marnes de Voise et calcaire de Beauce respectivement. En outre, là où la carte géologique indique la présence de limon des plateaux, la carte pédologique atteste de celle des néoluvisols et luvisols.

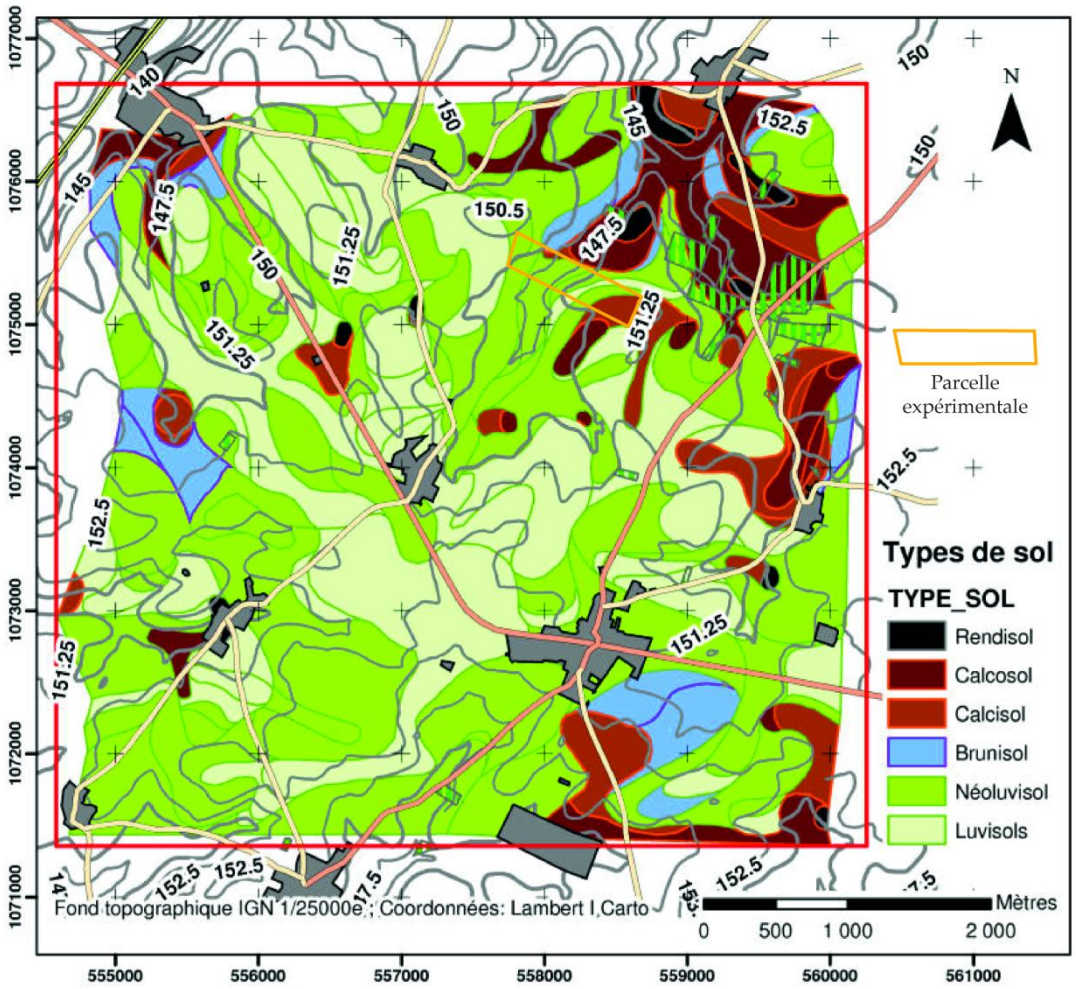


Figure 11. Carte des types de sols du secteur de Ouarville (d'après Moeys 2007)

1.1.5. Climat

Le climat de la région est du type continental tempéré avec une influence océanique nette, c'est-à-dire que les contrastes de température sont un peu plus accentués que sur les façades océaniques et que les précipitations y sont un peu moins importantes et réparties de manière plus homogène (Moeys 2007), avec 140 jours de pluie par an en moyenne.

Les précipitations annuelles, enregistrées sur 5 pluviomètres de Météo France (dans le Loiret, l'Eure-et-Loir et l'Essonne), pour la période de 1973 à 2001 (Figure 12), varient entre 400 et 900 mm. Avec une moyenne d'environ 630 mm d'eau par an, la Beauce est l'une des régions les moins arrosées de France, dont la pluviométrie annuelle moyenne est de 700 mm. L'évapotranspiration potentielle, favorisée par les vents océaniques forts caractéristiques de la région, est d'en moyenne 760 mm par an. Le bilan hydrique déficitaire d'environ 130 mm explique donc le recours nécessaire à l'irrigation pour l'agriculture.

La température moyenne de la région est d'environ 10,5°C et les températures moyennes extrémales enregistrées en été (juillet) et en hiver (janvier) sont respectivement de 25 et 0°C.

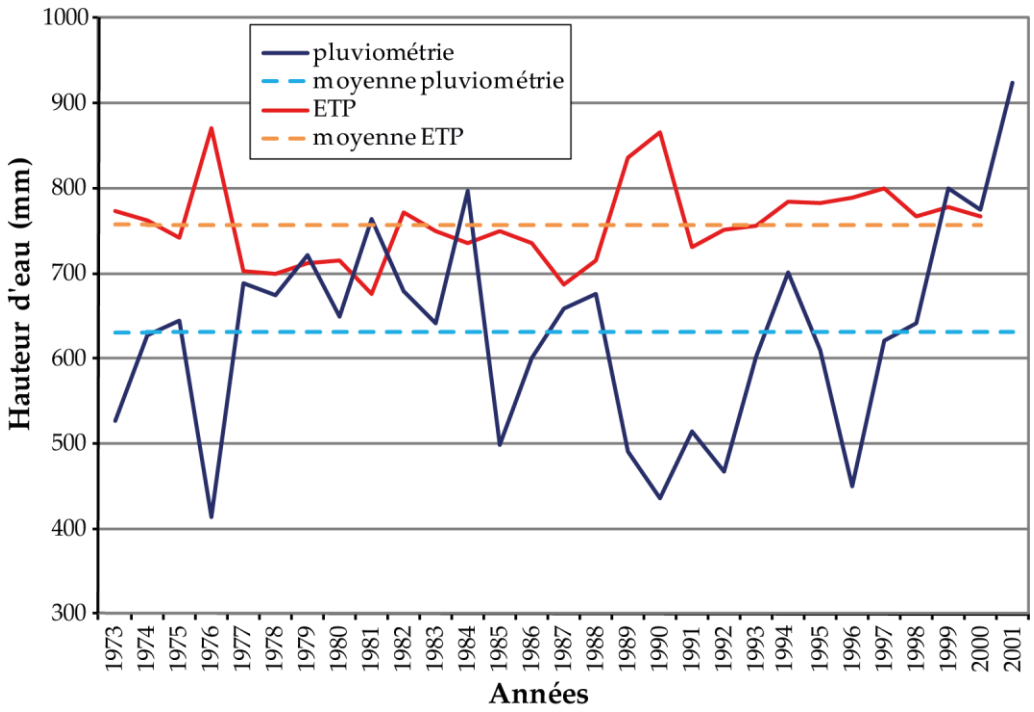


Figure 12. Evapotranspiration et pluviométrie en Beauce (hors Loir-et-Cher) de 1973 à 2001 (source BRGM)

1.2. Présentation de la parcelle expérimentale et données disponibles

1.2.1. Situation géographique et géologie locale

La parcelle expérimentale est située au nord de la commune de Ouarville en Eure-et-Loir. Elle couvre une surface de 22,5 ha, avec une longueur de 982 m suivant la direction ONO-ESE, et une largeur de 236 m. Les pentes y sont généralement inférieures à 2%.

Elle s'étend sur 3 formations géologiques affleurantes (Figure 13) :

- LP : limon des plateaux

D'une teinte brune à brun-jaune ou brun-roux, les limons en surfaces sont très homogènes, très peu calcaires et très fins. La notice de la carte géologique précise également que la fraction argileuse des limons reflète la nature du substratum. L'épaisseur de cette couche limoneuse varie de quelques centimètres à 2 m, mais lorsque celle-ci est inférieure à 80 cm la carte géologique indique les formations sous-jacentes (décrites brièvement ci-après) comme c'est le cas sur la moitié ouest de la parcelle.

- m_1a_2 : calcaire de Beauce (Aquitanien supérieur)

La calcaire de Beauce présente divers faciès : au sommet, après 1 m de calcaire gélifracté, se succèdent des calcaires gris, blanc-beige et, à la base, du calcaire beige rosé uni (Gigot *et al.* 1976). Au niveau de Ouarville, la puissance de cette formation est inférieure à 10 m. Il s'agit dans l'ensemble d'une roche fracturée où s'est installé un réseau karstique important, avec de nombreux avens possiblement comblés par des sables, et qui se manifestent notamment

par la présence de 2 dolines sur la parcelle. Une carrière à 10 km au sud-ouest de Ouarville (commune de Prasville) témoigne de la présence de meulières orangées à l'interface entre le calcaire de Beauce et la marne de Voise (paragraphe suivant) ; meulières effectivement rencontrées lors des prospections pédologiques réalisées dans le cadre de ce travail de thèse.

- m_1a_1 : marnes de Voise, calcaire de Berchères (Aquitanien inférieur)

Faciès de la partie inférieure du calcaire de Beauce, cette formation du début du Miocène est constituée de calcaire dur et de marnes friables blanches particulièrement présentes dans le secteur de Ouarville. D'une douzaine de mètres d'épaisseur, cette assise peut se charger en grains de sables détritiques jusqu'à former des lentilles de sable quartzeux (Gigot *et al.* 1976).

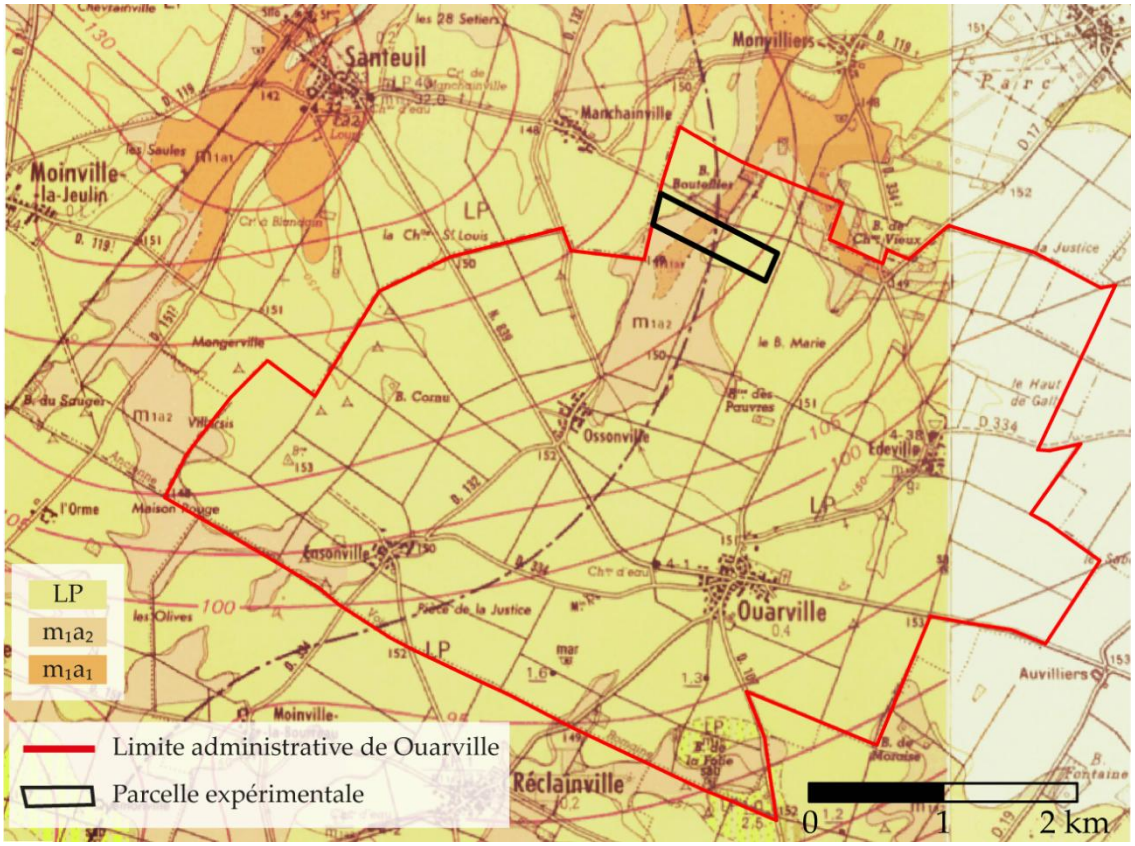


Figure 13. Contexte géologique du site expérimental

carte géologique au 1/50000ème (Gigot *et al.* 1976)

1.2.2. Données de prospection géophysique et pédologique conduites sur la parcelle

La parcelle de Ouarville, déjà étudiée par le passé (Assi 2007 ; Moeys *et al.* 2006), a fait l'objet de plusieurs campagnes de prospection géophysiques et pédologiques. Cette partie a pour but de présenter les données qui ont servi de base au travail présenté dans ce manuscrit.

a) Carte des sols de la parcelle

La carte des sols de la parcelle de Ouarville (Figure 14) a été réalisées dans le cadre d'un programme de recherche sur les risques de transferts de produits phytosanitaires dans les sols vers les eaux souterraines (programme ESHEL). Trois campagnes de prospection (en

2003 et 2004) ont été menées pour réaliser 140 sondages à la tarière en vue de comprendre la répartition spatiale des sols à l'échelle intraparcellaire. L'identification des types de sols a conduit à la définition de 15 unités cartographiques (référentiel pédologique francais, AFES 2008)

La typologie a été élaborée en discriminant les sols selon la nature et les propriétés des horizons, leur succession, leur épaisseur et la nature du ou des matériaux géologiques parentaux sur lequel les sols se sont développés. Le tracé des limites entre les plages cartographiques s'appuie sur les variations de résistivité observées sur les cartes résultant d'une prospection électrique réalisée au MUCEP (40 profils espacés de 6 m dans la direction longitudinale de la parcelle) (Moeys *et al.* 2006).

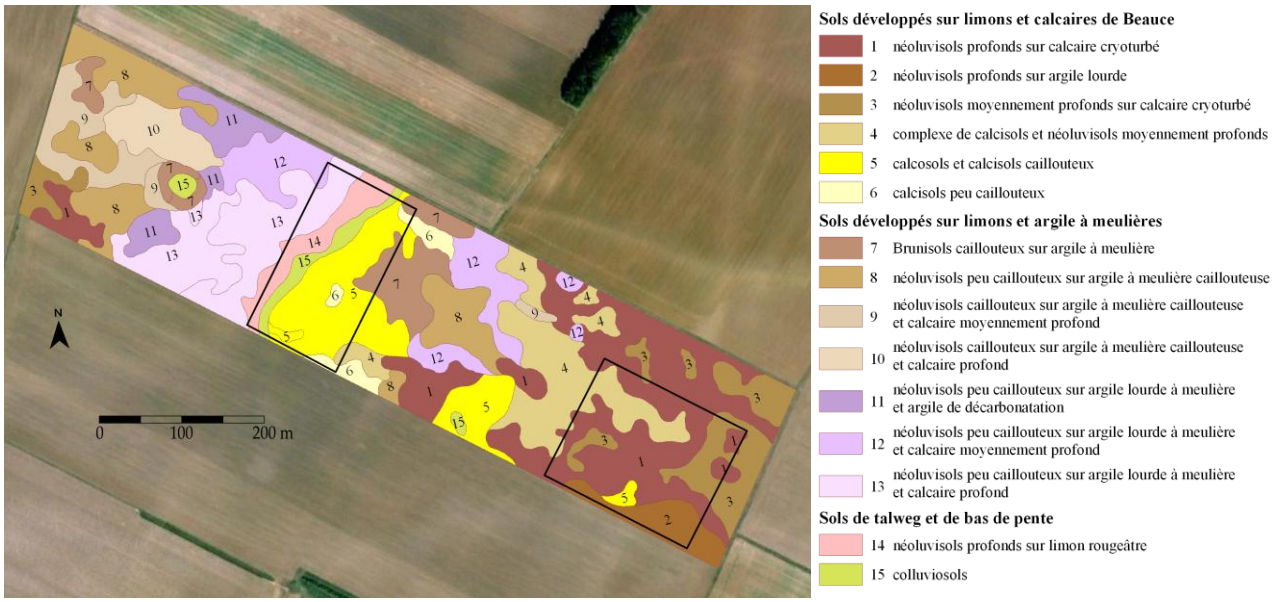


Figure 14. Carte des sols de la parcelle de Ouarville et délimitation des zones prospectées en 2010

b) Prospection électrique

Deux zones de 3 ha ont été prospectées les 18 et 19 août 2010 à l'aide du dispositif ARP® (délimitées Figure 14 sur la carte des sols). Dans la suite, la zone la plus à l'ouest sera appelée "zone ouest", et la seconde "zone est". Les profils de mesures ont été réalisés suivant la direction longitudinale de la parcelle. Un espacement inter-profil de 1 m a été choisi à la vue des résultats de modélisation de mesures présentés dans le chapitre III. Cet espacement inter-profils, relativement faible (habituellement utilisé en archéologie), combiné à la densité de mesures dans le sens de déplacement du dispositif, ont permis d'acquérir environ 380000 points de mesure par zone prospectée, soit 3 fois plus de données (pour les 3 voies de mesures).

Le courant utilisé pour l'injection est de 10 mA. La localisation des mesures est assurée par un dGPS différentiel Starfire. Un PC embarqué permet l'acquisition, le contrôle et la

mémorisation des données de position et de résistivité électrique. Le résistivimètre utilisé est un AFM 05.

Il résulte de cette prospection, 3 cartes de résistivité (Figure 53 du chapitre V) issues d'un traitement des données brutes présenté dans le chapitre V.

✓ **Remarque**

Dans la suite, les plages cartographiques de sols (PCS) couvertes par la prospection électrique seront notées tel que présenté dans la Figure 15.

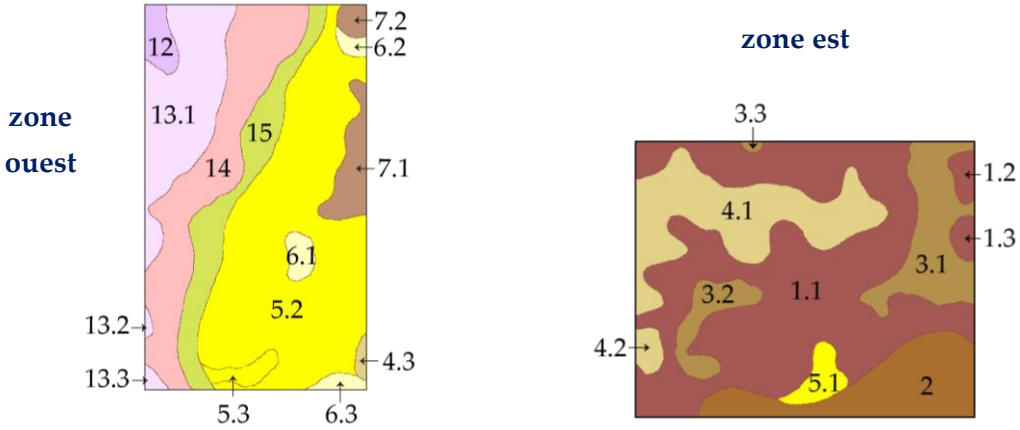


Figure 15. Dénominations des plages cartographiques couvertes par la prospection électrique

2. Site d'Orgeval

2.1. Contexte régional : le bassin de l'Orgeval

2.1.1. Localisation géographique

Le bassin versant de l'Orgeval (Figure 16) est l'unité hydrologique drainée par le ru du même nom, affluent secondaire de la Marne. D'une superficie de 104 km², il se trouve à l'est de Paris, en Seine et Marne (77), au nord de la Brie, plateau situé entre la Seine et la Marne et délimité à l'est par la "cuesta d'Ile-de-France" (limite brutale entre le plateau tertiaire du Bassin Parisien et la plaine du secondaire de Champagne crayeuse).
L'altitude du bassin versant varie de 160-180 m au nord (hors butte de Doue) à 74 m au sud, au niveau de l'exutoire.

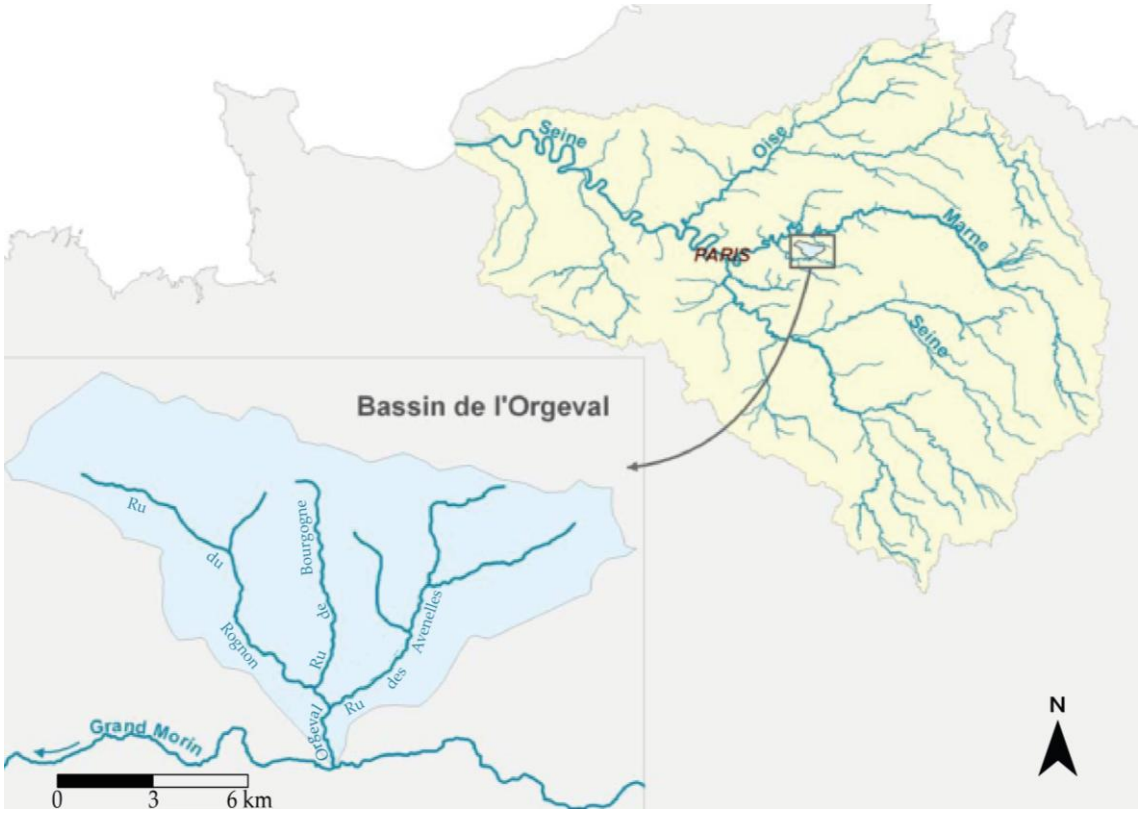


Figure 16. Situation géographique du bassin de l'Orgeval
(Source : PIREN Seine 2008)

Le bassin versant de l'Orgeval est situé en totalité en territoire rural. Le plateau briard, sur lequel il se situe, est recouvert d'une épaisse couverture limoneuse, qui lui confère une importante richesse agricole : la SAU occupe 81% de l'espace, 18% sont attribués à la forêt et le reste (1%) est artificialisé. L'agriculture est de type intensif, à dominante céréalière, avec la moitié de la surface cultivée consacrée à la culture de blé. Le maïs y est également très présent. La taille moyenne des exploitations dans le bassin de l'Orgeval est de 133 ha, pour une moyenne départementale de 130 ha.

Le bassin de l'Orgeval est caractérisé par un fort taux de drainage agricole – la surface drainée représente 80% de la SAU – qui s'explique par la nécessité d'assainir les sols particulièrement hydromorphes qui s'y développent. C'est une pratique aujourd'hui centenaire, qui a mené à l'installation de drains à une profondeur variant de 60 cm (pour les plus anciens) à 90 cm.

Le bassin de l'Orgeval fait l'objet d'un suivi expérimental depuis 1962. Il est équipé par l'IRSTEA (ex CEMAGREF) d'un réseau dense d'appareils de mesures : stations pluviométriques, limnimétriques (mesures de hauteur d'eau dans les cours d'eau) et météorologiques, ainsi que préleveurs automatiques pour analyse de la qualité de l'eau, piézomètres et sondes TDR (Time Domain Reflectometry, pour la mesure de la teneur en eau du sol).

2.1.2. Contexte géologique

Le bassin de l'Orgeval s'inscrit dans la partie est des formations tertiaires du bassin de Paris, formations qui reposent sur environ 600 m de craie à silex déposée durant le Crétacé.

L'Eocène moyen est représenté par les marnes et caillasses ainsi que par le calcaire grossier du Lutétien.
L'Eocène supérieur comprend un nombre important de formations, qui de la base au sommet, se succèdent comme suit – description basée sur la carte géologique au 1/50000 de Coulommiers, établie par Bricon *et al.* (1989) Figure 17 :

- Bartonien moyen : **Calcaire de Saint-Ouen** (e6b sur la carte géologique)

D'une épaisseur de 15-20 m, les calcaires de Saint-Ouen sont essentiellement représentés par des dépôts laguno-lacustres. Souvent en bas de pente, notamment au bord du Grand Morin, il s'agit de calcaires marneux et de calcaires à silex noirs ou beiges.

- Bartonien supérieur : Formation du gypse – **Calcaire de Champigny** (e7a)

La formation du gypse présente de très rares affleurements. Principalement présente au nord de Coulommiers, elle laisse place, au niveau du bassin de l'Orgeval, au calcaire de Champigny, par l'intermédiaire d'un faciès marneux d'environ 20 m d'épaisseur constitué de marnes ou d'argiles magnésiennes de coloration brune ocre ou grise. Le calcaire de Champigny, qui atteint une épaisseur de 12 m à Rebais à l'est du bassin de l'Orgeval, se présente généralement en bancs épais de 50 cm à 1 m, de couleur beige à beige-rosé.

- Bartonien supérieur : **Marnes supragypseuses** (e7b)

Epaisses de 10 m environ, elles sont formées par l'alternance de niveaux blancs, jaunes, gris-bleu et parfois de petits bancs de calcaire blanc. Elles sont nettement plus calcaires que les marnes de la formation de Champigny.

L'Oligocène est principalement constitué de deux formations du Stampien inférieur :

- **Argile verte de Romainville** (g1a)

De 6 à 7 m d'épaisseur, les argiles vertes de Romainville constituent un niveau assez constant présentant quelquefois des rognons ou bancs carbonatés blancs. Ces argiles vertes participent au glissement des argiles à meulières, qui souvent les masquent et auxquelles elles mêlent leur couleur verte caractéristique, en plus de les enrichir de leurs carbonates.

- **Calcaire et meulière de Brie** (g1b)

La formation de Brie, épaisse d'une vingtaine de mètres, est essentiellement représentée par des bancs ou des blocs de meulière disjoints dans une matrice argileuse brun-vert, grise ou rousse (Bricon *et al.* 1989). Il est à noter la présence d'une carrière de meulière au sud de la parcelle expérimentale.
Le Stampien supérieur est représenté par les sables de Fontainebleau présents uniquement dans le bassin de l'Orgeval sur la butte de Doue qui culmine à 186 m.

Les **limons des plateaux** (LP) du quaternaire sont des limons lœssiques, dont l'épaisseur, pouvant atteindre 10 m, suit un gradient décroissant du NO au SE du bassin de l'Orgeval. Cette couche limoneuse contient parfois des petites concrétions noires ferromanganiques et

dans sa partie inférieure, un enrichissement en argile provenant des argiles à meulière de la formation de Brie qu'elle surmonte. La présence, dans ces limons, d'une proportion non négligeable de sable (de Fontainebleau) a également été observée.

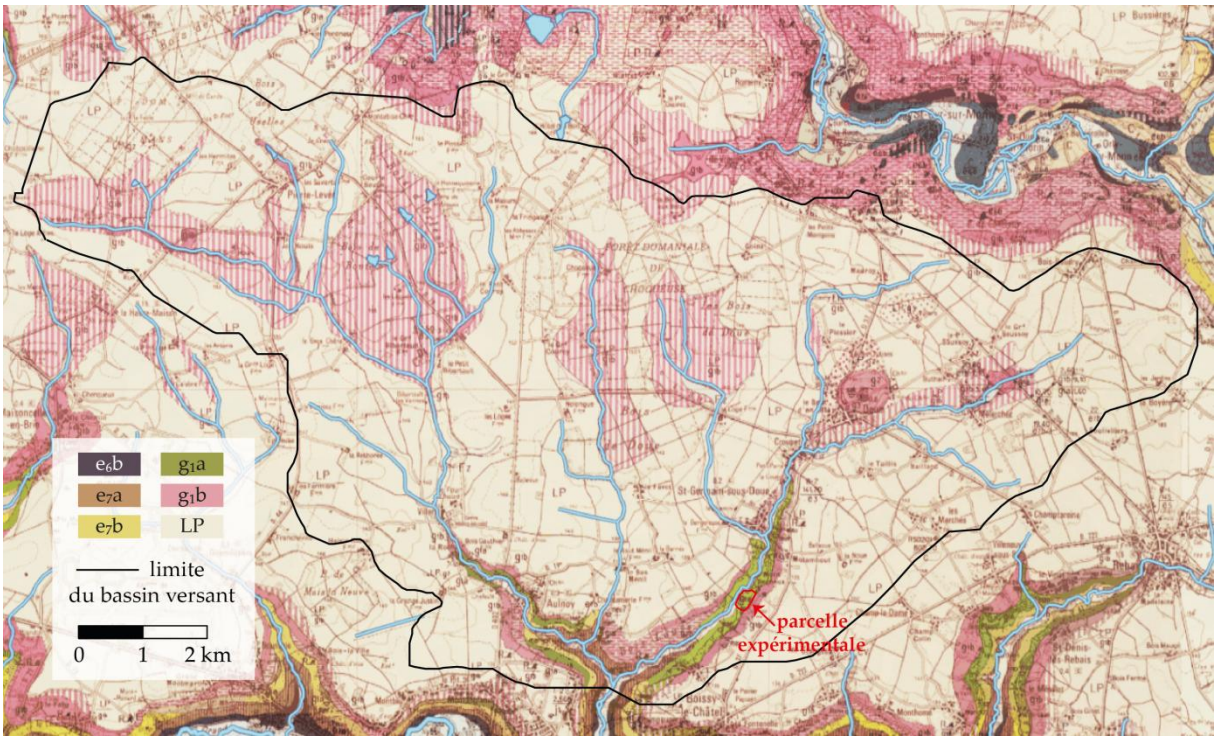


Figure 17. Géologie du bassin de l'Orgeval et localisation de la parcelle expérimentale
carte géologique au 1/50000ème (Bricon *et al.* 1989)

2.1.3. Hydrogéologie

Les deux principaux aquifères du bassin de l'Orgeval occupent les calcaires de Saint-Ouen et de Champigny, et la nappe la plus superficielle occupe les calcaires de Brie. Ces deux niveaux, décrits en détail par Mégnien (1979), peuvent être confondus en période humide.

- **Nappe des calcaires de Saint-Ouen et de Champigny** (Eocène supérieur)

Le mur de cet aquifère est constitué par les formations de l'Eocène inférieur et moyen : niveaux argileux de l'Yprésien et marnes et caillasses du Lutétien. Le réservoir total est puissant d'une soixantaine de mètres et la hauteur mouillée atteint 30 à 50 m. Cette nappe est alimentée par le bassin versant du grand Morin (dans lequel se jette le Ru de l'Orgeval) mais également par l'infiltration, à travers les marnes, des eaux de l'aquifère (décrit ci-après) des formations de Brie (Vilain 2010).

La plupart des forages sont réalisés dans cette nappe du côté des zones alluvionnaires du Grand Morin, alimenté par cette nappe.

- **Nappe des calcaires de Brie** (Oligocène)

Il s'agit d'un aquifère libre et perché dont le mur est constitué des argiles vertes de Romainville quasiment imperméables. Cette nappe est alimentée par la percolation des eaux de pluie à travers les formations superficielles quaternaires limoneuses. Elle est donc

particulièrement sensible aux variations des précipitations et aux contaminants. Si la hauteur mouillée dans les calcaires et meulières de Brie ne dépasse généralement pas les 6 m, en période de hautes eaux, la surface piézométrique atteint les limons.

2.1.4. Pédologie

La pédologie du bassin versant de l'Orgeval est principalement constituée de sols hydromorphes (sols lessivés dégradés ou pas) sur les plateaux, et de colluvions dans les fonds de vallées (Figure 18), conduisant à la formation d'une nappe perchée. Les fluctuations au niveau de la nappe de Brie témoignent d'une recharge annuelle, en interaction forte avec cette nappe perchée (Tournebize *et al.* 2011). Cette dernière a effectivement été observée au printemps 2012 à une profondeur d'environ 90 cm sur la parcelle expérimentale.

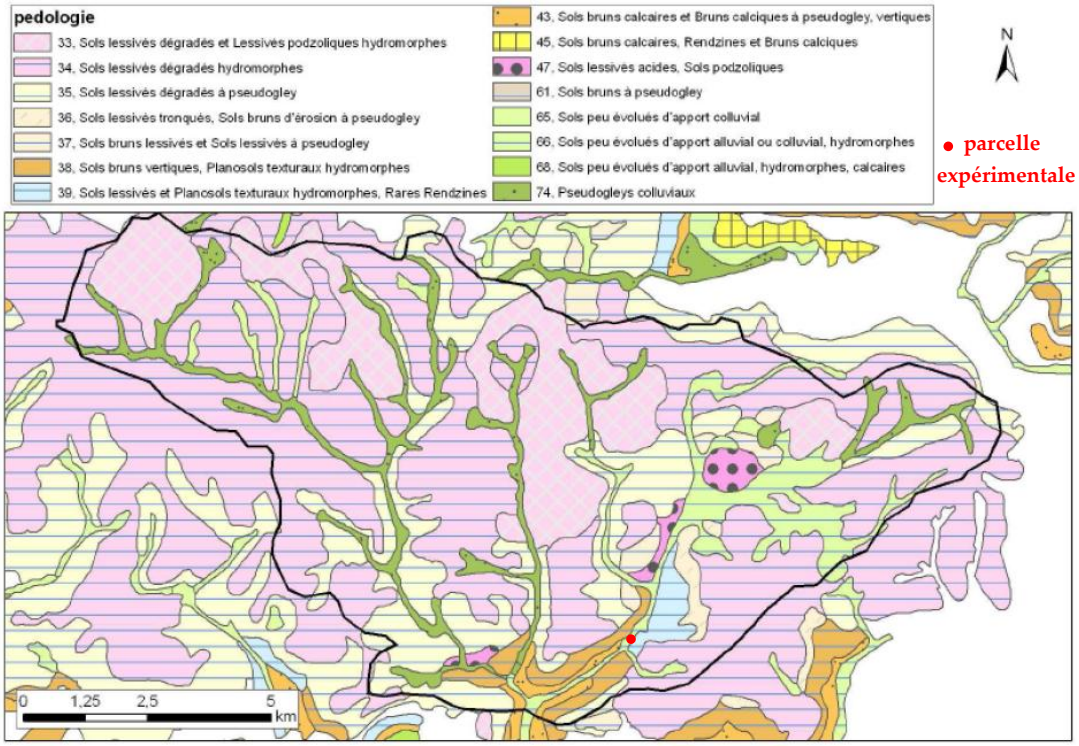


Figure 18. Carte pédologique du bassin versant de l'Orgeval
(Source : INRA 2007)

2.1.5. Climat

Le bassin de l'Orgeval est soumis à un climat océanique tempéré. Il est situé dans la Brie humide, où la pluviométrie annuelle, de 706 mm – données Météo France mesurées de 1963 à 2001 (Riffard *et al.* 2002) à la station de Boissy-le-Châtel à l'est du bassin versant – est supérieure au reste de la région Ile-de-France (600 mm). L'évapotranspiration potentielle est de 592 mm d'eau par an ; la période de déficit hydrique commence généralement début avril et prend fin début octobre.

Enfin, la température moyenne annuelle est d'environ 12°C (période de 1963 à 1981).

2.2. Présentation de la parcelle expérimentale et données disponibles

La parcelle expérimentale est située au bord du ru des Avenelles, sur le territoire de la ferme de la Derrier, dans la commune de Saint-Germain-sous-Doue (Figure 17). Elle couvre une surface de 3,8 ha et présente une topographie importante avec une pente de 7% orientée SE-NO perpendiculairement au ru des Avenelles.

Cette parcelle a été prospectée au moyen de l'ARP® le 20 août 2010. Les profils ont été réalisés perpendiculairement au ru des Avenelles (ligne arborée le long de la parcelle, Figure 19), avec un espacement entre chacun de 6 m.
Une seconde prospection a été conduite sur une zone sélectionnée d'environ 2500 m^2, au sud de la parcelle (délimitée en rouge sur la Figure 19), avec une distance inter-profils de 1 m.

Le courant injecté (10 mA) et le matériel utilisé sont les mêmes que pour les prospections à Ouarville.

Les cartes de résistivité apparente résultantes sont présentées dans le chapitre V (Figure 54), ainsi que le traitement dont elles ont fait l'objet.

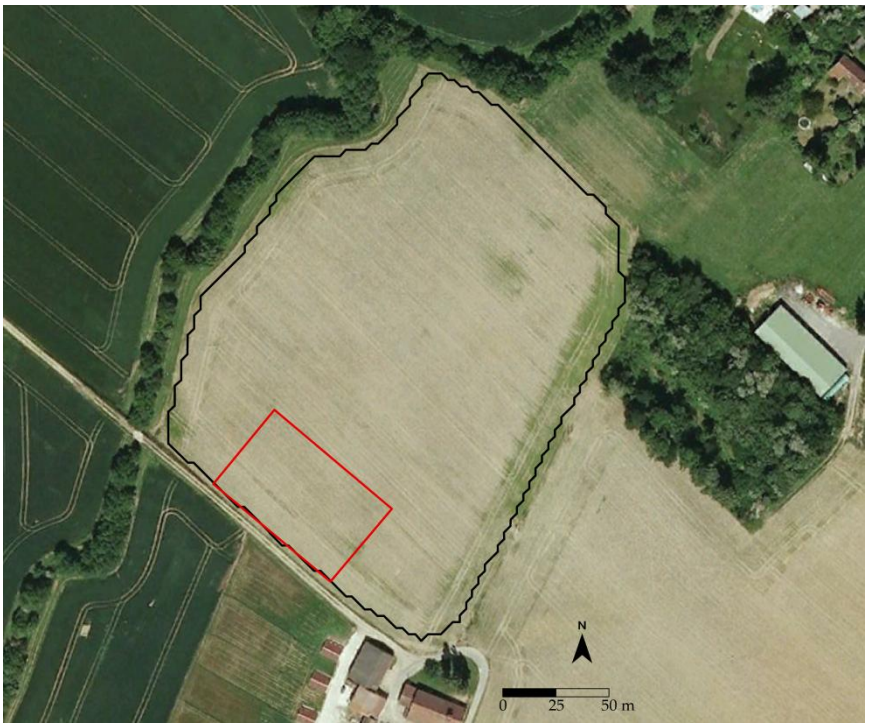


Figure 19. Délimitations des prospections électriques sur la parcelle de l'Orgeval

CHAPITRE III

Problème direct

La modélisation de mesures ARP® doit permettre d'approfondir les connaissances sur l'outil de prospection dans un double objectif : d'une part, définir des conditions expérimentales de mesure optimales, et, d'autre part, évaluer les performances et limites de la méthode. La modélisation porte sur l'étude de la détectabilité d'un corps dans un terrain synthétique sur lequel est simulée une prospection. La réponse du corps est évaluée de manière qualitative et quantitative afin de conclure quant à la sensibilité de l'appareil. A l'instar de Papadopoulos *et al.* (2009) dont les modélisations de mesures ARP® ont été réalisées sur des structures relativement épaisses (50 cm) pour étudier les variations de résistivité latérales dans une problématique archéologique, nous allons ici plutôt insister sur des structure fines, décimétriques, puisque c'est l'ordre de grandeur d'un horizon, unité de description pédologique.

Après la description de la méthodologie adoptée pour réaliser ces modélisations, les dimensions minimales d'un corps détectable, à l'aide de l'outil ARP® sont définies, différents paramètres caractérisant ce corps sont testés afin d'en évaluer l'impact sur la détection : espacement inter-profils, épaisseur, profondeur de ce corps ainsi que contraste de résistivité entre celui-ci et l'encaissant.

1. Matériels et méthode

1.1. Modélisation directe de mesures ARP®

1.1.1. Principe de la méthode des moments

La méthode des moments a été développée par Harrington (1961) pour des applications aux problèmes électromagnétiques. Elle consiste à remplacer les hétérogénéités présentes dans un milieu par une distribution équivalente de sources de courant. Utilisées par plusieurs auteurs (Dabas *et al.* 1994 ; Das et Parasnis 1987 ; Raiche 1974 ; Tabbagh 1985) tant pour la modélisation 3D électromagnétique qu'électrique, elle présente l'intérêt par rapport aux autres méthodes (éléments finis, différences finies) de limiter le maillage au volume des hétérogénéités considérées, placées dans un milieu homogène ou plus généralement tabulaire (Tabbagh *et al.* 2007). Les corps peuvent avoir des formes quelconques construites à partir d'éléments parallélépipédiques.

1.1.2. Formulation du problème physique

La méthode consiste à rechercher le potentiel électrique en un point quelconque lorsqu'un courant d'intensité I est injecté à la surface d'un sol homogène, de conductivité σ_H, comprenant un corps tridimensionnel de forme quelconque, de conductivité σ_C.

Introduisons tout d'abord le vecteur champ magnétique $\vec{H}$ à l'aide de la relation constitutive du milieu (en l'absence de phénomène de polarisation) :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

Les champs électrique total $\vec{E}$, et magnétique total $\vec{H}$, sont divisés en 2 parties :

- un champ primaire, noté $\overrightarrow{E_P}$ et respectivement $\overrightarrow{H_P}$, qui représente le champ présent dans le sol en l'absence de corps
- le champ secondaire, $\overrightarrow{E_S}$ et respectivement $\overrightarrow{H_S}$, qui résulte de la présence de corps à l'origine des anomalies

Les champs totaux s'écrivent donc :

$$\vec{E} = \overrightarrow{E_P} + \overrightarrow{E_S}$$

$$\vec{H} = \overrightarrow{H_P} + \overrightarrow{H_S}$$

En reprenant l'équation de MA appliquée au vecteur excitation magnétique, nous avons, dans le demi-espace homogène :

$$\overrightarrow{rot}\,\overrightarrow{H_P} = \sigma_H \overrightarrow{E_P}$$

et, à l'intérieur du corps :

$$\overrightarrow{rot}\,\vec{H} = \sigma_C \vec{E} \quad + \left(\sigma_H \vec{E} - \sigma_H \vec{E}\right)^2$$

En combinant les expressions précédentes, le champ secondaire s'écrit :

$\overrightarrow{rot}\,\overrightarrow{H_S} = \overrightarrow{rot}\left(\vec{H} - \overrightarrow{H_P}\right) = \overrightarrow{rot}\,\vec{H} - \overrightarrow{rot}\,\overrightarrow{H_P} = \sigma_C \vec{E} + \left(\sigma_H \vec{E} - \sigma_H \vec{E}\right) - \sigma_H \overrightarrow{E_P}$ d'où :

$$\overrightarrow{rot}\,\overrightarrow{H_S} = (\sigma_C - \sigma_H)\,\vec{E} + \sigma_H\,\overrightarrow{E_S}$$

Cette équation indique que l'effet du corps sur le milieu peut être interprété comme celui d'un source fictive de courant dont la densité est donnée par :

$$j_S = (\sigma_C - \sigma_H)\,E$$

Pour réaliser le calcul de $(\overrightarrow{H_S}, \overrightarrow{E_S})$ un potentiel vecteur $\vec{A}$ est défini tel que $\mu_0\,\overrightarrow{H_S} = \overrightarrow{rot}\,\vec{A}$ ce qui donne : $\overrightarrow{rot}\,\overrightarrow{H_S} = \frac{1}{\mu_0}\,\overrightarrow{rot}\left(\overrightarrow{rot}\,\vec{A}\right)$

Le champ électrique secondaire dépend donc de $\vec{A}$ par :

$$\overrightarrow{E_S} = \frac{1}{\mu_0\,\sigma_H}\,\overrightarrow{rot}\left(\overrightarrow{rot}\,\vec{A}\right) - \frac{\overrightarrow{J_S}}{\sigma_H}$$

Pour définir l'équation permettant de calculer $\vec{A}$, on utilise le fait qu'en régime continu, les dérivées temporelles sont nulles, $\overrightarrow{rot}\,\overrightarrow{E_S} = \vec{0}$, donc $\overrightarrow{E_S}$ dérive d'un potentiel scalaire V tel que :

$$\overrightarrow{E_S} = -\overrightarrow{grad}\,V$$

Mais $\overrightarrow{rot}\left(\overrightarrow{rot}\,\vec{A}\right) = \overrightarrow{grad}\left(div\,\vec{A}\right) - \vec{\Delta}\,\vec{A}$ et il est possible de choisir $div\,\vec{A} = -\mu_0\,\sigma_H\,V$ puisque $\vec{A}$ n'est défini (et utilisé) que par son rotationnel. On en déduit :

$$\vec{\Delta}\,\vec{A} = -\,\mu_0\,\overrightarrow{J_S}$$

Soit $G(r, r_S)$ ($= \frac{1}{4\pi|r - r_S|}$ dans le cas d'un milieu infini homogène), où r_S et r sont les positions de la source et du point d'observation, la fonction de Green correspondant au potentiel vecteur solution de cette équation, on en déduit que :

---

[2] Le terme $\left(\sigma_H \vec{E} - \sigma_H \vec{E}\right)$ est ajouté pour les simplifications qui suivent.

$$\overrightarrow{A(r)} = \iiint_V \mu_0 \, G(r) \, \overrightarrow{J_S} \, d\tau$$

L'écriture intégrale du champ secondaire dans le corps à l'origine de l'anomalie est :

$$\overrightarrow{E_S(r, r_S)} = \frac{1}{\sigma_H} \iiint_V \overrightarrow{J_S(r_S)} \, \overrightarrow{rot} \, \left[\overrightarrow{rot} \, G(r, r_S)\right] d\tau - \frac{\overrightarrow{J_S(r)}}{\sigma_H}$$

et à l'extérieur du corps :

$$\overrightarrow{E_S(r, r_S)} = \frac{1}{\sigma_H} \iiint_V \overrightarrow{J_S(r_S)} \, \overrightarrow{rot} \, \left[\overrightarrow{rot} \, G(r, r_S)\right] d\tau$$

où : V le volume de la cellule où est calculé le potentiel

Ces dernières équations, appelées équations de Fredholm, permettent donc de calculer le champ électrique en tout point de l'espace. Exprimées sous formes vectorielles, elles sont converties pour leur implémentation en un système matriciel par l'intermédiaire de la discrétisation du corps perturbateur. Celui-ci est divisé en N cellules de résistivité constante au centre desquelles 3 dipôles électriques sont dirigés selon x, y et z (Panissod 1997).

1.1.3. Présentation de l'outil de calcul PELEC3D

L'outil utilisé pour la modélisation est un programme de calcul, PELEC3D, mettant en œuvre la méthode des moments pour la modélisation électrique (Dabas *et al.* 1994 ; Tabbagh *et al.* 2007). Il permet un calcul rapide de la résistivité apparente mesurée au moyen d'un dispositif dont la configuration d'électrode est fixée par l'utilisateur. Le programme permet un calcul sur terrain tabulaire d'au maximum trois couches dont il faut indiquer résistivités électriques et épaisseurs, et offre la possibilité d'insérer dans la deuxième couche des corps tridimensionnels de résistivité différente de celle de l'encaissant. Ces corps, parallélépipédiques, peuvent être agencés de sorte à construire des structures de formes variées. Leur position dans le terrain (position latérale et profondeur), mais aussi le nombre et la taille de leurs cellules élémentaires nécessaires à l'application de la méthode des moments sont laissés au choix de l'utilisateur. Cependant il est nécessaire de trouver un compromis entre un effectif important de cellules qui peut augmenter considérablement le temps de calcul, et un petit nombre de cellules qui aura pour effet d'en augmenter la taille, taille qui conditionne la précision du calcul de résistivité, car la réponse de l'hétérogénéité diminue en amplitude si les dimensions des cellules qui la composent sont trop grandes. Un travail d'optimisation du maillage du corps hétérogène par rapport à l'écartement des électrodes (Panissod *et al.* 1997b) préconise l'emploi de cellules dont la taille n'excède pas cet écartement (typiquement la taille adoptée est de l'ordre de la demi distance entre les deux électrodes les plus proches du dispositif utilisé). Enfin l'outil de calcul demande de renseigner le nombre et la position des points de mesures en surface pour le dispositif étudié. La Figure 20 illustre les principaux paramètres de modélisation à préciser.

Dans toutes les modélisations réalisées ici, le terrain synthétique est homogène et contient un corps unique constitué de 4 à 8 cellules (précisé à chaque essai). L'ARP® disposant de trois

quadripôles, la simulation de mesures est faite pour les trois configurations d'électrodes : trapézoïdale pour les quadripôles extrêmes, correspondant aux voies d'enregistrement 1 et 3, et carré de 1 m de coté pour le quadripôle intermédiaire, correspondant à la deuxième voie d'enregistrement.

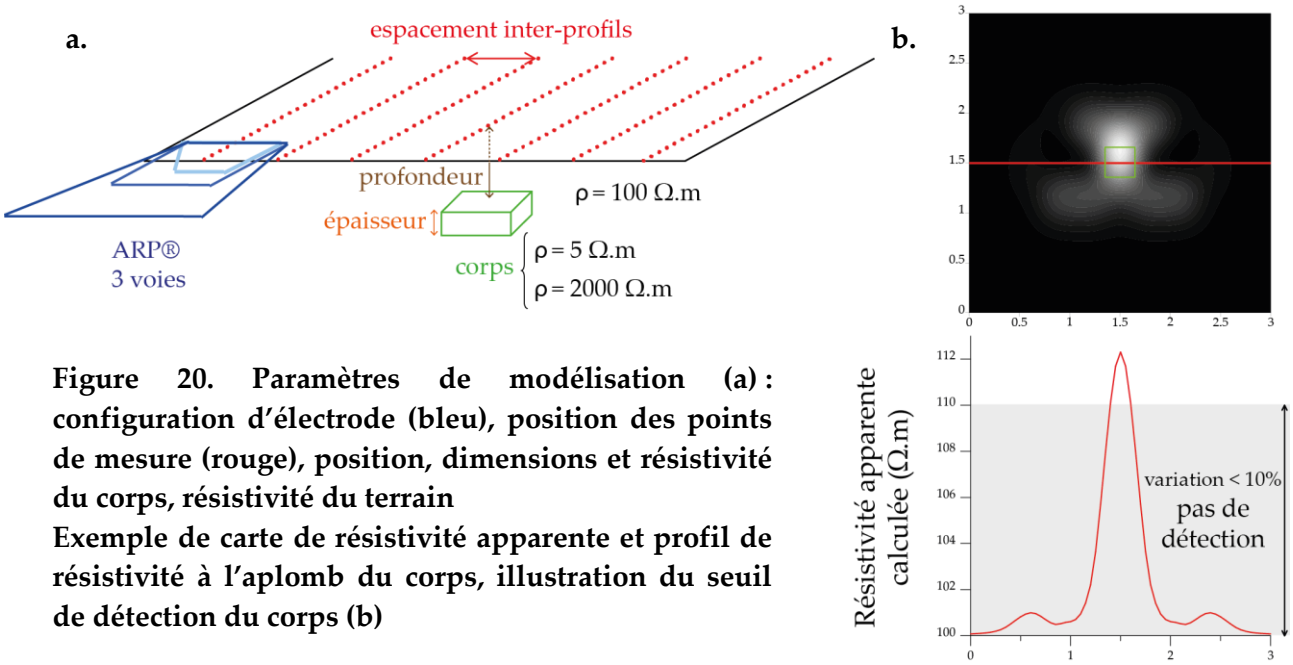


Figure 20. Paramètres de modélisation (a) : configuration d'électrode (bleu), position des points de mesure (rouge), position, dimensions et résistivité du corps, résistivité du terrain
Exemple de carte de résistivité apparente et profil de résistivité à l'aplomb du corps, illustration du seuil de détection du corps (b)

1.2. Evaluation de la qualité de la détection d'un corps

L'évaluation de la qualité de la détection du corps est contrôlée avec, d'une part, la cartographie de résistivité apparente, pour vérifier la bonne retranscription des contours de ce corps et d'autre part, le tracé du profil de résistivité apparente mesuré à l'aplomb du corps pour vérifier l'intensité de l'anomalie mesurée (Figure 20b).

1.2.1. Cartographie de résistivité apparente

La modélisation fournit des valeurs de résistivité apparente en chaque point de mesure spécifié. Il est nécessaire, pour obtenir des cartes, d'interpoler ces valeurs. L'interpolateur adopté, décrit en détail dans le chapitre V, utilise la fonction bi-cubique. La grille d'interpolation est choisie fine et régulière, avec une maille de 5x5 cm, pour ne pas introduire de biais dans la retranscription des contours du corps modélisé. Elle permet en outre de s'adapter aux structures synthétiques particulièrement petites testées dans le cadre de l'étude de sensibilité. A chaque nœud de la grille établie est attribuée une valeur de résistivité apparente prenant en compte les valeurs calculées par modélisation et comprises dans une fenêtre carrée, dont la taille est égale à quatre fois la plus grande distance entre deux points de mesure adjacents. La taille de cette zone d'influence est choisie de sorte à prendre en considération des valeurs calculées dans les directions longitudinale et transversale au déplacement du dispositif. Même si, dans les modélisations opérées, les points de mesure sont parfois invraisemblablement denses dans la direction perpendiculaire au passage de

l'appareil, en pratique, la distance entre les passages de l'ARP® est généralement plus importante que l'espacement entre deux points de mesure dans le sens de son déplacement. La dimension de la fenêtre adoptée permet ici de tenir compte de deux profils de part et d'autre du point interpolé. Ce choix est une façon de gommer les effets liés à l'anisotropie de la répartition spatiale des mesures. Les cartes de résistivité apparente obtenues (exemple Figure 20b) permettent ainsi d'apprécier la qualité des contours du corps détecté ainsi que ses dimensions.

1.2.2. Tracé du profil de résistivité à l'aplomb du corps

Afin de juger quantitativement l'intensité de la réponse d'un corps enfoui au passage simulé de l'outil de prospection, cette réponse est exprimée en termes de variation de résistivité apparente par rapport au milieu encaissant. Cette variation est visualisable à l'aide du tracé des valeurs de résistivité apparente calculées selon un profil passant à l'aplomb du corps et perpendiculaire aux passages du dispositif de mesure, c'est-à-dire selon une section traversant les cartes de résistivité apparente en leur centre (Figure 20b). Bien que la détectabilité d'un corps soit influencée par le bruit géophysique qui résulte de l'ensemble des réponses produites par des phénomènes non désirés comme l'irrégularité de la surface ou encore la variation à courtes distance des propriétés de la première couche, elle reste principalement dépendante du contraste de résistivité entre ce corps et le milieu qui l'entoure. En prospection électrique, la procédure habituelle est de fixer un niveau minimum en dessous duquel la variation mesurée n'est pas considérée comme provenant de la structure. Ce seuil est en général d'environ 10% de la réponse de l'encaissant (Tabbagh 1985). En vue d'une prospection future et suite à l'étude bibliographique sur les valeurs de résistivité rencontrées dans le Bassin Parisien, le terrain synthétisé est choisi uniforme avec une résistivité de 100 Ω.m. Ceci amène à considérer l'ARP® sensible à la présence de la structure à détecter si la valeur de résistivité calculée est au-delà de 110 Ω.m dans le cas d'un corps résistant et en dessous de 90 Ω.m dans le cas d'un corps conducteur.

1.3. Paramètres testés

Afin d'évaluer les performances de l'ARP®, et notamment pour avoir une idée des résolutions latérale et verticale envisageables avec l'appareil, divers paramètres sont testés lors des modélisations : l'espacement inter-profils, les dimensions, la profondeur et la résistivité du corps à détecter (Figure 20a). Deux cas de contraste, élevés mais réalistes (Guérin *et al.* 1996), sont traités :

- le cas d'un corps résistant par rapport au terrain : ρ_c=2000 Ω.m soit 20 fois la résistivité de l'encaissant
- le cas d'un corps conducteur : ρ_c=5 Ω.m soit la résistivité de l'encaissant divisée par 20

Une autre constante est la densité des mesures dans le sens de déplacement du dispositif, fixée à un point de mesure tous les 15 cm.

1.3.1. Espacement inter-profils

L'objectif du test de différents espacements inter-profils est de voir au-delà de quelle densité d'échantillonnage il n'est pas nécessaire d'aller pour détecter un corps ponctuel. Avant de procéder aux essais d'échantillonnage, il faut au préalable déterminer ce qui peut être considéré comme ponctuel en vue d'obtenir la réponse impulsionnelle de chaque dispositif. Pour cela, le corps inséré dans le terrain synthétique, est choisi cubique dont la longueur du côté va varier jusqu'à obtenir les dimensions minimales pour que ce corps soit détecté. La modélisation est réalisée avec la voie 1 de l'ARP® pour la détection d'un corps en surface : le toit de celui-ci est fixé à 10 cm. Le volume du cube prend les valeurs 10, 20, 30, 40 et 50 cm^3 et est divisé en 8 cellules semblables cubiques pour le calcul (cellules de coté 5, 10, 15, 20 et 25 cm). Pour être sûr de ne prendre en compte, dans le signal mesuré, que l'effet lié à la taille du corps confiné, les paramètres de modélisation restants sont choisis des plus propices afin de ne pas détériorer l'information : espacement inter-profils de 5 cm, distance entre 2 points de mesure de 15 cm (l'interpolation va prendre en compte les valeurs mesurées comprises dans une "zone d'influence" de 60 cm par 60 cm centrée sur la valeur interpolée).

Une fois les dimensions minimales détectables déterminées, c'est sur cette structure et toujours avec le petit quadripôle de l'ARP® que les essais d'espacement inter-profils variables sont réalisés. Le Tableau 2 répertorie les valeurs testées de 5 cm – valeur irréaliste en pratique mais possible en modélisation – à 1,2 m ; ces espacements sont également ramenés au coefficient géométrique du quadripôle, défini par AM, afin d'extrapoler les observations à des dispositifs d'autres dimensions. Par ailleurs, les espacements inter-profils les plus importants nécessitant des fenêtres d'interpolation plus grande, la taille des terrains synthétisés est variable mais la représentation, dans les résultats, des seuls 9 m^2 centraux des cartes de résistivité apparente est une façon de "zoomer" sur l'essentiel, tout en harmonisant la taille des cartes.

L'étude de l'effet de l'espacement inter-profils doit permettre d'évaluer les limites de détection de l'ARP® et les résolutions latérales approximatives envisageables pour chacune de ses voies d'enregistrement. Enfin, ces essais constituent un outil intéressant pour adapter l'échantillonnage des mesures sur le terrain en fonction d'objectifs pédologiques fixés.

1.3.2. Profondeur et épaisseur du corps

La modélisation de mesures ARP® au-dessus d'un corps de profondeur et d'épaisseur variables a pour objectif d'estimer ce qui peut être obtenu de l'appareil en termes de profondeur d'investigation et de résolution verticale. L'application pédologique de cet de prospection implique une finesse de détection de moins d'une dizaine de centimètres puisque l'ordre de grandeur de l'épaisseur d'un horizon de sol est décimétrique. Par ailleurs, les sites de prospection étant situés dans le Bassin Parisien, le choix des dimensions latérales du corps modélisé se base sur la variabilité spatiale qu'il est possible d'y rencontrer. La bibliographie témoigne de la présence de structures d'extension métrique, en limite des

bassins de la Loire et de la Seine, comme des lentilles d'argile lourde au nord d'Orléans (Dabas *et al.* 1995) ou encore des ensellements plus ou moins comblés de graviers au sein de matériaux argileux (Lamotte *et al.* 1988, 1990).

Paramètres de modélisation								
distance inter-profils Δx	0,05	0,1	0,15	0,3	0,45	0,6	0,9	1,2
(en mètre et rapport de AM)	AM/12	AM/6	AM/4	AM/2	3/4 AM	AM	3/2 AM	2 AM
nombre de profils	61	31	21	11	11	11	9	11
distance entre 2 mesures consécutives Δy (m)	0,15							
nombre de points par profils	21	21	21	21	31	41	49	81
taille du terrain (m)	3	3	3	3	4,5	6	7,2	12
Paramètres d'interpolation								
taille de la maille de la grille d'interpolation (m)	0,05							
zone d'influence (m)	0,6	0,6	0,6	1,2	1,8	2,4	3,2	4,8

Tableau 2. Paramètres de modélisation et d'interpolation utilisés pour l'étude de l'impact de l'espacement inter-profils sur la détection d'un corps

Profondeur

Le corps modélisé pour les tests de détectabilité en fonction de sa profondeur possède donc la forme d'une dalle carrée de 1 m de côté et d'épaisseur 10 cm. La profondeur de son centre varie de 0,2 à 2 m par pas de 20 cm. Les simulations sont réalisées pour la géométrie des 3 voies d'enregistrement de l'ARP®.

Epaisseur

La profondeur d'investigation est définie comme étant la profondeur maximale à laquelle un corps peut être détecté, mais il est intuitif, étant donné que les mesures de résistivité électrique sont intégratives, que la mise en évidence d'un corps fin sera plus aisée à l'aide d'un petit quadripôle si ce corps est en surface, qu'avec un quadripôle de plus grande dimension s'il est en profondeur. Les notions de profondeur d'investigation et de résolution verticale sont donc étroitement liées et celles d'épaisseur et de profondeur du corps difficilement dissociables. Cependant les modélisations s'attachent ici à ne faire varier qu'un seul des 2 paramètres ; les simulations de mesures au-dessus d'un corps d'épaisseur variable, sont par conséquent réalisées pour un corps positionné à 3 profondeurs distinctes : 0,5, 1 et 1,5 m. Cela devrait ainsi permettre d'accéder à la résolution verticale envisageable avec l'ARP® à chacune des profondeurs du corps.

L'ensemble des paramètres concernant la modélisation de mesures au-dessus d'une structure de profondeur et d'épaisseur variable est répertorié dans le Tableau 3.

Profondeur variable					Epaisseur variable					
Profondeur testées (m) (du centre de la dalle)					Profondeur	Epaisseur testée (m)				
					z=0,5 m	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,2	0,4	0,6	0,8	1	z=1 m	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
1,2	1,4	1,6	1,8	2	z=1,5 m	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Paramètres de modélisation										
distance inter-profils						1 m				
distance entre 2 mesures consécutives						15 cm				
4 cellules dans le corps (dimensions en m)						0,5 x 0,5 x épaisseur				
Paramètres d'interpolation										
maille de la grille d'interpolation						5 x 5 cm				
zone d'influence pour l'interpolation						60 x 60 cm				

Tableau 3. Paramètres de modélisation et d'interpolation utilisés pour l'étude de l'impact de la profondeur et de l'épaisseur d'un corps sur sa détection

1.3.3. Contraste de résistivité avec le milieu encaissant

Les modélisations de mesures au-dessus d'un corps de résistivité variable ont pour but de déterminer le contraste minimal de résistivité nécessaire entre ce corps et l'encaissant pour enregistrer un signal suffisant. Les simulations sont réalisées avec un corps d'extension latérale de 1 m, enfouie à 0,5 m de la surface, profondeurs d'investigation correspondant aux possibilités offertes par l'ARP®, et à une position plutôt moyenne pour un horizon d'une couverture pédologique comme celles observables dans le Bassin Parisien qui atteignent rarement plus d'1,2 m d'épaisseur. L'épaisseur du corps est celle déterminée lors des tests précédemment décrits comme étant l'épaisseur minimale détectable à 0,5 m. Les paramètres de modélisation et d'interpolation sont les mêmes que pour les simulations avec corps d'épaisseur et à profondeur variables (Tableau 3). Les valeurs de résistivité du corps varient de 5 à 95 Ω.m par pas de 10 Ω.m pour le contraste conducteur dans milieu résistant et de 2000 à 200 Ω.m par pas de 200 Ω.m pour le contraste résistant dans milieu conducteur. La gamme de résistivités testée commence ainsi avec les rapports employés jusqu'ici, $\rho_{encaissant}/20$ pour le corps conducteur ou $\rho_{encaissant} \times 20$ pour le corps résistant, et permet d'évaluer une dizaine de contraste, pour les deux types de contraste considérés, jusqu'à ce que la résistivité du corps atteigne celle du milieu.

2. Résultats

2.1. Evaluation des dimensions minimales détectables

Les profils de résistivité apparente à l'aplomb des corps conducteur et résistant de différents tailles sont tracés Figure 21. Ces courbes montrent qu'un corps ponctuel de volume inférieur

à 30x30 cm ne peut pas être mis en évidence par le dispositif de mesure modélisé avec les contrastes de résistivité utilisés et selon les limites de détectabilité fixées. Dès lors que le corps atteint 30 cm de côté, la déviation de résistivité apparente est d'au moins 10% par rapport à la réponse du milieu encaissant ; **le dispositif de mesure peut donc être considéré sensible aux structures de dimension supérieure à 30x30 cm**. Ce constat est valable quel que soit le contraste – corps conducteur ou résistant par rapport au milieu – mais l'intensité de la réponse diffère suivant les cas, et ce malgré le choix, d'un même contraste de résistivité entre le corps et l'encaissant (rapport $\frac{\rho(corps\ ou\ encaissant)_{résistant}}{\rho(corps\ ou\ encaissant)_{conducteur}} = 20$). En effet, d'après les critères de détectabilité fixés, **la détection du corps conducteur est meilleure**, avec des réponses d'amplitude 1,6 fois supérieure à celles occasionnées par la structure résistante (comparaison des maxima centraux). Enfin, il est d'usage d'exploiter la largeur à mi-hauteur des profils de résistivité et de les comparer aux dimensions du corps synthétique. S'il est difficile d'exploiter **les courbes de réponses** du corps résistant car celles-ci sont particulièrement larges et donneraient une surestimation de la taille de la structure à détecter, celles **fournies par le corps conducteur** en revanche **présentent des largeurs à mi-hauteur vraiment proches des dimensions de la structure** : de 28, 44 et 46 cm pour les simulations de mesures à l'aplomb de corps d'extension 30, 40 et 50 cm.

Cette étude préalable des dimensions minimales détectables avec l'ARP® sert de base aux modélisations de mesures avec espacements inter-profils variables puisque c'est au-dessus de cette structure cubique de 30 cm de côté et à 10 cm de la surface que les différents écarts entre les passages du dispositif seront testés.

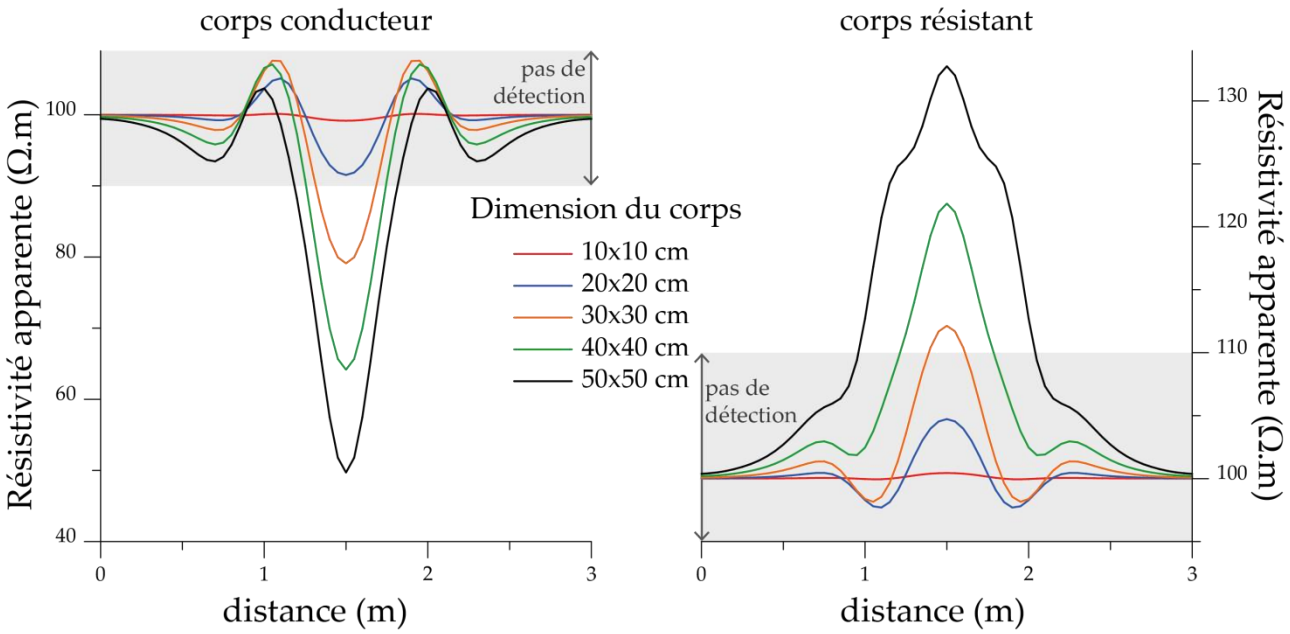


Figure 21. Résistivité apparente mesurée par la voie 1 de l'ARP® le long d'un profil à l'aplomb d'un corps de volume variable (toit à 10 cm de la surface) et de résistivité 5 Ω.m (gauche) ou 2000 Ω.m (droite)

2.2. Impact de l'espacement inter-profils sur la détection

Les cartes de résistivité apparente issues des modélisations de mesures avec différents espacements inter-profils sont représentées Figure 23, les profils de résistivité en leur centre sont tracés Figure 22.

Comme précédemment la différence d'intensité entre les réponses des corps conducteur et résistant est tout à fait remarquable, avec des rapports de maxima d'amplitude de l'ordre de 1,6-1,7 ; d'après les critères de détectabilité fixés, le corps conducteur est ici encore mieux distingué que le corps résistant quelle que soit la distance adoptée entre les passages du dispositif.

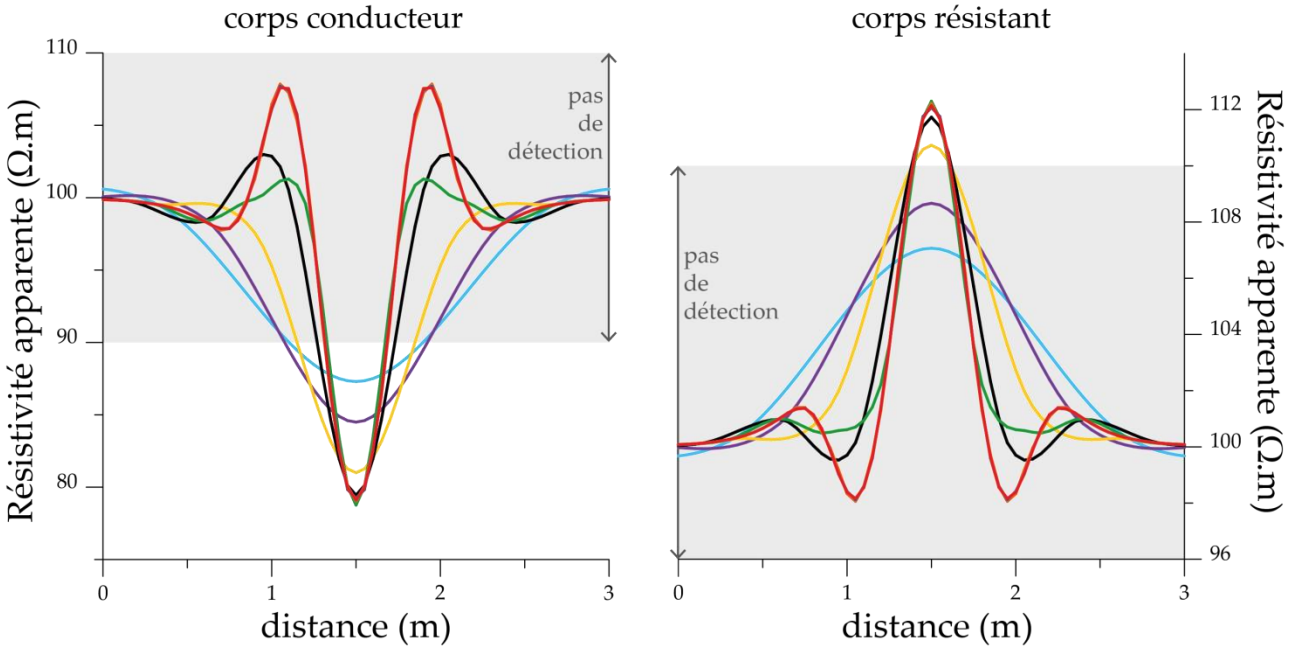


Figure 22. Résistivité apparente mesurée à l'aplomb d'un corps de 5 Ω.m (gauche) et de 2000 Ω.m (droite), cubique de 30 cm de coté (toit à 10 cm de la surface) pour des espacements inter-profils variables

Espacement inter-profils

0,05 m	AM/12	0,45 m	¾ AM
0,1 m	AM/6	0,6 m	AM
0,15 m	AM/4	0,9 m	³/₂ AM
0,3 m	AM/2	1,2 m	2×AM

Cartes et courbes donnent lieu à certaines observations similaires : il n'y a aucune différence entre les trois prospections de distance inter-profils les plus faibles, AM/12, AM/6 et AM/4, tant du point de vue de la retranscription des contours par la cartographie (Figure 23) que de l'allure des réponses fournies puisque les 3 courbes se superposent parfaitement (Figure 22). En outre la largeur à mi-hauteur de ces courbes, d'environ 30 cm, rend par conséquent très bien compte de la dimension de la structure. L'espacement inter-profils de AM/2 fournit également des cartes de résistivité apparentes de bonne qualité et des courbes de réponse des corps conducteur et résistant d'une finesse équivalente à celles décrites précédemment – indiquant correctement l'extension latérale de la structure – mais avec une amplitude supérieure et moins de distorsion de part et d'autre de "l'arche centrale" (en vert Figure 22).

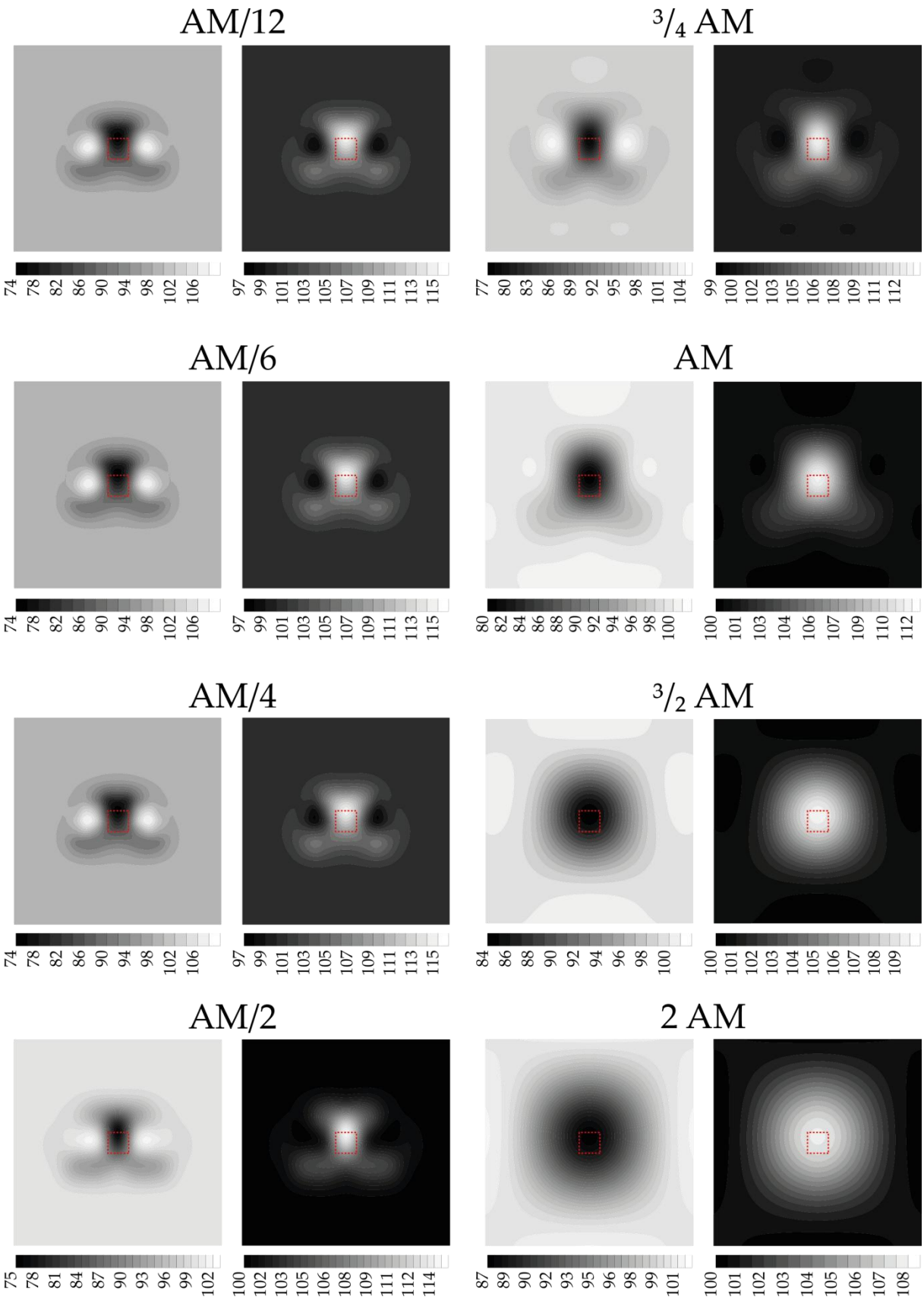


Figure 23. Cartographie de résistivité apparente (en Ω.m) pour différents espacements inter-profils au-dessus d'un corps cubique de 30 cm de coté, conducteur (gauche) ou résistant (droite)

Ce constat amène à conclure qu'il **est inutile de réduire la distance inter-profils en dessous de la demi-taille du dispositif AM/2**, distance correspondant à **la résolution latérale envisageable pour la voie 1 de l'ARP® qui est de l'ordre de 30 cm**.

Pour des espacements supérieurs à AM/2 et croissants, les contours du corps cartographié se font de moins en moins nets, les courbes de réponse des corps s'élargissent et leur amplitude s'amenuise jusqu'à passer, dans le cas du corps résistant, sous la barre des 110 Ω.m, faisant de celui-ci une structure indétectable avec une distance inter-profils supérieure à AM.

(Remarque : dans les cas modélisés, il y avait systématiquement un passage du dispositif à l'aplomb du centre du corps ce qui donne des constats particulièrement optimistes).

2.3. Impact de la profondeur d'une structure sur sa détection

Les simulations, réalisées avec les 3 voies d'enregistrement de l'ARP® au-dessus d'une dalle située à profondeur variable, donne les profils de résistivité apparente de la Figure 24. Pour chaque profondeur testée, cette figure ne fait apparaître que la courbe correspondant à la voie d'enregistrement la plus sensible à la présence du corps (voie sur laquelle la réponse est maximale).

La réponse du corps résistant est d'un amplitude particulièrement importante lorsque sa position est comprise entre 15 et 25 cm de profondeur. Ce n'est plus vrai pour des profondeurs supérieures. La sensibilité du dispositif à une dalle résistante décroit très rapidement lorsque le corps s'enfonce, beaucoup plus rapidement que pour le contraste corps conducteur dans milieu résistant. La mise en évidence de la dalle conductrice est possible jusqu'à une profondeur de 60 cm tandis que la dalle résistante n'est détectable que jusqu'à 40 cm.

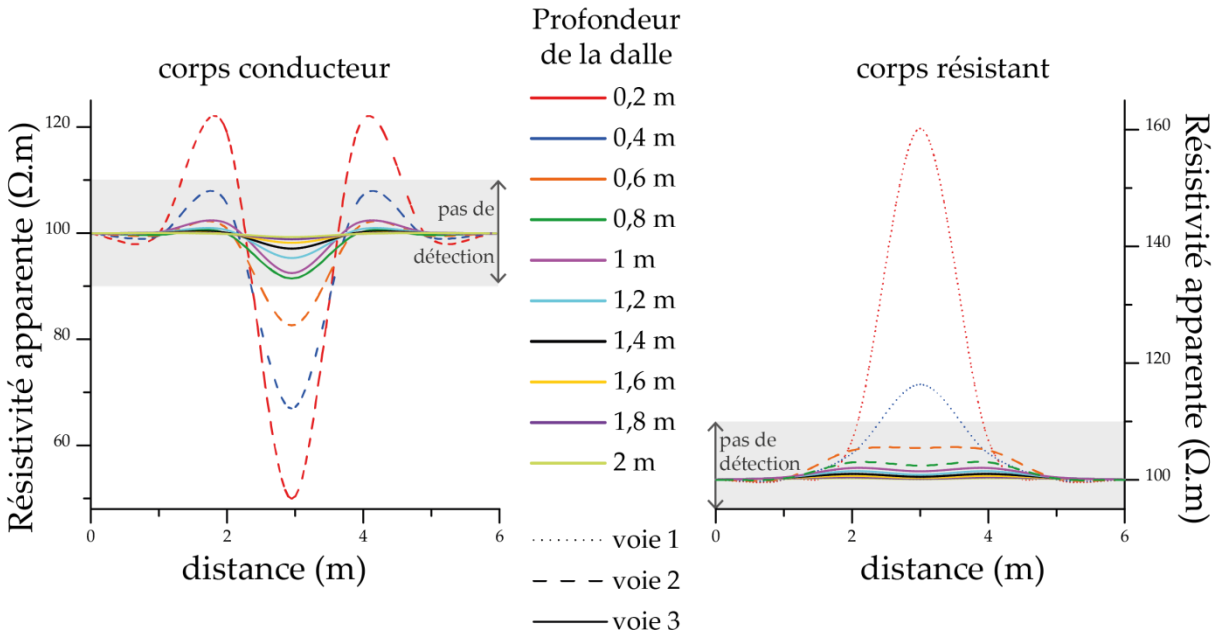


Figure 24. Résistivité apparente mesurée à l'aplomb d'une dalle de 10 cm d'épaisseur, de 5 Ω.m (gauche) et de 2000 Ω.m (droite), à profondeur variable

La Figure 24 montre assez logiquement, que plus la dalle s'enfonce, plus le quadripôle de grande dimension lui est sensible ; ceci est notamment visible sur les réponses du corps résistant, qui sont celles enregistrées sur la voie 1 jusqu'à 40 cm de profondeur, puis celles de la voie 2 de 60 à 80 cm de profondeur et enfin celles de la voie 3 jusqu'à une profondeur de 2 m. La dalle conductrice, quant à elle, même lorsqu'elle est en surface, donne un signal maximal sur la voie 2, mais ces courbes présentent des distorsions qui s'expliquent probablement par le fait que ce sont justement les réponses des voies qui ne sont pas forcément les plus appropriées vue la profondeur du corps : la voie 1, plus adaptée au cinquante premiers centimètres, procure des courbes de moindre amplitude mais également moins chahutée comme l'illustre la Figure 25 pour un corps enfoui à 20 cm de profondeur.

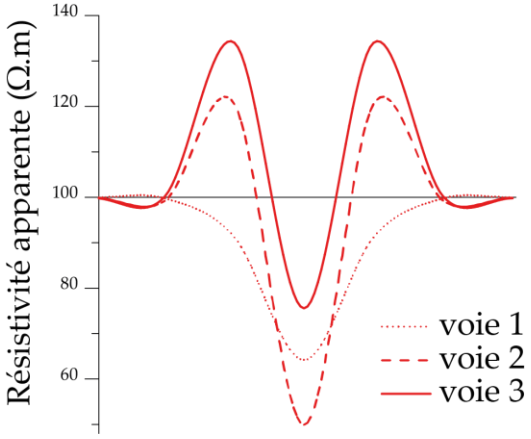
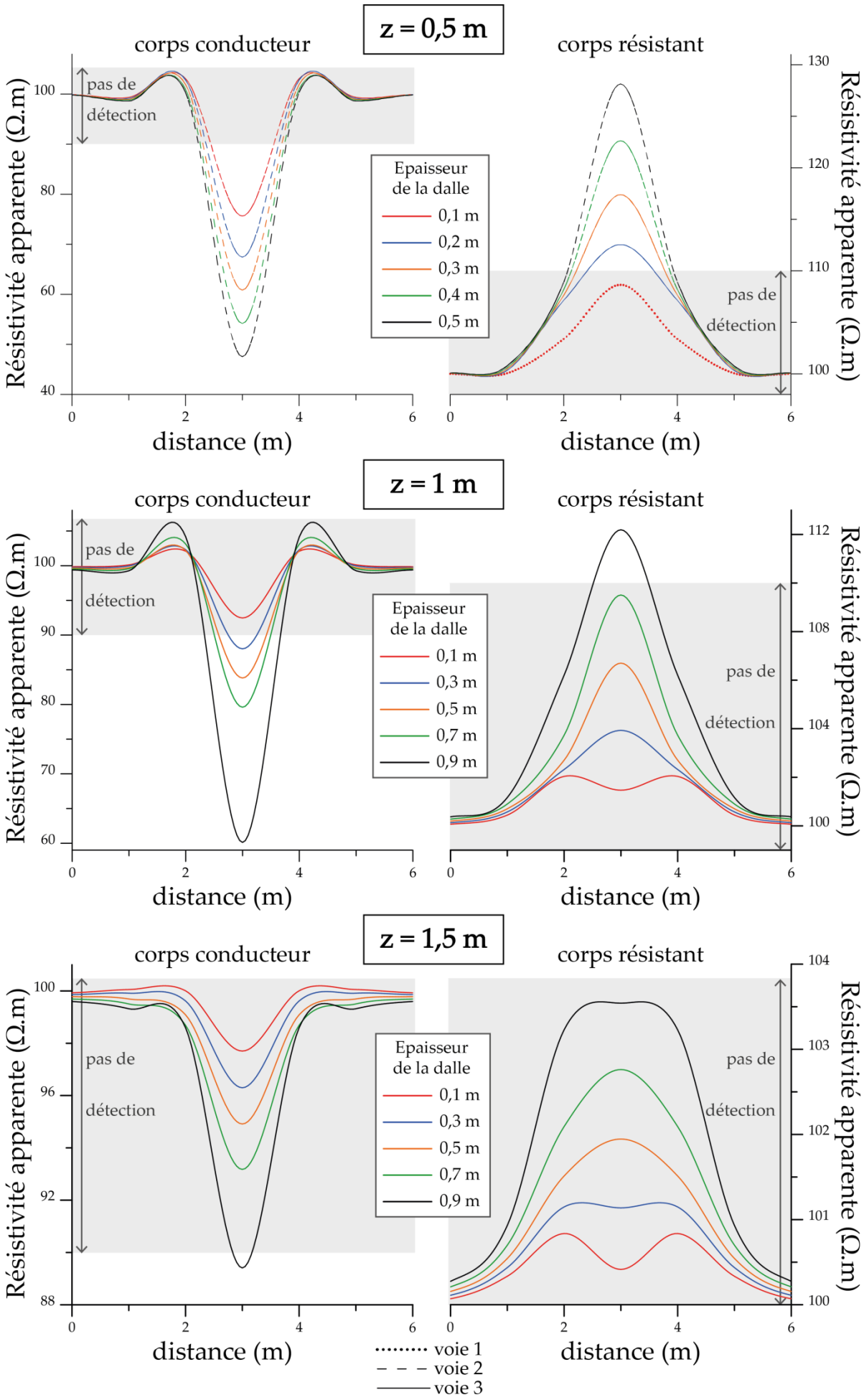


Figure 25. Résistivité apparente mesurée par les 3 voies de l'ARP® à l'aplomb d'un corps conducteur à 20 cm de profondeur

Ces observations conduisent à la conclusion qu'une **résolution verticale décimétrique est envisageable dans les cinquante premiers centimètres** en-dessous de la surface. Un horizon de sol, même fin, pourra donc avoir une signature sur la mesure électrique s'il contraste suffisamment en résistivité avec le milieu encaissant. Cette **résolution décimétrique décroit** cependant **très rapidement avec la profondeur** ce qui justifie d'étudier l'épaisseur nécessaire d'un corps pour qu'il soit détecté au-delà de 0,5 m de profondeur.

Page suivante :

Figure 26. Résistivité apparente mesurée à l'aplomb d'une dalle d'épaisseur variable, de 5 Ω.m (gauche) et de 2000 Ω.m (droite), à 0,5, 1 et 1,5 m de profondeur


z = 0,5 m
corps conducteur
corps résistant
pas de détection
Epaisseur de la dalle
0,1 m
0,2 m
0,3 m
0,4 m
0,5 m
Résistivité apparente (Ω.m)
distance (m)
z = 1 m
0,1 m
0,3 m
0,5 m
0,7 m
0,9 m
z = 1,5 m
voie 1
voie 2
voie 3

2.4. Impact de l'épaisseur d'une structure sur sa détection

La Figure 26 présente les réponses d'un corps d'épaisseur variable positionné à 0,5, 1 et 1,5 m de profondeur. Toutes les modélisations montrent des réponses d'amplitude deux à trois fois supérieure de la part du corps conducteur par rapport au corps résistant. Ce dernier, d'après les essais à 0,5 m de profondeur, ne devient visible selon les critères de détectabilité fixés que si son épaisseur dépasse les 10 cm. À partir de 1 m de profondeur, c'est le plus grand quadripôle de l'ARP® qui est le plus sensible à la présence du corps. Les profils de résistivité apparente au-dessus des corps à 1 m de profondeur indiquent des épaisseurs minimales de 30 cm et supérieure à 70 cm pour que le corps, respectivement conducteur et résistant, soient détectés. Enfin, à 1,5 m de profondeur, les épaisseurs minimales détectables – 90 cm pour le corps conducteur et non atteinte pour le corps résistant – sont telles que la structure doit s'étendre verticalement pour être mise en évidence : le toit du corps conducteur de 90 cm se retrouve à 1,05 m.

De toutes ces observations et d'après les critères de détection fixés, il ressort que **le corps conducteur semble** une nouvelle fois **plus facile à mettre en évidence que le corps résistant entre 0,5 et 1,5 m de profondeur**. En outre, **la résolution verticale du dispositif s'avère de quelques décimètres à 1 m de profondeur** et les structures vraiment profondes requièrent un volume conséquent pour être décelables.

2.5. Influence du contraste de résistivité entre le corps et l'encaissant

L'évaluation de l'impact de l'épaisseur du corps sur sa détection a montré la nécessité d'une dimension verticale minimale de 20 cm pour le corps de 2000 Ω.m ; c'est avec une dalle de cette épaisseur et de résistivité variable que sont réalisées les simulations de mesures ARP®. Les profils de résistivité représentés Figure 27 sont issus des modélisations avec le quadripôle moyen, carré de 1 m de coté, qui correspond à la voie sur laquelle le signal s'est avéré maximal. Les courbes indiquent une variation de résistivité satisfaisante pour une détection validée si la résistivité de la dalle est inférieure à 40 Ω.m ou bien supérieure à 700 Ω.m, soit 2,5 fois moins résistante ou 7 fois plus que l'encaissant. Les amplitudes des déviations atteignent environ 32% lorsque le corps est conducteur et 13% s'il est résistant, ce qui illustre une fois encore la meilleure mise en évidence du corps si celui-ci est plus conducteur que l'encaissant. Ces modélisations rendent compte de la **nécessité d'un contraste minimal de propriété électrique entre le corps et le milieu qui l'entoure**.

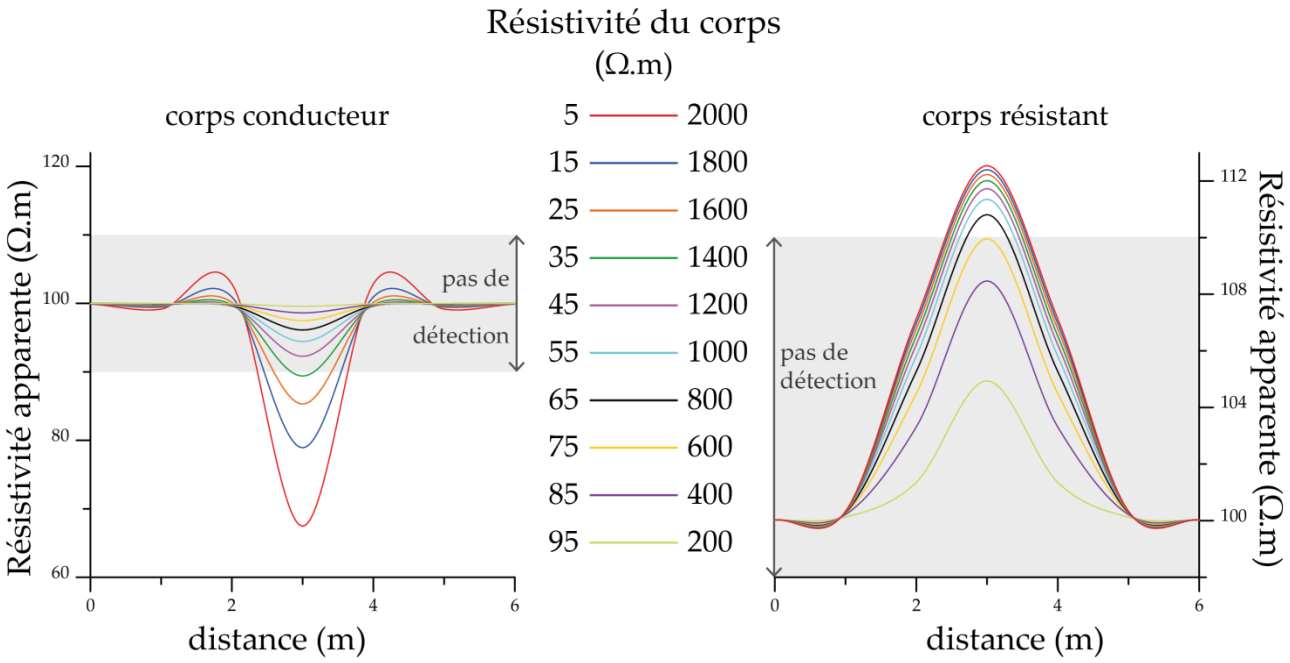


Figure 27. Résistivité apparente mesurée (voie 2) à l'aplomb d'une dalle à 0,5 m de profondeur et de résistivité variable, conductrice (gauche) ou résistante (droite) par rapport à l'encaissant (100 Ω.m)

3. Synthèse sur la modélisation

La modélisation de mesures ARP® sur un terrain synthétique comprenant un corps aux propriétés géométriques et électrique variables a montré en premier lieu qu'il est difficilement envisageable de déceler des structures de dimensions inférieures à 30x30 cm malgré un fort contraste de résistivité avec l'encaissant. Il est donc peu probable de distinguer des éléments pédologiques tels que des poches de cryoturbation, ou des changements ponctuels de la structure d'un horizon qui peut par exemple devenir lamellaire sous l'effet du tassement. En outre, la définition de ce volume minimal influençant la mesure enregistrée sur la voie 1 a permis d'estimer la résolution latérale du petit quadripôle : de l'ordre de la demi-taille du dispositif (AM/2). Par extension, celles des quadripôles de dimension supérieure peuvent être évaluées de manière approximative (Tableau 4). En outre, les modélisations avec différents échantillonnages de mesures ont montré qu'un espacement inter-profils inférieur à cette demi-taille de dispositif n'améliorait en rien la qualité de la détection tant du point de vue de la retranscription des contours du corps que de l'amplitude de sa réponse. La déviation de résistivité apparente est encore supérieure au seuil fixé de 10% pour des espacements inter-profils de l'ordre de ¾ AM ou de AM, qui correspondent également, dans les modélisations réalisées, à 1,5 et 2 fois la dimension latérale du corps synthétique. L'ensemble de ces observations indique, que, d'une part, en se basant sur le quadripôle intermédiaire de l'ARP® pour lequel AM=1 m, une distance inférieure à 50 cm entre les passages de l'appareil s'avèrerait inutile ; d'autre part, la variabilité spatiale potentiellement métrique dans le Bassin Parisien (Dabas *et al.* 1995)

exigerait un écart entre les profils de l'ordre de 2 m. Ceci conduit à adopter un espacement inter-profils optimal de 1 m afin d'optimiser les conditions expérimentales de mesures et appréhender la variabilité spatiale des sites prospectés.

Voie d'enregistrement	AM (m)	Résolution latérale (m)
1	0,6	0,3
2	1	0,5
3	2	1

Tableau 4. Résolutions envisageables pour chacune des voies d'enregistrement de l'ARP®

Les modélisations faisant varier les propriétés géométriques du corps à détecter donnent lieu aux courbes Figure 28 et Figure 29. Celles-ci sont tracées en reportant les maxima des profils de résistivité obtenus pour chaque profondeur/épaisseur testée afin de constituer ce que nous appellerons des courbes de sensibilité de l'ARP® à un corps dont un paramètre géométrique varie. Les essais avec une dalle fine positionnée à profondeur variable (Figure 28) montrent, dans le cas de contrastes de résistivité élevés comme ceux testés ici, qu'une résolution verticale décimétrique est envisageable dans les cinquante premiers centimètres au-dessous de la surface voire même sur 90 cm de profondeur dans le cas d'un corps plus conducteur que l'encaissant. Néanmoins, la Figure 29 indique que cette résolution devient rapidement de quelques décimètres plus en profondeur, puisqu'à 1 m l'épaisseur d'un corps conducteur doit être supérieure à 20 cm et celle d'un corps résistant d'environ 75 cm pour valider la détection. Ces résultats attestent de l'influence possible sur la mesure électrique d'un horizon de sol, même mince, s'il contraste suffisamment en résistivité avec le milieu encaissant. Toutefois, d'après les critères de détectabilité fixés et malgré l'emploi d'un rapport égal à 20 entre les résistivités du corps et du milieu pour les deux contrastes observés, la détection du corps conducteur s'est bien souvent révélée de meilleure qualité par rapport au corps résistant, avec des amplitudes de réponse supérieures, des courbes de résistivité davantage étroites et pouvant présenter des largeurs à mi-hauteur représentatives des dimensions du corps. Ceci est en général observable pour toutes les profondeurs et épaisseurs testées et quelle que soit la distance inter-profils adoptée.

Les modélisations laissent supposer qu'en conditions expérimentales la mise en évidence de certaines configurations pédologiques sera favorisée par rapport à d'autres : ainsi, un niveau argileux dans une couverture limoneuse devrait se distinguer davantage qu'un lit de cailloux ou la présence d'un horizon sec.

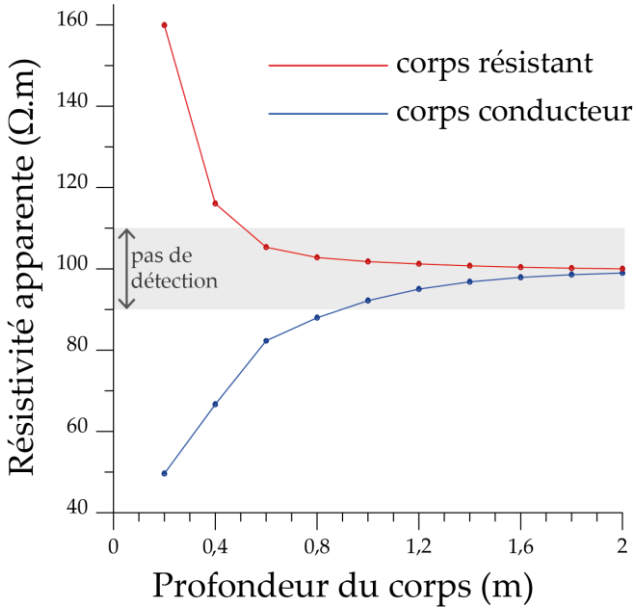


Figure 28. Courbe de sensibilité de l'ARP® à une dalle (1x1x0,1 m) dont la profondeur varie

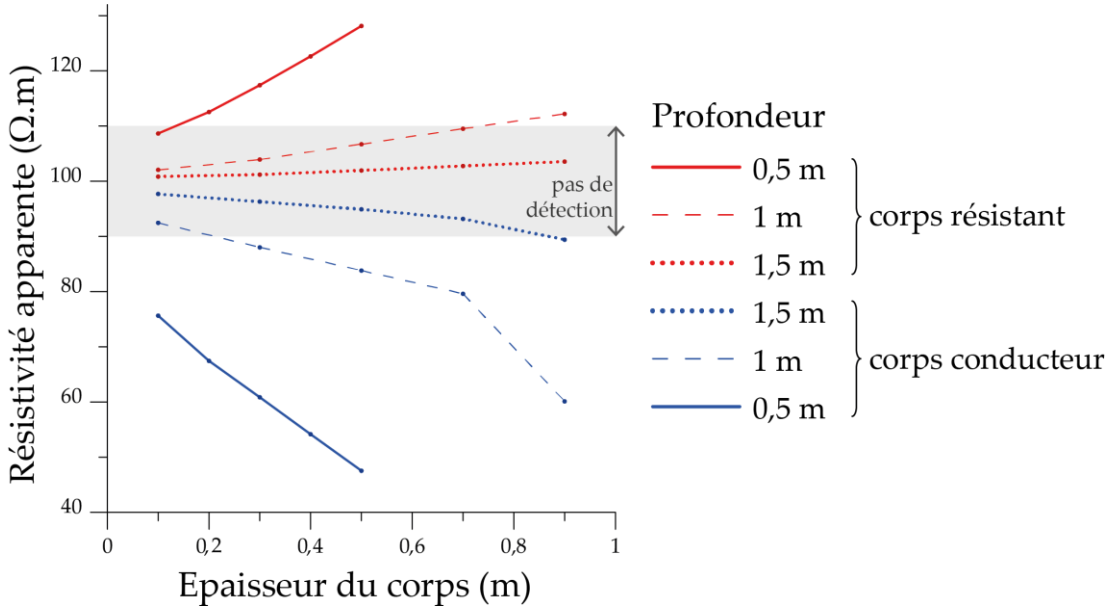


Figure 29. Courbe de sensibilité de l'ARP® à un corps d'épaisseur variable et positionné en z=0,5, z=1 et z=1,5 m

Enfin, la modélisation de mesures au-dessus d'un corps de propriétés électriques variables donne la courbe de sensibilité de l'ARP® à une dalle de résistivité variable (Figure 30), obtenue de la même façon que les précédentes courbes. Cette figure fournit la valeur de la résistivité apparente calculée en fonction de la résistivité "vraie" du corps modélisé. Elle témoigne de la nécessité d'un contraste de résistivité minimum entre le milieu et le corps pour que ce dernier soit détecté. D'après la courbe et selon les critères de détection fixés, la dalle peut être distinguée lorsque sa résistivité est inférieure à 40 Ω.m ou supérieure à

700 Ω.m ; ce qui correspond à un ratio des valeurs logarithmiques de résistivité $\rho_résistant/\rho_conducteur$ de l'ordre de 1,3 pour les deux contrastes observés.
Cette étude montre qu'un horizon d'épaisseur relativement ordinaire (20 cm), situé à une profondeur intermédiaire dans une couverture pédologique tout à fait susceptible d'être rencontré dans le Bassin Parisien a un influence sur la mesure électrique à condition qu'il contraste suffisamment avec l'encaissant.

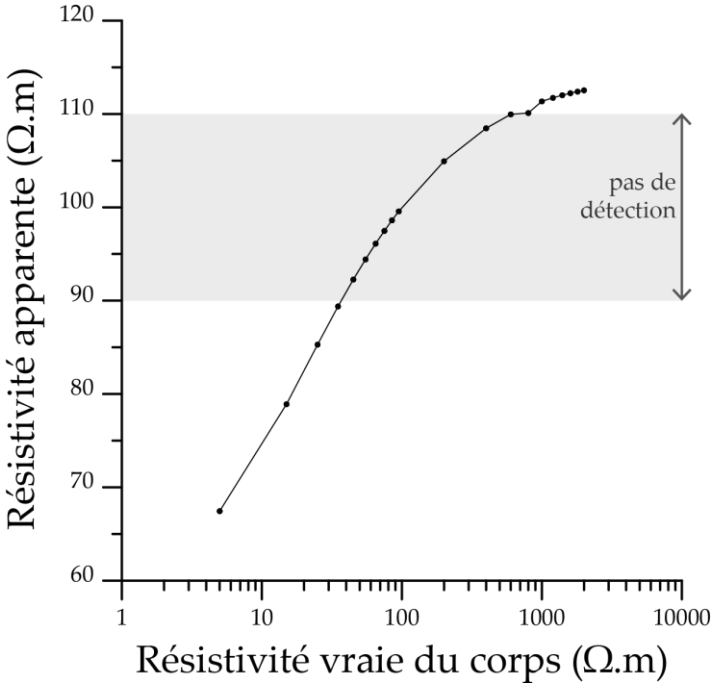


Figure 30. Courbe de sensibilité de l'ARP® à une dalle (1x1x0,2 m) à 50 cm de profondeur et de résistivité variable

CHAPITRE IV

Etude de la différenciation d'horizons pédologiques à partir de mesures de résistivité électrique

Ce chapitre présente l'expérimentation menée sur une tranchée, qui a fait l'objet d'une description pédologique approfondie et sur laquelle des prélèvements de sol ont été réalisés pour en mesurer la teneur en eau et la masse volumique apparente. Deux prospections électriques ont eu lieu : l'une, de surface, a été conduite avant l'ouverture de la tranchée, à l'aplomb de celle-ci, puis une seconde a mis en œuvre des mesures de résistivité sur la paroi de la tranchée. Les données de résistivité sont analysées afin de voir si elles permettent de discriminer les différents horizons de la couverture pédologique et de caractériser leur géométrie. Enfin, une étude statistique tente de montrer les corrélations entre propriétés pédologiques et résistivité électrique.
L'étude a été menée au cours du mois d'août 2011, sur sol déchaumé, après une culture de colza.

1. Matériels et méthode

1.1. Site d'étude

L'objet d'étude est une tranchée (Figure 31) dont la position est choisie à cheval sur deux plages cartographiques de sols (PCS) de la parcelle de Ouarville, afin d'étudier en détail, le passage de l'une à l'autre à l'aide d'une description pédologique et par la méthode électrique. La présence d'un fort contraste de résistivité en profondeur entre les 2 PCS (voir cartes de résistivité enregistrée sur les voies 2 et 3 de l'ARP®, Figure 32) a motivé le choix de l'emplacement de la tranchée. L'ouverture s'étend sur 16 m de long et atteint 1,5 m de profondeur selon la profondeur d'apparition du substratum. La tranchée sera décrite dans la suite au moyen de l'abscisse X, de 0 à 16 m et de la profondeur z en valeur absolue. Le début de la tranchée, coté Est (X=0 m) est situé dans la plage cartographique de sol n°1 correspondant aux néoluvisols profonds sur calcaire cryoturbé, tandis que la fin de la tranchée à l'ouest (X=16 m) est inclue dans la plage cartographique de sol n°2 correspondant aux néoluvisols profonds sur argiles lourdes. Le Tableau 5, qui rend compte de la description de sondages pédologiques réalisés en août 2010 (sondages 1 et 2 cf. Figure 32), précise la constitution des unités cartographiques auxquelles se rapportent les 2 plages.

Figure 31. Tranchée étudiée

Cette tranchée a fait l'objet d'analyses détaillées décrites dans les paragraphes suivants. Des mesures électriques de surface ont été menées à l'aplomb de la tranchée, 4 jours avant qu'elle ne soit creusée. Son ouverture a ensuite permis une description pédologique par un examen visuel approfondi de la paroi. Des mesures de résistivité électrique ont également été réalisées sur cette paroi.

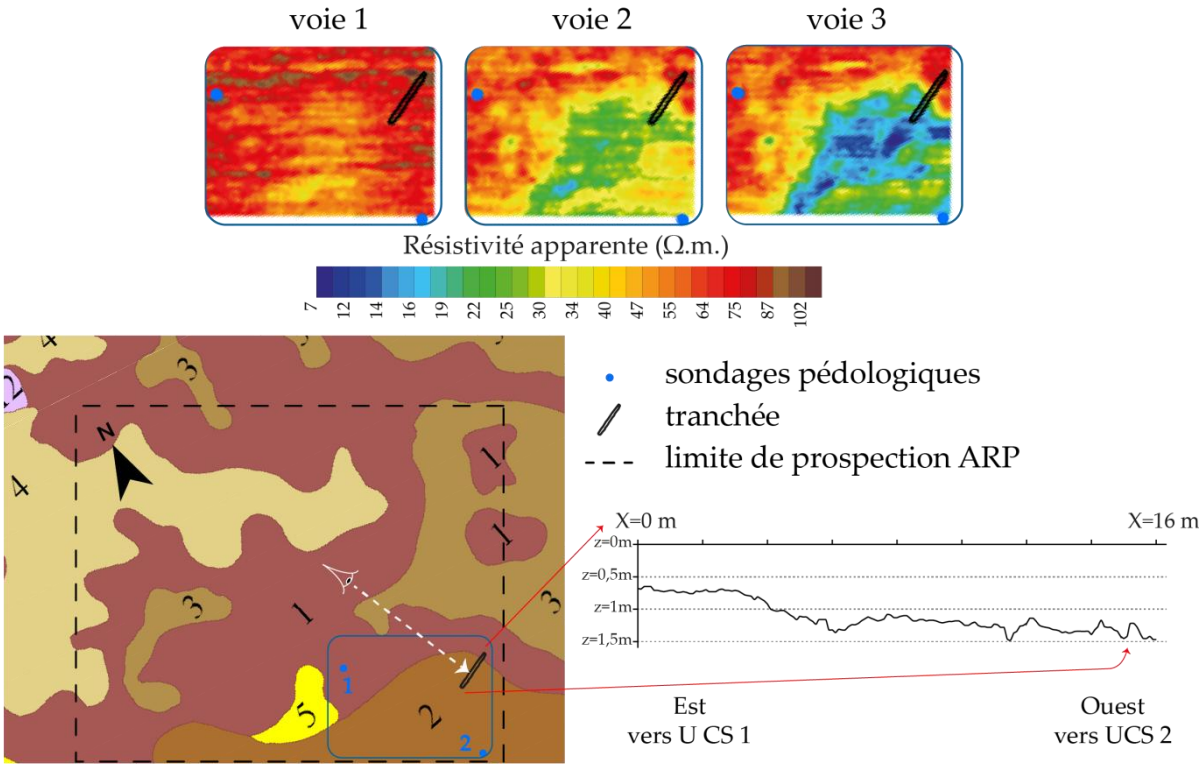


Figure 32. Position de la tranchée sur les cartes des sols et de résistivité électrique apparente issues de la prospection ARP® et éléments de description de la tranchée

UCS 1 Néoluvisols profonds sur calcaire cryoturbé		UCS 2 Néoluvisols profonds sur argiles lourdes	
z (cm)	**description du sondage**	**z (cm)**	**description du sondage**
0 - 30	limon argileux (< 15 % d'argile) très frais	0 - 60	limon argileux < 15 % d'argile
30 - 60	limon argileux plus dur +apparition de graviers de calcaire dans la matrice argileuse	60 - 70	limon argileux 15 à 20 % d'argile
> 60	substrat calcaire	70 - 85	limon argileux 20 à 25 % d'argile
		85 - 100	limon argileux 20 à 25 % d'argile +apparition de graviers de quartz dans la matrice argileuse
		100 - 120	argile à meulière
		> 120	pas de blocage

Tableau 5. Description des sondages réalisés dans les néoluvisols sur calcaire cryoturbé (UCS 1) et sur argiles lourdes (UCS 2)

Malgré l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) pour le géoréférencement des données – cartes pédologiques et de résistivités, position de la tranchée mesurée au GPS différentiel – nous verrons qu'il est difficile d'estimer précisément la position de l'abscisse à laquelle se situe la limite entre les deux PCS, notamment parce que le tracé de cette limite résulte probablement d'un compromis issu de la confrontation de données multiples (Moeys *et al.* 2006).

1.2. Données pédologiques

1.2.1. Identification des horizons et description de la tranchée

La décomposition d'une couverture pédologique en horizons permet de diagnostiquer l'évolution pédogénétique (gradient d'altération, migration de matière, …), et la fertilité du sol, car la structure, la compacité ou la texture jouent un rôle essentiel vis-à-vis du comportement racinaire et du régime hydrique (Baize et Jabiol 1995). L'identification des horizons consiste à mettre en exergue la variation d'un ou plusieurs paramètres pédologiques selon l'axe vertical, ce qui conduit à un découpage de la couverture en différentes couches considérées visuellement comme suffisamment homogènes. Les horizons définis servent ensuite comme unités de description et d'échantillonnage lors des prélèvements.

La tranchée ouverte à Ouarville a fait l'objet d'un tel examen (Figure 33a) et ses horizons constitutifs ont été décrits tous les 50 cm à 1 m latéralement, selon la variabilité observée, en se basant essentiellement sur les paramètres suivants :

- la structure : type, taille et netteté des agrégats
- la couleur : définie à partir de la charte de Munsell (Figure 33b)
- éléments concernant les hétérogénéités internes des horizons : taches, revêtements, charge en éléments grossiers

Figure 33. Identification des horizons de la tranchée (a) et utilisation de la charte de couleur de sol Munsell (b)

La surface du sol est choisie comme niveau de référence, z=0, pour indiquer les profondeurs et épaisseurs des horizons.

1.2.2. Prélèvements d'échantillons de sol

Chaque prélèvement est réalisé après rafraichissement de la zone concernée pour éviter son assèchement suite à l'exposition au soleil. Les échantillons sont prélevés à l'aide d'un cylindre d'acier de volume connu, ouvert aux extrémités et biseauté sur l'une des deux, pour une meilleure pénétration dans le sol. Le cylindre est enfoncé, par percussion, non pas sur la paroi de la tranchée mais verticalement depuis la surface jusqu'aux horizons profonds, à proximité immédiate de la tranchée. Un échantillon par horizon a été prélevé en des profils espacés d'environ 2 m sur la tranchée, ce qui représente au total 60 prélèvements au cylindre. Deux cylindres de dimensions différentes ont été employés :

- un petit cylindre : hauteur de 5 cm, rayon de 4 cm soit un volume de 251 cm^3 (pour les horizons peu épais)
- un grand cylindre : hauteur de 9 cm, rayon de 4,2 cm soit un volume de 499 cm^3.

20 autres échantillons ont été prélevés manuellement, "en vrac".

Le sol ainsi prélevé est placé dans un sachet ou une boîte hermétique, pesé, séché en étuve à 105°C durant 48h minimum afin d'éliminer par vaporisation l'eau contenue, puis pesé à nouveau. Cette dernière pesée fournit la masse de sol sec et la différence des deux pesées, la quantité d'eau présente dans le sol au moment du prélèvement. Le rapport des deux grandeurs donne la **teneur en eau massique $\boldsymbol{W}$** exprimée généralement en $g.g^{-1}$:

$$W = \frac{m_w}{m_{sol\ sec}}$$

Les prélèvements au cylindre permettent de rapporter les teneurs pondérales à une unité de volume ; la teneur en eau du sol peut alors s'exprimer au moyen de la **teneur en eau volumique $\boldsymbol{\theta}$** exprimée en $cm^3.cm^{-3}$:

$$\theta = \frac{V_w}{V_{tot}} = \frac{m_w}{\rho_w \,.\, V_{tot}}$$

où $\rho_w = 1000$ $kg.m^{-3}$ est la masse volumique de l'eau

et V_{tot} est le volume total prélevé, celui du cylindre.

Une autre grandeur intéressante et accessible grâce aux prélèvements au cylindre est la **masse volumique apparente du sol**, $\boldsymbol{Da}$. Avec le gramme comme unité de masse et le cm^3 comme unité de volume (donc $\rho_w = 1$ $g.cm^{-3}$), la masse volumique apparente du sol est égale à sa densité apparente $\boldsymbol{Da}$, et équivaut au rapport des grandeurs définies précédemment (teneurs en eau volumiques θ sur celles massiques W) :

$$Da = \frac{\theta . \rho_w}{W} = \frac{m_{sol\ sec}}{V_{tot}}$$

La masse volumique apparente est particulièrement intéressante pour un diagnostic de compaction, compaction qui tend à compresser la porosité (phase gazeuse) du sol. La masse volumique apparente est donc liée à la notion de porosité, qui permet d'estimer le volume

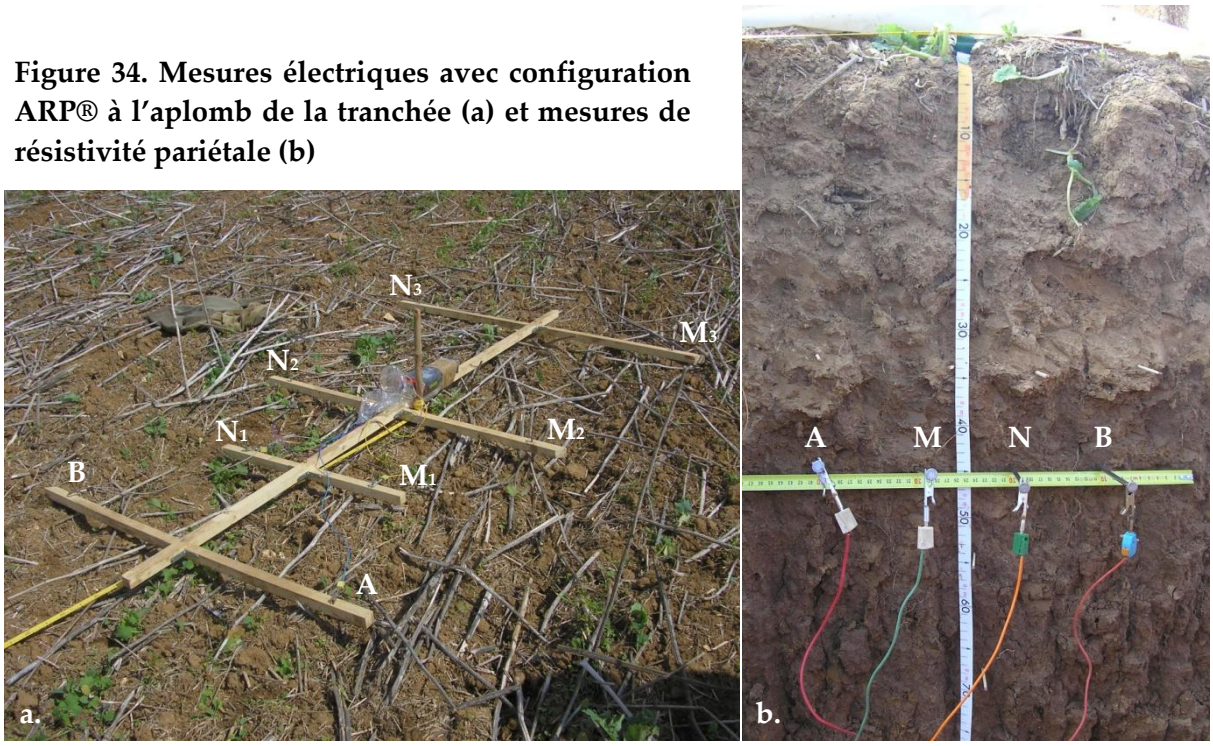
total du sol accessible à l'atmosphère (aération) ou aux transferts et stockage d'eau ; par exemple, selon les textures, une faible porosité, traduite par une masse volumique importante sera un indice de tassement ou révèlera la présence d'un horizon très dense qui constituera un obstacle à la percolation de l'eau dans le sol et pourra constituer un plancher responsable d'un engorgement (Baize 2000). En outre, la masse volumique est l'un des paramètres particulièrement influencé par le travail du sol (Moeys 2007), celui-ci pouvant également être à l'origine d'une compaction importante causée par exemple par le passage de roues d'engins.

1.3. Données géophysiques

1.3.1. Mesure de résistivité électrique apparente à l'aplomb de la tranchée avant son ouverture

A l'endroit même de la tranchée, avant son ouverture, des mesures de résistivité électrique apparente ont été réalisées avec une configuration d'électrodes et un espacement entre celles-ci identiques à ceux de l'ARP® (Figure 34a). Le dispositif est déplacé, le long de la future tranchée, de sorte à acquérir une mesure par chacun des 3 quadripôles, tous les 20 cm soit 81 valeurs de résistivité au total sur les 16 m de tranchée. Le résistivimètre utilisé est un "mesureur de terre et résistivité" MW9400 de Sefram.

Figure 34. Mesures électriques avec configuration ARP® à l'aplomb de la tranchée (a) et mesures de résistivité pariétale (b)



1.3.2. Mesure de la résistivité pariétale par horizon

Une fois la tranchée ouverte, des mesures de résistivité sont réalisées sur la paroi de celle-ci, à l'instar de Robain *et al.* (1996). Le dispositif utilisé est en configuration Wenner alpha (Figure 34b) qui permet d'obtenir un bon rapport signal sur bruit (Ward 1990) et pour lequel

les électrodes A, M, N et B sont équidistantes de a=10 cm. Cet écartement inter-électrodes est choisi de sorte à obtenir la résistivité "vraie" des horizons même fins sans prendre en considération les horizons voisins adjacents ; les électrodes sont pour cette raison insérées au centre de chaque horizon. Au regard de l'étude menée par Michot (2003) sur l'estimation de volume de sol pris en compte par la mesure, la distance a fixée devrait permettre de caractériser des horizons d'épaisseur de 10 à 20 cm. Les mesures brutes fournissent une mesure de résistance $\frac{\Delta V}{I}$ à partir de laquelle la résistivité est calculée : $\rho = k \times \frac{\Delta V}{I}$ où $k = 2\pi a = 0{,}63$ m est le coefficient géométrique de la configuration utilisée. A la différence des mesures réalisées en surface qui fournissent des propriétés apparentes, celles sur la paroi donnent des résistivités considérées "vraies". Elles sont réalisées en parallèle de la description pédologique, sur chaque horizon défini, en des profils espacés latéralement de 50 cm à 1 m. Le résistivimètre utilisé est un RMCA4 (ANVAR-CNRS).

1.3.3. Modélisation de mesures électriques de surface sur une "tranchée synthétique"

Les mesures de résistivité sur la paroi de la tranchée permettent d'en cartographier la section relativement finement. A partir de cette section, il est possible de créer une "tranchée synthétique" qui constitue un modèle électrique de terrain réaliste, sur lequel des mesures de résistivité apparente, depuis la surface, peuvent être modélisées. Cette opération va permettre de confronter les résultats fournis par les mesures géo-électriques obtenues en surface à ceux issus de cette modélisation.

a) Création d'un modèle de tranchée à l'aide des mesures de résistivité pariétale

La tranchée est modélisée à l'aide du logiciel RES2DMOD 3.01.80 (Loke et Barker 1996) qui utilise la méthode des différences finies (Dey et Morrison 1979). Cet outil permet de créer des modèles de terrain complexes en décomposant la subsurface selon un maillage rectangulaire aux nœuds duquel sont calculées les valeurs de potentiel électrique.

Le maillage délimite des blocs de dimension et résistivité fixées par l'utilisateur. L'échantillonnage des mesures (une tous les 20 cm) autorise une largeur de bloc relativement faible, choisie ici de 0,1 m. Pour ce qui est de la dimension verticale des blocs, le logiciel impose, afin d'améliorer la précision du calcul, d'utiliser des épaisseurs croissantes avec la profondeur (Loke 2002) ; ceci est une contrainte importante dans un cas d'étude pédologique où les épaisseurs mises en jeu sont particulièrement faibles et l'existence d'horizons fins en profondeur non exclue. En conséquence, cette exigence complique la démarche guidant le choix de l'épaisseur des blocs qui consiste à faire concorder autant que possible les limites entre deux lignes de blocs avec les délimitations entre horizons définies par l'examen visuel de la tranchée. Au final, 14 lignes de blocs seront utilisées (12 sont nécessaires au minimum) pour modéliser la couverture pédologique ; leurs épaisseurs, basées sur l'identification des horizons de la tranchée, sont précisées dans la partie résultats ci-après.

Les valeurs de résistivité attribuées à chaque bloc (également spécifiées dans la partie résultats) sont déterminées à l'aide du tracé de la section issue des mesures réalisées sur la paroi de la tranchée.

b) Modélisation de mesures de surface de résistivité apparente du sol

RES2DMOD ne permettant pas toutes les configurations d'électrodes, la géométrie ARP® est approximée à l'aide du dispositif dipôle-dipôle équatorial (Edwards 1977) présenté Figure 35. La démarche consiste à adapter les grandeurs a et b de celui-ci afin de retrouver les coefficients géométriques des 3 quadripôles trapézoïdaux de l'ARP®, qui sont rappelés dans le Tableau 6.

A partir de la définition du coefficient géométrique pour un quadripôle de mesure sur un demi-espace :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)$$

celui du dispositif dipôle-dipôle équatorial est :

$$k = \pi \frac{b\,L}{L - b}$$

avec : $L = \sqrt{a^2 + b^2}$

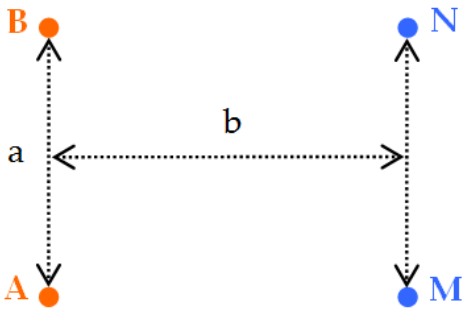


Figure 35. Géométrie du dispositif dipôle-dipôle équatorial

La distance b, séparant les électrodes d'injection de courant des électrodes de mesure de potentiel, est fixée proche ou égale à celles de l'ARP® (0,5, 1 et 2 m), puis, l'espacement a est alors calculé. Les caractéristiques géométriques des 3 dispositifs dipôle-dipôle équatoriaux utilisés pour la modélisation sont résumées Tableau 6.

Les mesures modélisées sont en même nombre que celles réellement réalisées sur le terrain : 81 points de mesure, espacés de 20 cm.

	ARP®	**dispositif dipôle-dipôle équatorial équivalent**		
	k (m)	b (m)	a (m)	L (m)
voie 1	4,63	0,4	0,376	0,549
voie 2	10,73	1	1	1,414
voie 3	51,10	2	1,096	2,280

Tableau 6. Caractéristiques géométriques du dispositif utilisé pour la modélisation

1.4. Etude statistique

Cette étude porte sur les quatre grandeurs définies précédemment : les teneurs en eau massique et volumique, la masse volumique apparente du sol ainsi que les résistivités électriques pariétales ρ. Elle a pour but de savoir si les horizons sont caractérisables par une valeur spécifique de W, θ, Da ou de ρ, et d'observer les contrastes d'un horizon à l'autre pour conclure quant à leur concordance avec l'identification des horizons établie. Les contrastes rencontrés, même s'ils sont souvent tributaires des épisodes météorologiques ou de l'action de la végétation, peuvent parfois conduire à des discordances qui ont une signification pédologique (Baize et Jabiol 1995). Un deuxième objectif de cette étude

statistique est d'étudier le lien entre les propriétés pédologiques mesurées et les valeurs de résistivité électrique.

1.4.1. Etude de la distribution des données de teneur en eau, masse volumique apparente de sol et résistivité électrique pariétale

Les grandeurs mesurées – teneurs en eau massique, volumique et masse volumique apparente de sol – ainsi que les résistivités pariétales sont représentées à l'aide des diagrammes de Tukey (ou "box plots" ou "boîtes à moustaches") par horizon (exemple Figure 36). Ce type de représentation est particulièrement adapté pour des petits jeux de données (jusqu'à 30 voire 50 données) comme dans le cas présent. La position des "moustaches", délimitant les bornes inférieure et supérieure au-delà desquelles les données sont considérées comme atypiques, sont les valeurs définies à partir des quartiles par :

$$Q_1 - 1{,}5 \times (Q_3 - Q_1)$$
$$Q_3 + 1{,}5 \times (Q_3 - Q_1)$$

la valeur 1,5 étant, selon Tukey, une valeur pragmatique qui a une raison probabiliste pour que soient retenues comme atypiques suffisamment d'observations (Le Guen 2002).

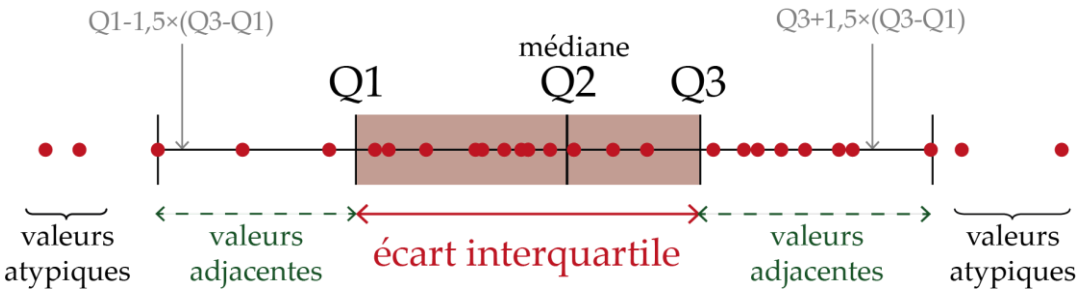


Figure 36. Principe de la représentation par diagramme de Tuckey

Ces diagrammes permettent d'étudier les différences entre horizons et la dispersion des valeurs au sein de chacun.

1.4.2. Mesure de la corrélation entre propriétés pédologiques et résistivité pariétale

L'objectif ici est de voir s'il existe une relation entre propriétés pédologiques (W, θ et Da) et résistivité électrique. En plus du tracé des graphiques représentant les nuages de points pour voir la forme de la relation entre deux variables, deux types de corrélation sont utilisés afin d'indiquer la proximité entre ces deux variables. Le premier coefficient de corrélation calculé est celui couramment employé de Bravais-Pearson, r. Le second, plus adapté aux petits jeux de données (n ≤ 30), est le coefficient de rang de Spearman r_s.

a) Coefficient de corrélation de Bravais-Pearson

Très utilisé, le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson entre deux variables x et y est équivalent à la racine carrée du coefficient de détermination. Il se calcule de la manière suivante :

$$r = \frac{covariance(x,y)}{\sqrt{variance\ (x)\ \times variance\ (y)}} = \frac{\sum_i\ (x_i - \bar{x})\ (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2\ \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

Il indique une relation forte dans le même sens s'il tend vers 1, forte et en sens inverse s'il tend vers -1 et pas de relation s'il tend vers 0.

Cependant le degré de signification du coefficient de corrélation est fonction du nombre de données. Il convient donc de s'assurer ensuite que la liaison entre les deux variables n'est pas due au hasard à l'aide d'un test d'indépendance entre les deux variables. Pour cela, on fera l'hypothèse que les variables comparées suivent loi normale. Le paramètre t de Student associé au coefficient r est calculé selon la formule suivante :

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r}}\sqrt{n-2}$$

où : r est le coefficient de corrélation

et n le nombre de paires de valeurs.

La probabilité p d'avoir un lien par hasard entre les deux variables est fournie ensuite par l'application sur la valeur t de la loi de Student (disponible sur tableur) ou au moyen d'une table de Student. Avec une probabilité bilatérale de 5% – seuil arbitraire mais le plus utilisé, si la valeur de p est inférieure à 0,05, alors la corrélation entre les deux variables étudiées est significative et non due au hasard. La valeur p constitue ainsi un indicateur de la significativité du coefficient de corrélation calculé.

b) Coefficient de corrélation de Spearman

Le calcul du coefficient de corrélation de Spearman est un test qui se base sur le rang des valeurs et non sur les valeurs elles-mêmes. Relativement peu utilisé, il ne fait pas d'hypothèse sur la loi de distribution des variables, ce qui en fait le test le mieux adapté pour quantifier une corrélation entre deux variables lorsque les échantillons comportent peu d'individus et que leur loi distribution en est difficilement identifiable ; ce qui est le cas ici puisque les prélèvements de sols par horizon sont en nombre restreint. La formule du coefficient de Spearman est la suivante :

$$r_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n(n^2-1)} \quad avec \quad d_i = rang(x_i) - rang(y_i)$$

La significativité du coefficient de corrélation de Spearman est donné par une valeur critique $\alpha(2)$ (2 pour une probabilité bilatérale) qui dépend du nombre de paires n et qui est fournie par une table de Spearman (Zar 1972). Si la valeur de r_s est supérieure à cette valeur critique, alors la corrélation est considérée significative avec un risque de 5% de se tromper.

2. Résultats

2.1. Prospection pédologique

2.1.1. Caractéristiques générales de la tranchée

La Figure 39a illustre le **résultat de l'identification des horizons** de la tranchée. Son examen visuel a fait apparaître **8 horizons** et, en profondeur au contact du substrat, 2 poches de matériaux dont la faible extension latérale exclue cette qualification. Les **transitions** d'un horizon à l'autre sont de manière générale **nettes** voire très nettes, elles s'étendent sur 2 à 5 cm ; les changements du ou des caractères qui différencient deux horizons sont rapides.

La **partie supérieure de la tranchée** – de 0 à 50 cm – présente très **peu de variabilité latérale**. Elle est constituée des 4 premiers horizons de géométrie très régulière avec des épaisseurs et profondeurs quasiment invariantes tout au long de la tranchée. Ils sont séparés les uns des autres par des **limites subhorizontales**. Les **délimitations entre horizons plus profonds** sont légèrement **plus ondulées** et montrent, pour les horizons nommés H5.2 et H7 notamment, une variation de la profondeur de ces horizons dans la couverture pédologique.

L'**état hydrique** de la tranchée est évidemment très conditionné par la période de prospection. L'été implique un sol **globalement sec**, rarement frais. D'une manière générale, les entités décrites présentent des **structures pédiques** (à agrégats) ; les couleurs rencontrées varient assez peu autour du brun sombre (brun, brun rouge, brun jaune) ; la **charge en éléments grossiers** (cailloux ou graviers exclusivement) **est légère ou absente** (inférieure à 5%) ; enfin, aucune effervescence n'est détectée.

Dans la description plus détaillée de chaque horizon qui suit, les notions de début et de fin de tranchée font référence respectivement aux petites et grandes abscisses X.

2.1.2. Propriétés pédologiques de chaque horizon

- Horizon H1 : déchaumage

La surface du sol, déchaumée, a paru d'une épaisseur suffisante pour définir le déchaumage comme un horizon indépendant. Les caractéristiques de ce premier horizon varient très peu suivant la longueur de la tranchée. Son **épaisseur moyenne est de 9 cm**. Le travail du sol a créé une structure grumeleuse en surface avec des agrégats de taille allant jusqu'à 5 mm, et, dans sa partie inférieure, l'horizon présente une structure plus nette avec des polyèdres sub-anguleux (de forme mal définie ou aux arêtes émoussées) de dimensions variant de 0,5 à 2 cm. Sa couleur est brun sombre (code Munsell : 10YR4/4).

- Horizon H2 : labour

Le deuxième horizon défini demeure également quasiment inchangé tout au long de la tranchée. Il est délimité par une semelle de labour située à une profondeur moyenne de 24 cm. L'horizon labouré est donc d'une **épaisseur moyenne de 15 cm** sous le déchaumage.

D'une structure peu nette, il est constitué de polyèdres sub-anguleux de dimensions 0,5 à 2 cm. Sa couleur est la même que H1, brun sombre (10YR4/4).

- Horizon H3 : ancien labour

Le troisième horizon est lui aussi délimité par une semelle de labour, plus ancienne, située à une profondeur moyenne de 35 cm. Son **épaisseur est de 11 cm en moyenne**. D'une structure peu nette proche de celle de H2, il est constitué d'agrégats polyédriques sub-anguleux légèrement plus gros, de 1 à 2 cm. A partir de l'abscisse X=12 m de la tranchée, l'horizon apparaît beaucoup plus tassé, jusqu'à devenir en X=15 m une structure hyper compacte lamellaire, voire quasi continue, sans agrégat. Sa couleur est celle des horizons qui le surmontent : brun sombre (10YR4/4).

- Horizon H4 : "horizon polyédrique"

L'horizon H4 d'une **épaisseur moyenne de 18 cm** possède une structure variable, causée par une compacité croissante de l'horizon le long de la tranchée. Jusqu'à l'abscisse X=6 m, la structure est nette avec des polyèdres allant de 0,5 à 1 ou 2 cm. A partir de X=6 m, la netteté des agrégats se réduit pour laisser place entre X=9 et 9,5 m à un horizon de structure double : des polyèdres tassés de 2-3 cm, et une structure lamellaire dans la partie supérieure de l'horizon, sur 5 cm d'épaisseur. Cette double structure se retrouve de X=11 m jusqu'au bout de la tranchée où l'horizon présente dans sa moitié supérieure (environ 10 cm) une structure lamellaire surplombant des polyèdres très nets et très anguleux de 0,5 à 2 cm.

Il est à noter la présence de multiples traces de dents sur la paroi de la tranchée entre les abscisses X=10 et X=15 m (exemple ci-contre Figure 37). Elles sont le témoin d'un travail de sol probablement à l'origine de la compacité singulière en cet endroit et qui explique l'évolution structurale de l'horizon

Figure 37. Exemple de traces de dents

La couleur de H4, brun rougeâtre (code Munsell : 7,5YR4/4), diffère de celle des horizons superficiels de labour.

- Horizon H5.1 : horizon majoritairement prismatique

L'horizon H5.1 n'est pas présent tout au long de la tranchée. Il occupe la première moitié de celle-ci et se termine en biseau entre X=8 et X=8,5 m. Son épaisseur moyenne est de 21 cm et sa structure prismatique nette contraste avec celles des horizons supérieurs. Les agrégats prismatiques qui le constituent mesurent 6-7 cm de hauteur sur 3-4 cm de largeur. A partir de X=4,5 m la taille des prismes augmente pour atteindre 10 cm de haut et 5-6 cm de large en X=5 m. L'abscisse X=5,5 m marque le passage de l'horizon à une structure polyédrique dont

les agrégats sont nets et mesurent 0,5 à 2 cm. L'horizon H5.1 se distingue également de H4 par sa charge en éléments grossiers, car il comporte quelques cailloux de meulière. Cette charge diminue à partir de X=5 m. Enfin, sa couleur est brun rougeâtre (7,5YR4/4).

- Horizon H5.2 : horizon prismatique

L'horizon H5.2 n'apparait qu'à l'abscisse X=4,4 m sous l'horizon H5.1, dont il se distingue par la taille des prismes, plus petits, de 6-7 cm de haut, ainsi que par une charge inférieure en éléments grossiers de type meulière et quartz. Tandis que H5.1 devient polyédrique, H5.2 voit ses prismes s'agrandir et sa pierrosité augmenter en X=6 cm. A partir de X=7,2 m, l'horizon s'affine et les prismes regagnent leur dimensions originales – 5 à 7 cm de haut sur 2 à 4 cm de large – qu'ils conserveront jusqu'au bout de la tranchée. Lorsque l'horizon H5.1 s'efface, H5.2 prend le relais sous le quatrième horizon et la quantité de quartz et de meulière qu'il contient s'amoindrit (à partir de X=9 m). Par ailleurs, il développe de X=9 à X=13 m une sous-structure polyédrique (polyèdre de 2-3 cm). H5.2 est donc un horizon comparable à H5 .1, de même couleur brun rougeâtre, et d'épaisseur moyenne comparable : 22 cm.
Son évolution dans la couverture pédologique n'est en revanche plus aussi subhorizontale que les horizons qui le surmontent, sa profondeur moyenne passant de 80 cm en début de tranchée à 65-70 cm autour de X=8 m.

- Horizon H6 : horizon à gros prismes rouges

L'horizon H6 est issu de la subdivision de l'horizon H7 à l'abscisse X=7,7 m. Il est le plus imposant de la couverture pédologique avec une épaisseur moyenne de 26 cm. Sa profondeur est quasi constante et sa forme à peine ondulée. Il est constitué de gros prismes rouges – de même couleur que H5.1 et H5.2 (7,5 YR 4/4) – hauts de 8 à 10 cm et larges de 5-6 cm. L'horizon est également marqué par la présence de graviers de meulière auxquels s'ajoute du quartz entre X=9,5 et X=12 m. A partir de X=13 m, des traces de manganèse sont observables et certains prismes atteignent jusqu'à 15 cm de hauteur.

- Horizon H7 : horizon à prismes jaunes à revêtements rouges

Le septième horizon apparait en X=3,2 m, abscisse à laquelle la profondeur du substrat calcaire augmente rapidement. Mis à part quelques endroits évoqués dans le paragraphe suivant, H7 est en contact direct avec le substrat calcaire, ce qui lui confère un mur de forme particulièrement chahutée. A son commencement, il se différencie de l'horizon H5.1 par une structure prismatique moins nette et une couleur plus jaune en mélange et de l'horizon H5.2 par sa charge en meulière un peu plus importante. L'horizon H7 s'affirme en X=4,5 m, développant de grands prismes de 9-10 cm de haut et 3-4 cm en largeur, plus nets, jaunes (code Munsell : 7,5 YR 4/6 ou 7,5 YR 5/6) dont la surface est revêtue d'une couleur rougeâtre semblable à celle des cinquième et sixième horizons (7,5 YR 4/4). Quelques cailloux de meulière de 2 à 5 cm parsèment l'horizon. En X=7 m, quelques graviers de quartz apparaissent et peu avant X=8 m, l'horizon se subdivise pour sa partie supérieure en l'horizon H6 prismatique rouge, tandis que la partie inférieure conserve les prismes

"bicolores". L'abscisse X=12 m marque l'irruption de traces de manganèse, dont l'abondance croît à X=13 m. La taille des prismes est réduite (6x3-4 cm) sur les trois derniers mètres de la tranchée. Malgré la forme irrégulière de ce dernier horizon, son épaisseur est estimée à 16 cm avant et 24 cm après sa subdivision.

- Poches de matériaux localisées P1 et P2

Des apparitions ponctuelles d'autres matériaux sont observables au fond de la tranchée lorsque le substrat calcaire s'approfondit brutalement.

La première poche apparait en X=5 m et se termine en biseau en X=7 m. Elle est constituée d'un matériau argileux jaune (code Munsell : 7,5 YR 4/6) de structure polyédrique, et est parsemée de cailloux et graviers de meulière et de quartz.

Le second matériau est aperçu en deux endroits dans la tranchée : très ponctuellement entre 11,3 et 11,8 m, ainsi qu'en fin de tranchée sur le dernier mètre. Il s'agit d'un matériau jaune limoneux (code Munsell : 7,5 YR 5/6), sans structure particulière, non effervescent et présentant quelques tâches de manganèse.

A la vue de l'identification des horizons, le positionnement de la limite entre les 2 PCS se situerait dans la "zone instable" où H5.1 disparaît et où H5.2 et H7 apparaissent, entre X=5 m et X=8 m.
En zoomant sur les cartes de résistivité apparente issues des voies d'enregistrement 2 et 3 (Figure 38), ces abscisses correspondent à une zone de transition séparant les hautes résistivités – supérieure à 50 Ω.m – à l'est vers la PCS 1, des faibles valeurs de résistivité – inférieures à 40 Ω.m – à l'ouest vers la PCS 2.

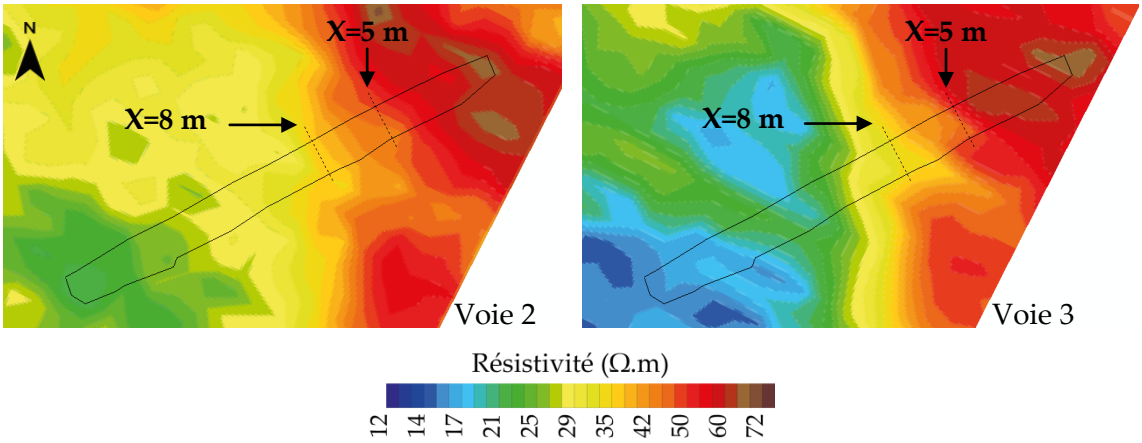


Figure 38. Localisation sur les cartes de résistivité apparente de la limite entre les 2 plages cartographiques de sol suggérée par l'examen visuel de la paroi de la tranchée

2.1.3. Mesures de la teneur en eau et de la masse volumique apparente de sol

Les prélèvements et pesées d'échantillons de sol ont permis de calculer les teneurs en eau massiques, volumiques ainsi que les masses volumiques apparentes du sol. Les calculs, pour

chaque prélèvement, sont présentés en annexe 1. Le Tableau 7 résume les résultats obtenus : la moyenne des teneurs en eau massiques calculée à partir des 80 échantillons est de 0,18 ± 0,03 $g.g^{-1}$; à partir des 60 prélèvements au cylindre la teneur en eau volumique moyenne obtenue est de 25 ± 0,06 $cm^3.cm^{-3}$ et la masse volumique apparente moyenne de 1,40 ± 0,20 $g.cm^{-3}$.

Ces résultats font l'objet d'une étude plus approfondie dans la partie 2.3, avec notamment la distinction par horizon de chacune de ces trois grandeurs.

	n	min	max	moyenne	écart-type
W ($g.g^{-1}$)	80	0,0955	0,2393	0,1781	0,0283
θ ($cm^3.cm^{-3}$)	60	0,0916	0,3642	0,2478	0,0633
Da ($g.cm^{-3}$)	60	0,7293	1,6509	1,3972	0,2028

Tableau 7. Synthèse des mesures de teneur en eau et masse volumique apparente réalisées sur les prélèvements de sols

2.2. Données géophysiques

2.2.1. Mesures de résistivité électrique de surface et sur la paroi de la tranchée

a) Résistivités apparentes

Les valeurs de résistivité mesurées en surface sont relativement bruitées. Celles-ci sont lissées par la méthode de la moyenne mobile (présentées brièvement en annexe 2 avec les données brutes). Ce traitement, en plus d'améliorer le rendu de la tendance des résistivités mesurées tout au long de la tranchée (Figure 40a), facilite la comparaison entre données mesurées et données modélisées (paragraphe 2.2.2).

La Figure 40a montre que la gamme de résistivité, toutes voies confondues, est assez peu étendue, ce qui se traduit par 3 profils relativement groupés. D'autre part, les résistivités mesurées ont une propension à décroître d'Est (X=0 m) en Ouest (X=16 m). Il ressort également des observations plus localisées :

- entre X=0 et X=6 m

Il s'agit de la zone où les 3 profils sont les plus différenciés avec $\rho_a3 > \rho_a1 > \rho_a2$. Cette évolution verticale de valeurs de résistivité concorde bien avec ce que peut produire un néoluvisol sur calcaire (UCS 1) qui présente un horizon de surface labouré sur un horizon intermédiaire enrichi en argile présentant une faible résistivité, le tout sur un substrat calcaire à l'origine de valeurs élevées de résistivité. La décroissance générale des résistivités mesurées est probablement due à la profondeur du substrat qui augmente.

- entre X=6 et X=11 m

Les 3 profils sont assez peu différenciables, mis à part celui enregistré sur la voie 2 qui ressort légèrement. Ce dernier, caractérisé par de faibles valeurs de résistivité, semble

indiquer qu'il y a conservation de la configuration observée en début de tranchée : un niveau conducteur intercalé entre deux autres plus résistants, avec cette fois un contraste moindre.

- entre X=11 et X=16 m

La fin de tranchée est marquée par une interruption de la décroissance des résistivités et surtout la présence d'un pic résistif enregistré sur la voie 3 entre 13 et 14 m dont l'origine pourrait s'expliquer par la présence d'une zone singulièrement sèche et extrêmement compacte à l'abscisse X=13 m observée lors de la prospection sur le terrain ; zone d'autant plus remarquable que de part et d'autre, les profils paraissaient particulièrement humides. Cette singularité résistante est en revanche un obstacle pour apprécier la succession de résistivité rencontrée, qui, pour un néoluvisol sur argile (UCS 2), devrait présenter des résistivités décroissantes avec la profondeur. Cette tendance attendue est observable entre 11 et 12,5 m où le profil de la voie 3 atteint ses minima de résistivité.

b) Résistivités "vraies"

Les valeurs de résistivité pariétale (dont les positions de mesures sont marquées d'une croix sur les figures représentant la tranchée) sont rassemblées en annexe 1. Elles permettent de tracer la section (Figure 39b), issue d'une interpolation par le plus proche voisin[3] aux nœuds d'une maille de 10 cm verticalement et de 50 cm horizontalement ; dimensions reflétant la densité de mesures.

Les mesures, locales et réalisées sur des volumes de sols a priori homogènes, peuvent être considérées comme étant les résistivités vraies de chacun des matériaux et devraient couvrir une plus grande gamme de valeurs, en comparaison avec les mesures de surface, par nature plus intégrantes. Les valeurs de résistivité s'étalent en effet de 12 à 76 Ω.m.

Ces mesures de résistivités pariétales amènent à un découpage sommaire de la couverture pédologique :

- Surface résistante : 50-70 Ω.m

Les 24 cm directement sous la surface du sol, comprenant les horizons de déchaumage et labouré (H1 et H2), présentent des hautes valeurs de résistivité qui s'expliquent par les effets :

- du travail du sol qui tend à ameublir celui-ci, le décompactant, contribuant ainsi à l'augmentation de sa résistivité

- du dessèchement du sol qui, favorisé par la période estivale, réduit la teneur en eau du sol et diminue sa conductivité électrique

[3] Chaque nœud du maillage se voit attribuer la valeur de résistivité du point observé le plus proche. Ce choix se justifie car les données sont suffisamment denses et de bonne qualité pour opter pour un interpolateur local, exact et peu lissant donc plus proche de la réalité. D'autres interpolateurs testés ont conduit à des rendus similaires mais souvent plus lissés.

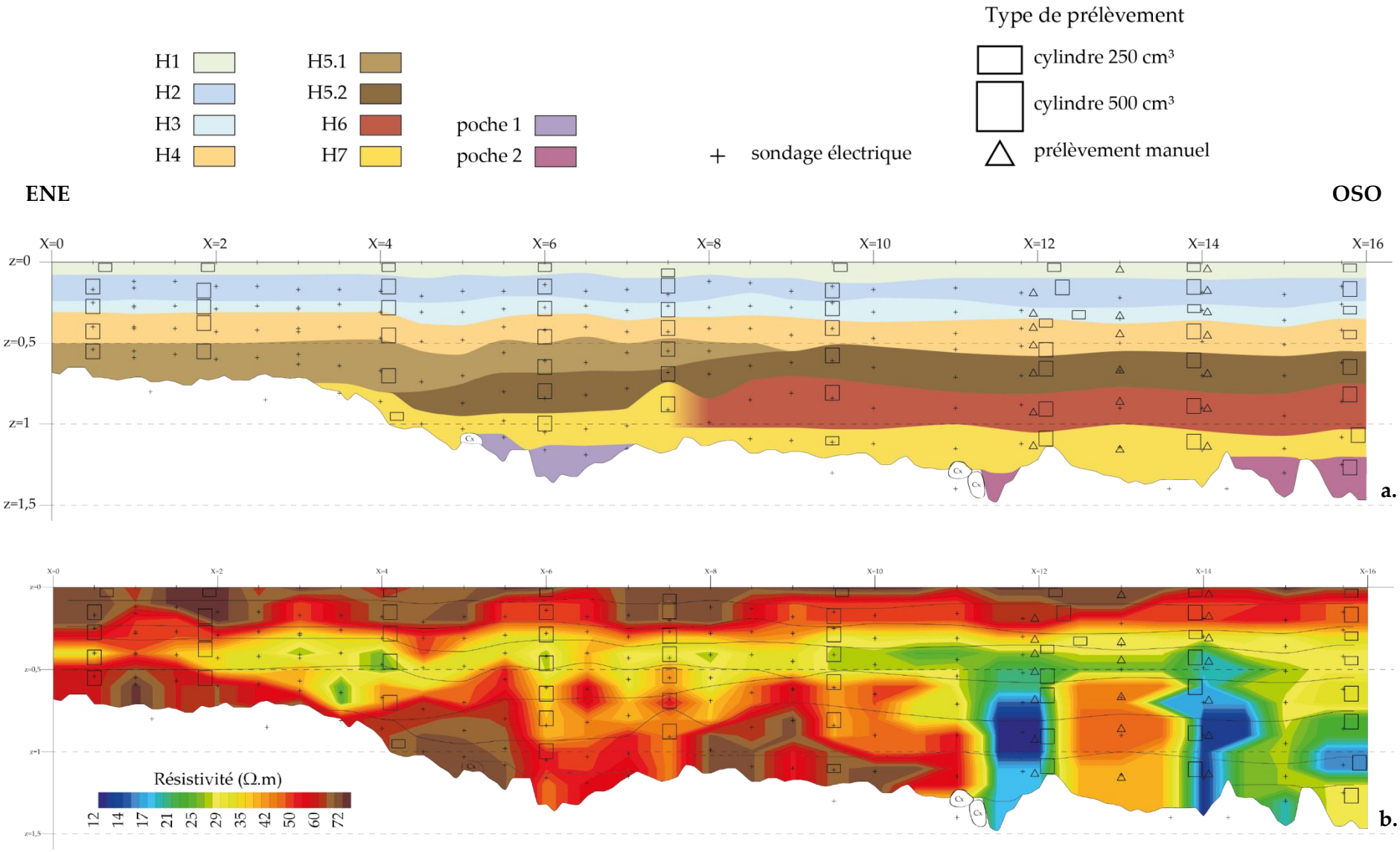


Figure 39. Résultat de l'identification des horizons de la couverture pédologique (a) et section issue de la mesure des résistivités pariétales (b)

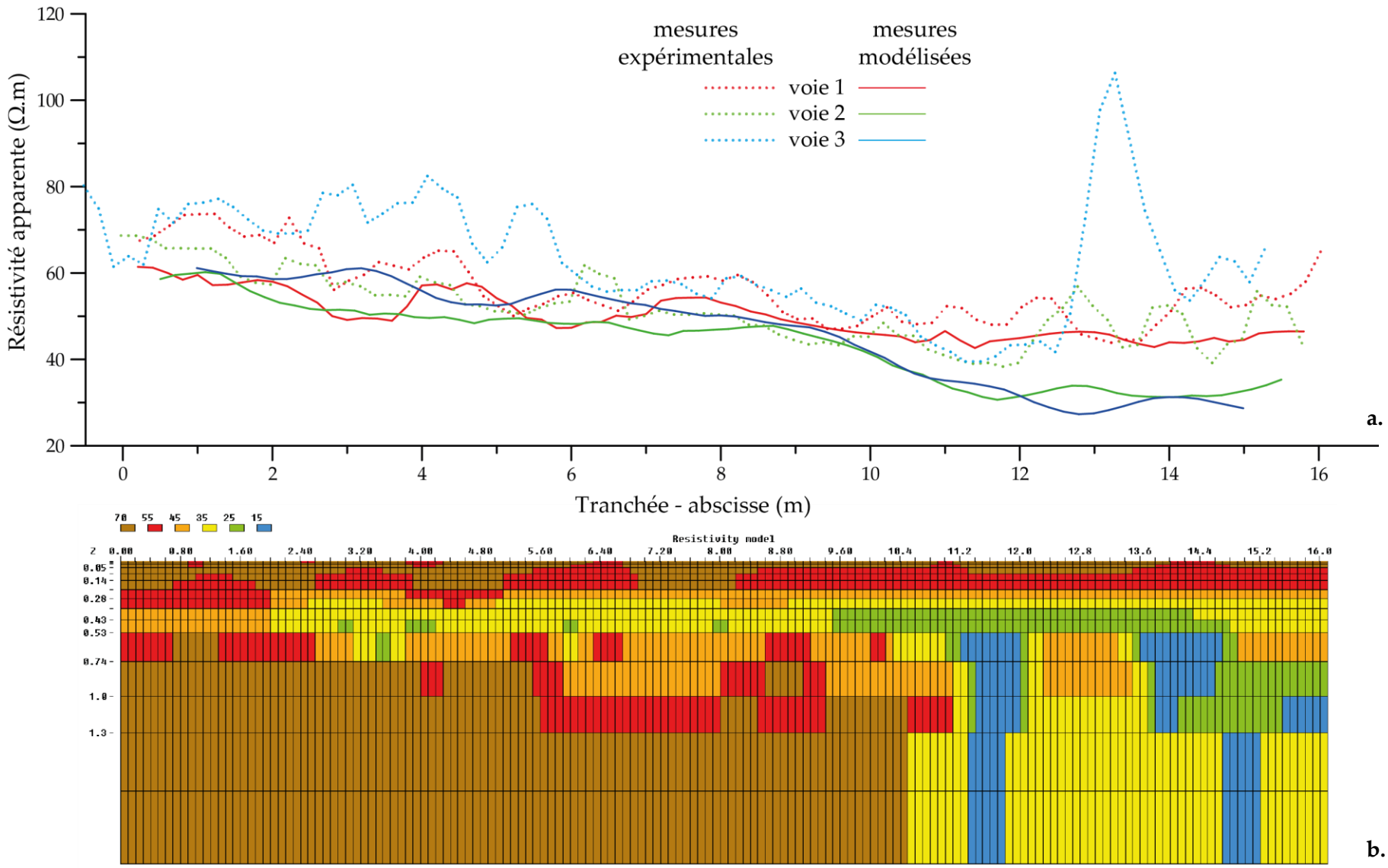


Figure 40. a : Profils de résistivité apparente mesurée à l'aplomb de la tranchée avant son ouverture avec une configuration d'électrode de type ARP® (en pointillés) et profils résultant de la modélisation (en traits pleins) ; b : Modèle utilisé pour simuler une prospection ARP® à l'aplomb de la tranchée

- Niveau intermédiaire : 30-40 Ω.m

Ce niveau, d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur, s'étale sur les horizons H3, H4, H5.1 et H5.2. Les faibles valeurs de résistivité mesurées sont attribuables à une teneur en argile supérieure à celle des horizons de surface. Les sondages à la tarière (Tableau 5) confirment ce fait : ils montrent une quantité d'argile inférieure à 15% jusqu'à 30 cm de profondeur, et entre 15 et 25% pour les horizons sous-jacents situés entre 30 et 60-70 cm de profondeur. Ces horizons sont également moins affectés par le phénomène d'évaporation.

- Niveau profond

Correspondant aux horizons à gros prismes H6 et H7, le niveau peut être divisé latéralement en deux parties :

- de X=4 à X=11 m où les résistivités varient de 50 à 70 Ω.m
- de X=11 à X=16 m où les valeurs de résistivité sont semblables à celles du niveau intermédiaire, de 25 à 40 Ω.m (anomalies conductrices mises à part).

Cette différence latérale de résistivité en profondeur est peut-être liée à la charge en élément grossier qui varie d'un bout à l'autre de la tranchée : la pierrosité est faible (jusqu'à 2% de graviers principalement) de X=4 à X=10 m puis quasi inexistante au-delà de X=10 m.

- Anomalies localisées :

Les deux anomalies les plus importantes sont situées aux abscisses X=11,6 m et X=14,2 m. Elles s'étalent verticalement de l'horizon H4 jusqu'au fond de la tranchée et leur position concorde avec les profils qualifiés d'humides lors de la prospection. Ces singularités présentent des résistivités très faibles de l'ordre de 15-25 Ω.m, qui s'expliquent probablement par une teneur en eau élevée.

c) Synthèse sur la prospection électrique

Que les mesures soient faites en surface ou bien sur la paroi de la tranchée, l'évolution de la résistivité de la couverture pédologique permet d'affirmer que l'Est de la tranchée semble bien correspondre à un néoluvisol sur calcaire avec une couche conductrice intercalée entre deux résistantes. La présence d'une alternance remarquable de teneur en eau entre 12 et 14 m observée lors de la prospection, avec notamment un profil qualifié de sec en X=13 m et, de part et d'autre (X=12 et 14 m) des profils singulièrement humides, explique probablement les discontinuités brutales révélées par les profils de résistivité mesurés en surface et la cartographie de résistivité pariétale. Ces irrégularités rendent difficile une conclusion quant à la concordance entre type de sol et succession verticale de résistivité, même si la tendance attendue pour un néoluvisol sur argile – terrain de plus en plus conducteur avec la profondeur – se discerne de manière discontinue entre X=11 et 16 m.

Les profils résultants de la prospection de surface permettent d'émettre une hypothèse quant à la position de la limite entre les PCS 1 et 2 : celle-ci se trouverait à l'abscisse X=6 ou X=11 m, où le profil enregistré sur la 3ème voie témoigne d'une nette diminution de la résistivité mesurée.

2.2.2. Confrontation des résistivités apparentes mesurées et des résistivités apparentes modélisées

a) Constitution du modèle de tranchée

Comme énoncé dans la partie 1.3.3, le modèle est constitué de 14 lignes de blocs aux coins desquels est calculé le potentiel électrique. Les épaisseurs des blocs, définies dans le Tableau 8, sont fixées de sorte à faire coïncider la limite entre 2 lignes de bloc avec des profondeurs seuils (en rouge dans le tableau) qui correspondent souvent aux limites inter-horizons. La contrainte imposée par l'outil de calcul (12 lignes minimum et épaisseurs de celles-ci, δz, croissantes avec la profondeur) a conduit cependant au rassemblement des horizons H2 et H3 ; c'est-à-dire que le mur de l'horizon H2 n'est pas matérialisé par une limite de bloc.

A la vue de la section de résistivité pariétale, 6 valeurs de résistivité sont choisies pour établir le modèle : 70, 55, 45, 35, 25 et 15 Ω.m. A chaque bloc est attribuée l'une de ces valeurs selon sa position dans le modèle, en vue de reproduire le mieux possible la section de résistivité. La résistivité du subtratum est fixée à 70 Ω.m à l'Est et à 35 Ω.m à l'Ouest, valeurs qui correspondent aux résistivités mesurées dans le calcaire lorsqu'il était possible d'y insérer les électrodes (mesures positionnées au niveau des croix en dehors de la zone cartographiée sur la section, Figure 39). Le modèle équivalent à la tranchée étudiée est représenté Figure 40b.

Horizons concernés	Epaisseurs Cumulées (m)	ligne	épaisseur des blocs δz (m)	motif justifiant le choix des "profondeurs seuils" (en rouge) (épaisseur moyenne des horizons $\bar{e}$ ou autre)
H1	0,005 0,015 0,045 0,09	1 2 3 4	0,005 0,01 0,03 0,045	$\bar{e_1} = 9$ cm
H2 + H3	0,14 0,205 0,275 0,35	5 6 7 8	0,05 0,065 0,07 0,075	$\bar{e_2} = 15$ cm, $\bar{e_3} = 11$ cm $\overline{e_{2+3}} = 24$ cm
H4	0,43 0,53	9 10	0,08 0,1	$\bar{e_4} = 18$ cm
H5.1 - H5.2	0,74	11	0,21	$\bar{e_5} = 21$-22 cm
H6	1	12	0,26	$\bar{e_6} = 26$ cm
H7	1,27	13	0,27	$\bar{z} = 127$ cm : profondeur moyenne de la tranchée entre X=5 et 16 m
substrat	1,7	14	0,43	limite théorique de profondeur d'investigation du dispositif de mesure

Tableau 8. Paramètres géométriques du modèle - justification de leur sélection

b) Profils de résistivité résultants de la modélisation

Les profils modélisés (Figure 40a) sont évidemment plus lisses que les expérimentaux car aucun bruit n'a été ajouté lors de la modélisation. Leurs allures générales sont proches de celles des profils expérimentaux, mais avec un décalage vers les faibles valeurs de résistivité. Comme les données expérimentales, ils sont relativement groupés, signe d'une extension limitée de la gamme de résistivité observée (24-60 Ω.m), et ont une tendance à décroitre de X=0 à X=11 m pour se stabiliser au-delà. L'abscisse X=11 m marque la distinction de 2 zones, qui pourrait être liée au changement de substrat modélisé ou à la limite entre les deux unités de sols dans lesquelles la tranchée a été creusée. La stabilisation des valeurs de résistivité entre X=11 et X=16 m s'accompagne d'une différenciation des profils, qui commence en X=9 m, et qui pourrait traduire la présence d'un néoluvisol sur argile lourde, avec une couche résistante en surface – grandes valeurs de résistivité enregistrées sur la voie 1 – surmontant une couche conductrice due au niveau argileux en profondeur (résistivités enregistrées sur les voies 2 et 3). En revanche, les données modélisées ne semblent pas ou très peu affectées par les anomalies mises en évidence lors de la prospection, entre 12 et 14 m : l'enregistrement voie 2 fait apparaître deux très légères incurvations dans le profil à l'aplomb des singularités conductrices en X=11,6 m et X=14,2 m.

2.3. Etude statistique

2.3.1. Distribution des teneurs en eau massiques par horizon

Les box plots de la teneur en eau massique par horizon (Figure 41a) présentent un étalement qui, dans les valeurs élevées, a pour origine les échantillons prélevés aux abscisses X=12 et 14 m de la tranchée (croix vertes et violettes sur la figure). Deux hypothèses explicatives peuvent être avancées : les profils en X=12 et X=14 m sont particulièrement humides, ce qui serait cohérent avec les observations qualitatives sur le terrain lors de la prospection, car la tranchée révélait une alternance remarquable de teneur en eau entre 12 et 14 m avec notamment un profil qualifié de sec en X=13 m – dans lequel les prélèvements se sont avérés mécaniquement difficiles –, entouré de deux profils (X=12 et 14 m) singulièrement humides.
La deuxième hypothèse est que la teneur en eau est fortement influencée par le type de prélèvement car si la plupart d'entre eux ont été réalisés à l'aide d'un cylindre avant d'être mis dans un sac sans secousse particulière, une partie des échantillons, aux abscisses X=12, 13 et 14 m, ont été prélevés à la main (localisés par des triangles sur la Figure 39), en "vrac", et sont donc davantage remaniés que les prélèvements à l'aide de cylindres.

✓ Remarque :

La légende, ci-contre, adoptée pour les figures 41, 43, 44 et 45 a pour seul but de mettre en évidence l'origine des valeurs extrêmes, notamment celles issues des profils situés aux abscisses X=12, 13 et 14 m.

Position du prélèvement sur la tranchée

X=0,5 m	X=9,5 m
X=1,8 m	X=~12 m
X=4 m	X=13 m
X=6 m	X=~14 m
X=7,5 m	X=~15,8 m

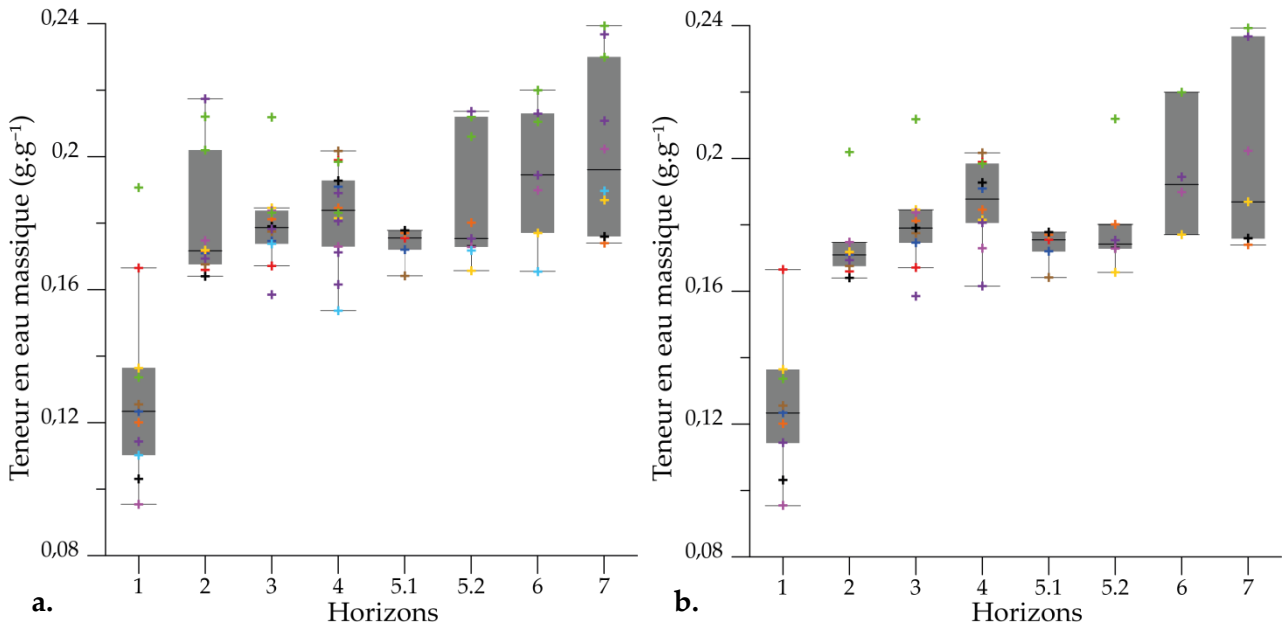


Figure 41. Box plots des teneurs en eau massiques par horizon de tous les échantillons (a) et des échantillons prélevés au cylindre métallique seulement (b)

Cette dernière hypothèse ne peut être confirmée : la Figure 42 indique, pour les prélèvements au profil X=14 m, des teneurs en eau généralement plus importantes dans le cas de prélèvements au cylindre, que dans le cas de prélèvements manuels, alors que la tendance est inverse au niveau de l'abscisse X=12 m.

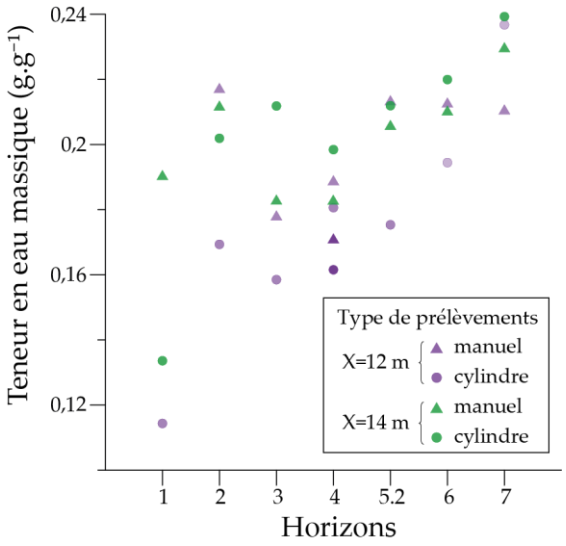


Figure 42. Impact du type de prélèvement (manuel ou à l'aide d'un cylindre) sur la mesure de teneur en eau

Les box plots sont retracés (Figure 41b) en retirant les échantillons prélevés à la main. Cette opération réduit notablement les écarts interquartiles, en particulier pour les horizons H2 et H5.2. Les teneurs en eau à l'abscisse X=14 m demeurent néanmoins des plus élevées confirmant l'humidité spécifique du profil. Il y a assez peu de recouvrement des diagrammes pour les quatre premiers horizons ce qui témoigne de teneurs en eau massiques très distinctes (Tableau 9). Celles des horizons H5.1 et H5.2 semblent très proches et équivalentes à la teneur en eau de l'horizon H3. Seuls quatre échantillons ont été prélevés dans l'horizon H6, il est donc difficile de discuter les teneurs en eau obtenues mais elles semblent se rapprocher de celles de l'horizon H7, le plus humide de la couverture pédologique.

Horizon	1	2	3	4	5.1	5.2	6	7
n	9	9	9	10	5	6	7	4
W ($g.g^{-1}$)	0,12	0,17	0,18	0,19	0,18	0,17	0,18	0,22
θ ($cm^3.cm^{-3}$)	0,12	0,21	0,26	0,28	0,26	0,27	0,28	0,34
Da ($g.cm^{-3}$)	1,02	1,27	1,49	1,54	1,46	1,53	1,55	1,54

Tableau 9. Valeurs médianes par horizon des teneurs en eau massiques, volumiques, et des masses volumiques apparentes de sol

2.3.2. Distributions des teneurs en eau volumiques par horizon

Les box plots des teneurs en eau volumiques par horizon (Figure 43), sont moins étalés que ceux des teneurs en eau massiques et conduisent aux mêmes remarques :

- le profil en X=14 m est particulièrement humide
- les teneurs en eau volumiques des quatre premiers horizons sont très différenciées (Tableau 9)
- celles des horizons H5.1 et H5.2 sont très proches
- les plus fortes teneurs en eau sont obtenues pour les horizons profonds H6 et H7

2.3.3. Distributions des masses volumiques apparentes de sol par horizon

Les box plots de la masse volumique apparente de sol sont représentés Figure 44. Ils montrent des masses volumiques particulièrement faibles pour les horizons H1 et H2 appartenant à ce qui est communément appelé horizon de labour. Ce constat est attendu car le sol travaillé est évidemment davantage aéré et moins compact. Par ailleurs, au sein même de cette couche travaillée, le déchaumage se distingue clairement par une masse volumique apparente très faible, proche de 1 $g.cm^{-3}$ (Tableau 9), que lui confère sa structure en partie grumeleuse.

En comparaison, sur cette même parcelle, avec ⅔ d'échantillons prélevés dans le lit de semence (de 5 à 10 cm de profondeur) et ⅓ issus du reste de l'horizon travaillé, Moeys (2007) a obtenu une masse volumique apparente de sol de 1,28 $g.cm^{-3}$ ce qui est équivalent à la valeur obtenue ici pour le deuxième horizon ; en attribuant les mêmes poids ⅔ et ⅓ aux masses volumiques obtenus pour les horizons H1 et H2 respectivement, la masse volumique moyenne pondérée obtenue, de 1,10 $g.cm^{-3}$, est relativement inférieure à celle de Moeys (2007). En outre, une étude menée sur des calcisols de Petite Beauce comparables à ceux de Ouarville (Michot *et al.* 2003) mentionne une masse volumique apparente, pour l'horizon labouré, égale à celle de H2, de 1, 27 $g.cm^{-3}$.

Au-delà de la couche de sol travaillée, les masses volumiques apparentes des horizons H4, H5.2, H6 et H7 sont équivalentes, de l'ordre de 1,54 $g.cm^{-3}$. Celles des horizons les plus profonds sont tout à fait prévisibles vu les difficultés qu'ont présenté leurs prélèvements. La dispersion du box plot correspondant à l'horizon H4 s'explique par la compaction qui se manifeste en fin de tranchée : ce sont les masses volumiques apparentes des échantillons

issus des profils d'abscisses supérieures à X=12 m qui étirent le diagramme vers les valeurs supérieures.

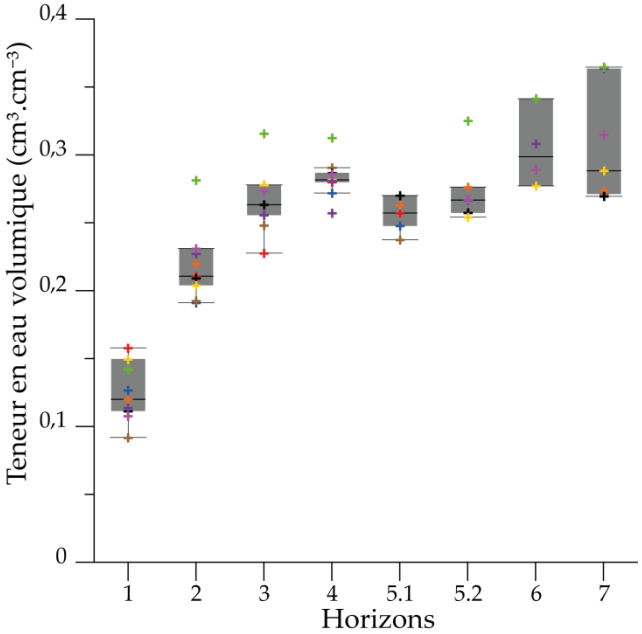


Figure 43. Box plots des teneurs en eau volumiques par horizon

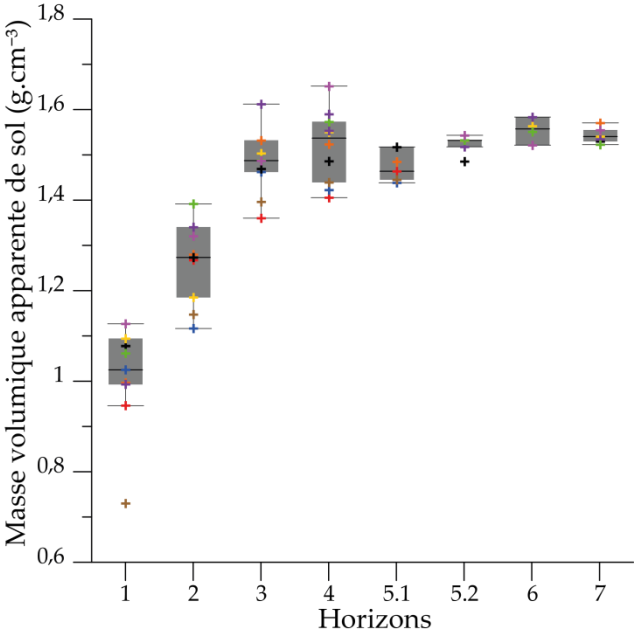
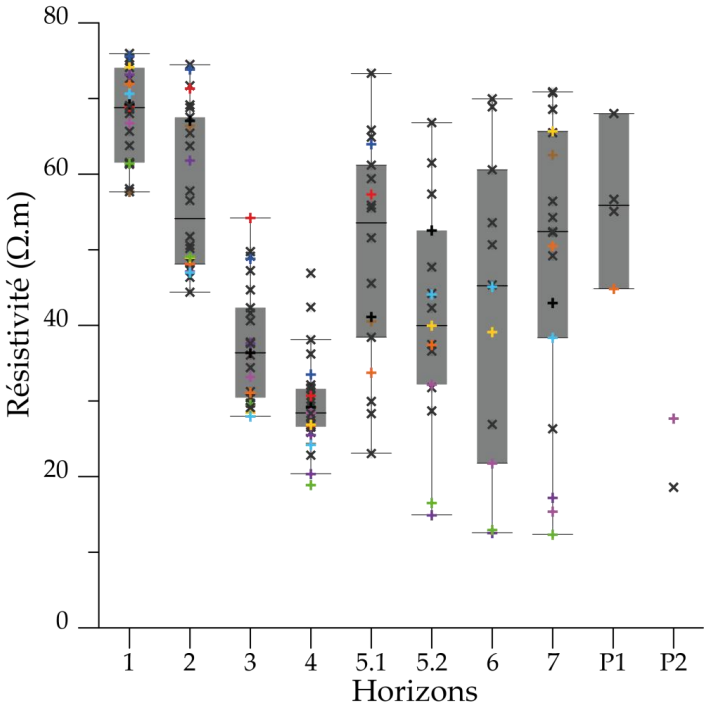


Figure 44. Box plots des masses volumiques apparentes de sol par horizon



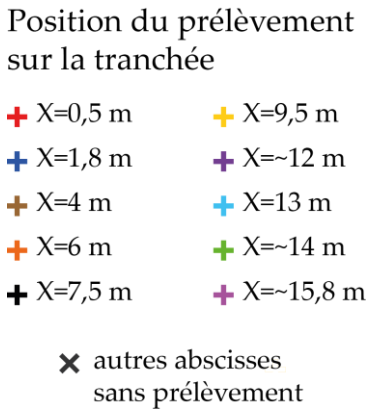


Figure 45. Box plots par horizon de sol des résistivités mesurées sur la paroi de la tranchée

2.3.4. Distributions des résistivités électriques par horizon

Les résistivités électriques mesurées par horizon sont représentées dans les diagrammes de la Figure 45 et les valeurs numériques, traduisant leur tendance centrale et leur dispersion par horizon, sont regroupées dans le Tableau 10. Le non recouvrement des diagrammes des quatre premiers horizons (28 à 30 mesures par horizon) n'est pas aussi manifeste que dans les figures discutées précédemment du fait d'une dispersion plus importante. Malgré cela, les valeurs médianes de résistivité révèlent un gradient indéniable de résistivité de l'horizon 1 à 4, passant successivement de 69, 54, 36 à 28 Ω.m.

Les valeurs de résistivité mesurées sur les horizons profonds (12 à 19 mesures par horizon) sont équivalentes, de l'ordre de 40-45 Ω.m pour H5.2 et H6 et de 50 Ω.m pour H5.1 et H7. Les diagrammes correspondants sont davantage dispersés que pour les horizons de surface, ce qui s'explique en partie par les valeurs mesurées sur les profils qualifiés de "profils humides" lors de la prospection, en X=12 m et 14 m (croix violettes et vertes sur la figure) ; ces valeurs de résistivité, particulièrement faibles – valeurs inférieures à Q1, notamment pour les horizons H5.2, H6 et H7 – sont associées à une teneur en eau élevée du profil de prélèvement et contribuent à l'étalement des "box plots".

Les valeurs de résistivité mesurées sur les poches P1 et P2 sont présentées mais, peu nombreuses (2 à 4 mesures), ne peuvent être inclues dans une interprétation d'ensemble.

Horizon	**H1**	**H2**	**H3**	**H4**	**H5.1**	**H5.2**	**H6**	**H7**	**P1**	**P2**
n	28	28	28	30	18	17	12	19	4	2
min	57,6	44,4	28,0	18,9	23,1	14,9	12,6	12,4	44,8	18,6
max	75,9	74,4	54,2	46,9	73,3	66,8	69,9	70,8	68,0	27,7
moyenne	68,2	57,5	37,2	29,4	49,4	40,7	42,3	49,5	56,1	23,2
médiane	68,8	54,1	36,4	28,4	53,5	40,0	45,2	52,4	55,8	23,2
écart-type	5,9	10,3	7,5	5,9	14,8	14,1	20,1	19,3	9,5	6,4

Tableau 10. Statistiques sur les valeurs de résistivités (en Ω.m) mesurées par horizon

En confrontant les teneurs en eau et masses volumiques apparentes du sol par horizon aux valeurs de résistivité, un constat remarquable s'impose : au regard de la croissance, de la surface à H4, des teneurs en eau et des masses volumiques des quatre premiers horizons, il est cohérent d'obtenir une évolution en sens inverse de la résistivité. En effet, si l'impact de la teneur en eau sur la résistivité est bien connu, de récentes études (Besson *et al.* 2004 ; Séger *et al.* 2009 ; Seladji *et al.* 2010) sur la compaction du sol montrent que l'augmentation de celle-ci, à l'origine de masses volumiques apparentes du sol importantes, entraîne une diminution des valeurs de résistivité. En revanche, bien que les horizons profonds, plus argileux que ceux de la surface, soient plus humides et plus denses, leurs résistivités ne s'avèrent pas particulièrement faibles. Le point commun entre tous est leur structure prismatique, qui pourrait être tenue responsable de ces valeurs de résistivité inattendues. Cette observation concorde avec l'étude de Séger *et al.* (2009) qui précise que la présence de vides autour de

zones même très compactes peut engendrer des valeurs de résistivité importantes. Celles des horizons prismatiques, H5.1, H5.2, H6 et H7, s'expliquent donc très probablement par le développement de fentes verticales qui délimitent les prismes ; ces espacements inter-prismes sont d'autant plus marqués en période de sécheresse estivale, qui accentue le phénomène de retrait des argiles.

2.3.5. Corrélation entre résistivités pariétales et propriétés pédologiques

Les résultats des tests de Bravais-Pearson et de Spearman (Tableau 11) montrent qu'il est rarement possible d'établir de lien entre les propriétés d'états (W, θ ou Da) et les valeurs de résistivité électrique ρ lorsque les prélèvements utilisés proviennent d'un horizon particulier.

En revanche les tests réalisés avec l'ensemble des échantillons tous horizons confondus donnent des coefficients de corrélation élevés : r=-0,68, -0,81 et -0,73 entre résistivité et respectivement teneur en eau massique, teneur en eau volumique et masse volumique apparente de sol.
Les courbes de tendance linéaire (qui, pour rappel, ne sont pas des droites, l'échelle des résistivités étant semi-logarithmique) ainsi que les équations correspondantes sont ajoutées aux figures représentant les nuages de points (Figure 46, Figure 47 et Figure 48). Malgré des corrélations fortes et significatives, ces graphiques montrent des relations non linéaires plus complexes : en forme de sigmoïde pour ρ=f(W) et ρ=f(θ) et un lien qui semble plutôt polynomial entre ρ et Da.

Fukue *et al.* (1999) a également obtenu un lien d'allure sigmoïdal entre résistivité électrique et teneur en eau massique sur des argiles (exemple des argiles de Kibushi, Japon, Figure 49). L'interprétation de cette allure est qu'en dessous d'un certain seuil de teneur en eau, la continuité du trajet des charges électriques n'est plus assurée. En effet le trajet des charges électriques dépend de la continuité de la porosité du sol et de la présence d'eau dans ces pores, qui favorise leur déplacement (Friedman 2005). La confrontation des figures 48 et 49 montre des corrélations entre W et ρ de tendances similaires dans la gamme de teneur en eau mesurée sur les échantillons de Ouarville, pour $10\ g.g^{-1} < W < 25\ g.g^{-1}$ (flèches rouges) : la résistivité semble constante pour des faibles teneurs en eau puis chute brutalement pour une valeur critique de teneur en eau qui indique que la discontinuité de la porosité est atteinte (seuil de percolation). Cette valeur critique est de l'ordre de $13\ g.g^{-1}$ pour les argiles de Kibushi et de $16\ g.g^{-1}$ pour le sol de Ouarville. Enfin pour les fortes teneurs en eau, la résistivité se stabilise autour de 10-12 Ω.m. Cependant le palier de résistivité aux faibles teneurs en eau se situe autour de 70 Ω.m dans le cas de Ouarville et autour de 3000 Ω.m pour les argiles de Kibushi. Cette différence trouve peut-être son explication dans le fait qu'il demeure dans le sol de Ouarville de l'eau adsorbée en surface des particules argileuses tandis que les argiles de Kibushi font l'objet d'une étude en laboratoire où la désorption est plus complète.

H1	W	θ	Da
r	-0,315	0,344	0,524
n	11	9	9
t	0,996	0,970	1,626
p	0,345	0,364	0,148
r_s	-0,191	0,383	0,2
$\alpha(2)$	0,618	0,700	0,700

H2	W	θ	Da
r	-0,370	-0,580	-0,502
n	11	9	9
t	1,195	1,885	1,536
p	0,263	0,101	0,169
r_s	-0,545	-0,6	-0,55
$\alpha(2)$	0,618	0,700	0,700

H3	W	θ	Da
r	-0,500	-0,783	-0,531
n	12	9	9
t	1,823	3,327	1,659
p	0,098	0,013	0,141
r_s	-0,552	-0,85	-0,533
$\alpha(2)$	0,587	0,700	0,700

H4	W	θ	Da
r	-0,716	-0,495	-0,466
n	14	10	10
t	3,554	1,611	1,490
p	0,004	0,146	0,175
r_s	0,169	-0,394	-0,527
$\alpha(2)$	0,587	0,648	0,648

H5.1	W	θ	Da
r	0,730	-0,282	-0,560
n	5	5	5
t	1,848	0,509	1,172
p	0,162	0,646	0,326
r_s	-0,2	-0,2	-0,5
$\alpha(2)$	1	1	1

H5.2	W	θ	Da
r	-0,738	-0,611	-0,477
n	9	6	6
t	2,896	1,543	1,087
p	0,023	0,198	0,338
r_s	-0,65	-0,543	-0,314
$\alpha(2)$	0,700	0,886	0,886

H6	W	θ	Da
r	-0,908	-0,798	-0,081
n	7	4	4
t	4,849	1,871	0,116
p	0,005	0,202	0,919
r_s	-0,679	-0,8	-0,4
$\alpha(2)$	0,786	-	-

H7	W	θ	Da
r	-0,839	-0,830	0,271
n	10	7	7
t	4,357	3,334	0,630
p	0,002	0,021	0,557
r_s	-0,806	-0,643	0,429
$\alpha(2)$	0,648	0,786	0,786

toutes données	W	θ	Da
r	-0,683	-0,812	-0.732
n	79	59	59
t	8,213	10,486	8,109
p	$3,96.10^{-12}$	$6,41.10^{-15}$	$4,53.10^{-11}$
r_s	-0,683	-0,829	-0,715
$\alpha(2)$	0,220 < seuil < 0,223	0,255 < seuil < 0,259	

Tableau 11. Tests de corrélation entre variables pédologiques (W, θ et Da) et résistivité ρ réalisés par horizon et avec l'ensemble des données

(La partie supérieure des tableaux correspond au test de Bravais-Pearson la partie inférieure à celui de Spearman ; les coefficients en rouge sont ceux pour lesquels la corrélation est significative)

Rappel :
- r : coefficient de Bravais-Pearson
- n : nombre de prélèvements
- t : t de Student associé à r
- p : probabilité de t
- r_s : coefficient de Spearman
- $\alpha(2)$: valeur critique du coefficient r_s

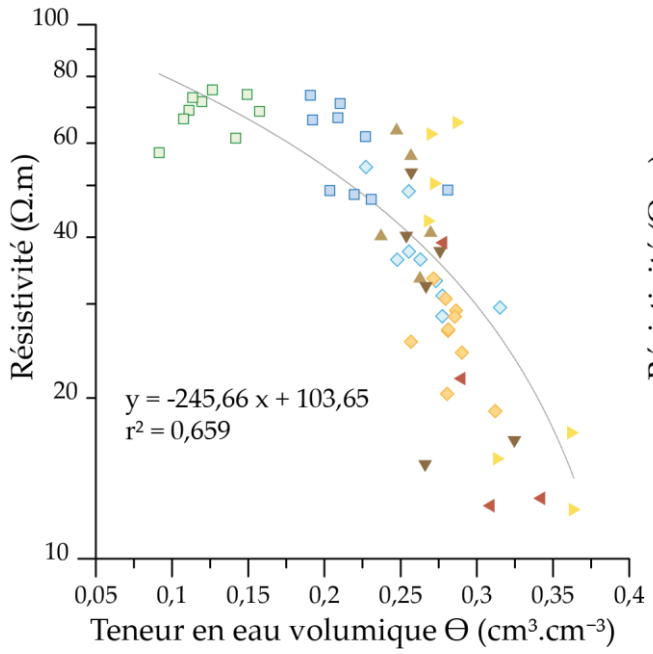


Figure 46. Relation entre résistivité électrique des sites de prélèvements et teneur en eau volumique des échantillons de sol

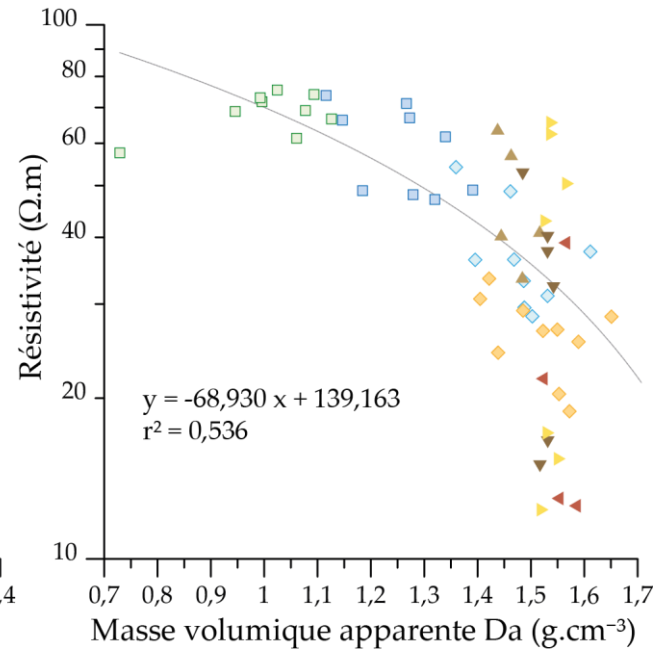


Figure 47. Relation entre résistivité électrique des sites de prélèvements et masse volumique apparente des échantillons de sol

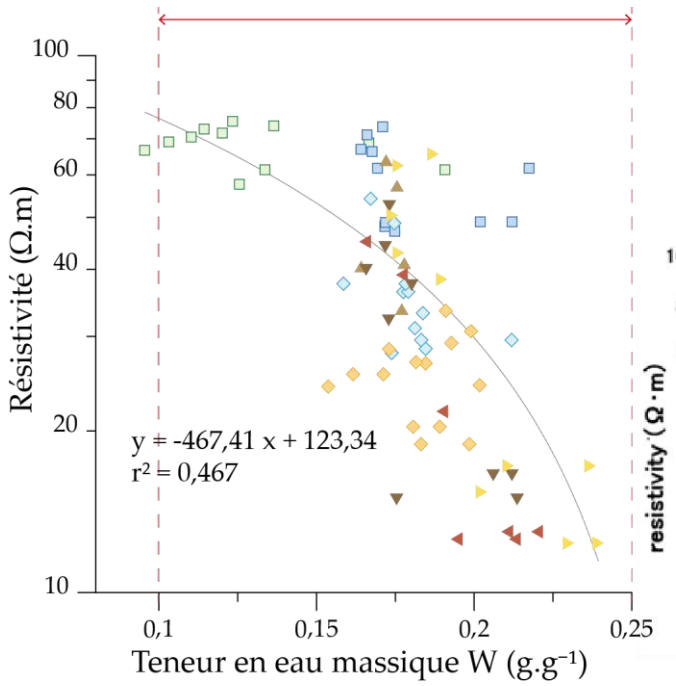


Figure 48. Relation entre résistivité électrique des sites de prélèvements et teneur en eau massique des échantillons de sol

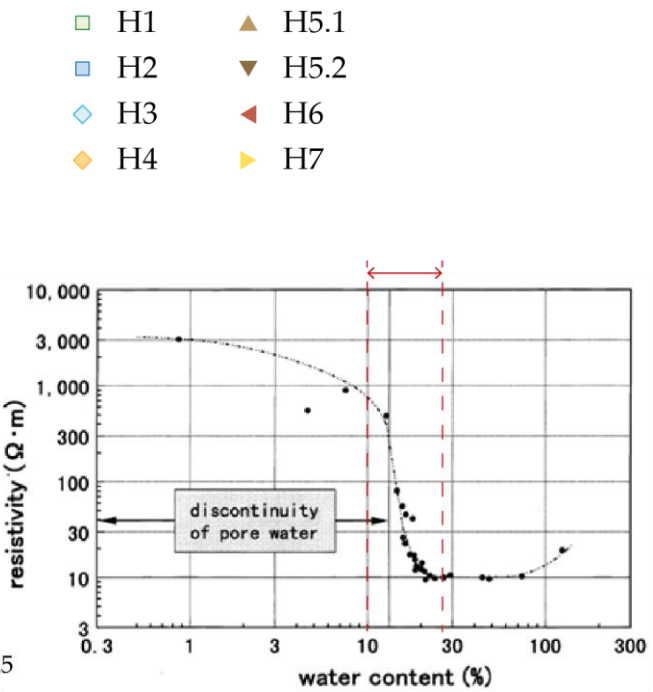


Figure 49. Relation entre résistivité électrique et teneur en eau massique sur argile de Kibushi (d'après Fukue et al. 1999)

3. Synthèse

- **Organisation de la couche pédologique**

L'examen visuel de la tranchée ouverte a fait apparaître 8 horizons et, en profondeur, au contact du substrat, 2 poches de matériaux isolés.

Les 4 premiers horizons, dans la partie supérieure de la tranchée – de 0 à 50 cm – correspondent au déchaumage (H1), aux labours récent et ancien (H2 et H3) et à un horizon polyédrique (H4). Avec des épaisseurs moyennes de 9, 15, 11 et 18 cm (de H1 à H4), ces horizons présentent très peu de variabilité latérale et verticale.

La partie inférieure de la couverture pédologique est constituée d'horizons argileux de formes moins régulières que les horizons de surface, avec, pour H5.2 et H7, une évolution de leur profondeur au sein de la couverture pédologique.

Enfin, le substrat apparait à 70 cm de profondeur sur les 4 premiers mètres de la tranchée. Il devient progressivement plus profond entre X=4 et 6 m et atteint une profondeur d'en moyenne 1,2-1,3 m, qu'il conserve jusqu'au bout de la tranchée.

- **Propriétés électriques et pédologiques des horizons**

Pour les 4 premiers horizons, les teneurs en eau – massique W ou volumique θ – ainsi que les masses volumiques apparentes sont très différenciées d'un horizon à l'autre : de H1 à H4, les valeurs médianes obtenues sont θ=0,12, 0,21, 0,26 et 0,28 $cm^3.cm^{-3}$ et Da=1,02, 1,27, 1,49 et 1,54 $g.cm^{-3}$. Les faibles valeurs de θ pour les horizons H1 et H2 s'expliquent par l'évaporation de l'eau des couches superficielles du sol et les faibles valeurs de Da, par le fait que ces horizons constituent la couche travaillée du sol, plus poreuse.

Les valeurs médianes de résistivité de chacun de ces horizons – 69, 54, 36 et 28 Ω.m – révèlent un gradient de résistivité avec la profondeur. **Sommairement, la teneur en eau et la masse volumique apparente augmentent fortement avec la profondeur sur les cinquante premiers centimètres, tandis que la résistivité diminue.**

Concernant les horizons profonds, les teneurs en eau des horizons H5.1 et H5.2 sont proches de celles de l'horizon H3, celles des horizons H6 et H7 sont proches de celle de l'horizon H4. Mis à part l'horizon H5.1, dont Da=1,46 $g.cm^{-3}$, les masses volumiques apparentes de H4 et des horizons profonds sont équivalentes, de l'ordre de 1,54 $g.cm^{-3}$. **Cette homogénéité des masses volumiques apparentes des horizons profonds se retrouve dans les valeurs de résistivité** : de l'ordre de 40-45 Ω.m pour H5.2 et H6 et de l'ordre de 50 Ω.m pour H5.1 et H7.

La comparaison des masses volumiques de l'horizon labouré avec celles obtenues dans d'autres études montre qu'il n'est pas évident de retrouver des valeurs similaires. Par ailleurs, bien que les horizons profonds soient argileux, humides et denses, leurs résistivités ne s'avèrent pas particulièrement faibles. Ce constat s'explique par la présence des pores inter-agrégats, vides d'eau, qui s'opposent à la conduction du courant dans le sol. Ces remarques illustrent la difficulté qu'il y a de décorréler les effets des divers paramètres influençant la résistivité.

Les tests statistiques montrent qu'il est rarement possible d'établir de lien entre les propriétés d'état (W, θ ou Da) et les valeurs de résistivité électrique par horizon. Les prélèvements à l'intérieur d'un même horizon montrent une dispersion de la résistivité électrique, qui ne se retrouve pas à l'échelle de la tranchée dans son ensemble, probablement car la résistivité intègre un volume de sol plus grand que celui échantillonné pour les mesures de teneur en eau ou de masse volumique apparente. En prenant l'ensemble des échantillons tous horizons confondus, les coefficients de corrélation sont élevés : r=-0,68, -0,81 et -0,73 entre résistivité et teneur en eau massique, teneur en eau volumique et masse volumique apparente du sol. Ceci montre que la résistivité électrique est aussi pertinente que Da pour définir les horizons.

- **Limite entre PCS 1 et PCS 2**

L'expertise pédologique situe la limite entre les 2 PCS entre les abscisses X=5 m et X=8 m de la tranchée, ce qui correspondrait, sur les cartes de résistivité apparente, à une zone de résistivité variant de 40 à 50 Ω.m. Malgré des données bruitées, la prospection de surface conduirait à placer cette limite au niveau de l'abscisse X=6 m, où le profil enregistré sur la voie 3 rejoint les 2 autres, et donne des résistivités inférieures. Les données modélisées, quant à elles, laissent supposer que la limite entre les 2 PCS se situe plutôt en X=11 m éventuellement X=9 m, abscisse de différenciation des profils. Cependant la position de cette limite résulte probablement du modèle de tranchée créé pour lequel la résistivité du substrat est modifiée entre X=10 et 11 m.

- **Caractérisation pédologique par résistivité électrique**

Les mesures faites en surface ou bien sur la paroi de la tranchée sont cohérentes avec les types de sols étudiés : elles indiquent, à l'Est, la superposition d'une couche conductrice intercalée entre deux résistantes, ce qui correspond bien à un néoluvisol sur calcaire. A l'ouest, malgré la présence d'anomalies résistives, le terrain de plus en plus conducteur avec la profondeur correspond à un néoluvisol sur argile.

CHAPITRE V

Etude de la cohérence entre prospection électrique à 3 profondeurs et répartition des sols sur 2 surfaces agricoles de 3 ha

Ce chapitre propose une méthode simple et originale d'exploitation de données électriques issues d'une prospection multi-profondeurs. Si cette méthode, en cours de développement, se doit encore d'évoluer, les principes sur lesquels elle repose sont présentés dans cette partie.

Les données issues d'une prospection multi-profondeurs, habituellement traitées sous forme de 3 cartes de résistivité apparente, sont ici considérées comme un ensemble de sondages électriques comportant chacun 3 valeurs de résistivité apparente. L'exploitation de l'évolution de la résistivité avec la profondeur, c'est-à-dire de la succession des 3 valeurs de résistivité apparente, permet la définition de taxons géophysiques susceptibles d'être mis en lien avec les taxons pédologiques rencontrés.
Les données considérées ici sont celles acquises au moyen de l'ARP® sur les parcelles de Ouarville et de l'Orgeval.

1. Traitement préliminaire des données brutes

1.1. Ecrêtage

Les données acquises au moyen de l'ARP présentent quelques valeurs erronées ; le travail du sol (labour, déchaumage), la qualité du contact des électrodes avec celui-ci, notamment lorsque la géométrie du dispositif est modifiée dans les virages, influencent fortement la qualité de la mesure. Il est par conséquent nécessaire, avant toute exploitation des données, d'éliminer les valeurs n'ayant aucune signification.
Chaque jeu de données à disposition (présentés chapitre II) comporte un pourcentage non négligeable de valeurs nulles qui rendent compte du mauvais déroulement de la mesure et qui sont donc supprimées. Par ailleurs, l'observation des histogrammes des valeurs de résistivité montrent des distributions dont les queues sont très étalées du côté des grandes valeurs. Un écrêtage est alors appliqué sur ces distributions avec une borne supérieure calculée sur les données en log (transformation choisie afin de rectifier au mieux la dissymétrie des histogrammes) et définie, en Ω.m, par :

$$10\hat{}\left(\overline{\rho_{log}} + |p| \times \sigma_{log}\right)$$

où ρ_{log} et σ_{log} sont les moyenne et écart-type des résistivités apparentes transformées en log et p, le nombre d'écarts-types au-delà duquel les données sont considérées comme aberrantes, est donné par la loi normale inverse de 1/N, N étant l'effectif du jeu de données.
L'écrêtage est réalisé sur les données brutes issues des trois voies d'enregistrement de l'ARP, il y a donc trois opérations d'écrêtage à faire par site prospecté.

1.2. Interpolation

L'interpolation répond au besoin de connaître la valeur d'une variable régionalisée en un site autre qu'un site échantillonné. Les mesures enregistrées sur chacune des voies de l'ARP étant

décalées dans l'axe de déplacement du dispositif (cf. présentation du dispositif chapitre II), une interpolation est employée en vue d'obtenir trois valeurs de résistivité apparente en un même site de coordonnées x et y, où elles pourront être interprétées comme un sondage électrique.

Beaucoup de méthodes permettent de prédire la valeur d'une grandeur à partir des observations voisines, mais la prise en considération du spectre des données permet de définir une façon rigoureuse d'interpoler (Annexe 3). L'interpolation idéale est en effet réalisable en multipliant le spectre du signal échantillonné par un filtre rectangulaire ou fonction porte $rect(\nu)$ de largeur correspondant à la fréquence d'échantillonnage (ici u_e) :

$$F(\nu) = \mathrm{rect}_{u_e}(\nu) \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} F(\nu - k\, u_e)$$

où $F(\nu)$ est le spectre du signal reconstruit.

Dans le domaine spatial, cela correspond au produit de convolution du signal échantillonné par la fonction sinus cardinal normalisée :

$$f(x) = u_e \frac{\sin(\pi\, u_e\, x)}{\pi\, u_e\, x} * \frac{1}{u_e} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} f\left(\frac{k}{u_e}\right) \delta\left(x - \frac{k}{u_e}\right) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f\left(\frac{k}{u_e}\right) \frac{\sin\left(\pi\, u_e \left(x - \frac{k}{u_e}\right)\right)}{\pi\, u_e \left(x - \frac{k}{u_e}\right)}$$

ce qui donne, en 2 dimensions et en prenant une fenêtre d'interpolation de même taille u_e suivant les directions x et y :

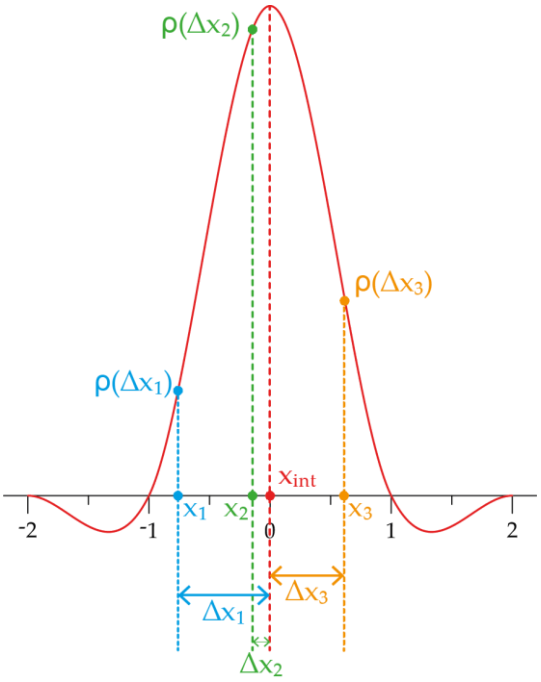
$$f(x,y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f\left(\frac{m}{u_e}, \frac{n}{u_e}\right) sinc\left(u_e\left(x - \frac{m}{u_e}\right)\right) sinc\left(u_e\left(y - \frac{n}{u_e}\right)\right)$$

L'amortissement du sinus cardinal impose une pondération des valeurs observées, fonction de leur distance au point à interpoler ; les valeurs les plus éloignées n'auront donc que peu d'influence. C'est pour cette raison, ainsi que parce que ce type d'interpolation qualifiée d'idéale n'est pas réalisable du fait de l'ordre infini de la fonction sinus cardinal, que cette dernière est approximée par une fonction polynomiale d'ordre 3, cubique qui colle aux trois arches centrales du sinus cardinal et qui est définie comme suit :

$$\begin{array}{ll} si \;\; |\Delta x| < 1 & \rho(\Delta x) = 1{,}5|\Delta x|^3 - 2{,}5|\Delta x|^2 + 1 \\ si \;\; 1 \leq |\Delta x| < 2 & \rho(\Delta x) = -0{,}5|\Delta x|^3 + 2{,}5|\Delta x|^2 - 4|\Delta x| + 2 \\ si \;\; |\Delta x| \geq 2 & \rho(\Delta x) = 0 \end{array}$$

Pour que l'interpolation spatiale soit réalisée à 2 dimensions, $\rho(\Delta y)$ est définie de la même façon que $\rho(\Delta x)$ – x et y étant les directions parallèle et perpendiculaire à celle d'acquisition – et la zone d'influence des valeurs observées est une fenêtre de 4 fois la distance interprofil. Pour ré-échantillonner les mesures, il convient de créer une grille aux nœuds de laquelle les valeurs de résistivité sont interpolées. Pour faciliter le traitement cartographique, cette grille est choisie à maille carrée dont la taille se base sur la plus grande distance existant entre deux mesures consécutives (suivant l'une ou l'autre des deux directions) ; la taille de la maille est donc égale à la distance interprofil adoptée lors de l'acquisition. L'interpolation, dont le principe est illustré Figure 50, consiste à centrer la fonction cubique normalisée sur le point à

interpoler, et à calculer la valeur de la cubique en fonction de la distance au nœud de la grille établie, de chaque mesure de résistivité incluse dans la zone d'influence.



$$\rho_{int} = \frac{\sum_i \rho_i[\rho(\Delta x_i) \times \rho(\Delta y_i)]}{\sum_i[\rho(\Delta x_i) \times \rho(\Delta y_i)]}$$

Figure 50. Principe de l'interpolation par la cubique : exemple en 1D avec 3 valeurs observées en x_1, x_2 et x_3 à proximité du point à interpoler

1.3. Impact sur les distributions de données et cartographie de résistivité apparente

L'impact de l'écrêtage sur les distributions de données est visualisable sur les histogrammes figures 51 et 52. Pour l'ensemble des jeux de données, la méthode d'écrêtage choisie impose des bornes supérieures situées à environ 4 écarts-types de la moyenne (sur données log).

L'opération conduit à supprimer environ 6 à 10% des données de Ouarville, pour la plupart des valeurs nulles, tandis que du côté des grandes valeurs, moins de 1/1000ème des données se trouvent au-delà de la borne d'écrêtage calculée.

Les mesures à Orgeval, de meilleure qualité, présentent environ 3% de zéros sur l'ensemble de la parcelle et moins de 1% sur la zone prospectée en maille fine. Aucune grande valeur n'est considérée aberrante avec les critères fixés.

L'interpolation d'un point s'appuie sur les observations situées dans un carré (centré sur le point) de 4 m sur 4 m pour les prospections réalisées avec une distance inter-profil de 1 m (Ouarville et zone sélectionnée d'Orgeval) et dans un espace de 20 m sur 20 m pour la parcelle entière d'Orgeval dont la distance inter-profil est de 5 m. Les mesures ARP étant réalisées tous les 10 à 20 cm, l'interpolation a pour première conséquence de réduire le nombre de données ; les effectifs sont divisés par 5 à 10 lorsque la distance inter-profil est de 1 m et par 20 lorsqu'il est de 5 m. En outre, l'interpolation ne prenant pas en compte la réduction du nombre d'observations utilisées pour interpoler les points en bordure de carte, quelques valeurs erronées sont générées (inférieures à 0 à cause des oscillations de la fonction cubique, ou particulièrement élevées). L'étendue de la prospection et le nombre de

OUARVILLE

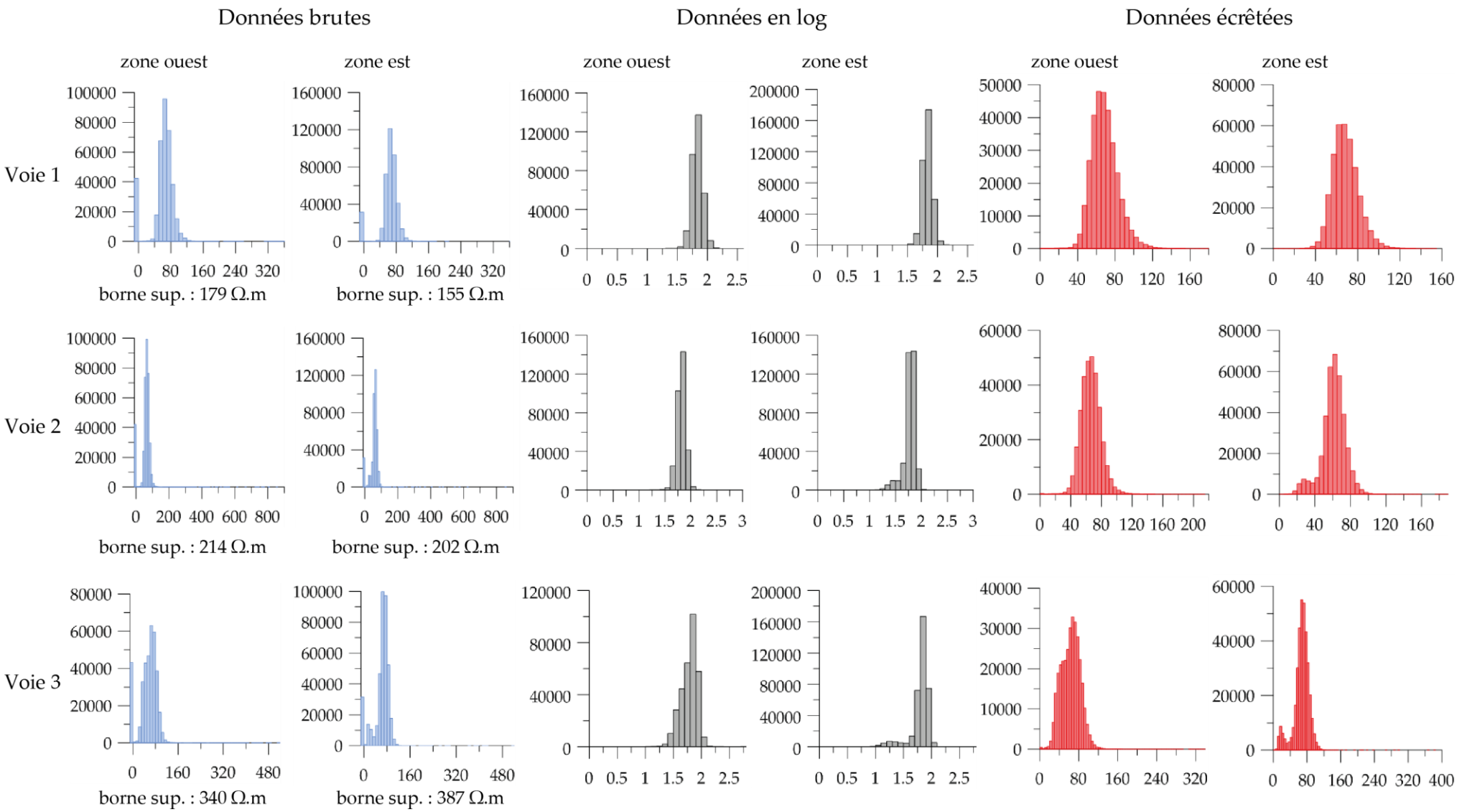


Figure 51. Distribution des données de Ouarville avant et après écrêtage
(Les voies 1, 2 et 3 correspondant aux mesures sur les petit, moyen et grand quadripôles de l'ARP®)

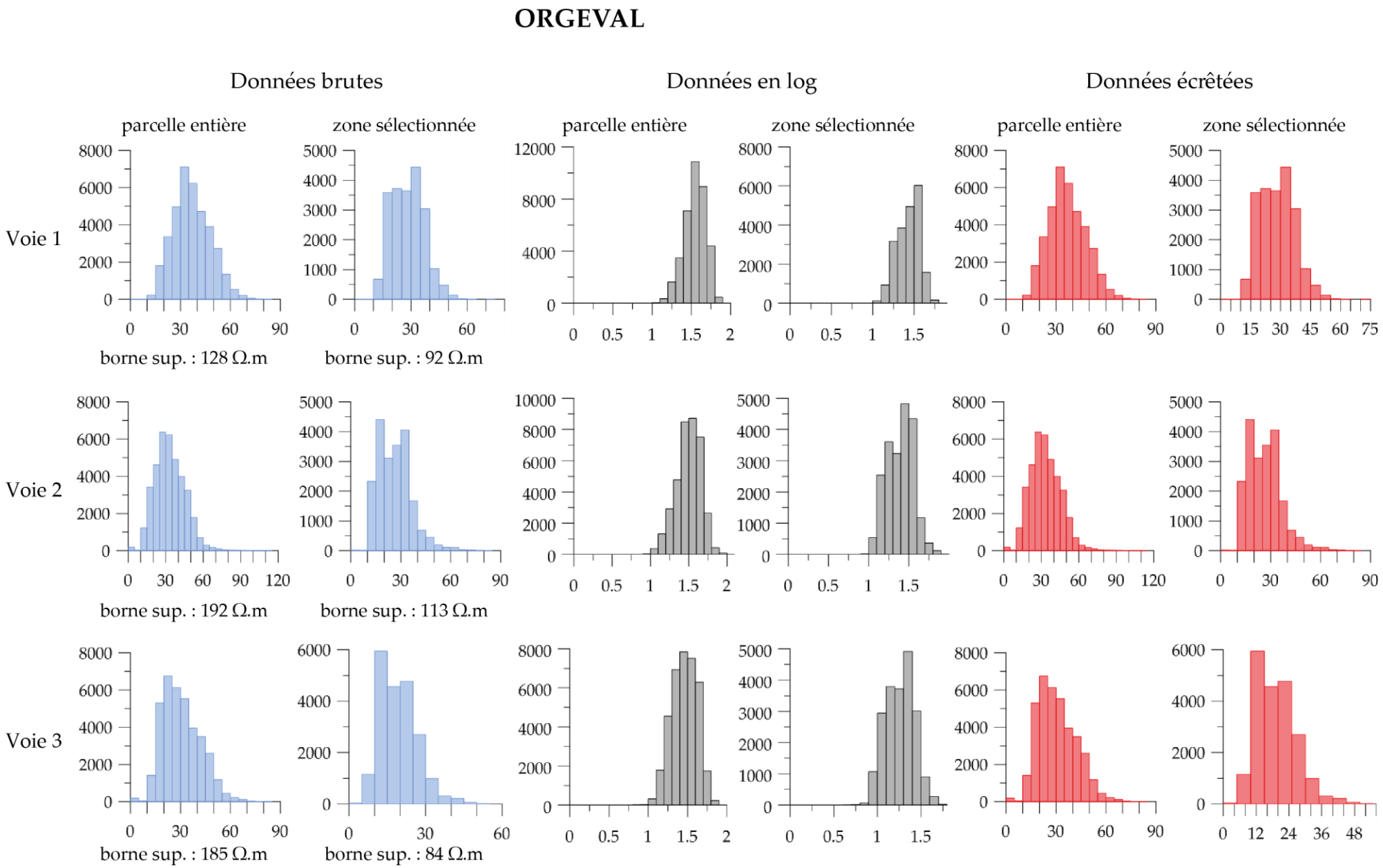


Figure 52. Distribution des données d'Orgeval avant et après écrêtage

données étant suffisamment importants, les bordures de cartes ont été supprimées. Les figures 53 et 54 montrent les cartes résultantes de ce traitement des données, après un léger filtrage[4] par la médiane (Tabbagh 1988) pour en améliorer le rendu.

En résumé, l'application d'un écrêtage souple a donc permis d'améliorer le rendu des distributions de données tout en s'assurant de ne pas perdre d'information potentiellement intéressante. Si les données brutes sont déjà d'une qualité satisfaisante une simple élimination des zéros peut suffire (cas des données de l'Orgeval). L'interpolation requiert une suppression des quelques valeurs erronées qu'elle génère en bordure de carte, soit manuellement, soit plus rapidement en retirant les bords de cartes. Ecrêtage et interpolation des données ne modifient pas ou très peu les paramètres qui caractérisent la tendance centrale (moyenne et médiane) des jeux de données.

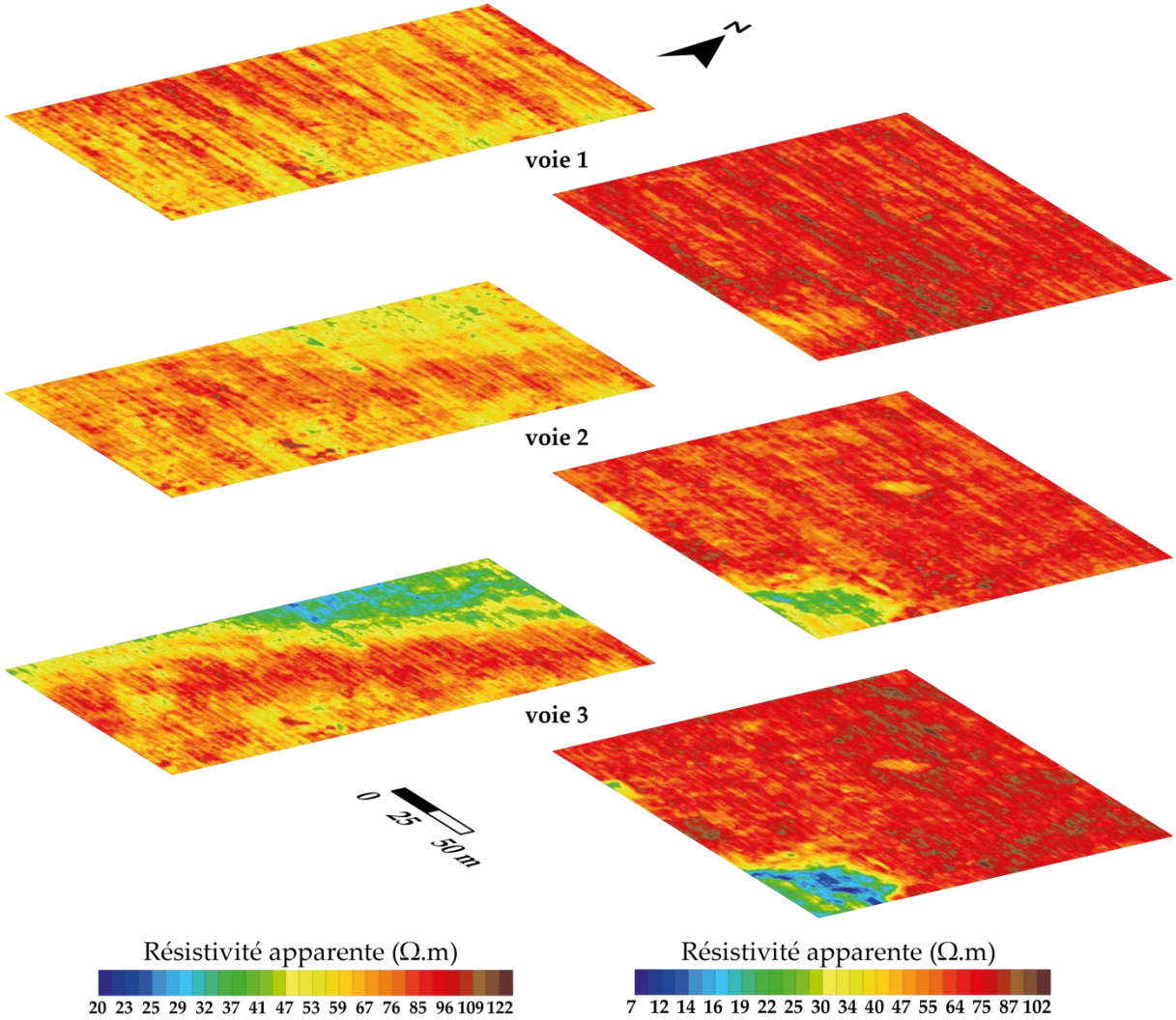


Figure 53. Cartographie de résistivité apparente des zones ouest (gauche) et est (droite) de la parcelle de Ouarville

[4] Le filtre utilisé est un filtre médian de taille 5x5, qui s'applique donc sur un carré de 25 valeurs, et modifie la valeur centrale, en la remplaçant par la médiane des 25 valeurs, si elle diffère de 20% par rapport à cette médiane. Ceci a pour effet d'éliminer les valeurs singulières isolées. Le pourcentage de données modifiées est en général de 3-4%, 8% tout au plus.

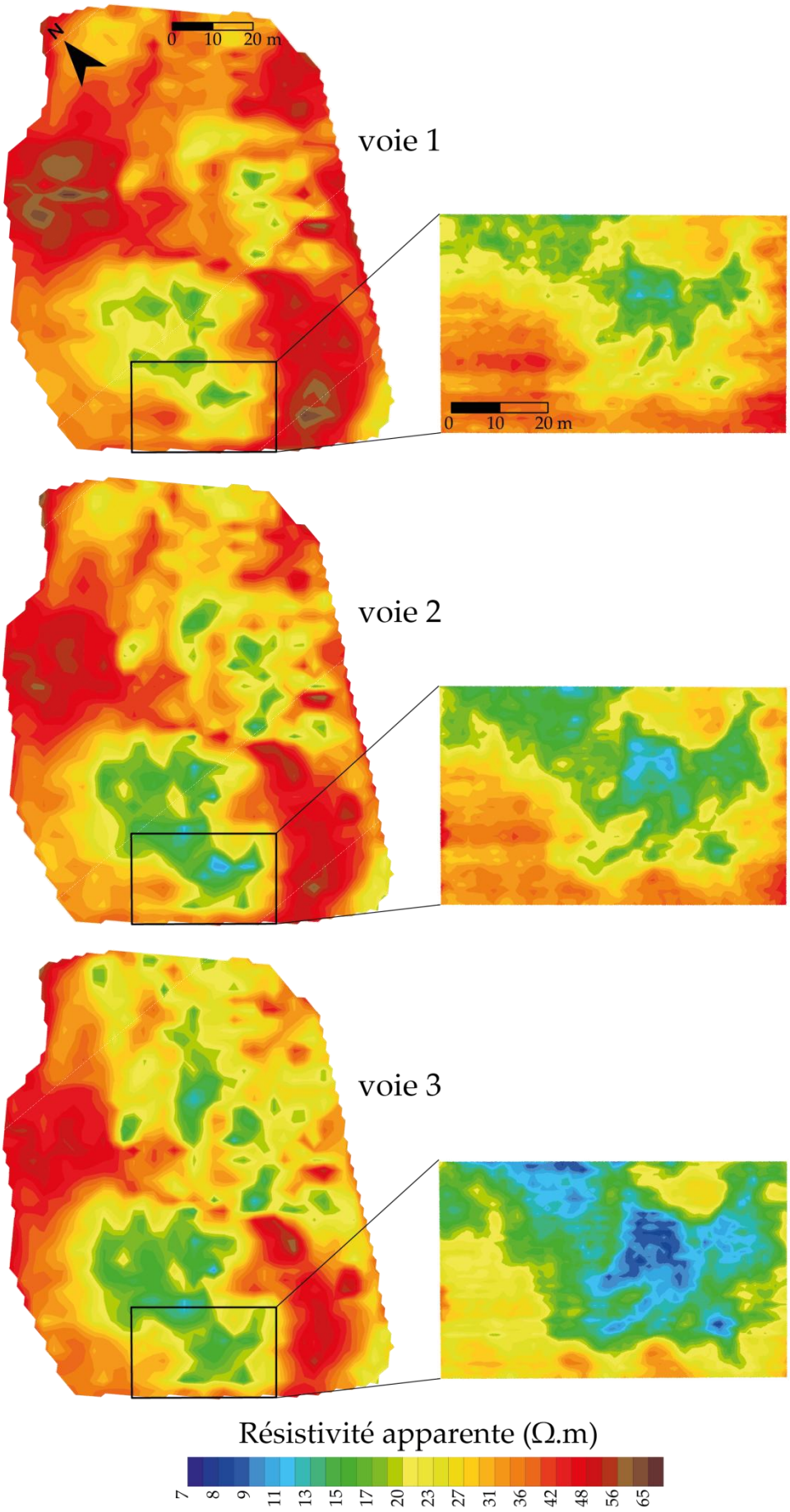


Figure 54. Cartographie de résistivité apparente sur la parcelle de l'Orgeval

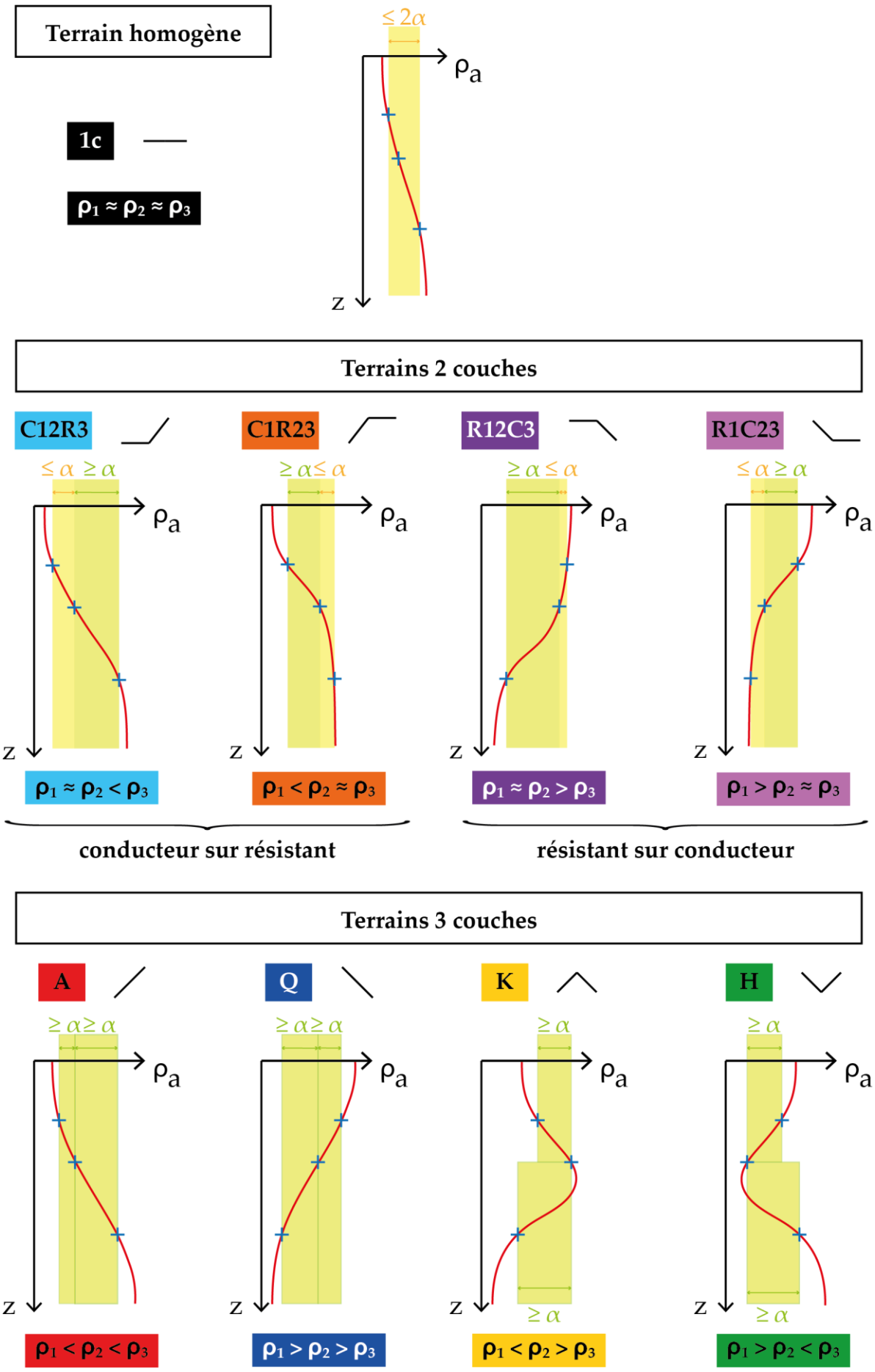


Figure 55. Profils-types définis, noms, symboles et code couleur

2. Principe de la méthode

2.1. Taxonomies géophysique et pédologique

L'idée développée ici consiste à définir des taxons géophysiques à partir des sondages électriques obtenus à l'issu du traitement préliminaire et de voir si cette classification peut être un outil permettant d'améliorer le processus de construction d'une carte pédologique en étudiant la cohérence spatiale des différentes classes établies par la cartographie des taxons géophysiques, ou encore en analysant la correspondance entre taxons pédologiques (lorsque des données pédologiques sont disponibles) et taxons géophysiques.

2.1.1. Classification des profils verticaux de résistivité apparente

La taxonomie des sondages électriques repose sur l'exploitation de l'évolution des trois valeurs de résistivité avec la profondeur. Elle s'appuie sur un paramètre, α, qui désigne l'écart en Ω.m au-delà duquel deux valeurs de résistivité sont considérées comme provenant de deux couches de sol distinctes selon leur résistivité apparente. α est donc un paramètre qui tend à différencier les couches. Les trois valeurs de résistivité apparente de chaque sondage ρ_{a1}, ρ_{a2}, ρ_{a3} sont comparées les unes aux autres et, selon les successions de résistivités rencontrées, 9 types de profils verticaux sont proposés (Figure 55).

Le terrain est alors considéré comme étant :

i) homogène si les 3 valeurs de résistivité apparente sont comprises dans l'intervalle $[\rho - \alpha, \rho + \alpha]$

ii) un terrain 2 couches, si :
   - 2 valeurs contiguës de résistivité ne diffèrent entre elles que de α au maximum (les 2 valeurs rendent compte d'une même couche)
   - la 3ème valeur est supérieure d'au moins α à la valeur maximale des 2 autres, ou inférieure d'au moins α à la valeur minimale des 2 autres

iii) un terrain 3 couches si la différence entre deux valeurs contiguës est supérieure à α Ω.m

2.1.2. Attribution d'un profil de résistivité aux unités cartographiques de sol

Dans le cas de Ouarville où des données pédologiques sont disponibles, il est possible, à l'aide de la définition des types de sols présents sur la parcelle, d'anticiper l'allure des sondages électriques attendus. La taxonomie élaborée ici s'appuie non seulement sur la typologie pédologique établie mais également sur certaines caractéristiques du substrat telles que sa nature et sa profondeur, qui sont susceptibles d'influer sur le profil de résistivité. Ces critères, détaillés en annexe 4, conduisent aux regroupements d'unités cartographiques suivants :

- UCS 7 : brunisols

Les brunisols à eux seuls constituent un groupe auquel peut être attribué le profil-type H (∨) pour traduire la superposition du labour sur un niveau d'argile à meulière, le tout reposant sur un substrat calcaire ; mais certains brunisols de la parcelle possèdent un niveau d'argile peu épais (de l'ordre de 15 cm) qui pourrait, s'il n'est pas détecté, donner lieu à l'existence du profil de type C12R3 (_/).

- UCS 15 : colluviosols

S'il est difficile de rapprocher les colluviosols d'autres UCS, il est aussi délicat de leur attribuer un profil de résistivité potentiel. Les colluviosols étant des sols particulièrement uniformes, le profil (1c __) correspondant à un terrain homogène semble le plus probable pour manifester la présence de ce type de sols. Cependant, si la surface est plus sèche ou moins argileuse, l'existence de profil-type R1C23 (_) n'est pas exclue. En outre, si le calcaire sur lequel les colluviosols reposent est relativement peu profond, il est possible de voir apparaître des profils de type C12R3 (_/) ou C1R23 (/‾).

- UCS 4[5] et 5 : calcisols et calcosols sur substrat calcaire cryoturbé situé entre 30 et 41 cm

Le profil de résistivité attendu pour ce groupe est C1R23 (/‾) avec une couche conductrice correspondant au labour et quasiment en contact avec le substrat calcaire résistant. Pour les cas où le substrat apparait un peu plus en profondeur les profils-types C12R3 (_/) et H (∨) peuvent éventuellement être envisagés.

- UCS 3 et 6 : calcisols et néoluvisols sur substrat calcaire situé entre 45 et 55 cm

Les sols de ces UCS étant plus profonds que les précédents, le profil de résistivité le plus probable à leur associer est C12R3 (_/). Si l'épaisseur de sol à partir de la semelle de labour (autour de 30 cm) jusqu'au substrat présente une humidité ou une teneur en argile plus importante qu'en surface, le profil H (∨) peut également être envisagé.

- UCS 1, 4[6], 9 et 12 : néoluvisols dont le substrat est situé entre 55 et 77 cm

Le profil-type attendu est H (∨) avec un niveau argileux conducteur intercalé entre le labour et le substrat calcaire plus résistants. Si le gradient de teneur en argile est faible, le profil C12R3 (_/) peut également être rencontré.

- UCS 8 et 14 : néoluvisols dont le substrat à une profondeur > 1 m

Ce regroupement de néoluvisols profonds sur limon ou néoluvisols sur argile concerne des plages cartographiques dont la profondeur du substrat calcaire a été mesurée entre 100 et 110 cm. Le profil-type possible pour ce groupe est Q (\) qui traduit une décroissance de la résistivité avec la profondeur.

- UCS 2, 10, 11 et 13 : néoluvisols sur argile dont le substrat est situé entre 80 et 120 cm

Comme les précédents, les néoluvisols de ce groupement sont particulièrement profonds, et leur position "sur argile" fait du profil-type Q (\) le plus adapté pour exprimer le gradient

---

[5] L'UCS 4 étant un complexe de calcisols et de néoluvisols, ce sont ici les calcisols de l'UCS qui sont considérés.

[6] Néoluvisols du complexe de l'UCS 4.

d'argile de ces UCS. Le profil H (∨) peut également être envisagé pour les cas où le substrat calcaire apparaît vers 80 cm de profondeur.

Le Tableau 12 donne la synthèse des profils de résistivité attribués à chaque unité cartographique de sol.

Cette taxonomie pédologique permet d'appréhender l'apparence attendue des cartes des zones prospectées : la cartographie de la répartition spatiale des profils-types établis (avec le code couleur établi lors de la taxonomie géophysique) devrait conduire à la Figure 56. Cette carte constitue en quelque sorte la référence prédite par la typologie pédologique.

7 groupements de sols	**UCS**	**Profil de résistivité attendu**
brunisols	7 (brunisols)	H (ou C12R3)
colluviosol	15 (colluviosols)	1c (ou R1C23, C12R3, C1R23)
calcisols et calcosols sur substrat calcaire cryoturbé entre 30 et 41 cm	4 (calcisols)	C1R23
	5 (calcisols et calcosols)	
substrat calcaire entre 45 et 55 cm	3 (néoluvisols)	C12R3 (ou H)
	6 (calcisols)	
néoluvisols + substrat calcaire cryoturbé ou altéré entre 55 et 77 cm	1 (néoluvisols)	H
	4 (neoluvi)	
	9 (néoluvisols)	
	12 (néoluvisols)	
néoluvisols profonds sur calcaire à une profondeur > 1 m	8 (néoluvisols)	Q
	14 (néoluvisols)	
néoluvisols sur argile + substrat calcaire cryoturbé entre 80 et 120 cm	2 (néoluvisols)	Q (ou H)
	10 (néoluvisols)	
	11 (néoluvisols)	
	13 (néoluvisols)	

Tableau 12. Profil de résistivité attendu pour chaque UCS

Figure 56. Prédiction par la typologie pédologique de l'organisation spatiale des profils-types

Rappel légende : H ∨ Q ╲ C12R3 ⎽/ C1R23 /⎺ 1c —

✓ **Remarque**

La carte des sols sur laquelle s'appuie la taxonomie pédologique a été établie lors d'une prospection antérieure (Moeys *et al.* 2006 ; Moeys 2007) à l'aide de mesures de résistivités à trois profondeurs réalisées au MUCEP (dispositif présenté chapitre I). Les principaux critères de délinéation des unités cartographiques ont été la mesure de résistivité enregistrée sur la voie 2, puis secondairement, celle enregistrée sur la voie 3, ainsi que les observations localisées telles que la pierrosité ou la topographie.
La mise en relation de la répartition spatiale des profils-types avec la carte des sols est une démarche différente, englobante, puisque c'est ici la succession verticale des données de résistivité apparente qui est exploitée, en vue de retrouver des délinéations similaires à celles de la carte des sols.

2.2. Discussion sur la valeur du paramètre différenciateur de couches α

Le paramètre α, comme dit précédemment, va tendre à différencier plus ou moins les couches du point de vue de leur résistivité électrique. En effet, pour des faibles valeurs de α, la différenciation des 3 valeurs de résistivité sera maximale, tandis que, pour des valeurs importantes, il n'y aura plus de différenciation : les 3 valeurs de résistivité rendront compte d'un terrain homogène. Alors, à combien fixer le paramètre α et sur quel(s) critère(s) se baser pour lui attribuer une valeur ?

Dans un premier temps, le choix est fait de ne pas fixer α, mais de lui faire balayer tout une gamme de valeurs de manière à apprécier l'évolution des sondages qui prendront alors l'allure d'un profil-type correspondant à un terrain 3 couches pour α=0, jusqu'au profil-type correspondant au terrain homogène pour des grandes valeurs de α, en passant (ou pas) par une allure de terrain 2 couches.
Le fait de ne pas fixer α permet donc non seulement d'observer l'intégralité de l'évolution des sondages, mais également de ne pas exclure d'autres effets que celui du sol pouvant éventuellement influencer la mesure de résistivité (bruits liés à l'appareil de mesure ou mise en œuvre).

Dans la suite, les valeurs des α de transitions, pour lesquels le sondage passe de celui d'un 3 couches à celui d'un 2 couches ou de celui d'un 2 couches à celui d'un terrain homogène seront appelées respectivement α_{32} et α_{21}.

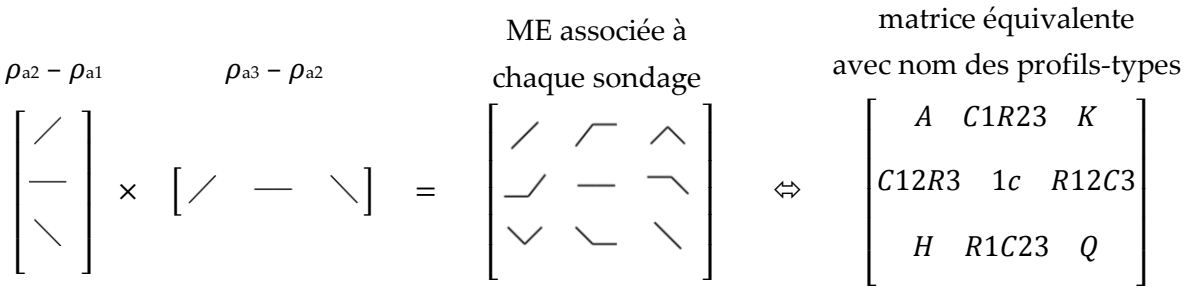
2.3. Formalisme utilisé

Le formalisme présenté ci-après consiste à exprimer les taxons géophysiques et pédologiques établis via une écriture matricielle, qui va permettre leur mise en relation.

2.3.1. "Matrice électrique" (ME)

Pour faciliter la manipulation informatique et parce que le problème s'y prête bien, à chaque sondage électrique est attribuée une matrice de dimension (3, 3) comprenant les neuf profils-

types définis. Cette matrice résulte du produit de deux vecteurs traduisant le signe (>0, <0 ou =0) de la différence entre deux valeurs contiguës comparées ; l'évolution relative pouvant être croissante, décroissante ou nulle dans la limite du paramètre α défini précédemment :



Pour α=0 Ω.m, les ME sont nulles. Puis, pour chaque nouvelle valeur de α testée, un profil-type est attribué au sondage (ou point de mesure) considéré. L'élément de sa ME, correspondant à ce profil-type est alors incrémenté. Le remplissage de la matrice se fait ainsi jusqu'à ce que l'élément central (manifestation du terrain homogène) diffère de zéro. Ce choix implique donc un α maximal de balayage différent d'un sondage à l'autre.

2.3.2. "Matrice pédologique" (MP)

Suite à la taxonomie pédologique établie, 6 profils de résistivité susceptibles d'être rencontrés ont été définis. A chacun d'eux, est attribuée une matrice "pédologique" dont l'élément correspondant au profil-type attendu est fixé à 1, le reste de la matrice étant nul. Le Tableau 13 récapitule les informations relatives aux 6 combinaisons établies.

Profil-type pédologique	Matrice associée	UCS concernées
H	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	**1** 2 3 ***4n*** (4*c*) 6 **7** **9** 10 11 **12** 13
Q	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	**2** **8** **10** **11** **13** **14**
1c	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	**15**
C1R23	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	(3) ***4c*** **5** 15
C12R3	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	**3** 4*c* 4*n* 5 **6** 7 9 15
R1C23	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	15

Lorsque plusieurs profils-types sont attribuables à une UCS :
- n° de l'UCS en gras : en face du profil-type favori
- n° de l'UCS ni en gras, ni entre parenthèses : profil-type secondaire
- n° de l'UCS entre parenthèses : profil-type possible pour quelque cas isolés de PCS (cf. annexe 4)

4n et 4c sont respectivement les néoluvisols et calcisols du complexe de l'UCS 4

Tableau 13. Groupements d'unités cartographiques de sols établis en fonction du sondage électrique attendu et matrice associée à chaque profil-type

2.3.3. Principe du calcul de distance matricielle

L'utilisation d'une écriture matricielle pour l'expression 1)des profils de résistivité obtenus par la prospection électrique et 2)des profils-types attendus d'après la typologie pédologique, trouve son intérêt dans la possibilité qu'elle offre de calculer une ressemblance entre taxons géophysiques et pédologiques. C'est par le biais d'un calcul de distance matricielle que cette ressemblance va être quantifiée. La distance d, entre la matrice électrique d'un sondage et la matrice pédologique attendue pour ce sondage, est donnée par la norme de leur différence. Cette norme est le résultat de la somme quadratique des éléments de la matrice $ME - MP$, également appelée "norme de Frobenius" (équivalent, pour une matrice, de la norme euclidienne d'un vecteur[7]). Cette distance matricielle est donnée par la relation suivante :

$$d = \|ME - MP\| = \sqrt{\sum_{i=1,j=1}^{m,n} (ME - MP)_{i,j}^2}$$

Les faibles valeurs de d indiqueront alors un maximum de ressemblance entre ME et MP. A l'inverse, des valeurs importantes de d traduiront une faible ressemblance entre ME et MP.

Bien qu'il n'y ait que 6 profils-types envisageables d'après la typologie pédologique, rien n'empêche, en pratique, de calculer la norme de la différence entre ME et n'importe quelle matrice pouvant correspondre à l'un des 9 profils-types – c'est-à-dire comportant un seul élément non nul et égal à 1 n'importe où dans la matrice, parmi les 9 possibilités ; ce qui sera fait dans la partie 3.3. Il résulte d'une telle procédure, 9 valeurs de distance pour chaque point de mesure, qui vont traduire le degré de ressemblance du sondage avec chacun des profils-types théoriques :

$d(A)$ $d(C1R23)$ $d(K)$ $d(C12R3)$ $d(1c)$ $d(R12C3)$ $d(H)$ $d(R1C23)$ $d(Q)$

En outre, comme le paramètre α n'est pas fixé, les distances $d(profils - type)$ vont être calculées à partir de ME dont le remplissage va dépendre de la gamme de valeurs balayées par α. Afin de connaître le poids de chacune des distances $d(profils - type)$, celles-ci seront normalisées en les divisant par la somme de toutes : $\sum_{i=1}^{9} d(profils - type)_i$.

3. Mise en œuvre sur les données de Ouarville

3.1. Balayage maximal du paramètre α

3.1.1. Vers des sondages électriques correspondant à un terrain homogène

Les distributions des valeurs du paramètre α_{21}, qui caractérise le passage d'une interprétation 2 couches à 1 couche des sondages électriques, sont présentés Figure 57 pour chaque zone prospectée sur Ouarville.

[7] Remarque : cette norme correspond aussi à la racine carrée de la trace du produit de la matrice avec sa transposée : $d = \sqrt{tr[(ME - MP)^T.(ME - MP)]}$

Les histogrammes s'étirent du côté des grandes valeurs, c'est-à-dire que de nombreux sondages tardent à devenir ceux d'un terrain homogène ; cela est à mettre en relation avec la présence de valeurs de résistivité apparente anormalement élevées et isolées, qui demeurent malgré les traitements préliminaires. En effet, un α_{21} de 160 devrait signifier que l'écart maximal entre 2 valeurs de résistivité du sondage est de 160 Ω.m. Or, sur toutes les cartes, toutes voies confondues, les valeurs de résistivité s'étendent sur une gamme de l'ordre de 100 Ω.m ; les sondages pour lesquels α_{21} est vraiment supérieur à 100 Ω.m possèdent donc bien des valeurs singulières isolées qui ont été lissées par le filtrage.
D'autre part, les distributions obtenues pour les 2 zones prospectées ont des allures assez similaires, de type log-normale. C'est pour α compris entre 5 et 10 Ω.m pour l'Ouest et entre 10 et 15 Ω.m pour l'Est qu'il y a le plus de transitions 3 ou 2 couches vers 1 couche. Enfin, la quasi-totalité des sondages est considérée comme relevant d'un terrain homogène pour α de l'ordre de 50 Ω.m.

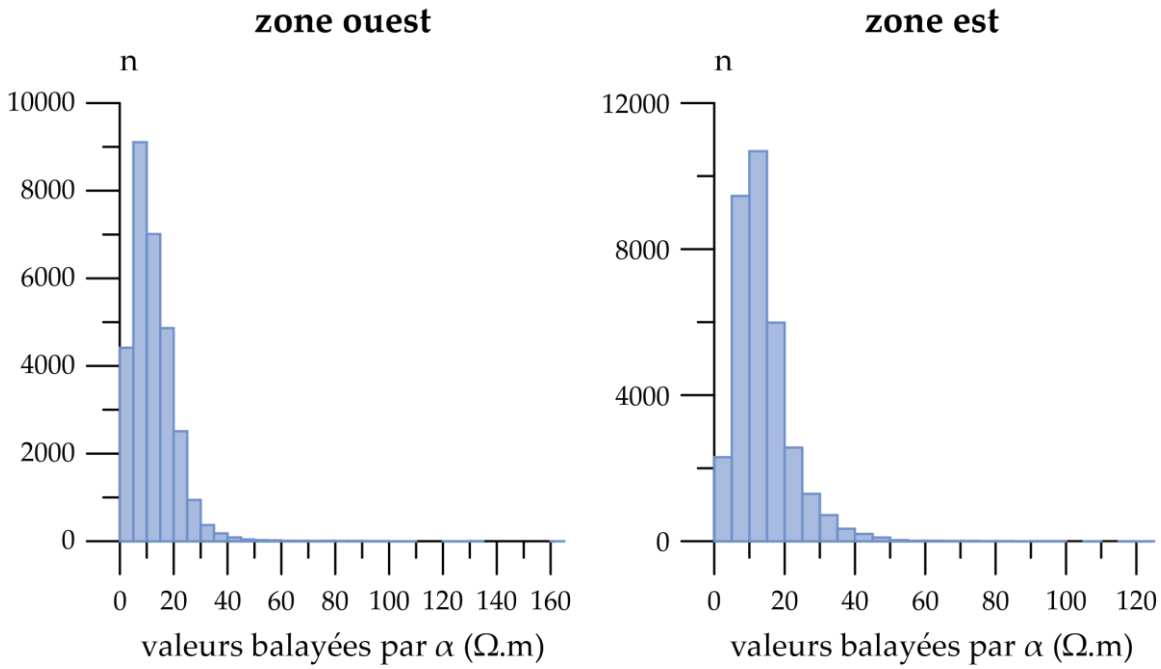


Figure 57. Histogramme des α_{21} pour les zones prospectées à Ouarville

3.1.2. Courbes de densité de profils-types

L'objectif est ici d'observer l'évolution des sondages électriques contenus par plage cartographique de sol, en fonction de la valeur que prend le paramètre α. Ceci devrait permettre de voir s'il est possible d'attribuer un ou plusieurs profils-types, c'est-à-dire une signature spécifique à chaque unité cartographique de sol, et de vérifier que les plages cartographiques appartenant à une même unité cartographique fournissent des signatures similaires.

On définit pour cela des graphes de densité de profils-types : ces graphes (un par PCS et par UCS) vont comporter 9 courbes représentant le nombre de sondages appartenant aux

9 profils-types définis en fonction de la valeur prise par α. Le remplissage de la ME se fait jusqu'à ce que le dernier sondage de la zone prospectée atteigne l'état de terrain homogène (~160 et 120 Ω.m pour les zones Ouest et Est) mais, pour le tracé des graphes présentés dans cette section, l'échelle des abscisses est optimisée pour améliorer le rendu des courbes.

La Figure 58 indique le nombre de chacun des profils-types en fonction de α sur les unités cartographiques 1 (1ère ligne), 3 (2ème ligne) et 4 (3ème ligne). Les 3 premières colonnes concernent les plages cartographiques constitutives de chaque unité cartographique. La dernière colonne représente le nombre de profils-types comptabilisés par UCS, c'est-à-dire qu'elle regroupe les données des 3 premières colonnes.

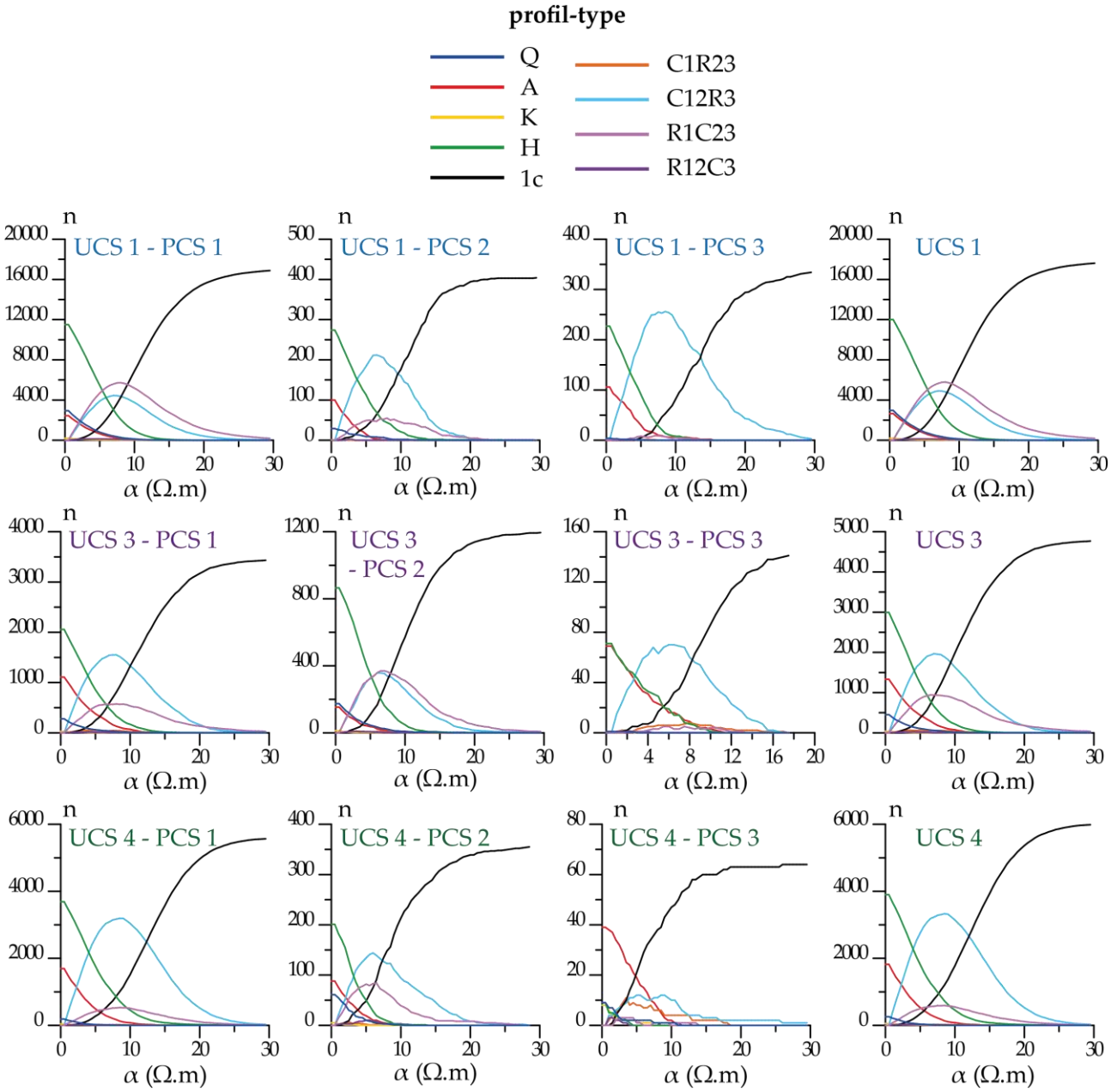


Figure 58. Courbes des densités de profils-types sur les UCS 1, 3 et 4 en fonction du paramètre α

- UCS 1

La première ligne de la Figure 58 montre qu'il existe des similitudes entre les plagess cartographiques de l'UCS 1. Le profil-type majoritaire pour les faibles valeurs de α ($0 \leq \alpha \leq 4$-5,5 Ω.m) est celui d'un terrain 3 couches H, pour lequel $\rho1 > \rho2 < \rho3$. Les PCS 2 et 3 possèdent ensuite une majorité de profils C12R3 (où $\rho1 \approx \rho2 < \rho3$) pour des α jusqu'à 10 voire 14 Ω.m. Cette évolution depuis un terrain 3 couches H (résistant-conducteur-résistant) vers une égalisation de ρ1 et ρ2 apporte une précision quant à l'allure du sondage initial (pour α=0) : $\rho1 > \rho2 < \rho3$ avec $\rho3 > \rho1$. Cependant, la PCS 1, beaucoup plus vaste, possède des densités quasi équivalentes de profils-types R1C23 et C12R3 pour $5,5 \leq \alpha \leq 9$ Ω.m. La coexistence de ces 2 types de profils, qui, au sein d'une PCS supposée homogène, devraient être non compatibles l'un avec l'autre – puisqu'ils rendent compte de terrains résistant sur conducteur pour l'un et conducteur sur résistant pour l'autre – relève d'un état de transition de la PCS vers une PCS intégralement constituée de sondages correspondants à un terrain homogène. En effet, c'est sur une gamme de α relativement courte, $\Delta\alpha$~4 Ω.m, que soit ρ1 devient égal à ρ2, soit ρ2 devient égal à ρ3, avant que les 3 valeurs de résistivité ne soient considérées égales.

De manière générale, la coexistence de plusieurs types de profils dans une plage cartographique peut remettre en question sa délinéation mais également sa pureté car l'attribution d'une identité pédologique à une zone géographique n'exclue pas sa non-homogénéité.

- UCS 3

D'après la 2ème ligne de la Figure 58, les plages cartographiques de l'UCS 3 sont peu différentes les unes des autres. Le profil-type majoritairement représenté sur cette UCS est le profil H pour de α=0 à $3 \leq \alpha=\alpha_{32} \leq 5$ Ω.m. On note toutefois que la PCS 3 possède de nombreux profils de type A qui coexistent avec les profils de types H pour α petit, mais la position de cette PCS, en bordure de zone prospectée peut engendrer des résultats biaisés par l'interpolation. Comme pour l'UCS 1, les sondages de l'UCS 3 passent par le type C12R3 avant de devenir ceux d'un terrain homogène pour $8 \leq \alpha_{21} \leq 10$ Ω.m.

- UCS 4

La troisième plage cartographique mise à part (de très petite taille donc possédant un nombre de sondages électriques limités, en bordure de carte et seule PCS située sur la zone prospectée ouest) les PCS 1 et 2 de l'UCS 4 sont relativement similaires, avec une majorité de profils de type H jusqu'à α~4 Ω.m, puis de profils de types C12R3, avant que tous les sondages ne deviennent ceux d'un terrain 1 couche pour $8 \leq \alpha_{21} \leq 10$ Ω.m.

La Figure 59 présente les courbes de densités de profil-type des UCS 5, 6, 7 et 15 qui sont les moins faciles à caractériser par une allure de sondage électrique, tant les 9 profils-types y sont représentés.

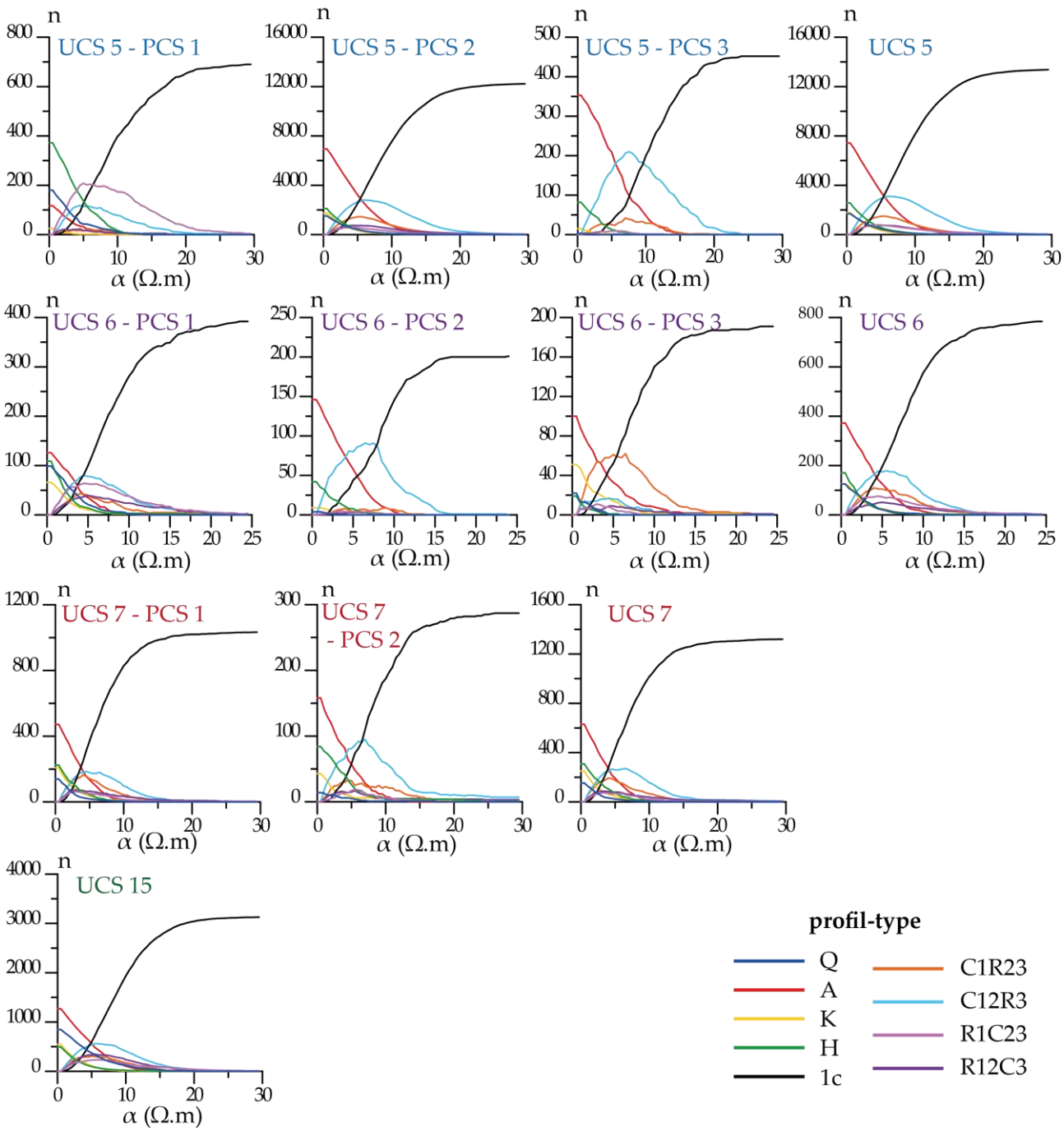


Figure 59. Courbes des densités de profils-types sur les UCS 5, 6, 7 et 15 en fonction du paramètre α

- UCS 5

La PCS 5.1 est, de l'UCS 5, la seule située sur la zone Est de Ouarville, ce qui explique sa différence par rapport aux deux autres. Les PCS 2 et 3 présentent une majorité de profils de type A depuis α=0 à α~5,5 Ω.m. Si la transition 3 couches vers 1 couche semble direct pour la PCS 2, la PCS 3 passe par un état de transition où une grande partie des sondages sont de type C12R3, jusqu'à $6 \leq \alpha = \alpha_{21} \leq 10$ Ω.m.

- UCS 6

Si les 3 plages cartographiques de l'UCS 6 possèdent une majorité de profils de type A jusqu'à α=3-4 Ω.m, l'évolution de chacune des PCS diffère quelque peu lorsque α augmente : la PCS 1 passe directement à l'état de terrain électriquement homogène tandis que les PCS 2 et 3 correspondent à des terrains 2 couches de types conducteur sur résistant (C12R3 et C1R23) avant d'être considérés homogènes pour α=6-8 Ω.m.

- UCS 7

L'UCS 7 est également considérée électriquement comme un terrain 3 couches de type A jusqu'à α=4 Ω.m. La PCS 1 passe directement à l'état de terrain homogène tandis que la PCS 2 passe par un court état de transition de type C12R3 de α=4 à α=7 Ω.m.

- UCS 15

L'UCS 15 ne possède qu'une plage cartographique sur la zone prospectée. Celle-ci est électriquement considérée comme un terrain 3 couches de type A jusqu'à α=5 Ω.m et passe ensuite directement à l'état de terrain homogène.

La Figure 60 présente les densités de profils-types observés sur les unités cartographiques 12, 13, 14 et 2 ; UCS qui, à l'inverse des précédentes, se caractérisent par 1 voire 2 profils-types uniquement.

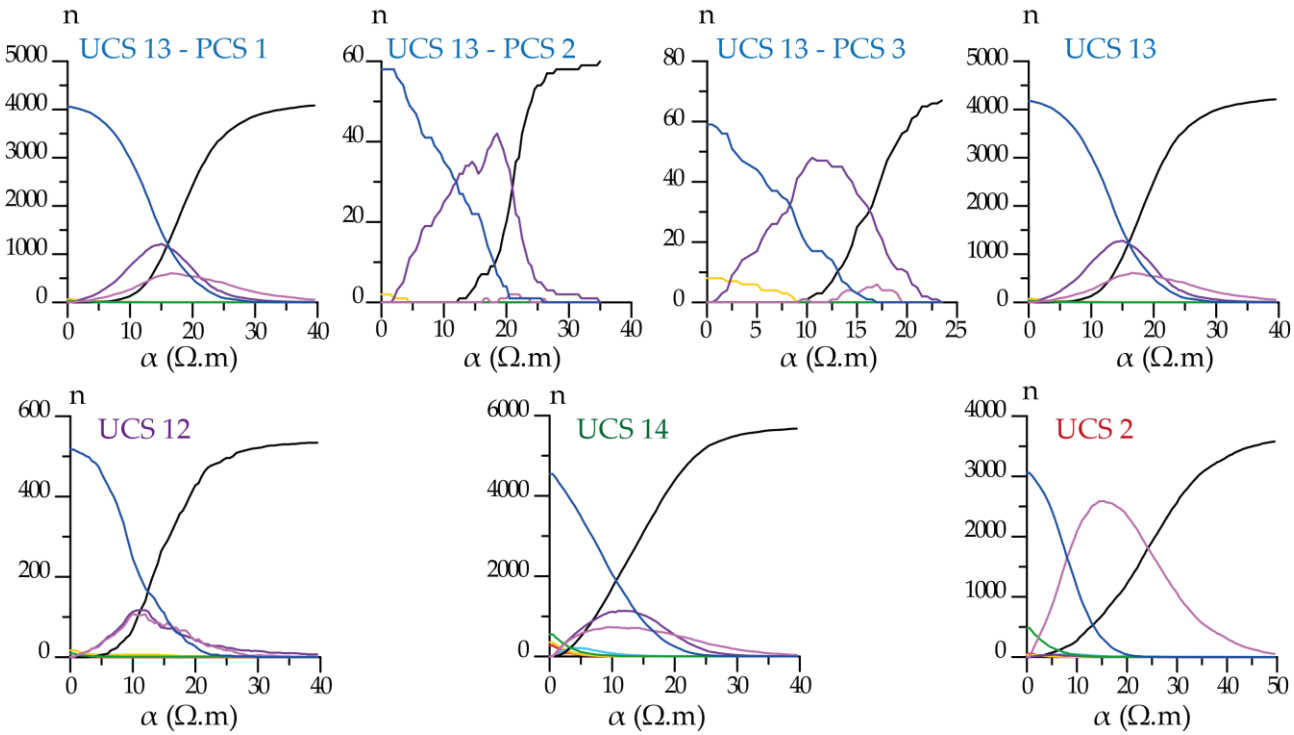


Figure 60. Courbes des densités de profils-types sur les UCS 12, 13, 14 et 2 en fonction du paramètre α (Légende figure 59)

- UCS 12, 13 et 14

Ces 3 UCS, tout à fait comparables, sont constituées de sondages ayant l'allure du profil-type Q sur une gamme relativement grande de valeurs prises par α : de 0 jusqu'à 13 Ω.m pour l'UCS 12, 16 Ω.m pour l'UCS 13 et 11 Ω.m pour l'UCS 14. Mises à part les PCS 2 et 3 de l'UCS 13 (petites et en bordure de carte), tous les graphes indiquent une transition directe de l'état de terrain 3 couches à un terrain électriquement homogène. Si l'étude pédologique définit 3 types de sols différents, la méthode d'exploitation des données électriques proposée ici ne semble pas permettre de les différencier.

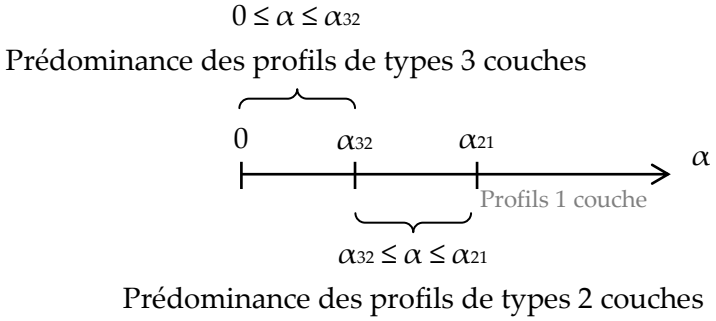
- UCS 2

L'UCS 2, ne comportant qu'une plage cartographique, est caractérisée par la présence clairement majoritaire de sondages électriques de types Q pour $0 \leq \alpha \leq 8$ Ω.m et celle tout aussi marquée de sondages de types R1C23 pour α de 8 à 25 Ω.m. Il s'agit de l'UCS qui atteint l'état électriquement homogène le plus tardivement lors du balayage de valeurs par le paramètre α.

3.1.3. Comparaison avec taxons pédologiques et synthèse

Le Tableau 14 récapitule pour chaque UCS :

- le nom des profils-types correspondant
  - au terrain 3 couches le plus représenté
  - au(x) terrain(s) 2 couches le(s) plus représenté(s)
- les valeurs des α de transition α_{32} et α_{21} qui délimitent les gammes de α pour lesquelles les profils-types suscités prédominent sur l'UCS :



- le nom du ou des profils-types présagés par la définition pédologique du type de sol
- la gamme de α, $\Delta\alpha_{eq}$, où concordent (si concordance il y a) les noms
  - des profils-types observés électriquement
  - des profils-types attendu d'après la typologie pédologique

Et, dans le cas où la transition 3 couches vers 1 couche est directe c'est-à-dire où $\alpha_{21}=\alpha_{32}$:

- la valeur $\alpha_{densMax(2c)}$ pour laquelle le nombre de profils-types correspondant au terrain 2 couches le plus représenté (mais non majoritaire) est maximal

Si dans l'ensemble, les sondages deviennent relativement rapidement ceux d'un terrain homogène, ceux appartenant à des unités cartographiques de sol sur argile lourde (UCS 2, 12 et 13) tardent davantage à le devenir ; cela témoigne de la sensibilité particulière de la

mesure électrique à la présence d'argile, qui augmente le contraste entre les valeurs de résistivité apparente observées au sein d'un sondage.

Au regard du Tableau 14, les allures des sondages électriques appartenant aux UCS 1, 3, 4 sont cohérentes avec le profil-type H prédit par la pédologie sur une gamme de α, commune aux 3 UCS : de 0 à 4 Ω.m. Même observation, pour les profils de type Q des UCS 2, 13 et 14 qui concordent, sur une gamme commune de α de 0 à 8 Ω.m avec les estimations de la typologie pédologique.
En revanche, l'UCS 12, pour laquelle le profil-type H était attendu d'après le nom de l'unité, ne comporte quasiment pas de sondages de ce type quelle que soit la valeur de α. Le substrat calcaire de ces sols, bien qu'en moyenne, apparaissant entre 60 et 70 cm de profondeur selon la carte pédologique, n'est visiblement pas détecté.

UCS	**Profil 3 couches**	α_{32} **(Ω.m)**	**profil(s) 2 couches**	α_{21} **(Ω.m)**	$\alpha_{densMax(2c)}$ **(Ω.m)**	**profil(s)-type(s) pédologique(s)**	$\Delta\alpha_{eq}$ **(Ω.m)**
1	**H**	5,5	R1C23 et C12R3	9		**H**	$0 \leq \alpha \leq 5,5$
3		4,5	C12R3	10		C12R3 ou **H** (ou C1R23)	$0 \leq \alpha \leq 4,5$
4		4	C12R3	12		**H** ou C12R3	$0 \leq \alpha \leq 4$
5	A	5,5	**C12R3**		7	C1R23 ou **C12R3** (ou H)	$\alpha \sim 7$
6		4,5			5,5	**C12R3** ou H	$\alpha \sim 5,5$
7		4			6	H ou **C12R3**	$\alpha \sim 6$
15		5			7	**1 couche** (ou R1C23 ou C12R3 ou C1R23)	$\alpha \geq 5$
12	**Q**	12	R12C3 et R1C23		11	H	pas de concordance
13		16	R12C3		15	**Q** ou H	$0 \leq \alpha \leq 16$
14		11	R12C3		12	**Q**	$0 \leq \alpha \leq 11$
2		8	R1C23	25		**Q** ou H	$0 \leq \alpha \leq 8$

Tableau 14. Synthèse sur la prédominance des profils-types par UCS et gamme de α pour lesquelles il y a concordance entre profils-types électriques observés et profils-types anticipés par la typologie pédologique

L'unité cartographique 15 correspondant aux colluviosols et pour laquelle un profil-type 1 couche est attendu, voit une grande partie de ses sondages correspondre à un terrain homogène pour des valeurs de α au-delà de 5 Ω.m.
Enfin, les sondages des plages cartographiques 5, 6 et 7, subissent une transition directe du type 3 couches vers le type 1 couche, et l'un des profils-types attendus pour ces UCS est celui correspondant au terrain 2 couches C12R3. Or, les profils du type C12R3 sont très présents sur l'UCS, mais jamais prédominants ; la densité maximale de profils C12R3 sur ces UCS se retrouve pour des valeurs de α entre 5 et 7 Ω.m.

La plupart des prédictions sur les profils-types attendus pour chacune des UCS sont vérifiées par les profils de résistivité apparente obtenus expérimentalement. Néanmoins il demeure difficile d'attribuer au paramètre α une valeur telle qu'il y ait une concordance systématique, pour toutes les UCS, entre profils-types prédits par la typologie pédologique et profils-types obtenus par la prospection électrique. Cependant, cette analyse montre qu'il n'est pas nécessaire que le paramètre α atteigne des valeurs importantes ; c'est pourquoi la suite de l'étude se contente d'utiliser une gamme de faibles valeurs pour α afin d'examiner la répartition spatiale des 9 profils de résistivité établis.

3.2. Cartographie des profils verticaux de résistivité apparente pour α variant de 2 à 7 Ω.m

Les valeurs relativement faibles du paramètre α semblant transmettre l'information la plus sensée sur les variations spatiales de la distribution des sols, une gamme de α allant de 2 à 7 Ω.m est exploitée pour cartographier les profils de résistivité. Cette cartographie va permettre :

- de se rendre compte qualitativement de la forte représentation ou non de chacun des profils-types sur les zones prospectées
- de voir s'il existe une cohérence spatiale entre les sondages présentant le même profil de résistivité
- d'observer d'éventuelles concordances entre "nuages" de profils-types et unités cartographiques de sol

3.2.1. Organisation spatiale des profils-types dominants

L'annexe 5 présente la répartition des profils-types dominants pour α de 2 à 7 Ω.m par pas de 1 Ω.m pour chacune des zones prospectées sur la parcelle de Ouarville. Seules les cartes les plus pertinentes sont présentées ici.

a) Zone ouest

Pour α=2-3 Ω.m, les profils omniprésents sur la zone ouest de Ouarville correspondent à des terrains 3 couches, de type Q (╲) et A (╱). Ceux-ci se muent naturellement en des profils dérivés correspondants à des terrains 2 couches conducteur sur résistant pour le premier et résistant sur conducteur pour le second : pour α=3-4 Ω.m, les sondages de type Q tendent à

devenir des profils d'allure principalement R12C3 (plutôt que R1C23) et les sondages de types A des profils de type C12R3 (plutôt que C1R23). Cette évolution dans chacun des cas indique que ce sont les résistivités enregistrées sur les voies 1 et 2 de l'appareil qui s'égalisent quand α augmente et que la valeur de résistivité :

- $\rho 3$ des profils-types Q est particulièrement faible d'où $\rho 1 > \rho 2 >> \rho 3$
- $\rho 3$ des profils-types A est particulièrement élevée d'où $\rho 1 < \rho 2 << \rho 3$

Ce constat sur les contrastes de résistivité est d'autant plus vrai qu'il repose sur l'exploitation de données de résistivités apparentes issues de mesures intégratives ; en données interprétées les contrastes observés seraient exacerbés.

La Figure 61 (cartographie pour α=4 Ω.m) montre que, schématiquement, la zone ouest se scinde en deux parties avec une complémentarité des distributions des profils-types Q et R12C3 d'une part et des profils-types A et C12R3 d'autre part. Cette figure révèle une forte cohérence spatiale des profils-types Q et R12C3 qui se retrouvent en masse sur une moitié de la zone prospectée et forment 2 ou 3 nuages de points dans l'autre moitié. Les profils A et C12R3 en revanche sont totalement absents du NO de la zone et couvrent une grande partie du SE.

En outre, les sondages d'allure correspondant à un terrain homogène sont relativement très présents même pour α faible : dès 2-3 Ω.m, une quantité non négligeable de profils-types 1c est présente et l'organisation spatiale des profils ne semble pas être complètement due au hasard : la Figure 61b, pour α=4 Ω.m fait apparaître notamment un ruban de profils 1c selon l'axe NE SO, comme une transition entre les groupes de profils Q et A évoqués précédemment. La position des profils-types 1c dans l'ensemble sont un complément aux zones clairsemées des Figure 61 a et c combinées.

Si les profils-types Q (╲), A (╱) et 1c (—) semblent couvrir presque intégralement la zone prospectée, les profils-types H (∨) et K (∧) demeurent en revanche quasi-inexistants quelle que soit la valeur de α.

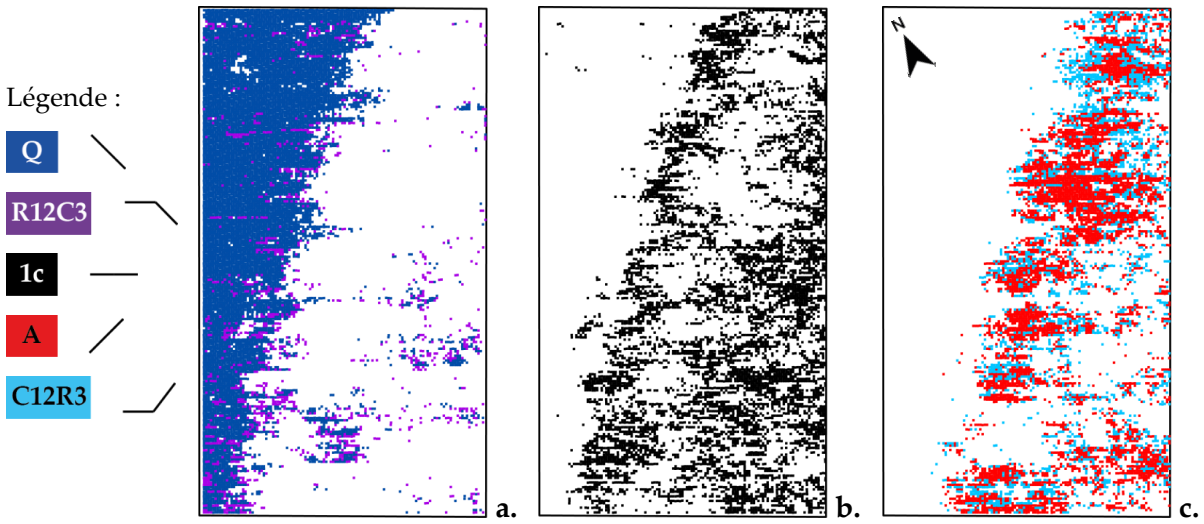


Figure 61. Distribution spatiales des profils-types prédominants sur la zone ouest de Ouarville : Q et R12C3 (a), 1c (b) et A et C12R3 (c) pour α=4 Ω.m

b) Zone est

Trois profils-types sont quasi inexistants sur la zone est : K (∧), C1R23 (⌐) et R12C3 (¬). La répartition des 6 autres, de α=2 à 7 Ω.m (annexe 5), varie assez peu lorsqu'ils sont cartographiés par couples :

- profils-types A (/) et C12R3 (_/)

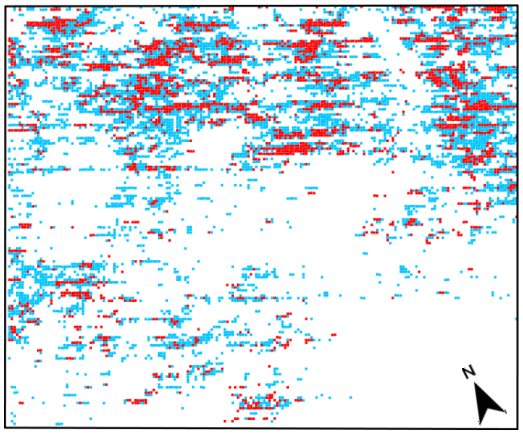
Quelle que soit la valeur prise par α, ces 2 profils-types occupent principalement le NE de la carte (Figure 62a). L'augmentation de α ne modifie pas ou très peu leur distribution, mais conduit plutôt à une transformation des quelques profils-types A visibles pour α=2 Ω.m en profils C12R3, qui deviennent très rapidement majoritaires.

- profils-types Q (\) et R1C23 (_)

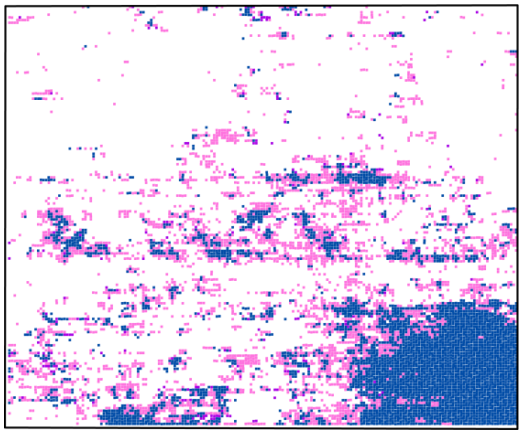
Ces profils-types font preuve d'une cohérence spatiale évidente dans le coin SE de la carte (Figure 62b) ; quelques groupes de points sont également observables au centre. Si la répartition de ces profils-types est quasiment inchangée pour la gamme de valeurs α testée, la conversion des profils de type Q en profil R1C23 quand α augmente est très nette (annexe 5). Cette progression, vers une égalisation des résistivités enregistrées voies 2 et 3 du dispositif de mesure, amène à l'hypothèse de contraste de résistivité suivant : $\rho 1 >> \rho 2 > \rho 3$.

- Profils-types 1c (—) et H (∨)

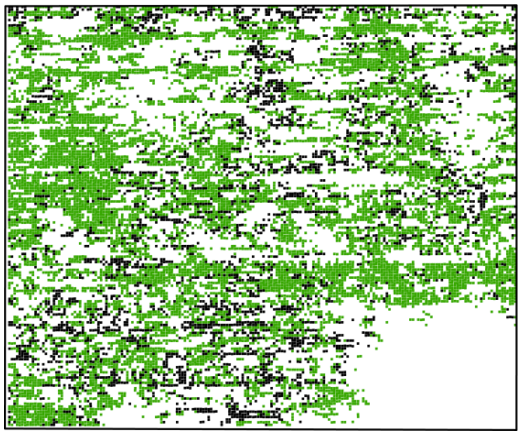
Parmi les 9 profils-types établis, les profils H (et par suite les profils 1c lorsque α croît) sont les plus abondants sur cette zone (Figure 62c). Sans forcément relever d'une organisation spatiale particulière, ils couvrent l'ensemble de carte, hormis le coin SE. La transformation des profils-types H en profil correspondant à un terrain homogène s'effectue principalement pour α=4-5 Ω.m (annexe 5).



a.



b.



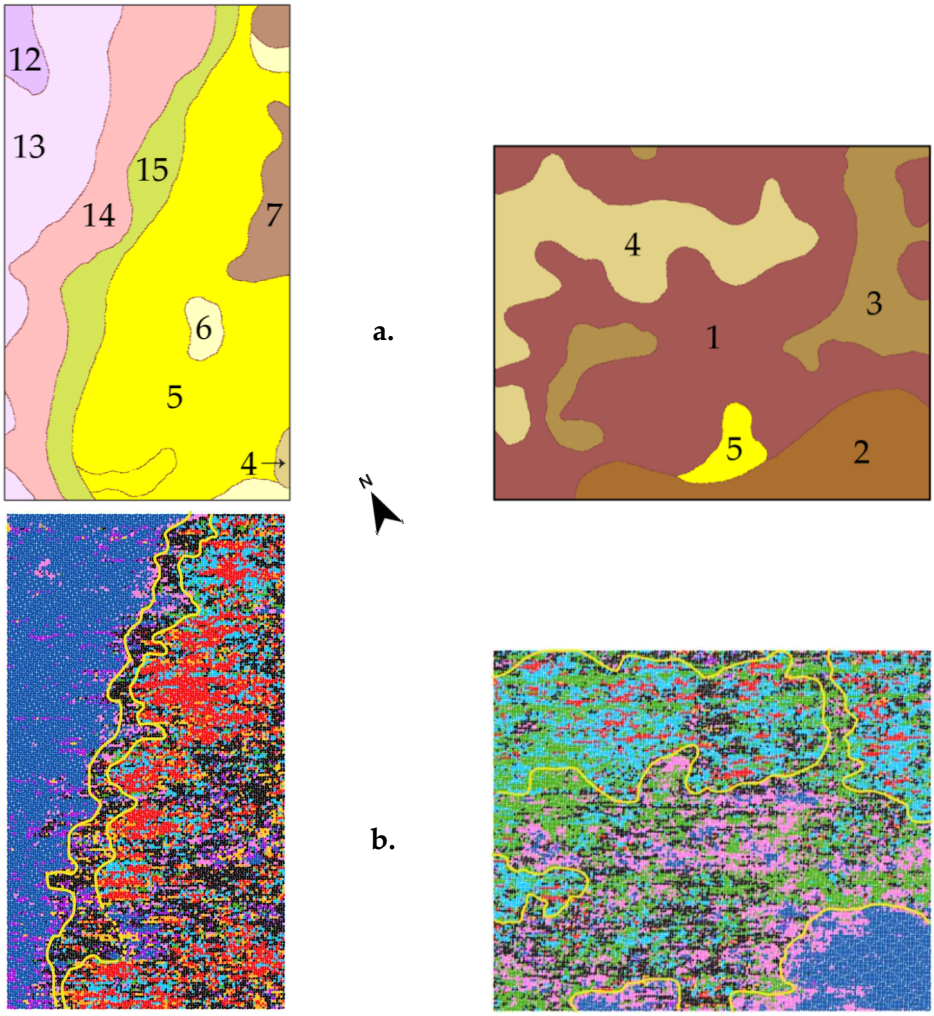
c.

Figure 62. Distribution spatiales des profils-types prédominants sur la zone est de Ouarville : A et C12R3 (a), Q et R1C23 (b) et 1c et H (c) pour α=3 Ω.m

Rappel légende : A / C12R3 _/ Q \ R1C23 _ H ∨ 1c —

3.2.2. Correspondance avec la carte des sols et synthèse

L'annexe 6 montre, pour la gamme de α testée, les cartes de l'ensemble des profils-types définis, auxquelles sont superposées les délimitations d'UCS. Le géoréférencement des données étant imparfait, la Figure 63 expose séparément les délimitations de PCS (Figure 63a) et les délinéations possibles par la cartographie des profils de résistivité pour α=4 Ω.m (Figure 63b).



Légende :

A	C1R23	K
C12R3	1c	R12C3
H	R1C23	Q

Figure 63. Comparaison des délinéations possibles par la cartographie de profils de résistivité pour α=4 Ω.m (b) avec les délimitations de PCS (a)

Une des principales observations de cette étude est la concordance remarquable, pour les 2 zones prospectées, entre les délimitations :

- des ensembles où le profil Q (╲), en bleu foncé, est abondamment présent,
- des UCS 12, 13 (pour la zone ouest) et 2 (à l'est) qui sont tous des néoluvisols sur argile lourde.

Cette concordance confirme les prédictions pédologiques qui proposaient d'associer le profil Q à ces UCS. En outre, les zones délimitables par la cohérence spatiale des sondages d'allure Q sont très peu, voire pas du tout, entachées par la présence d'autres profils-types. Ce constat corrobore l'assertion selon laquelle la présence d'argile influe fortement sur la mesure de résistivité électrique.

Cependant, l'UCS 14 de la zone ouest, qui correspond à des néoluvisols sur limon, est en grande partie recouverte de profil Q alors que le profil-type H y était attendu. Cette non distinction des limons par rapport aux argiles est peut-être due à la profondeur importante des néoluvisols de l'UCS 14 dont le substrat calcaire apparaît au-delà de 90 cm (annexe 4).

La zone ouest présente un autre groupement de profils de types A (╱) et C12R3 (▁╱) (en rouge et bleu clair) qui semble concorder avec une grosse partie de l'UCS 5, pour laquelle la description pédologique prévoyait une présence majoritaire de profil C1R23 (╱▔).

Cette différence entre le résultat expérimental et la prédiction théorique trouve peut-être son explication dans le fait que les données exploitées sont des résistivités apparentes. En effet l'information contenue dans la mesure de résistivité enregistrée sur les plus grands quadripôles prend aussi en compte l'information des mesures réalisées par les quadripôles de dimension moindre.

Si, pour des sols courts comme les calcisols ou calcosols concernés ici, il est vraisemblable de supposer que la résistivité ne varie plus avec la profondeur une fois le substrat atteint – et donc de s'attendre à des profils de résistivité de type C1R23 – cette possibilité ne doit pas conduire à la présomption que les résistivités enregistrées sur les voies 2 et 3 doivent être équivalentes sous prétexte qu'elles résultent toutes deux de la réponse du substrat. En effet, ayant à faire à des propriétés apparentes, la mesure enregistrée sur la troisième voie de l'appareil intègre un volume de substrat plus important que celle de la voie 2, pouvant conduire ainsi à un profil de résistivité croissante de type A.

Si la profondeur d'apparition du substrat est le premier motif justifiant la présence de profils-types C12R3 à la place des profils-types attendu C1R23, le fait de travailler en résistivité apparente peut également être une explication : il est possible que la mesure enregistrée sur la voie 2 soit affectée par le niveau plus conducteur en surface, et donc sous-estimée par rapport à une valeur réelle de résistivité.

A la jonction entre les deux ensembles de sondages, d'allure Q et A, évoqués précédemment, le ruban de profils de type majoritairement 1c semble concorder avec la bande de colluviosols pour lesquels le profil-type attendu était effectivement celui d'un terrain homogène. Ce groupe de profils-types apparaît notamment pour α=4-5 Ω.m sans pour autant que les autres sondages de la carte aient atteint l'allure 1c qui leur est destinée si α prend de trop grandes valeurs.

La Figure 63b indique la délinéation, sur la zone est, d'ensembles de profils-types C12R3. Le groupe constitué par ces profils dans le coin NE de la carte semble correspondre à l'UCS 3, UCS à laquelle l'expertise pédologique a justement associé le profil de type C12R3.
La circonscription des deux autres ensembles de profils-types C12R3 pourrait grossièrement être assimilée à la délimitation de l'UCS 4 pour laquelle sont attendus des profils de type H[8]. Cette discordance entre profils-types attendus d'après la description pédologique et profils-types obtenus expérimentalement peut s'expliquer par la profondeur d'apparition du calcaire qui est d'en moyenne 55 cm sur l'UCS. Par conséquent, le niveau argileux de ces néoluvisols ne peut être que relativement fin et donc non forcément détecté par le dispositif de mesure.
L'aspect intégratif des mesures de résistivité électrique peut là encore justifier le nombre non négligeable de profil A présents parmi les profils C12R3.

Le centre de la zone (non délimité mais visible sur la Figure 63b) est caractérisé par des profils-types R1C23 alors qu'en pleine UCS 1, correspondant aux néoluvisols profonds sur calcaire cryoturbé, le profil attendu devrait être de type H. Ces petits ensembles où le substrat ne semble pas être détecté coïncident peut-être avec des zones où sa profondeur d'apparition est particulièrement importante.

En résumé, la cartographie des taxons géophysiques établis a permis de mettre en évidence la prédominance, à Ouarville, des profils-types : Q, H, C12R3 et 1c. Ceux-ci concordent plus ou moins avec plusieurs unités cartographiques auxquelles il est possible d'attribuer une description sommaire commune (Tableau 15).

profil-type observé	…. sur les UCS	Caractéristiques des sols correspondants
Q ╲	2 12 13 14	néoluvisols dont la profondeur du substrat est > 60 cm
H ╲╱	1 3 4	néoluvisols dont la profondeur du substrat est < 60 cm
C12R3 ⎽╱	5 6 7	brunisols, calcisols, calcosols
1c —	15	colluviosols

Tableau 15. Profils de résistivité observés sur la parcelle de Ouarville et caractéristiques des UCS correspondantes

La présence inattendue de profils-types A (╱) s'explique par le fait que les données exploitées sont des propriétés apparentes. Enfin, lorsque α augmente, le profil-type Q évolue vers les profils-types dérivés R1C23 (╲⎽) et R12C3 (¬╲) – ce dernier ne figurant pas dans les profils envisagés par la description pédologique –, correspondant à un terrain 2 couches

[8] L'UTS 4 regroupant à la fois des néoluvisols et des calcisols, se référer à l'annexe 4 pour savoir quel type de sol est attribué à chaque plage cartographique de la parcelle ; ici, l'UTS de la zone prospectée correspond à un néoluvisol.

"résistant sur conducteur". Au final, 4 profils-types (éventuellement 5 en comptant le R1C23), sur 6 définis par la typologie pédologique comme étant ceux susceptibles d'être rencontrés sur la parcelle de Ouarville, ont réellement été observés.

3.3. Mesure de la ressemblance entre ME et MP

3.3.1. Application du calcul de distance matricielle

L'objectif ici est de voir s'il est possible, à l'aide du calcul de la distance entre ME et MP, de retrouver des résultats similaires à ceux obtenus précédemment, dans la partie 3.2, en terme de cohérence spatiale de profils de résistivité.

Pour cela, la gamme de valeurs de résistivité balayée par α, de 2 à 7 Ω.m, est conservée pour le calcul de distance matricielle. Les ME de tous les points de mesures d'une zone prospectée sont donc remplies pour 6 valeurs de α, puis, à l'issue de ce remplissage, les 9 distances normalisées $d(profil - type)$ sont calculées (bien que 6 MP n'aient été retenues comme envisageables).
Ce procédé permet alors d'établir des cartes de ressemblance entre l'allure des sondages obtenus sur la zone prospectée et l'allure de chaque profils-types théoriques.

3.3.2. Cartographie de ressemblance entre sondages électriques issus de la prospection et taxons établis

La Figure 64 représente, pour les deux zones prospectées de Ouarville, les 9 cartes de distances matricielles calculées. Les points en noirs correspondent à de faibles distances entre sondages et taxons, et donc à une forte ressemblance.

a) Zone ouest

Les 4 profils de résistivité, dont les sondages de la zone sont les plus proches, sont de type : A, C12R3, 1c, Q. Ce constat rejoint les résultats obtenus par la cartographie des profils de résistivité apparente (Figure 61 section 3.2), qui désignaient ces profils-types comme prédominants sur la zone prospectée. En outre, l'organisation spatiale des particulièrement faibles distances, $d(A)$, $d(C12R3)$, $d(1c)$ et $d(Q)$, est assez comparable à celle des profils-types prédominant de la Figure 61.
Les conclusions quant à la mise en lien des zones de forte ressemblance entre sondages et taxons avec les délimitations d'UCS sont donc assez similaires à celles établies lors de la correspondance entre cartographie de profils-types et types de sols (section 3.2.2) ; il existe une forte ressemblance entre :

- profil-type Q et sondages appartenant aux UCS 12, 13 et 14 (carte en bas à droite)
- profils-type 1c et les sondages de l'UCS 15 (carte centrale)
- profils-types A et C12R3 et sondages de l'UCS 5 (2 1ères cartes de la 1ère colonne)

b) Zone est

Les taxons auxquels les sondages de la zone ressemblent le plus sont les profils-types C12R3, H, R1C23 et Q. La répartition des zones de forte ressemblance avec les taxons – cartes de $d(C12R3)$, $d(H)$, $d(R1C23)$ et $d(Q)$ – coïncide ici encore avec celle des profils-types prédominants cartographiées Figure 62 (section 3.2). Ainsi :

- les sondages du NE de la carte sont d'allure proche du profil-type C12R3 (carte de la 2ème ligne 1ère colonne) et leur disposition pourrait concorder avec l'UCS 4 de la carte des sols (Figure 63a)
- les sondages du coin SE de la carte ont l'allure du profil de type Q (carte en bas à droite) et sont situés sur l'UCS 2
- les sondages d'allure proche des profils-types H et R1C23 se répartissent sur le reste de la carte (2 1ères cartes de la dernière ligne)

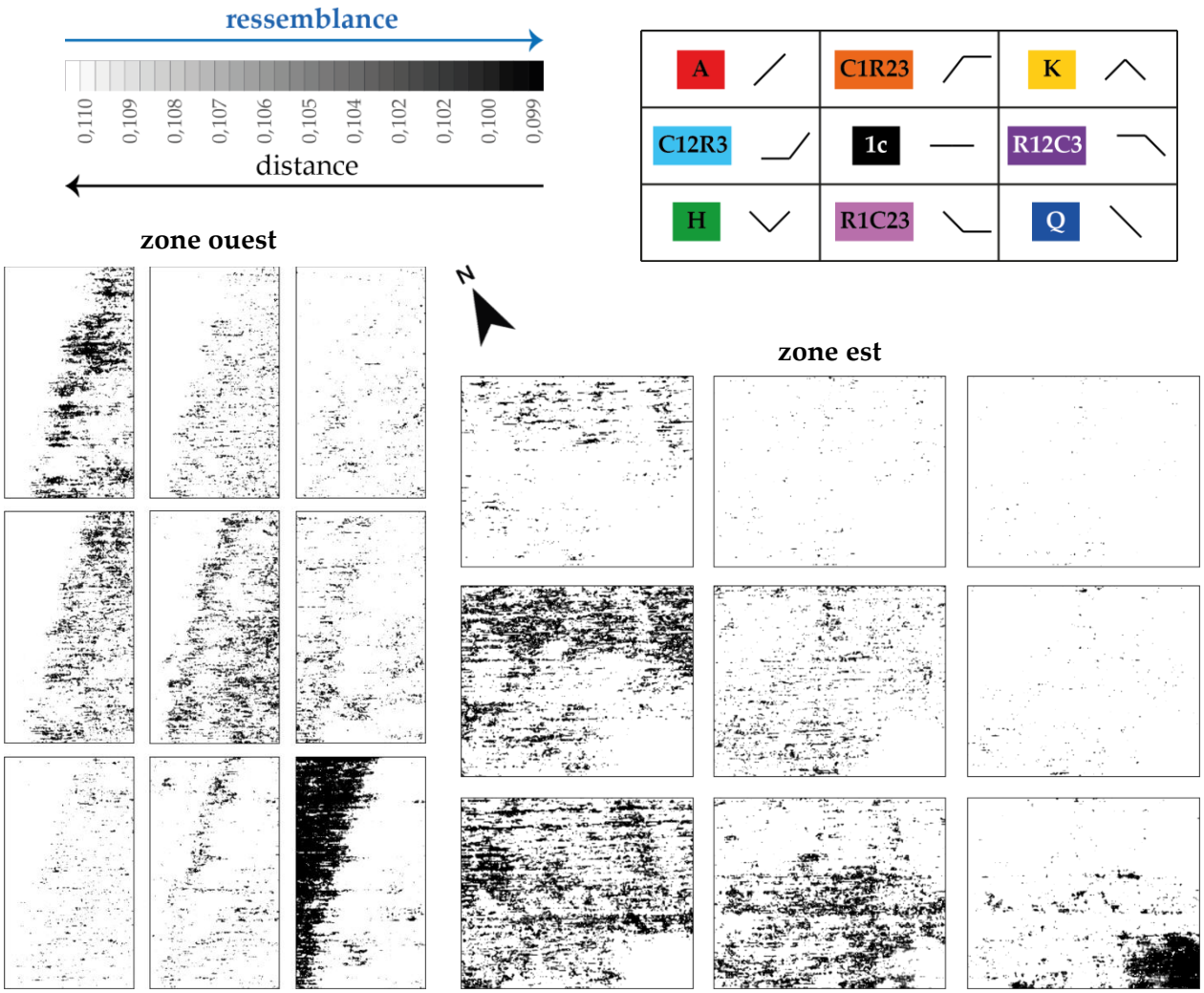


Figure 64. Cartographie de la ressemblance entre les sondages de Ouarville et chacun des profils-types établis

Pour chaque zone prospectée, la position de chacune des 9 cartes correspond à la cartographie de la distance du sondage au profil-type situé à la même position dans le tableau ci-dessus.

3.3.3. Synthèse et potentialité d'automatisation de la méthode

La cartographie des distances entre matrices électriques (remplies pour $2 < \alpha < 7$ Ω.m) et matrices pédologiques (ou autres taxons non envisagés par la typologie pédologique c'est-à-dire les matrices comportant un 1 n'importe où) a abouti aux mêmes conclusions que la cartographie des profils de résistivité pour α variant de 2 à 7 Ω.m.

- les 4 profils-types principaux dont les sondages des zones prospectées sont les plus proches sont, selon leur position géographique, ceux répertoriés dans le Tableau 15 : Q (╲), H (∨), C12R3 (_/) et 1c (—)
- la zone est présente un grand nombre de sondages ressemblant au profil-type R1C23 (╲_) ; ce profil, en revanche, ne semblait être, lors de la cartographie de profils de résistivité, que le prolongement du profil-type Q pour α grand
- les sondages de la zone ouest (en effectif relativement important) ont une allure proche d'un profil non envisagé par la typologie pédologique, le profil-type A (/) ; ce constat s'explique par le caractère apparent des résistivités exploitées
- quelle que soit la zone prospectée, les sondages ne présentent aucune ou très peu de ressemblance avec les profils-types K (∧) et R12C3 (¯╲) dont la typologie pédologique n'avait pas prédit la présence sur Ouarville, ainsi qu'avec le profil C1R23 (/¯)

Cette concordance entre les observations issues de la cartographie de profils-types et de la cartographie de la ressemblance entre sondages et taxons établis, amène à penser que le calcul de distance matricielle pourrait constituer un premier pas vers l'automatisation de la méthode. En effet, il s'avère difficile d'attribuer une valeur au paramètre α, différentiateur de couches résistives, de sorte qu'il y ait, sur l'ensemble des UCS, une concordance systématique entre l'allure des sondages électriques mesurés et l'allure que prédirait la typologie pédologique. De plus, l'évolution rapide des cartes de profils-types lorsque α varie indique une grande sensibilité des sondages à ce paramètre. Par conséquent, si sa valeur était fixée (entre 3 et 5 Ω.m par exemple) en se basant sur les données de Ouarville, il semble peu probable que cette même valeur soit adaptée à un autre jeu de données. Cependant, si la cartographie de profils de résistivité a nécessité le test de plusieurs valeurs pour le paramètre α, la cartographie de la ressemblance entre sondage et taxons s'affranchit de cette contrainte en exploitant une gamme de valeurs de résistivité pour α. Il est alors plus probable que cette gamme de valeurs balayées par α s'adapte davantage à des données issues d'autres prospections.

La partie suivante propose justement d'appliquer ces 2 types de cartographie – de profils-types et de distance matricielle – à d'autres données, celles de l'Orgeval. Ainsi il va être possible 1)de voir si les profils-types les plus présents (sur les cartes de répartitions de profils-types) sont également ceux dont les sondages sont les plus proches (sur les cartes de ressemblance) et 2)de conclure quant à la pertinence de la gamme de valeurs de résistivité couverte par α.

4. Mise en œuvre sur les données d'Orgeval

4.1. Cartographie des profils verticaux de résistivité apparentes pour 2 Ω.m < α < 7 Ω.m

La Figure 65 présente la répartition, sur la parcelle de l'Orgeval, des 9 profils-types établis, pour les 2 espacements inter-profils utilisés – 6 m sur la parcelle entière et 1 m sur la zone sélectionnée.

- Profils-types prédominants

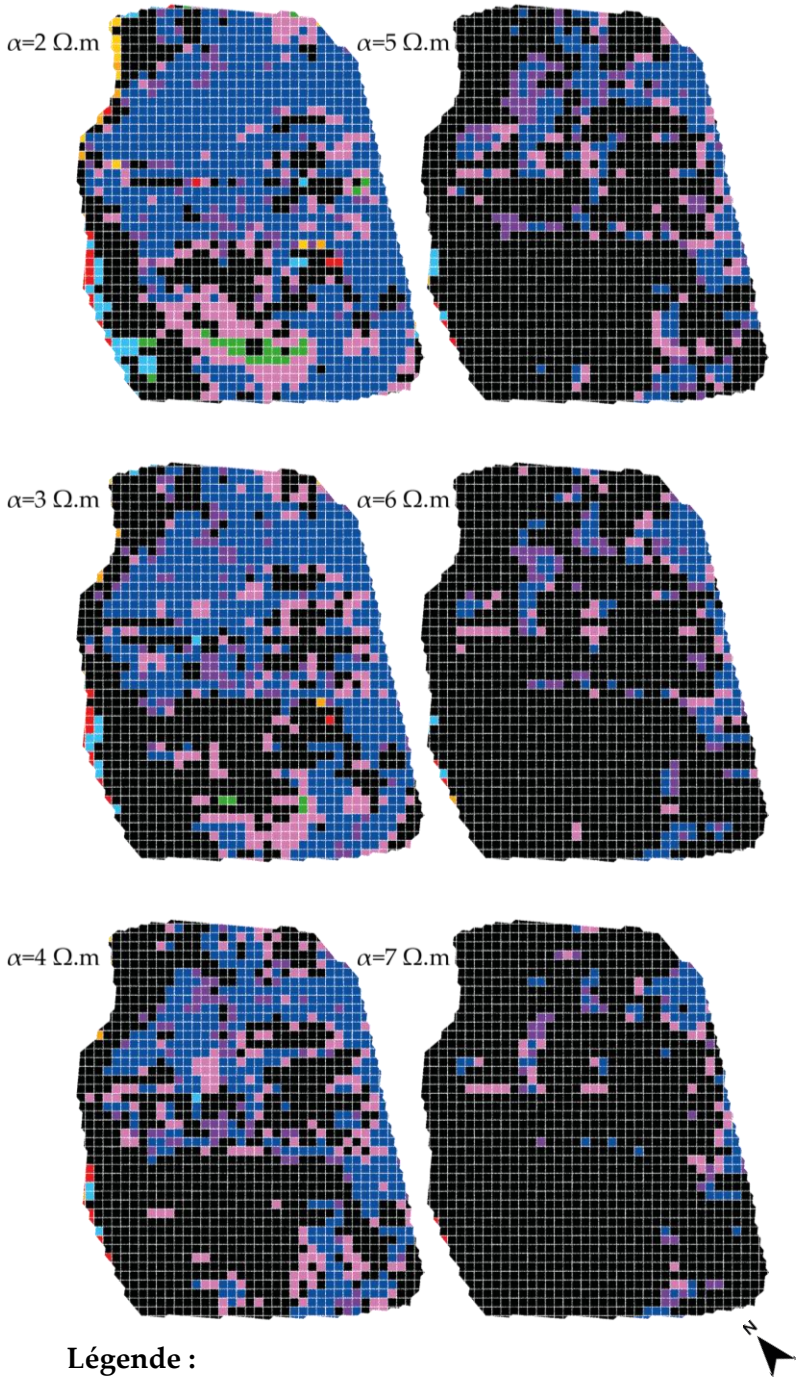
Les profils de résistivité les plus présents sur la parcelle pour la gamme de α utilisée sont les profils-types Q (╲), R12C3 (⌐╲), R1C23 (╲_) et 1c (—), les autres sont quasi inexistants. Ces types de profils témoignent d'un terrain de conductivité croissante avec la profondeur, ce qui est cohérent avec la présence d'argile (argiles vertes de Romainville) relativement proche sous la surface, parfois directement en-dessous de la couche de labour.
Les cartes de la zone sélectionnée ne comportent quant à elles que 3 profils-types : Q, R12C3 et 1c.

- Cohérence spatiale des profils-types

Pour α=2 Ω.m, sur la parcelle entière, les profils correspondant à un terrain homogène sont principalement concentrés au bord du ru (coté ondulé de la carte au NO) ; l'organisation spatiale particulière de ces sondages pourrait correspondre à une zone de colluvions particulièrement uniforme. Il existe une cohérence spatiale des sondages d'allure R1C23 (nuage de points en rose), visible au SO de la parcelle. Le reste de la parcelle est principalement couvert par des profils de résistivité de type Q au milieu desquels s'insèrent quelques éparses profils-types R12C3.
La zone sélectionnée possède des ensembles très "purs" de profils-types Q (╲), R12C3 (⌐╲) et 1c (—) ; en effet, quelle que soit la valeur de α, ces ensembles sont très bien délimités et peu entachés d'autres types de profils de résistivité.

- Evolution des sondages pour α croissant

Que ce soit pour la parcelle entière ou pour la zone choisie, les sondages, dans l'ensemble, atteignent très rapidement l'état correspondant à un terrain homogène : pour α=7 Ω.m, la parcelle est considérée homogène quasiment intégralement.
Les autres transitions, toutes aussi rapides lorsque α augmente, sont logiques : les profils-types R1C23, présents pour α=2 Ω.m et correspondant à un terrain 2 couches, se transforme naturellement en profil correspondant à un terrain 1 couche. Les profils de résistivité de type Q, avant d'atteindre l'état correspondant à un terrain homogène, passent parfois par une allure traduisant un terrain 2 couches – terrain résistant sur conducteur –, de type R12C3 ; ceci est encore plus visible sur la zone sélectionnée (quand α croît, "les sondages en violet gagnent du terrain sur les sondages en bleu et ceux en noir gagnent du terrain sur ceux en violet").



Légende :

A	C1R23	K
C12R3	1c	R12C3
H	R1C23	Q

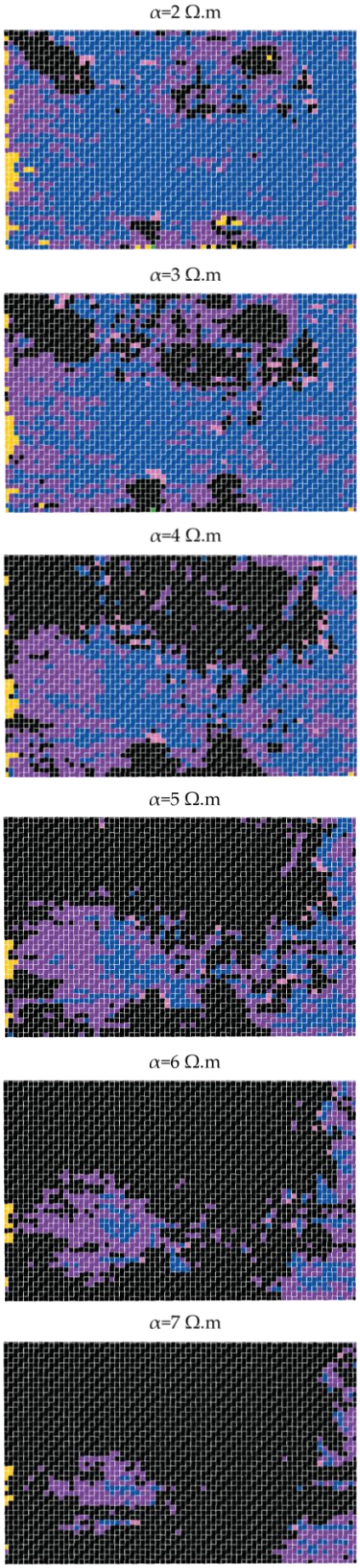


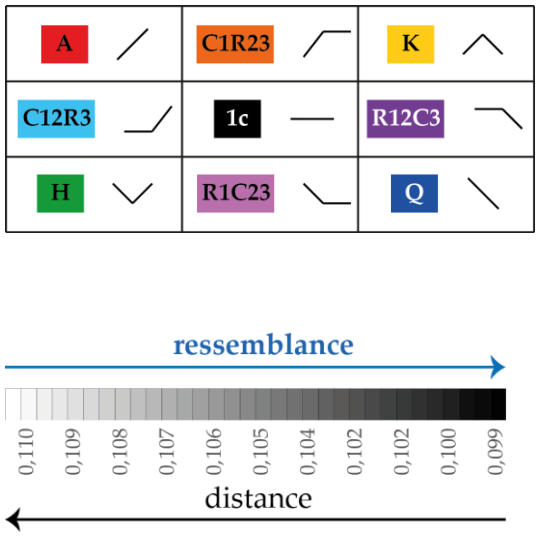
Figure 65. Cartographie des 9 profils-types établis sur la parcelle de l'Orgeval (ci-dessus) et sur la zone sélectionnée (à droite) pour α variant de 2 à 7 Ω.m

4.2. Application du calcul de distance matricielle

Comme pour les données de Ouarville, les matrices électriques des sondages de l'Orgeval sont remplies pour α variant de 2 à 7 Ω.m. La ressemblance entre ME et taxons établis est ensuite cartographiée (Figure 66).

Comme attendu, seules les cartes de ressemblance aux profils Q, R12C3, 1c et R1C23 (pour la parcelle entière) laissent apparaître des amas de points ; les autres profils-types étant inexistants sur les prospections.

Pour chaque zone prospectée, la position de chacune des 9 cartes correspond à la cartographie de la distance du sondage au profil-type situé à la même position dans le tableau ci-dessous.



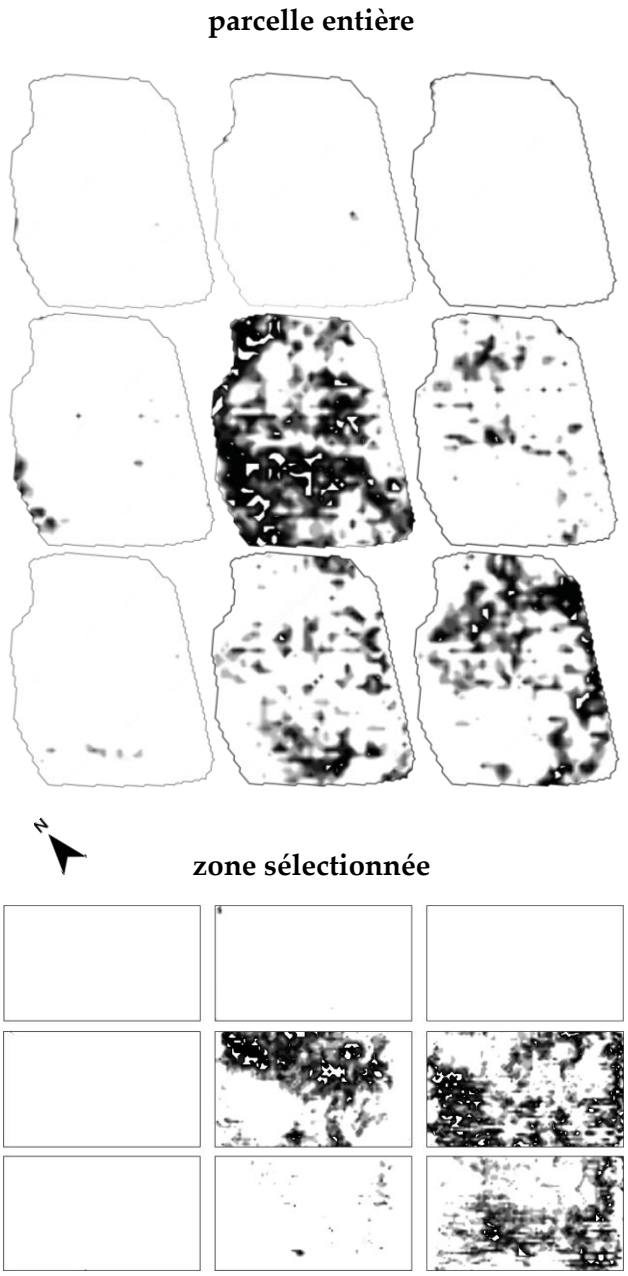


Figure 66. Cartographie de la ressemblance entre les sondages de l'Orgeval et chacun des profils-types établis sur la parcelle entière (haut) et sur la zone sélectionnée (bas)

Comme l'évolution des cartes de profils-types est très rapide lorsque α varie – plus encore que pour les données de Ouarville – il est difficile de confronter les cartes de répartition des profils-types à celles de ressemblance $d(Q)$, $d(R12C3)$, $d(R1C23)$ et $d(1c)$. Les principales observations sur l'organisation spatiale des faibles distances matricielles sur la parcelle complète sont :

- il existe une zone, visible au SO, qui présente des sondages s'apparentant fortement au profil-type R1C23 (Figure 66, carte du milieu dernière ligne) à l'endroit où il y avait une concentration de ces profils de résistivité sur la cartographie de profils-types pour α=2 Ω.m (Figure 65)
- la répartition des sondages proches du profil-type Q (Figure 66, carte en bas à droite), est assez équivalente à celle de ces mêmes profils-types sur la Figure 65 pour α=4 Ω.m
- les sondages présentant une forte ressemblance avec le profil de résistivité traduisant l'homogénéité du terrain couvrent une grande partie de la parcelle (Figure 66, carte centrale) ; cette répartition est un peu l'équivalente de celle des profils-types 1c pour α=5 Ω.m

Concernant la zone sélectionnée, la répartition des zones de forte ressemblance aux profils-types Q (╲), R12C3 (⌐╲) et 1c (—) est comparable à la répartition de ces mêmes profils-types pour α=5 Ω.m (Figure 66).

4.3. Synthèse et discussion sur la valeur du paramètre α

L'application de la méthode de cartographie de profils de résistivité a montré la prédominance, sur la parcelle de l'Orgeval, des profils-types Q (╲), R12C3 (⌐╲), 1c (—) et de quelques profils-types R1C23 (└╲). Ces profils-types présentent une organisation spatiale probablement non due au hasard, notamment sur la zone sélectionnée où chaque groupe de sondages de même allure est très bien délimité et très pur, quelle que soit la valeur de α. Ce rendu très net des délinéations d'ensembles de sondage d'allure commune, est probablement favorisé par le faible espacement inter-profil (1 m) utilisé lors de la prospection.

La cartographie des ressemblances entre sondages de la parcelle et taxons établis a confirmé la présence exclusive des profils-types cités ci-dessus. En revanche il est difficile de comparer ces cartes de ressemblances aux cartes de répartition de profils-types tant ces dernières sont sensibles à la valeur du paramètre α. En effet, les zones de forte ressemblance entre sondages et taxons coïncident avec la répartition des taxons pour diverses valeurs de α.

Ce dernier constat pourrait remettre en cause le choix de la gamme de valeurs de résistivité balayée par α vis-à-vis de son adaptabilité à différents jeux de données. Si, dans le cas d'un site prospecté, la valeur de α était fixée, sur la base d'une bonne concordance entre délimitation d'UCS et délinéations possibles par cartographie de profils-types, cette valeur aurait peu de chance d'être adaptée à un autre site ; en particulier si l'état des sondages

électriques est instable lorsque α augmente. C'est pourquoi nous avons tenté, par la cartographie de distance entre sondages et taxons, de nous affranchir de l'attribution d'une valeur pour le paramètre α différenciateur de couches résistives. Mais il est possible que la gamme de α testée ici, soit également mal appropriée pour d'autres sites prospectés.
Un moyen de savoir si cette gamme de α est adaptée sur l'Orgeval, serait de réaliser une prospection pédologique à l'échelle de la parcelle de l'Orgeval afin de délimiter les différentes UCS qui la constituent, et de voir si ces délimitations coïncident avec les délinéations que l'on ferait d'ensembles de sondages d'allures semblables à celle des taxons définis. Enfin, l'application de la méthode sur d'autres sites d'étude, est nécessaire à sa juste évaluation.

Néanmoins, la perspective d'exploiter l'instabilité des sondages lorsque α croît est envisageable : l'évolution des sondages pour α de 2 à 7 Ω.m est peut-être liée aux variations latérale et avec la profondeur de la couche pédologique. La zone sélectionnée sur l'Orgeval semble être un très bon cas d'étude avec, lorsque que α augmente, des sondages, correspondant à un terrain 3 couches (profil-type Q) qui se muent naturellement et de proche en proche en des sondages correspondant à un terrain 2 couches (profil-type R12C3), pour enfin finir par correspondre à un terrain homogène. Il est très probable que cette évolution puisse être mise en lien avec la variation d'épaisseur ou profondeur d'horizons de sol.
Une application ultérieure de la méthode, sur la tranchée étudiée dans le chapitre IV, pourra sûrement témoigner de la signification pédologique de l'évolution des sondages lorsque le paramètre α augmente.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'importance croissante des problématiques environnementales entraîne un regain d'intérêt pour les sols. Les nombreux aléas, auxquels ils sont soumis, les fragilisent et affectent leurs propriétés. Une gestion et une protection optimales des sols passe par une connaissance approfondie de leur variabilité spatiale, y compris l'identification de zones vulnérables. L'objectif des travaux présentés était d'exploiter le pouvoir discriminant de la résistivité électrique vis-à-vis des différents horizons d'une couverture pédologique en vue d'en caractériser les propriétés géométriques et typologique.
Dans cet objectif, deux sites ont été étudiés, tous deux relevant d'un contexte d'agriculture intensive, l'un est situé en Beauce Chartraine (Eure-et-Loir), l'autre en Brie (Seine-et-Marne) dans le bassin de l'Orgeval.

Modélisation de mesures électriques multi-profondeurs

- Limites du dispositif ARP®

La modélisation de mesures ARP® pour un terrain synthétique comparable à ceux rencontrés dans le Bassin Parisien a montré en premier lieu qu'il est difficilement envisageable de déceler des structures de faible volume (inférieur à celui d'un cube de 30 cm de côté) quel que soit le contraste de résistivité entre cette structure et l'encaissant. Par ailleurs, lorsque ce contraste est important, c'est-à-dire tel que le ratio des valeurs logarithmiques de résistivité $\rho_{résistant}/\rho_{conducteur}$ dépasse 1,3, une résolution verticale décimétrique est envisageable dans les cinquante premiers centimètres, plus en profondeur, la résolution se dégrade et plusieurs décimètres s'avèrent nécessaires.
Il est donc peu probable de pouvoir distinguer, à l'aide de l'ARP®, des éléments pédologiques tels que des petites poches de cryoturbation, ou des changements ponctuels de la structure d'un horizon qui peut par exemple devenir lamellaire sous l'effet du tassement. Les résultats ont montré l'influence possible, sur la mesure de la résistivité électrique, d'un horizon de sol de 20 cm d'épaisseur, situé à une profondeur intermédiaire (50 cm) dans une couverture pédologique. Les modélisations suggèrent qu'en conditions expérimentales la mise en évidence de certaines configurations pédologiques sera favorisée par rapport à d'autres : ainsi, un niveau argileux dans une couverture limoneuse devrait se distinguer davantage qu'un horizon sableux ou qu'un horizon sec.

- Echantillonnage optimal des mesures sur le terrain

La résolution latérale de chaque quadripôle du dispositif a pu être estimée : de l'ordre de la demi-taille de l'écartement entre électrodes d'injection et électrodes de mesures de potentiel (AM/2). En outre, selon la résolution souhaitée, les modélisations ont montré qu'une

hétérogénéité était décelable pour un échantillonnage des mesures jusqu'à 2 fois la dimension latérale de l'hétérogénéité.
Ainsi, la variabilité spatiale, qui peut être d'échelle métrique sur les plateaux du Bassin Parisien, a conduit à adopter un espacement inter-profils de 1 m afin d'optimiser les conditions expérimentales de mesures et appréhender le mieux possible la variabilité spatiale des sites prospectés.

Etude expérimentale d'une tranchée

- Caractérisation des horizons pédologiques par la résistivité électrique

Les prospections électriques de surface ou bien sur la paroi de la tranchée étudiée ont fourni des résultats cohérents avec les types de sols examinés.
A l'emplacement d'un néoluvisol sur calcaire, l'analyse des résistivités pariétales, depuis la surface jusqu'au substrat, a mis en évidence l'existence d'une couche conductrice intercalée entre deux résistantes ; cette succession est cohérente avec l'unité cartographique considérée, caractérisée par un horizon labouré surmontant un horizon argileux, le tout sur un substrat calcaire. De même, un néoluvisol sur argile lourde, où la conductivité est croissante avec la profondeur, semble se manifester d'un point de vue électrique malgré la présence d'anomalies résistives.
Les mesures en surface sont également cohérentes avec les unités cartographiques prospectées. Le néoluvisol sur calcaire rend compte de résistivités apparentes particulièrement faibles enregistrées sur la voie 2 de l'ARP®, qui traduit probablement la réponse du niveau argileux, tandis que de hautes résistivités sont enregistrées sur la voie 3, valeurs liées au substrat calcaire. De même, au niveau du néoluvisol sur argile, les voies 1, 2 et 3 témoignent de résistivités décroissantes avec l'augmentation du volume investigué.
La création d'un modèle de tranchée a fourni des données modélisées de prospection de surface comparable aux données expérimentales.

- Caractérisation de la variabilité latérale de la couverture pédologique

La tranchée recoupant la limite entre les deux unités cartographiques évoquées précédemment, nous avons tenté de voir où positionner cette limite au regard des différents résultats.
Sur les 16 m de tranchée étudiés, l'expertise pédologique situerait la transition d'une unité à l'autre entre les abscisses X=5 m et X=8 m. Malgré des données bruitées, la prospection de surface conduirait à placer cette limite au niveau de l'abscisse X=6 m, tandis que les données modélisées suggèrent une transition en X=9 m. Ces résultats illustrent la complexité que peut représenter une délinéation précise des unités cartographiques de sol.

- Corrélation entre propriétés pédologiques et résistivité électrique

Les tests statistiques, montrent qu'en considérant les données d'un même horizon, il est rarement possible d'établir un lien entre les propriétés d'états pédologiques – teneurs en eau massiques et volumiques et masse volumique apparente – et les valeurs de résistivité électrique. En revanche, en prenant l'ensemble des échantillons, les coefficients de

corrélation sont élevés : r=-0,68, -0,81 et -0,73 pour les corrélations entre résistivité et respectivement teneur en eau massique, teneur en eau volumique et masse volumique apparente de sol.

Exploitation de données issues d'une prospection électrique multi-profondeurs

La dernière partie de ce manuscrit s'est consacrée au développement d'une méthode exploitant les variations relatives entre les résistivités apparentes mesurées pour différents volumes de sol investigués. Cette méthode s'appuie 1)sur une taxonomie géophysique qui a conduit à une cartographie de profils verticaux de résistivité apparente et 2)sur une taxonomie pédologique, qui, dans le cas des données de Beauce où la carte des sols de la parcelle était disponible, a permis une prédiction des profils de résistivité observables sur les unités cartographiques définies. La mise en œuvre a nécessité la définition d'un paramètre différenciateur de couches résistives α, qui contribue à établir la taxonomie géophysique. Un formalisme matriciel a également été introduit pour l'expression des taxons établis, constituant ainsi, par le biais d'un calcul de distance matricielle, un moyen de quantifier la ressemblance entre taxons pédologiques et taxons géophysiques.

- Cohérence spatiale des profils de résistivité

La répartition de certains profils de résistivité présente une forte cohérence spatiale qui est manifestement liée à des facteurs pédologiques : pour exemple, les régions qui regroupent le profil-type relevant des néoluvisols sur argile sont très bien délimitées ; ceci témoigne par ailleurs de la sensibilité particulière de la mesure électrique à la présence d'argile.

- Concordance entre taxons géophysiques et pédologiques

Les données de Beauce indiquent que, généralement, les profils-types prédits par la typologie pédologique coïncident avec les profils-types obtenus par la prospection électrique. Certaines discordances observées sont attribuées au caractère apparent des résistivités, c'est-à-dire acquises au moyen d'un dispositif de mesures intégratives.

- Calcul de distance matricielle

Pour évaluer la ressemblance entre taxons géophysiques et taxons pédologiques, le calcul de distance matricielle exploite une gamme de valeurs de résistivité balayée par α plutôt que d'attribuer une valeur particulière à ce paramètre, qui amoindrirait les chances d'adapter la méthode à des données issues d'autres prospections. Ce calcul de distance matricielle pourrait ainsi constituer un premier pas vers l'automatisation de la méthode.

La méthode proposée est une approche originale d'exploitation de données issues d'une prospection électrique multi-profondeurs, et un outil potentiellement intéressant pour l'étude de la variabilité spatiale d'une couverture pédologique. C'est une méthode englobante dans le sens où elle intègre l'information des différentes cartes de résistivité apparente résultant de la prospection et habituellement traitées séparément.

Perspectives

L'évolution rapide des cartes de profils-types lorsque le paramètre différenciateur de couches résistives α varie, indique une grande sensibilité des sondages à ce paramètre. Il est très probable que l'évolution des sondages lorsque α croît relève de caractéristiques géométriques de la couverture pédologique – variation d'épaisseur ou profondeur d'horizon de sol. L'exploitation de cette évolution est un axe à approfondir. De plus, la géométrie de la tranchée étudiée dans le chapitre 4 étant bien connue, il serait bon d'appliquer la méthode sur les données de prospection de surface à l'aplomb de cette tranchée pour témoigner de la signification pédologique de l'évolution des sondages lorsque le paramètre α augmente. La méthode pourra également être appliquée sur les données modélisées.

D'autre part, pour éclaircir l'hypothèse selon laquelle les discordances entre profils de résistivité observés et prédits par la typologie pédologique seraient dues au fait d'exploiter des résistivités apparentes, il apparaît nécessaire d'approfondir l'étude de cette méthode en l'appliquant sur des données inversées (Robain *et al.* 2001).

Enfin, les données acquises en Brie (Orgeval) devront être confrontées à des données issues d'une prospection pédologique de la parcelle (40 sondages à la tarière ont été réalisés trop tardivement pour être exploités et inclus ici). Une autre idée consisterait à exploiter, en plus de l'allure du sondage, la valeur médiane ou moyenne de chaque profil de résistivité apparente, ce qui positionnerait le sondage sur une échelle de résistivité et pourrait conduire à une classification faisant mieux intervenir la texture des horizons.

Une nouvelle voie est ouverte dans la direction d'une cartographie automatique (donc rapide) des sols et très détaillée quant à la description de la variabilité latérale. D'autres expérimentations sont à mener dans d'autres contextes de formations superficielles. Il faudra aussi, à partir des jeux de données expérimentales comme à partir de données synthétiques, tester si le nombre de trois profondeurs de mesure est optimal et si, en particulier, il ne faudrait pas chercher à mieux décrire la couche cultivée elle-même par des mesures avec un quadripôle de dimensions réduites.

REFERENCES

Adam I, Michot D, Guero Y, Soubega B, Moussa I, Dutin G, Walter C (2012) Detecting soil salinity changes in irrigated Vertisols by electrical resistivity prospection during a desalinisation experiment. *Agricultural Water Management* 109 : 1–10

AFES (2008) Référentiel pédologique 2008. 435 p. Editions Quae

Amato M, Basso B, Celano G, Bitella G, Morelli G, Rossi R (2008) In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging. *Tree Physiology* 28 : 1441–1448

Amato M, Bitella G, Rossi R, Gomez J, Lovelli S, Gomes J (2009) Multi-electrode 3D resistivity imaging of alfalfa root zone. *European Journal of Agronomy* 31 : 213–222

Archie GE (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transaction American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers* 146 : 54–62

Assi JP (2007) Contribution de la tomographie électrique 3D à la détermination de la variabilité spatiale du sol à l'échelle décimétrique : application au suivi des phénomènes d'infiltrations rapides. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

Auerswald K, Kutilek M (1998) A European view to the protection of the soil resource. *Soil and Tillage Research* 46 : ix–xi (preface)

Auerswald K, Simon S, Stanjek H (2001) Influence of soil properties on electrical conductivity under humid water regimes. *Soil science* 166 : 382–390

Baize D (2000) Guide des analyses en pédologie. 266 p. INRA

Baize D, Jabiol B (1995) Guide pour la description des sols. 388 p. Paris, INRA

Baraduc L (2008) L'agriculture : une belle entreprise pour l'Eure-et-Loir. 8 p. Document de la chambre d'agriculture d'Eure-et-Loir : L'agriculture en Eure-et-Loir, 3ème édition septembre 2008

Batlle-Aguilar J, Schneider S, Pessel M, Tucholka P, Coquet Y, Vachier P (2009) Axisymetrical Infiltration in Soil Imaged by Noninvasive Electrical Resistivimetry. *Soil Science Society of America Journal* 73 : 510

Beck Y-L (2008) Evaluation de l'état hydrique d'un sol fin par méthodes électriques et électromagnétiques : application géotechnique. 302 p. Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France

Besson A (2007) Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau des sols à l'échelle parcellaire par la méthode de résistivité électrique. 212 p. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, Orléans, France

Besson A, Cousin I, Bourennane H, Nicoullaud B, Pasquier C, Richard G, Dorigny A, King D (2010) The spatial and temporal organization of soil water at the field scale as described by electrical resistivity measurements. *European Journal of Soil Science* 61 : 120–132

Besson A, Cousin I, Dorigny A, Dabas M, King D (2008) The temperature correction for the electrical measurements. *Soil Science* 173 : 707–720

Besson A, Cousin I, Samouelian A, Boizard H, Richard G (2004) Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. *Soil and Tillage Research* 79 : 239–249

Bricon C, Lorenz C, Obert D, Bureau de recherches géologiques et minières (France). Service géologique national (1989) Carte géologique de la France à 1/50 000. 185, Coulommiers.

Bruand A, Creusot G, Quétin P, Darthout R, Raison L, Courtemanche P, Gaillard H (1997) Variabilité de la recharge de la nappe de Beauce : rôle de l'irrigation et des caractéristiques du sol. *Etude et Gestion des Sols* 4 : 4, 229–245

Campbell RB, Bower CA, Richards LA (1949) Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts. *Soil Science Society of America Journal* 13 : 66–69

Chery P (1995) Variabilité de l'épaisseur de la couverture de sol. Conséquences pour le bilan hydrique hivernal d'un secteur de Petite Beauce. 286 p. Thèse de doctorat, Université de Nancy I, Nancy, France

Cirad (2008) La vision stratégique 2008-2012

Cosenza P, Mannet E, Rejiba F, Cui Y, Tabbagh A, Charlery Y (2006) Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics* 60 : 165–178

Cousin I, Besson A, Bourennane H, Pasquier C, Nicoullaud B, King D, Richard G (2009) From spatial-continuous electrical resistivity measurements to the soil hydraulic functioning at the field scale. *Comptes Rendus Géosciences* 341 : 859–867

Curmi P, Bidois J, Bourrié G, Cheverry C, Durand P, Gascuel-Odoux C, Germon J-C, Hallaire V, Hénault C, Jaffrezic A, Mérot P, Trolard F, Walter C, Zida M (1997) Rôle du sol sur la circulation et la qualité des eaux au sein de paysages présentant un domaine hydromorphe. *Etude et Gestion des Sols* 4 : 2, 95–114

Dabas M, Duval O, Bruand A, Verbèque B (1995) Cartographie électrique en continu : apport à la connaissance d'une couverture de sol développée sur matériaux deltaïques. *Etude et Gestion des Sols* 2 : 4, 257–268

Dabas M, Hesse A., Jolivet A., Tabbagh A. (1989) Intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle. *Science du sol* 27 : 65–68

Dabas M, Tabbagh A, Tabbagh J (1994) 3-D inversion in subsurface electrical surveying - I. Theory. *Geophysical Journal International* 119 : 975–990

Dahlin T, Loke MH (1998) Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics* 38 : 237–249

Das UC, Parasnis DS (1987) Resistivity and induced polarization responses of arbitrarily shaped 3-d bodies in a two-layered earth. *Geophysical Prospecting* 35 : 98–109

Desprez N (1973) L'hydrogéologie des formations lacustres en Beauce et en Sologne. *Le calcaire de Beauce - géologie, hydrogéologie, applications en construction routière et génie civil.* Bulletin de liaison du laboratoire des Ponts et Chaussée - Spécial U : 60–67

Dey A, Morrison HF (1979) Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. *Geophysics* 44 : 753–780

Edwards LS (1977) A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics* 42 : 1020–1036

Evans SD, Lindstrom MJ, Voorhees WB, Moncrief JF, Nelson GA (1996) Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture, and corn yield. *Soil and Tillage Research* 38 : 35–46

Friedman SP (2005) Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 46 : 45–70

Fukue M, Minato T, Horibe H, Taya N (1999) The micro-structures of clay given by resistivity measurements. *Engineering Geology* 54 : 43–53

Gigot C, Desprez N, Bureau de recherches géologiques et minières (France). Service géologique national (1976) Carte géologique de la France à 1/50 000. 291, Voves.

Gigot C, Fedoroff N, Bureau de recherches géologiques et minières (France). Service géologique national (1973) Carte géologique de la France à 1/50 000. 362, Patay.

Gigout M (1973) L'altération périglaciaire du calcaire de Beauce. *Le calcaire de Beauce - géologie, hydrogéologie, applications en construction routière et génie civil.* Bulletin de liaison du laboratoire des Ponts et Chaussée - Spécial U : 54–59

Guérin R, Meheni Y, Rakotondrasoa G, Tabbagh A (1996) Interpretation of slingram conductivity mapping in near-surface geophysics: Using a single parameter fitting with 1D model. *Geophysical Prospecting* 44 : 233–249

Hagrey SA al (2007) Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. *Journal of Experimental Botany* 58 : 839–854

Harrington RF (1961) Time-harmonic electromagnetic fields. 496 p. John Wiley & Sons Inc, USA

Hesse A, Jolivet A, Tabbagh A (1986) New prospects in shallow depth electrical surveying for archaeological and pedological applications. *Geophysics* 51 : 585–594

Job J-O (1992) Les sols salés de l'oasis d'El Guettar (sud tunisien). 151 p. Thèse de doctorat, USTL, Montpellier, France

Kalinski R, Kelly W, Bogardi I, Pesti G (1993) Electrical resistivity measurements to estimate travel times through unsaturated ground water protective layers. *Journal of Applied Geophysics* 30 : 161–173

Keller GV, Frischknecht FC (1966) Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon press, Oxford, UK

Lamotte M (1993) Les sols sableux à forte cohesion des zones tropicales arides. Etude du harde Lagadge au Nord-Cameroun. 315 p. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

Lamotte M, Bellier G, Duval O, Jamagne M (1990) Une démarche itérative entre caractérisation et cartographie de sols en Orléanais. *Science du sol* 28 : 109–122

Lamotte M, Bruand A, Duval O, Humbel FX (1988) Un système planosol-sol hydromorphe en forêt d'Orléans. *Science du sol* 26 : 139–155

Le Guen M (2002) La boîte à moustaches pour sensibiliser à la statistique. *Bulletin de méthodologie sociologique* 73 : 43–64

Le Parco R (1995) Utilisation d'une méthode géophysique pour la cartographie des sols, Apport et limite de la méthode électrique pour l'estimation de l'épaisseur de la couverture limoneuse en Petite Beauce. 25 p. Mémoire de fin d'études, INRA unité de Scieces du sol d'Orléans, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

Loke MH (2002) RESDMOD ver.3.01 - Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite-difference and finite-element methods. 28 p

Loke M h., Barker R d. (1996) Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44 : 131–152

Lorain JM (1973) La géologie du calcaire de Beauce. *Le calcaire de Beauce - géologie, hydrogéologie, applications en construction routière et génie civil.* Bulletin de liaison du laboratoire des Ponts et Chaussée - Spécial U : 14–53

Lund ED, Christy CD, Drummond PE (1999) Practical applications of soil electrical conductivity mapping. Dans : Precision agriculture 99 Proceedings of the 2nd European conference on Precision Agriculture, edited by J. V. Stafford. Sheffield Academic Press, Sheffield, UK, pp. 771–779

Mallat S (2000) Une exploration des signaux en ondelettes. 658 p. Editions Ecole Polytechnique

Mariotti A, Landreau A (1986) Etude du transfert et de l'évolution des nitrates dans les aquifères au moyen du traçage isotopique naturel 15N. *Hydrogéologie* : 1, 77–86

Martin JC (1999) Piézométrie de la nappe de Beauce. Bilan du réseau piézométrique. Etat corrigé de hautes eaux 1986. 89 p. Rapport BRGM R 40379

McCarter WJ (1984) The electrical resistivity characteristics of compacted clays. *Géotechnique* 34 : 263

Mégnien C (1979) Hydrogéologie du centre du bassin de Paris : Contribution à l'étude de quelques aquifères principaux. 532 p. Editions du BRGM

Meheni Y, Guerin R, Benderitter Y, Tabbagh A (1996) Subsurface DC resistivity mapping: Approximate 1-D interpretation. *Journal of Applied Geophysics* 34 : 255–269

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. 412 p. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

Michot D, Benderitter Y, Dorigny A, Nicoullaud B, King D, Tabbagh A (2003) Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research* 39 : 5, 1138–1157

Michot D, Dorigny A, Benderitter Y (2001) Mise en évidence par résistivité électrique des écoulements préférentiels et de l'assèchement par le maïs d'un CALCISOL de Beauce irriguéDetermination of water flow direction and corn roots-induced drying in an irrigated Beauce CALCISOL, using electrical resistivity measurements. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 332 : 29–36

Moeys J (2007) Variabilité spatiale et déterminismes agro-pédologiques du devenir d'un herbicide dans l'horizon de surface : application au cas de l'isoproturon dans un secteur agricole de Beauce chartraine. 308 p. Thèse de doctorat, Institut national agronomique Paris-Grignon, Thiverval-Grignon, France

Moeys J, Nicoullaud B, Dorigny A, Coquet Y, Cousin I (2006) Cartographie des sols à grande échelle : intégration explicite d'une mesure de résistivité apparente spatialisée à l'expertise pédologique. *Etude et Gestion des Sols* 13 : 4, 269–286

Nicole J (2006) Dynamique d'une nappe perchée temporaire sur plateau d'argile à meulières du bassin parisien : relation avec l'organisation pédologique et le fonctionnement hydrodynamique de la couverture de sol limoneux hydromorphe. 164 p. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, Paris, France

Nicole J, Coquet Y, Vachier P, Michelin J, Dever L (2003) Fonctionnement hydrodynamique et différenciation pédologique d'une couverture de sol limoneux hydromorphe en Bassin Parisien. *Etude et Gestion des Sols* 10 : 3, 173–190

Panissod C (1997) Prospection électrique et électrostatique à faible profondeur à l'aide de systèmes multipôles permettant la description directe des strutures en 3-D. 238 p. Thèse de doctorat, Université Paris 6, Paris, France

Panissod C, Dabas M, Hesse A, Jolivet A, Tabbagh J, Tabbagh A (1998) Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. *Geophysics* 63 : 1542–1550

Panissod C, Dabas M, Jolivet A, Tabbagh A (1997a) A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3m) geoelectrical investigation: the "Vol-de-canards" array. *Geophysical Prospecting* 45 : 983–1002

Panissod C, Lajarthe M, Tabbagh A (1997b) Potential focusing: a new multielectrode array concept, simulation study, and field tests in archaeological prospecting. *Journal of Applied Geophysics* 38 : 1–23

Papadopoulos NG, Tsokas GN, Dabas M, Yi M-J, Kim J-H, Tsourlos P (2009) Three-dimensional inversion of automatic resistivity profiling data. *Archaeological Prospection* 16 : 267–278

Pujari P, Soni A (2009) Sea water intrusion studies near Kovaya limestone mine, Saurashtra coast, India. *Environmental monitoring and assessment* 154 : 93–109

Raiche AP (1974) An integral equation approach to three-dimensional modelling. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 36 : 363–376

Rhoades JD, Chanduvi F, Lesch SM (1999) Soil salinity assessment : methods and interpretation of electrical conductivity measurements. 172 p. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italie

Richard G, Cousin I, Sillon JF, Bruand A, Guérif J (2001) Effet du compactage sur la porosité d'un sol limoneux : conséquences sur les propriétés hydrauliques en non saturé. *European Journal of Soil Science* 52 : 49–58

Riffard M, Augeard B, Kao C, Andreassian P, Ansart P, Chaumont C (2002) Synthèse des recherches effectuées sur le bassin versant de l'Orgeval, affluent du Grand Morin, sur la thématique ruissellement/érosion 1962 - 2002. 42 p. Synthèse du fonctionnement hydrologique du bassin de l'Orgeval, Cemagref, Antony, France

Robain H, Descloitres M, Ritz M, Atangana QY (1996) A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *Journal of Applied Geophysics* 34 : 237–253

Robain H, Lajarthe M, Florsch N (2001) A rapid electrical sounding method The "three-point" method: a Bayesian approach. *Journal of applied geophysics* 47 : 83–96

Samouelian A, Cousin I, Richard G, Tabbagh A, Bruand A (2003) Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. *Soil Science Society of America Journal* 67 : 1319–1326

Samouëlian A, Cousin I, Tabbagh A, Bruand A, Richard G (2005) Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research* 83 : 173–193

Samouelian A, Richard G, Cousin I, Guerin R, Bruand A, Tabbagh A (2004) Three-dimensional crack monitoring by electrical resistivity measurement. *European Journal of Soil Science* 55 : 751–762

Schnebelen N, Ledoux E, Bruand A, Creuzot G (1999) Stratification hydrogéochimique et écoulements verticaux dans l'aquifère des calcaires de Beauce (France) : Un système anthropisé à forte variabilité spatiale et temporelle. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 329 : 421–428

Schnebelen N, Nicoullaud B, Bourennane H, Couturier A, Verbeque B, Revalier C, Bruand A, Ledoux E (2004) The STICS model to predict nitrate leaching following agricultural practices. *Agronomie* 24 : 423–435

Séger M, Cousin I, Frison A, Boizard H, Richard G (2009) Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements. *Soil and Tillage Research* 103 : 387–398

Seladji S (2010) Caractérisation et suivi par méthodes géoélectriques de la dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement. 220 p. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

Seladji S, Cosenza P, Tabbagh A, Ranger J, Richard G (2010) The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation. *European Journal of Soil Science* 61 : 1043–1055

Souffaché B, Cosenza P, Flageul S, Pencolé J-P, Seladji S, Tabbagh A (2010) Electrostatic multipole for electrical resistivity measurements at the decimetric scale. *Journal of Applied Geophysics* 71 : 6–12

Srayeddin I (2009) Transferts hydriques sol-plante et extraction racinaire : une approche de la spatialisation des prélèvements hydriques par Tomographie de Résistivité Electrique. 236 p. Thèse de doctorat, Université d'Avignon et Pays de Vaucluse, Avignon, France

Tabbagh A (1985) The response of a 3-dimensional magnetic and conductive body in shallow depth electromagnetic prospecting. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 81 : 215–230

Tabbagh J (1988) Traitement des données et élimination des valeurs erronées en prospection électrique en continu. *Revue d'Archéométrie* 12 : 1–9

Tabbagh A, Benderitter Y, Michot D, Panissod C (2002) Measurement of variations in soil electrical resistivity for assessing the volume affected by plant water uptake. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 7 : 229–237

Tabbagh A, Dabas M, Hesse A, Panissod C (2000) Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation. *Geoderma* 97 : 393–404

Tabbagh J, Samouëlian A, Tabbagh A, Cousin I (2007) Numerical modelling of direct current electrical resistivity for the characterisation of cracks in soils. *Journal of Applied Geophysics* 62 : 313–323

Tetegan M, Pasquier C, Besson A, Nicoullaud B, Bouthier A, Bourennane H, Desbourdes C, King D, Cousin I (2012) Field-scale estimation of the volume percentage of rock fragments in stony soils by electrical resistivity. *Catena* 92 : 67–74

Thiesson J, Dabas M, Flageul S (2009) Detection of resistive features using towed slingram electromagnetic induction instruments. *Archaeological Prospection* 16 : 103–109

Tournebize J, Clément R, Guérin A, Ansart P, Haumont C, Moreau S, Hénine H (2011) Y a-t-il infiltration verticale sous drainage agricole ? Conséquence pour la recharge de la nappe de Brie. 8 p. Agriculture pour demain - Rapport d'activité PIREN Seine, IRSTEA, Antony, France

Vilain G (2010) Emissions de N2O dans un versant agricole de grandes cultures (Brie, Bassin de la Seine) : observations, expérimentations et modélisation dans un continuum "plateau/zone enherbée/rivière". 238 p. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

Ward SH (1990) Geotechnical an environmental geophysics. Chap 6, 44 p. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa OK, USA

Waxman M, Smits L (1968) Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal* 8 : 107–122

Werban U, Attia al Hagrey S, Rabbel W (2008) Monitoring of root-zone water content in the laboratory by 2D geoelectrical tomography. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171 : 927–935

Zanolin A (2003) Irrigation de précision en Petite Beauce : mesures au champ et modélisation stochastique spatialisée du fonctionnement hydrique et agronomique d'une parcelle de maïs. 187 p. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

Zanolin A, De Fouquet C, Granier J, Ruelle P, Nicoullaud B (2007) Geostatistical simulation of the spatial variability of an irrigated maize farm plot. *Comptes Rendus Géosciences* 339 : 430–440

Zar JH (1972) Significance testing of the Spearman rank correlation coefficient. *Journal of the American Statistical Association* 67 : 578–580

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Mesure de la résistance électrique d'un matériau 7
Figure 2. Variables d'espace utilisées en coordonnées sphériques 10
Figure 3. Exemples de sytèmes tractés utilisés pour la mesures de résistivité à grande échelle spatiale : dispositifs Veris 3100 (à gauche) et MUCEP (à droite) 13
Figure 4. Dispositif ARP® utilisé à Ouarville (28) 14
Figure 5. Configuration du dispositif (les croix indiquent l'aplomb des positions des 3 mesures) – Illustration du principe de mesures à 3 profondeurs 15
Figure 6. Relation entre la teneur en eau volumique et la résistivité électrique pour différents types de sol 18
Figure 7. Influence de la température d'un échantillon reconstitué de sol limoneux sur la mesure de résistivité électrique - confrontation avec la loi de Keller et Frischknecht (1966) .. 19
Figure 8. Localisation des sites évoqués dans la littérature (en rouge) et des sites prospectés dans cette étude (en jaune) 21
Figure 9. Situation géographique du secteur étudié (a) à l'échelle de la France sur la carte de l'occupation des sols de 2006 et (b) à l'échelle de la Beauce 30
Figure 10. Nappe de Beauce en limite des bassins de la Seine et de la Loire 31
Figure 11. Carte des types de sols du secteur de Ouarville 33
Figure 12. Evapotranspiration et pluviométrie en Beauce de 1973 à 2001 34
Figure 13. Contexte géologique du site expérimental 35
Figure 14. Carte des sols de la parcelle de Ouarville et délimitation des zones prospectées en 2010 36
Figure 15. Dénominations des plages cartographiques couvertes par la prospection électrique 37
Figure 16. Situation géographique du bassin de l'Orgeval 38
Figure 17. Géologie du bassin de l'Orgeval et localisation de la parcelle expérimentale 40
Figure 18. Carte pédologique du bassin versant de l'Orgeval 41
Figure 19. Délimitations des prospections électriques sur la parcelle de l'Orgeval 42
Figure 20. Paramètres de modélisation (a) : configuration d'électrode (bleu), position des points de mesure (rouge), position, dimensions et résistivité du corps, résistivité du terrain 48
Figure 21. Résistivité apparente mesurée par la voie 1 de l'ARP® le long d'un profil à l'aplomb d'un corps de volume variable (toit à 10 cm de la surface) et de résistivité 5 Ω.m (gauche) ou 2000 Ω.m (droite) 53
Figure 22. Résistivité apparente mesurée à l'aplomb d'un corps de 5 Ω.m (gauche) et de 2000 Ω.m (droite), cubique de 30 cm de coté (toit à 10 cm de la surface) pour des espacements inter-profils variables 54

Figure 23. Cartographie de résistivité apparente (en Ω.m) pour différents espacements inter-profils au-dessus d'un corps cubique de 30 cm de coté, conducteur (gauche) ou résistant (droite) 55
Figure 24. Résistivité apparente mesurée à l'aplomb d'une dalle de 10 cm d'épaisseur, de 5 Ω.m (gauche) et de 2000 Ω.m (droite), à profondeur variable 56
Figure 25. Résistivité apparente mesurée par les 3 voies de l'ARP® à l'aplomb d'un corps conducteur à 20 cm de profondeur 57
Figure 26. Résistivité apparente mesurée à l'aplomb d'une dalle d'épaisseur variable, de 5 Ω.m (gauche) et de 2000 Ω.m (droite), à 0,5, 1 et 1,5 m de profondeur 57
Figure 27. Résistivité apparente mesurée (voie 2) à l'aplomb d'une dalle à 0,5 m de profondeur et de résistivité variable, conductrice (gauche) ou résistante (droite) par rapport à l'encaissant (100 Ω.m) 60
Figure 28. Courbe de sensibilité de l'ARP® à une dalle (1x1x0,1 m) dont la profondeur varie 62
Figure 29. Courbe de sensibilité de l'ARP® à un corps d'épaisseur variable et positionné en z=0,5, z=1 et z=1,5 m 62
Figure 30. Courbe de sensibilité de l'ARP® à une dalle (1x1x0,2 m) à 50 cm de profondeur et de résistivité variable 63
Figure 31. Tranchée étudiée 67
Figure 32. Position de la tranchée sur les cartes des sols et de résistivité électrique apparente issues de la prospection ARP® et éléments de description de la tranchée 68
Figure 33. Identification des horizons de la tranchée (a) et utilisation de la charte de couleur de sol Munsell (b) 69
Figure 34. Mesures électriques avec configuration ARP® à l'aplomb de la tranchée (a) et mesures de résistivité pariétale (b) 71
Figure 35. Géométrie du dispositif dipôle-dipôle équatorial 73
Figure 36. Principe de la représentation par diagramme de Tuckey 74
Figure 37. Exemple de traces de dents 77
Figure 38. Localisation sur les cartes de résistivité apparente de la limite entre les 2 plages cartographiques de sol suggérée par l'examen visuel de la paroi de la tranchée 79
Figure 39. Résultat de l'identification des horizons de la couverture pédologique (a) et section issue de la mesure des résistivités pariétales (b) 82
Figure 40. a : Profils de résistivité apparente mesurée à l'aplomb de la tranchée avant son ouverture avec une configuration d'électrode de type ARP® (en pointillés) et profils résultant de la modélisation (en traits pleins) ; b : Modèle utilisé pour simuler une prospection ARP® à l'aplomb de la tranchée 83
Figure 41. Box plots des teneurs en eau massiques par horizon de tous les échantillons (a) et des échantillons prélevés au cylindre métallique seulement (b) 87
Figure 42. Impact du type de prélèvement (manuel ou à l'aide d'un cylindre) sur la mesure de teneur en eau 87
Figure 43. Box plots des teneurs en eau volumiques par horizon 89

Figure 44. Box plots des masses volumiques apparentes de sol par horizon 89
Figure 45. Box plots par horizon de sol des résistivités mesurées sur la paroi de la tranchée 89
Figure 46. Relation entre résistivité électrique des sites de prélèvements et teneur en eau volumique des échantillons de sol 93
Figure 47. Relation entre résistivité électrique des sites de prélèvements et masse volumique apparente des échantillons de sol 93
Figure 48. Relation entre résistivité électrique des sites de prélèvements et teneur en eau massique des échantillons de sol..... 93
Figure 49. Relation entre résistivité électrique et teneur en eau massique sur argile de Kibushi (d'après Fukue et al. 1999)..... 93
Figure 50. Principe de l'interpolation par la cubique : exemple en 1D avec 3 valeurs observées en x_1, x_2 et x_3 à proximité du point à interpoler 101
Figure 51. Distribution des données de Ouarville avant et après écrêtage 102
Figure 52. Distribution des données d'Orgeval avant et après écrêtage 103
Figure 53. Cartographie de résistivité apparente des zones ouest (gauche) et est (droite) de la parcelle de Ouarville 104
Figure 54. Cartographie de résistivité apparente sur la parcelle de l'Orgeval 105
Figure 55. Profils-types définis, noms, symboles et code couleur 106
Figure 56. Prédiction par la typologie pédologique de l'organisation spatiale des profils-types 109
Figure 57. Histogramme des α_{21} pour les zones prospectées à Ouarville 113
Figure 58. Courbes des densités de profils-types sur les UCS 1, 3 et 4 en fonction du paramètre α 114
Figure 59. Courbes des densités de profils-types sur les UCS 5, 6, 7 et 15 en fonction du paramètre α 116
Figure 60. Courbes des densités de profils-types sur les UCS 12, 13, 14 et 2 en fonction du paramètre α 117
Figure 61. Distribution spatiales des profils-types prédominants sur la zone ouest de Ouarville : Q et R12C3 (a), 1c (b) et A et C12R3 (c) pour α=4 Ω.m 121
Figure 62. Distribution spatiales des profils-types prédominants sur la zone est de Ouarville : A et C12R3 (a), Q et R1C23 (b) et 1c et H (c) pour α=3 Ω.m 122
Figure 63. Comparaison des délinéations possibles par la cartographie de profils de résistivité pour α=4 Ω.m (b) avec les délimitations de PCS (a) 123
Figure 64. Cartographie de la ressemblance entre les sondages de Ouarville et chacun des profils-types établis 127
Figure 65. Cartographie des 9 profils-types établis sur la parcelle de l'Orgeval (ci-dessus) et sur la zone sélectionnée (à droite) pour α variant de 2 à 7 Ω.m 130
Figure 66. Cartographie de la ressemblance entre les sondages de l'Orgeval et chacun des profils-types établis sur la parcelle entière (haut) et sur la zone sélectionnée (bas) 131

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Synthèse sur les valeurs de résistivité rencontrées dans le Bassin Parisien..... 21
Tableau 2. Paramètres de modélisation et d'interpolation utilisés pour l'étude de l'impact de l'espacement inter-profils sur la détection d'un corps..... 51
Tableau 3. Paramètres de modélisation et d'interpolation utilisés pour l'étude de l'impact de la profondeur et de l'épaisseur d'un corps sur sa détection 52
Tableau 4. Résolutions envisageables pour chacune des voies d'enregistrement de l'ARP®. 61
Tableau 5. Description des sondages réalisés dans les néoluvisols sur calcaire cryoturbé (UCS 1) et sur argiles lourdes (UCS 2)..... 68
Tableau 6. Caractéristiques géométriques du dispositif utilisé pour la modélisation..... 73
Tableau 7. Synthèse des mesures de teneur en eau et masse volumique apparente réalisées sur les prélèvements de sols 80
Tableau 8. Paramètres géométriques du modèle - justification de leur sélection 85
Tableau 9. Valeurs médianes par horizon des teneurs en eau massiques, volumiques, et des masses volumiques apparentes de sol..... 88
Tableau 10. Statistiques sur les valeurs de résistivités (en Ω.m) mesurées par horizon 90
Tableau 11. Tests de corrélation entre variables pédologiques (W, θ et Da) et résistivité ρ réalisés par horizon et avec l'ensemble des données 92
Tableau 12. Profil de résistivité attendu pour chaque UCS..... 109
Tableau 13. Groupements d'unités cartographiques de sols établis en fonction du sondage électrique attendu et matrice associée à chaque profil-type..... 111
Tableau 14. Synthèse sur la prédominance des profils-types par UCS et gamme de α pour lesquelles il y a concordance entre profils-types électriques observés et profils-types anticipés par la typologie pédologique..... 119
Tableau 15. Profils de résistivité observés sur la parcelle de Ouarville et caractéristiques des UCS correspondantes..... 125

ANNEXES

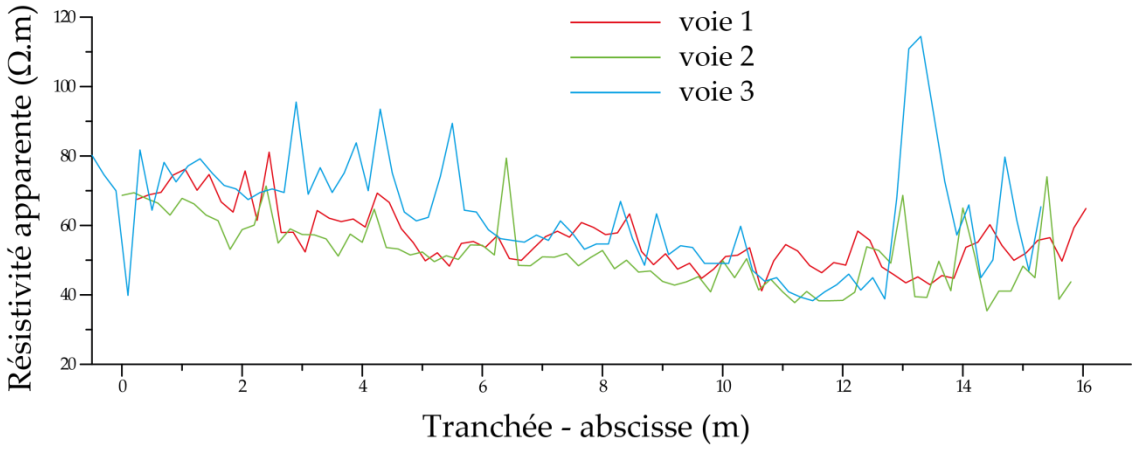
ANNEXE 1. Résistivité des horizons mesurée sur la paroi de la tranchée et résultats des pesées d'échantillons : teneur en eau massique, volumique et masse volumique de sol en chaque lieu de prélèvement

Abscisse X (m)	Horizon	type prélèvement : cylindre petit/grand ou vrac	teneur en eau massique ($g.g^{-1}$)	teneur en eau volumique ($cm^3.cm^{-3}$)	Densité sol ($g.cm^{-3}$)	Résistivité (Ω.m)
0,65	1	petit	0,1665	0,1575	0,9456	68,9
0,5	2	grand	0,1660	0,2103	1,2668	71,3
0,5	3	grand	0,1672	0,2272	1,3595	54,2
0,5	4	grand	0,1990	0,2795	1,4048	30,7
0,5	5.1	grand	0,1755	0,2568	1,4629	57,3
1,9	1	petit	0,1234	0,1264	1,0245	75,5
1,85	2	grand	0,1710	0,1908	1,1159	73,8
1,85	3	grand	0,1747	0,2553	1,4615	48,8
1,85	4	grand	0,1910	0,2715	1,4216	33,5
1,85	5.1	grand	0,1721	0,2474	1,4376	63,9
4,1	1	petit	0,1255	0,0916	0,7293	57,6
4,1	2	grand	0,1676	0,1922	1,1467	66,4
4,1	3	grand	0,1775	0,2477	1,3955	36,3
4,1	4	grand	0,2017	0,2902	1,4385	24,3
4,1	5.1	grand	0,1642	0,2371	1,4443	40,5
4,2	7	petit	0,1759	0,2709	1,5396	62,5
6	1	petit	0,1201	0,1196	0,9958	71,8
6	2	grand	0,1717	0,2196	1,2790	48,1
6	3	grand	0,1812	0,2775	1,5312	31,1
6	4	grand	0,1846	0,2811	1,5226	26,8
6	5.1	grand	0,1770	0,2627	1,4840	33,8
6	5.2	grand	0,1802	0,2759	1,5311	37,4
6	7	grand	0,1740	0,2731	1,5697	50,5
7,5	1	petit	0,1031	0,1111	1,0772	69,2
7,5	2	grand	0,1640	0,2088	1,2727	67,0
7,5	3	grand	0,1791	0,2630	1,4683	36,4
7,5	4	grand	0,1928	0,2863	1,4852	29,2
7,5	5.1	grand	0,1778	0,2697	1,5165	41,1
7,5	5.2	grand	0,1731	0,2570	1,4846	52,5
7,5	7	grand	0,1760	0,2691	1,5290	43,0
9,6	1	petit	0,1364	0,1492	1,0935	74,1
9,5	2	grand	0,1719	0,2036	1,1844	48,9
9,5	3	grand	0,1846	0,2774	1,5025	28,5
9,5	4	grand	0,1815	0,2813	1,5495	26,9
9,5	5.2	grand	0,1657	0,2537	1,5312	40,0
9,5	6	grand	0,1771	0,2767	1,5627	39,1
9,5	7	petit	0,1870	0,2879	1,5399	65,6

Abscisse X (m)	Horizon	type prélèvement : cylindre petit/grand ou vrac	teneur en eau massique ($g.g^{-1}$)	teneur en eau volumique ($cm^3.cm^{-3}$)	Densité sol ($g.cm^{-3}$)	Résistivité (Ω.m)
12	2	vrac	0,2174			61,8
12	3	vrac	0,1783			37,6
12	4	vrac	0,1712			25,5
12	4	vrac	0,1891			20,4
12	5.2	vrac	0,2136			14,9
12	6	vrac	0,2129			12,6
12	7	vrac	0,2108			17,2
12,2	1	petit	0,1144	0,1135	0,9925	73,1
12,3	2	grand	0,1694	0,2269	1,3397	61,8
12,5	3	petit	0,1585	0,2554	1,6113	37,6
12,1	4	petit	0,1616	0,2568	1,5891	25,5
12,1	4	grand	0,1806	0,2805	1,5526	20,4
12,1	5.2	grand	0,1754	0,2661	1,5170	14,9
12,1	6	grand	0,1945	0,3078	1,5827	12,6
12,1	7	grand	0,2368	0,3630	1,5330	17,2
13	1	vrac	0,1103			70,6
13	3	vrac	0,1738			28,0
13	4	vrac	0,1537			24,2
13	5.2	vrac	0,1718			44,1
13	6	vrac	0,1654			45,1
13	7	vrac	0,1897			38,4
13,9	1	petit	0,1336	0,1418	1,0608	61,4
13,9	2	grand	0,2019	0,2809	1,3910	49,1
13,9	3	petit	0,2119	0,3152	1,4878	29,6
13,9	4	grand	0,1985	0,3121	1,5723	18,9
13,9	5.2	grand	0,2120	0,3246	1,5315	16,6
13,9	6	grand	0,2200	0,3410	1,5502	13,0
13,9	7	grand	0,2393	0,3642	1,5218	12,4
14	1	vrac	0,1907			61,4
14	2	vrac	0,2120			49,1
14	3	vrac	0,1832			29,6
14	4	vrac	0,1831			18,9
14	5.2	vrac	0,2060			16,6
14	6	vrac	0,2105			13,0
14	7	vrac	0,2299			12,4
15,8	1	petit	0,0955	0,1075	1,1261	66,7
15,8	2	grand	0,1748	0,2307	1,3197	47,1
15,8	3	petit	0,1837	0,2731	1,4864	33,2
15,8	4	petit	0,1730	0,2856	1,6509	28,4
15,8	5.2	grand	0,1729	0,2666	1,5423	32,2
15,8	6	grand	0,1899	0,2887	1,5205	21,8
15,9	7	grand	0,2023	0,3144	1,5539	15,4
15,8	8	grand	0,1976	0,2949	1,4919	27,7

ANNEXE 2. Données de résistivité mesurées sur les 3 voies du dispositif apparenté à l'ARP® - Principe du lissage de valeurs par la moyenne glissante

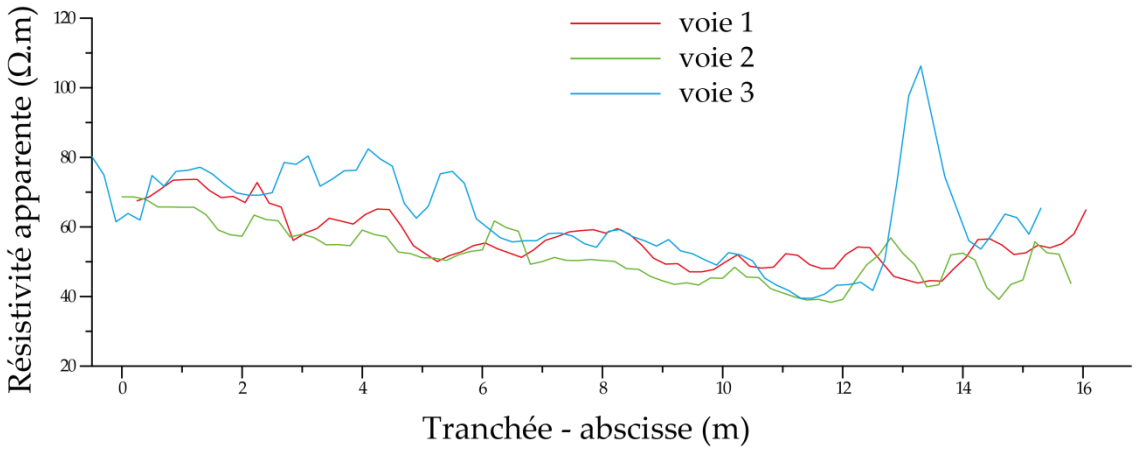
Données brutes :



L'objectif du lissage par la moyenne mobile est d'atténuer les fluctuations des profils de résistivité dont les données sont sujettes au bruit. Chaque valeur est recalculée en utilisant les 2 valeurs adjacentes ($N = 3$) à l'aide de la formule suivante :

$$\overline{x_n} = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} x_{n-k}$$

Données lissées :



ANNEXE 3. Origine de l'interpolation par le sinus cardinal - Echantillonnage des données

Soit un espace à 1 dimension x auquel correspond un espace spectral ν.

- **Périodisation du spectre**

Les données manipulées sont des valeurs discrètes, en nombre fini, tout comme dans le domaine spectral ; mais dans la pratique, ce sont des données spatiales que nous utilisons et nous n'avons pas accès à $f(x)$. Cependant, il est possible d'exprimer cette fonction discrétisée fd. En effet, un signal discret peut se représenter comme une somme d'impulsion de Dirac (Mallat 2000) : à tout échantillon $f(k\,u)$ est associé un Dirac $\delta(x-k\,u)$. Ainsi, un échantillonnage uniforme de $f(x)$ correspond à une somme pondérée de Diracs :

$$fd(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(k\,u)\ \delta(x-k\,u)$$

Comme $f(k\,u)\,\delta(x-k\,u) = f(x)\,\delta(x-k\,u)$ car $\delta(x-k\,u)=0$ sauf en $x=k\,u$, la fonction discrétisée peut également s'écrire :

$$fd(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f\,(x-k\,u)$$

De la même façon, le spectre périodisé qui résulte de l'échantillonnage spatial des données peut s'écrire :

$$F(\nu) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} F(k\,u)\ \delta(\nu-k\,u) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} F\,(\nu-k\,u)$$

- **Echantillonnage**

Comme le spectre des données est périodique, une période de ce spectre suffit pour pouvoir reconstitué le signal f(x). Ainsi, le filtrage du spectre par un filtre passe-bas idéal (ou fonction porte) de largeur $u\ rect_u(\nu)$ s'écrit :

$$F(\nu) = \mathrm{rect}_u(\nu) \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} F(\nu-k\,u)$$

Pour retrouver $f(x)$ il suffit de revenir dans l'espace x ; le produit ci-dessus devient alors le produit de convolution des transformées de chacun de ses termes :

$$F(\nu) \longrightarrow f(x)$$

$$\mathrm{rect}_u(\nu) \longrightarrow u\ sinc\ (u\,x) \qquad \text{où :} \quad \mathrm{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$$

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} F(k\,u)\,\delta(\nu-k\,u) \longrightarrow \frac{1}{u}\sum_{k=-\infty}^{+\infty} f\left(\frac{k}{u}\right)\,\delta\left(x-\frac{k}{u}\right)$$

d'où :

$$\boldsymbol{f(x) = u\ sinc\ (u\,x)\ *\ \frac{1}{u}\sum_{k=-\infty}^{+\infty} f\left(\frac{k}{u}\right)\,\delta\left(x-\frac{k}{u}\right) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f\left(\frac{k}{u}\right)\ sinc\left[u\left(x-\frac{k}{u}\right)\right]}$$

La figure suivante (d'après Mallat 2000) illustre les différentes étapes d'un échantillonnage puis d'une reconstruction à partir des échantillons, dans le domaine temporel et le domaine fréquentiel.

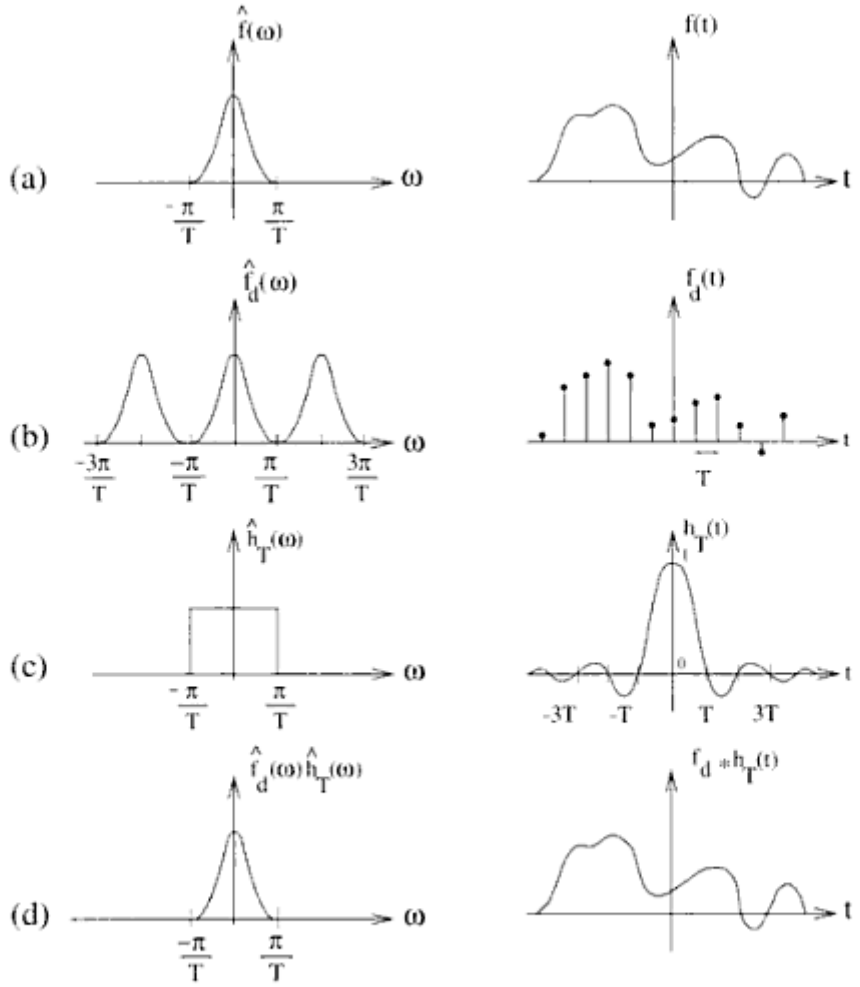
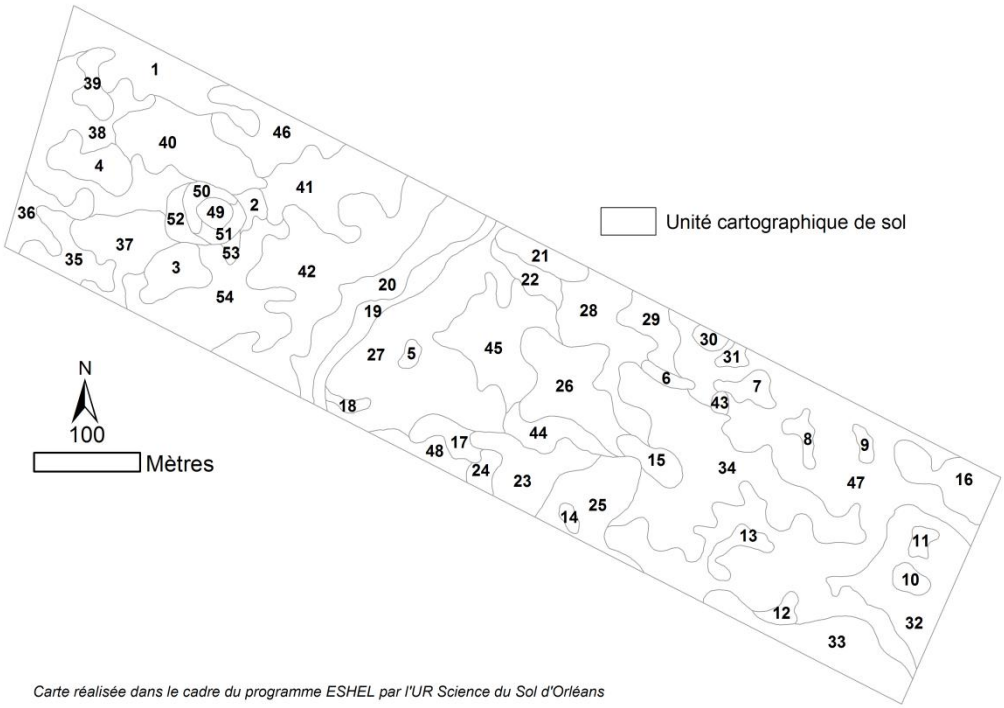


FIG. 3.1 – (a) : Signal f et sa transformée de Fourier $\hat{f}$. (b) : Un échantillonnage uniforme de f rend sa transformée de Fourier périodique. (c) : Passe-bas idéal. (d) : Le filtrage de (b) par (c) reconstitue f.

ANNEXE 4. Regroupement des unités cartographiques de sols sur la parcelle de Ouarville
Base de données ayant servi de support à la taxonomie

La typologie des sols de la parcelle de Ouarville a été élaborée dans le cadre d'un programme de recherche sur les risques de transferts de produits phytosanitaires dans les sols vers les eaux souterraines (programme ESHEL). Trois campagnes de prospection pédologique (en 2003 et 2004) ont été menées pour réaliser 140 sondages à la tarière en vue de comprendre la répartition spatiale des matériaux pédologiques et géologiques à l'échelle intraparcellaire. L'identification des types de sols (d'avril à mai 2004) a abouti à la définition, sur la parcelle, de 54 plages cartographiques de sol (PCS ou PC), assignées à 15 unités cartographiques (Figure 14).



Le tableau qui suit a servi de base pour le regroupement d'unités cartographiques de sol (UCS). Il indique pour les 54 PCS, le type de sol, et l'unité cartographique à laquelle elle appartient. A chacune des UCS, un (éventuellement plusieurs) profil de résistivité possiblement observable est attribué. Si plusieurs des UCS conduisent à un même profil-type potentiel, alors des caractéristiques communes aux UCS concernées sont recherchées. Le constat principal est que les regroupements sont fortement conditionnés par la profondeur du substrat.

Au final, 6 profils de résistivité s'avèrent potentiellement observables sur l'ensemble de la parcelle de Ouarville.

n° PC	UCS légende	SOL	description sommaire	Profil de résistivité attendu			cas isolé	Groupe d'UCS	Caractéristiques communes
				principal	secondaire(s)	Bilan			
21	7	brunisol	horizon labouré argilo-limoneux (0-30 cm) / argile lourde à meulière brun rouge (30-48) / calcaire cryoturbé à 48 cm	H	C12R3				
39	7	brunisol	horizon labouré limono-argileux (0-30 cm) / argile à meulière (30-45) / calcaire cryoturbé à 45 cm / calcaire à 60 cm	H	C12R3				
45	7	brunisol	horizon labouré argilo-limoneux (0-30 cm) / argile lourde à meulière brun rouge (30-46) / calcaire cryoturbé à 46 cm	H	C12R3		**H ou C12R3**	**7**	**brunisols**
50	7	brunisol	horizon labouré argilo-limoneux (0-30 cm) / argile lourde à meulière brun rouge (30-50) / argile lourde (50-70) / calcaire à 70 cm	H					
51	7	brunisol	horizon labouré argilo-limoneux (0-30 cm) / argile lourde à meulière brun rouge (30-50) / argile lourde (50-80) / calcaire à 80 cm	H					
14	15	colluvio	labour + argile limoneuse jusqu'à 110 cm	1c	R1C23		**1c ou R1C23 ou C12R3 ou C1R23**	**15**	**colluviosol**
19	15	colluvio	calcaire cryoturbé à 55 cm	1c	C12R3	C1R23			
49	15	colluvio	sol profond > 120 cm	1c	R1C23				
12	5	calci	calcaire cryoturbé à 30 cm	C1R23			**C1R23**	C12R3 ou H	**4 (calci) + 5**	**calcisols et calcosols sur substrat calcaire cryoturbé entre 30 et 41 cm**
27	5	calci	calcaire cryoturbé à 41 cm	C1R23						
25	5	calco	calcaire cryoturbé à 35 cm	C1R23						
18	5	calco	calcaire dur à 50 cm	C1R23	C12R3					
27	5	calco	calcaire cryoturbé à 35 cm	C1R23						
7	4	calci	calcaire cryoturbé à 37 cm	C1R23						
17	4	calci	calcaire cryoturbé à 50 cm	C12R3	H					
29	4	calci	calcaire cryoturbé à 37 cm	C1R23	H					
31	4	calci	calcaire cryoturbé à 37 cm	C1R23						
34	4	calci	calcaire cryoturbé à 37 cm	C1R23						

n° PC	UCS légende	SOL	description sommaire	Profil de résistivité attendu			cas isolé	Groupe d'UCS	Caractéristiques communes
				principal	secondaire(s)	Bilan			
5	6	calci	limon argileux sur calcaire à 85 cm	C12R3	H	**C12R3 ou H**	C1R23	**3 + 6**	**substrat calcaire entre 45 et 55 cm**
22	6	calci	limite argile/calcaire à 45 cm	C12R3	H				
48	6	calci	calcaire cryoturbé à 55 cm	H	C12R3				
8	3	néoluvi	calcaire cryoturbé à 55 cm	C12R3	H				
9	3	néoluvi	calcaire cryoturbé à 55 cm	C12R3	H				
13	3	néoluvi	calcaire cryoturbé à 55 cm	C12R3	H				
16	3	néoluvi	calcaire cryoturbé à 55 cm	C12R3	H				
32	3	néoluvi	calcaire cryoturbé à 55 cm	H					
36	3	néoluvi	calcaire altéré à 45 cm	H	C1R23				
7	4	néoluvi	calcaire cryoturbé à 55 cm	C12R3	H	**H**	C12R3	**4 (neoluvi) + 1 + 9 + 12**	**néoluvisols sur substrat calcaire cryoturbé ou altéré entre 55 et 77 cm**
17	4	néoluvi	calcaire cryoturbé à 67 cm	H					
29	4	néoluvi	calcaire cryoturbé à 55 cm	H					
31	4	néoluvi	calcaire cryoturbé à 55 cm	H					
34	4	néoluvi	calcaire cryoturbé à 55 cm	H					
10	1	néoluvi	calcaire cryoturbé à 77 cm	H					
11	1	néoluvi	calcaire cryoturbé à 77 cm	H					
15	1	néoluvi	calcaire cryoturbé à 77 cm	H					
23	1	néoluvi	calcaire cryoturbé à 72 cm	H					
35	1	néoluvi	calcaire altéré à 65 cm	H					
47	1	néoluvi	calcaire cryoturbé à 77 cm	H					
6	9	néoluvi	calcaire cryoturbé à 70 cm	H					
38	9	néoluvi	calcaire cryoturbé à 72 cm	H					
52	9	néoluvi	calcaire cryoturbé à 70 cm	H					
28	12	néoluvi	calcaire cryoturbé à 70 cm	H					
30	12	néoluvi	calcaire cryoturbé à 70 cm	H					
41	12	néoluvi	calcaire cryoturbé à 63 cm	H					
43	12	néoluvi	calcaire cryoturbé à 65 cm	H					
44	12	néoluvi	calcaire cryoturbé à 70 cm	H					

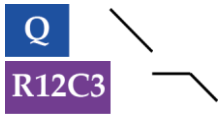
n° PC	UCS légende	SOL	description sommaire	Profil de résistivité attendu			cas isolé	Groupe d'UCS	Caractéristiques communes
				principal	secondaire(s)	Bilan			
1	8	néoluvi	le calcaire cryoturbé apparaît à 1,1 m	Q		Q		8 + 14	**néoluvisols profonds sur calcaire à une profondeur > 1 m**
4	8	néoluvi	calcaire cryoturbé à 1,1 m	Q					
24	8	néoluvi	limon argileux (0-40 cm) / argile limoneuse (0-80 cm) / argile limoneuse à meulière + cailloux jusqu'à 100 cm	Q					
26	8	néoluvi	limon argileux (0-30 cm) / argile limoneuse (0-70 cm) / argile lourde + cailloux jusqu'à 100 cm	Q					
37	8	néoluvi	calcaire cryoturbé à 100 cm	Q					
20	14	néoluvi	Sol profond > 120 cm	Q					
33	2	néoluvi	calcaire à 110 cm	Q	H	**Q ou H**		2 + 10 + 11 + 13	**néoluvisols sur argile et substrat calcaire cryoturbé entre 80 et 120 cm**
40	10	néoluvi	calcaire cryoturbé à plus de 90 cm	Q	H				
2	11	néoluvi	calcaire cryoturbé à 95 cm	Q	H				
3	11	néoluvi	calcaire cryoturbé à 1m-1,2m	Q	H				
46	11	néoluvi	calcaire cryoturbé entre 90 et 120 cm	Q	H				
42	13	néoluvi	calcaire cryoturbé à 100 cm	Q	H				
53	13	néoluvi	calcaire cryoturbé à 92 cm	Q	H				
54	13	néoluvi	calcaire cryoturbé à 81 cm	Q	H				

ANNEXE 5. Répartition des profils-types prédominants sur les zones prospectées de Ouarville pour α variant de 2 à 7 Ω.m

Les profils-types prédominants cartographiés ci-après sont :

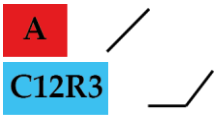
- Pour la zone ouest

(carte de gauche) (carte du milieu) (carte de droite)

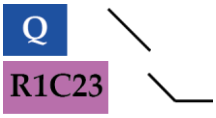


- Pour la zone est

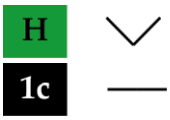
(carte du haut)



(carte du milieu)

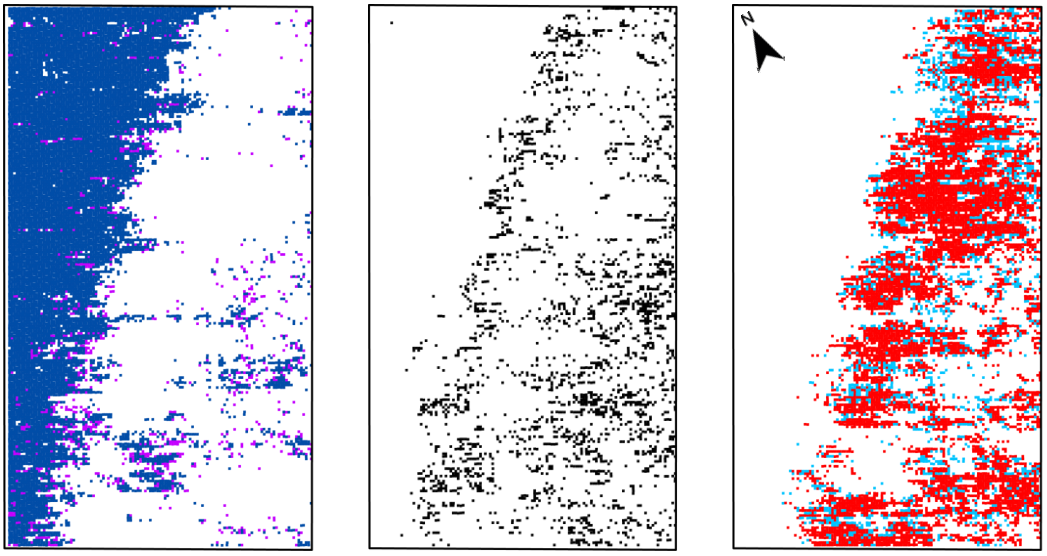


(carte du bas)

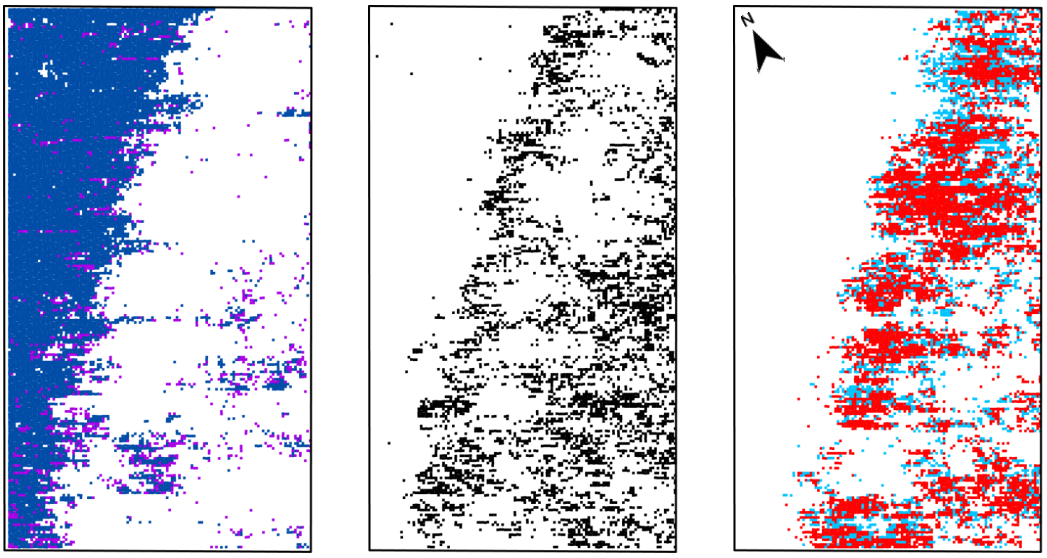


ZONE OUEST

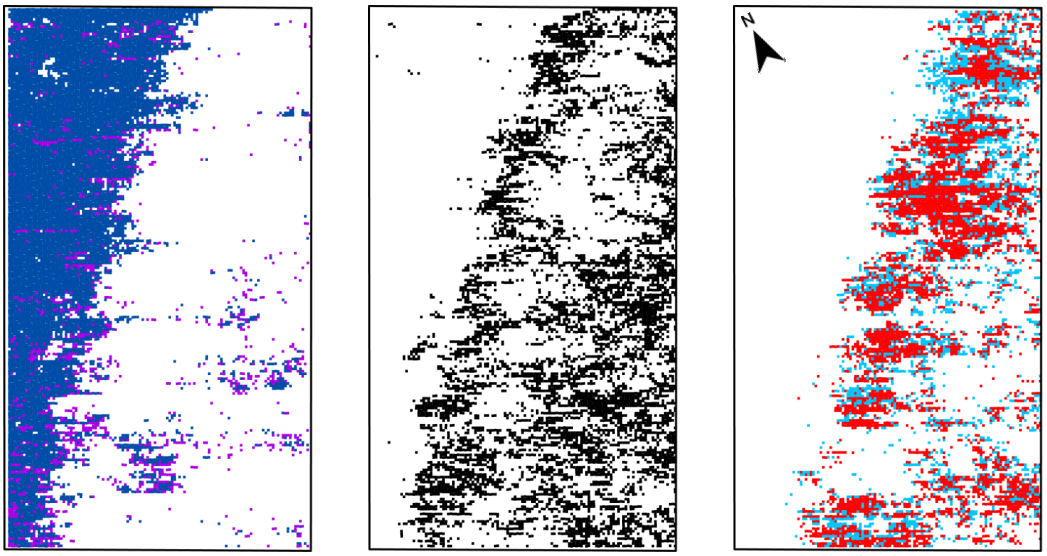
α=2 Ω.m



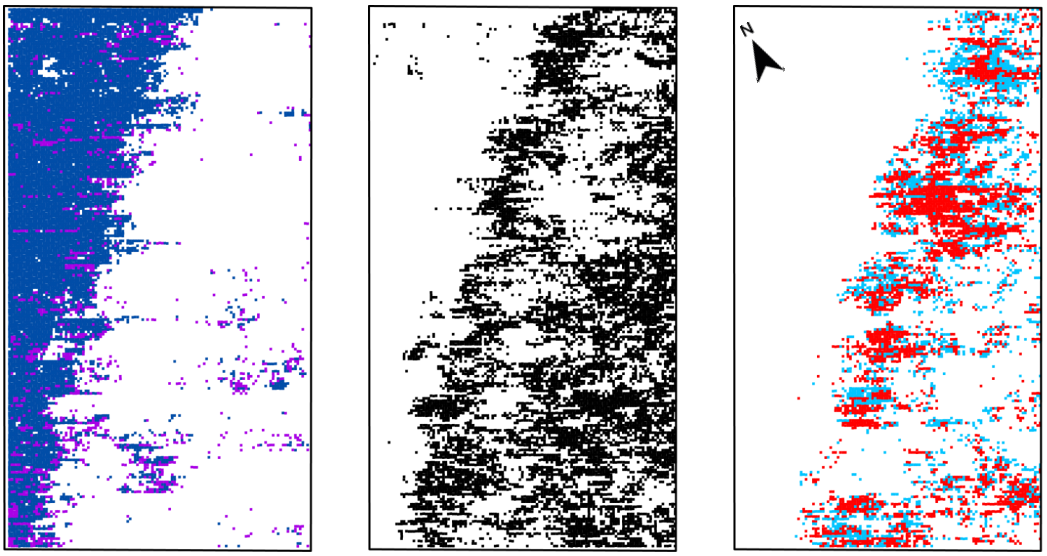
α=3 Ω.m



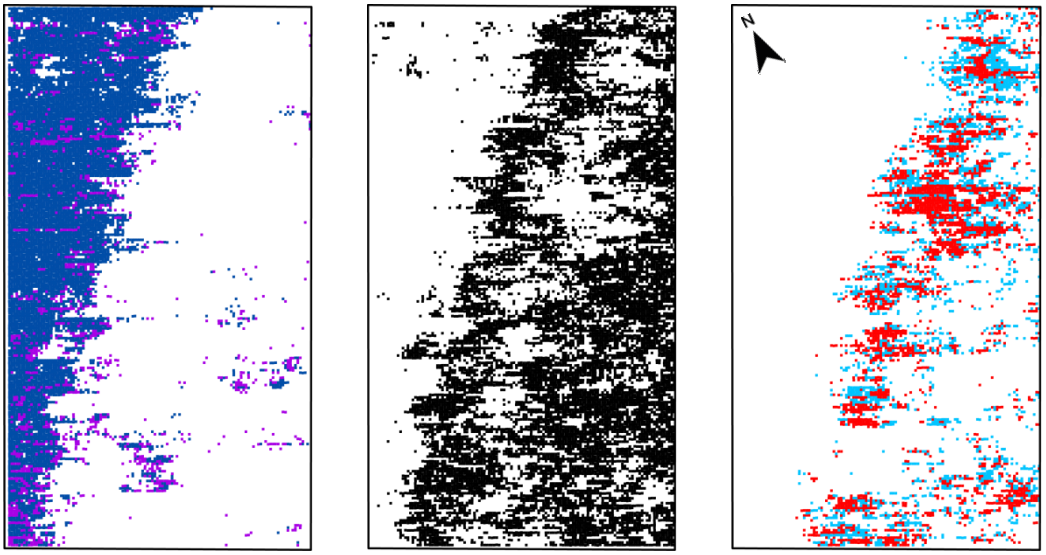
α=4 Ω.m



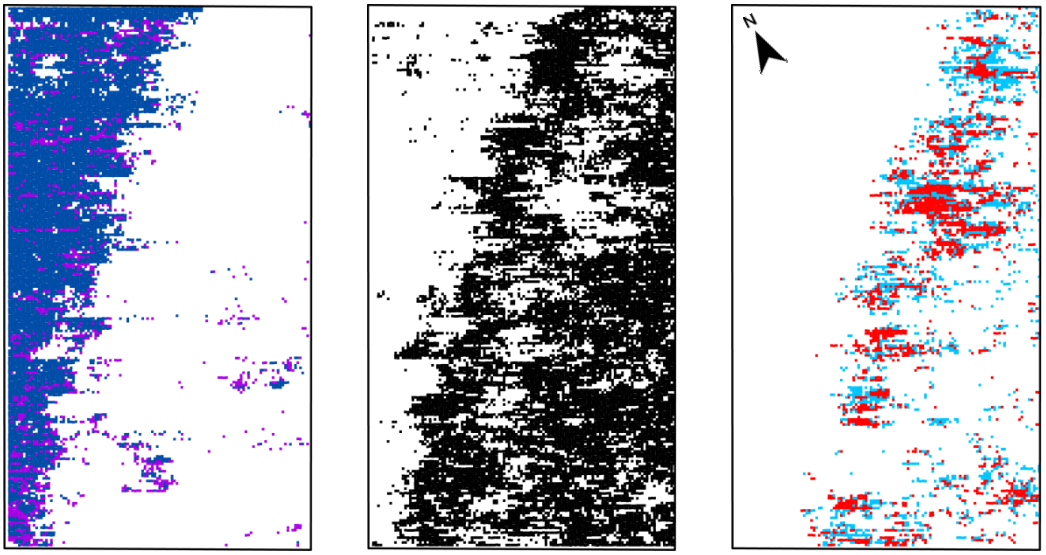
α=5 Ω.m



α=6 Ω.m

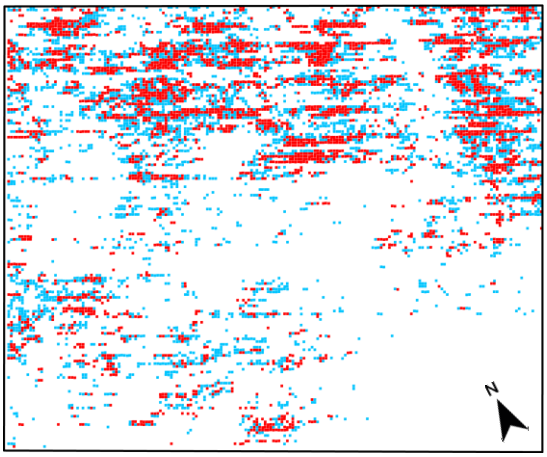


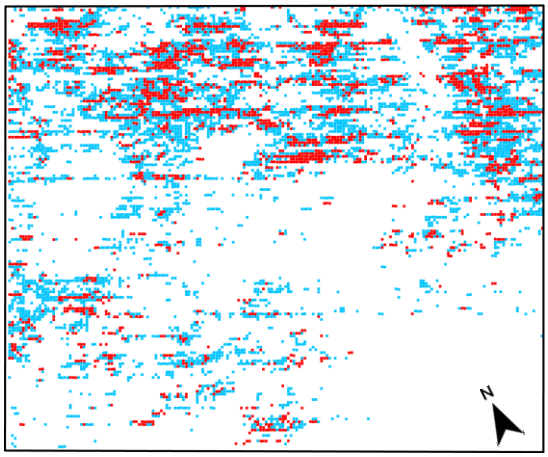
α=7 Ω.m

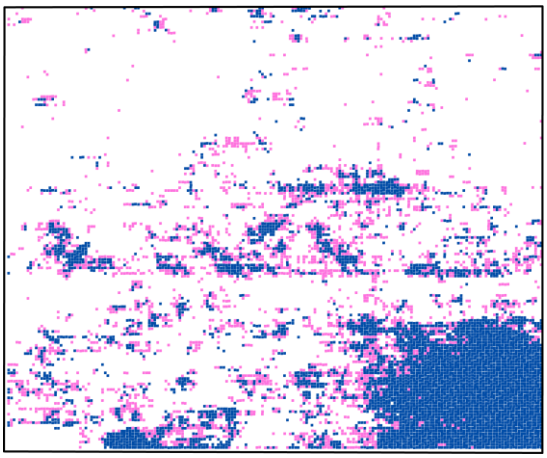


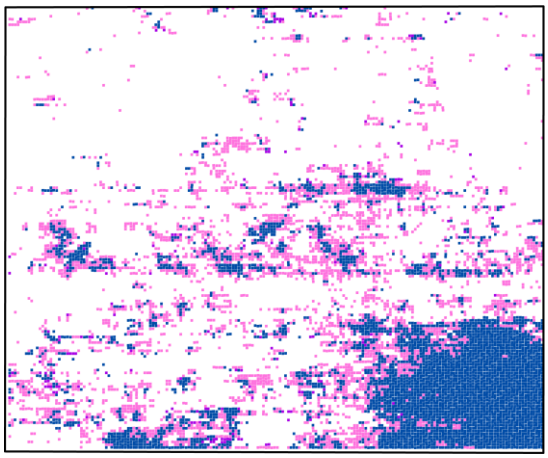
ZONE EST

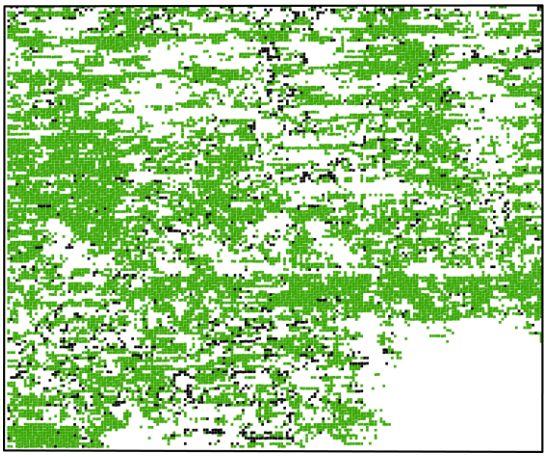
α=2 Ω.m **α=3 Ω.m**

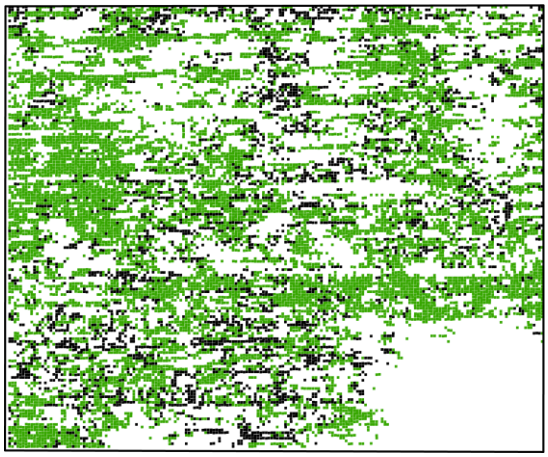




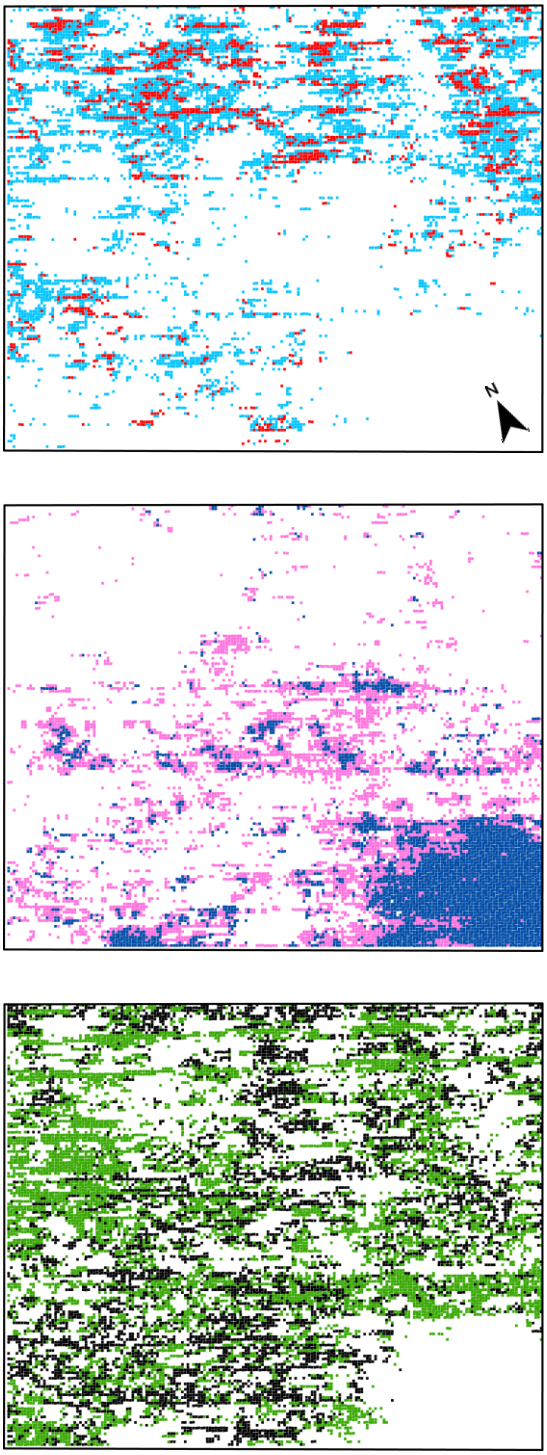




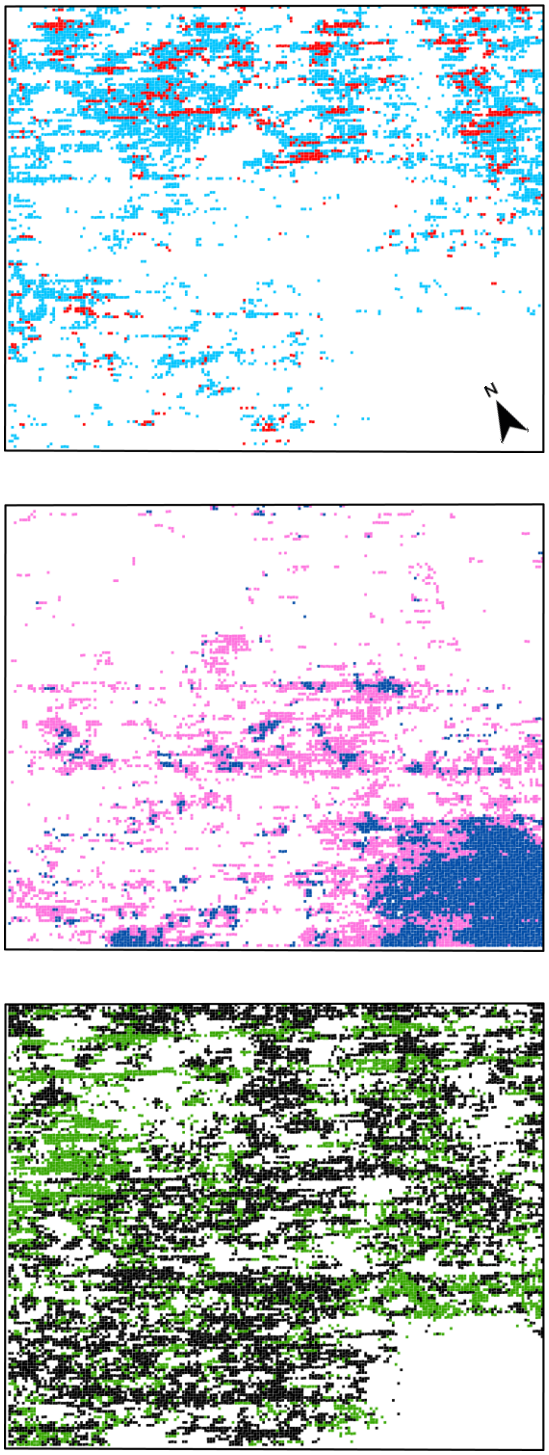




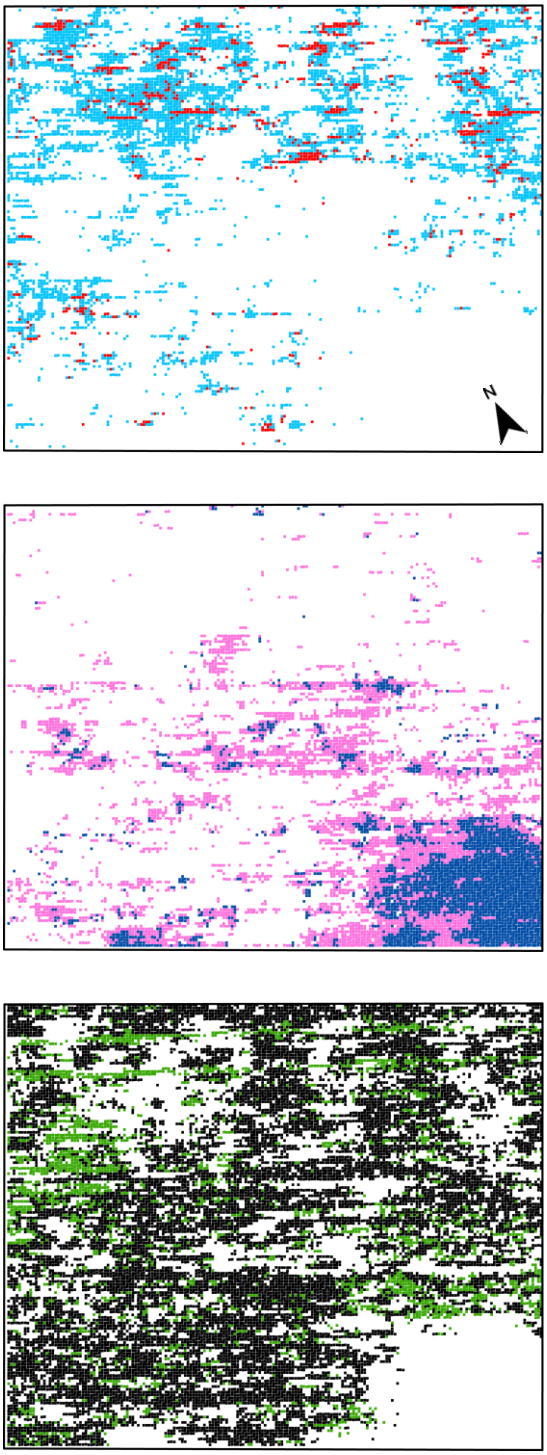
α=4 Ω.m



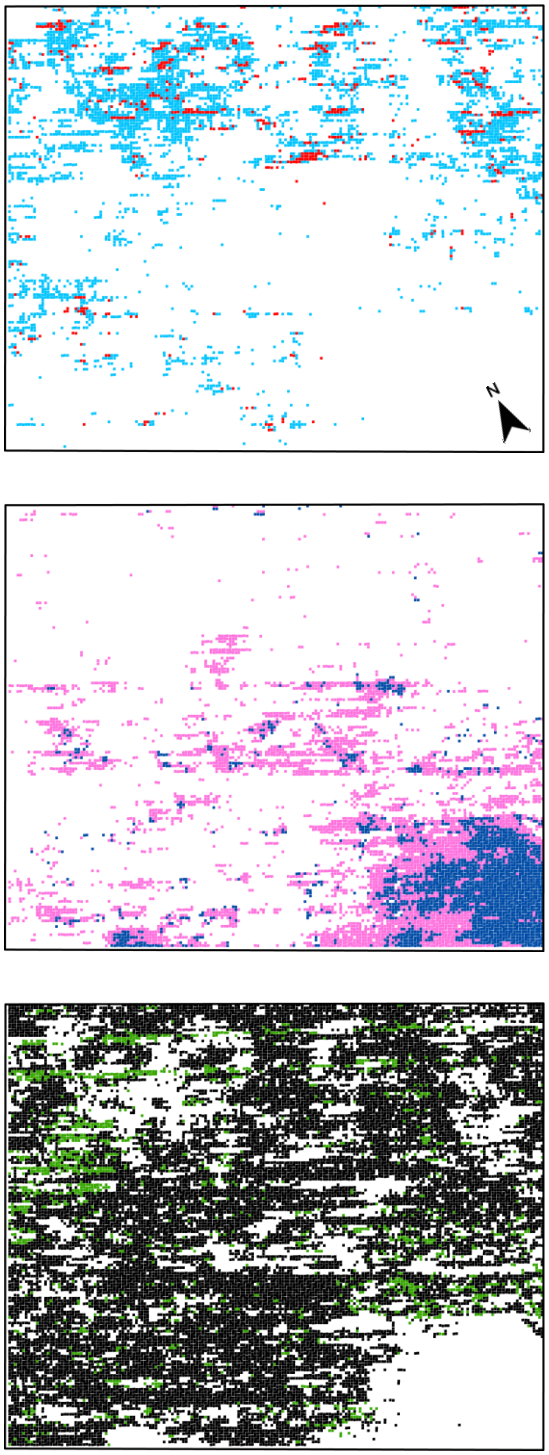
α=5 Ω.m



α=6 Ω.m



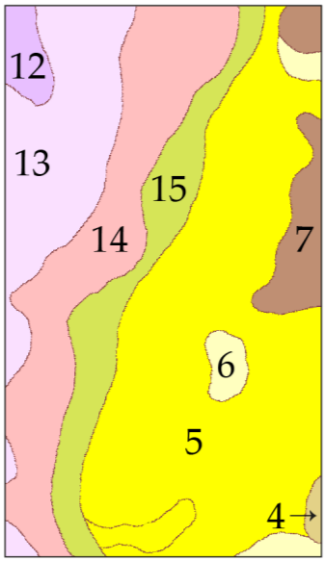
α=7 Ω.m

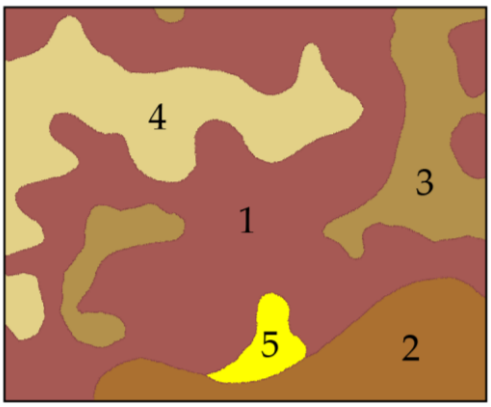


ANNEXE 6. Cartographie des 9 profils-types définis sur les zones prospectées de Ouarville pour α variant de 2 à 7 Ω.m

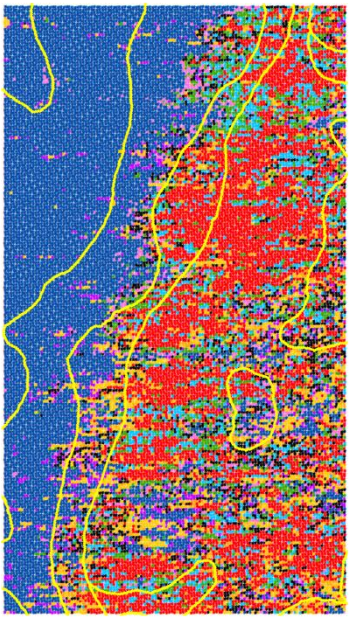
Rappel du code couleur utilisé pour la cartographie des profils-types :

Rappel des UCS sur les zones prospectées :

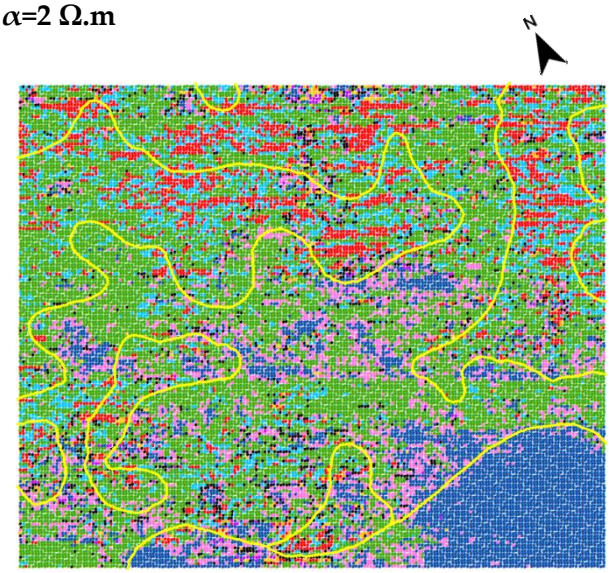


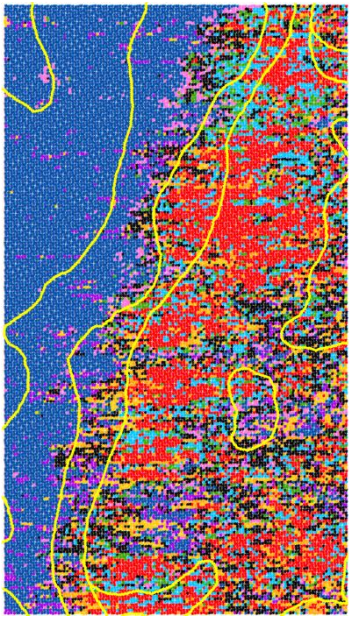


ZONE OUEST **ZONE EST**

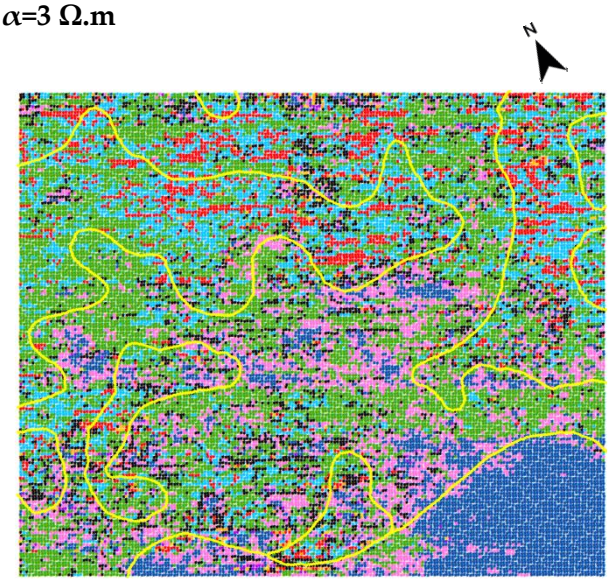


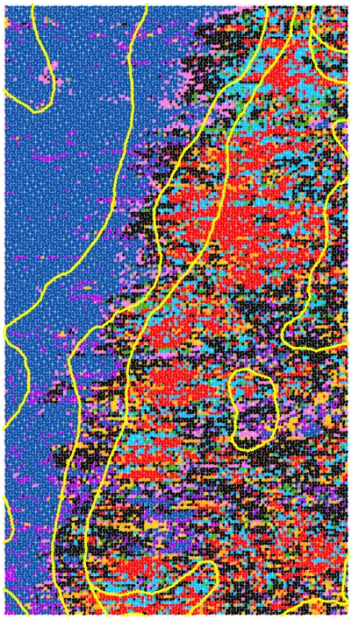
α=2 Ω.m



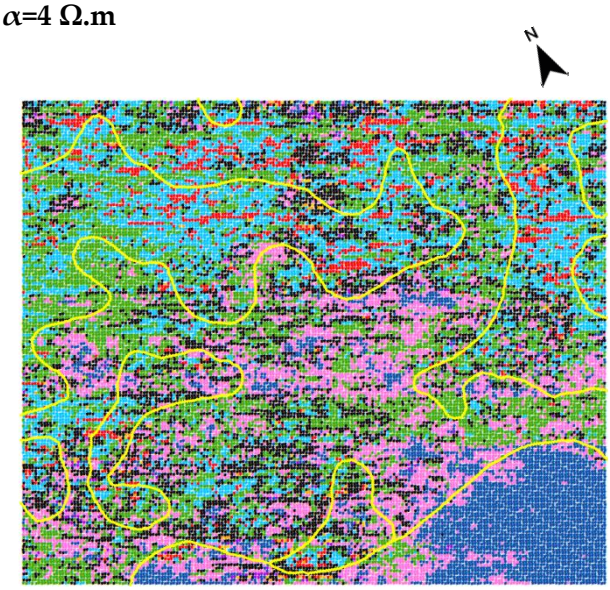


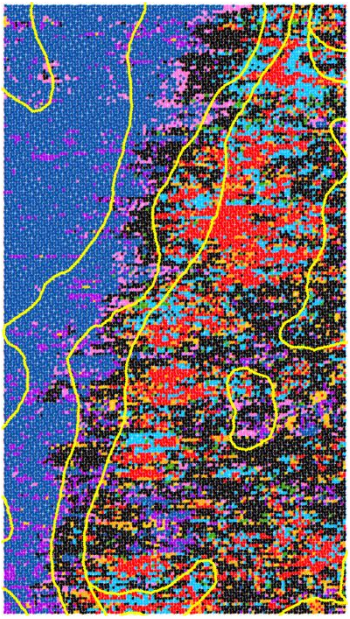
α=3 Ω.m



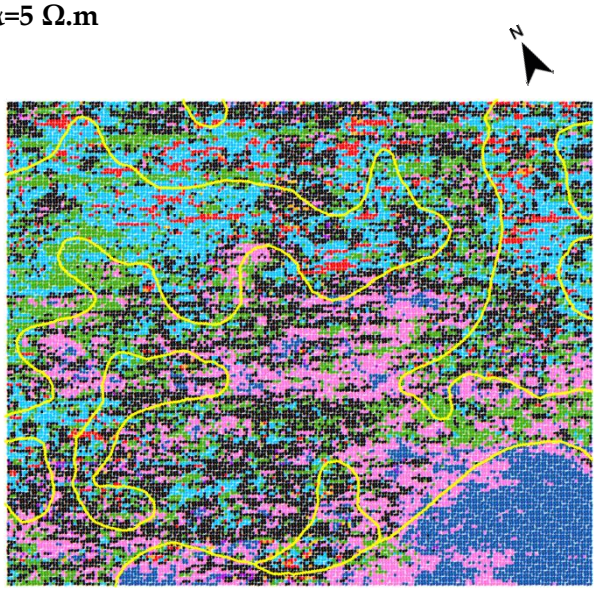


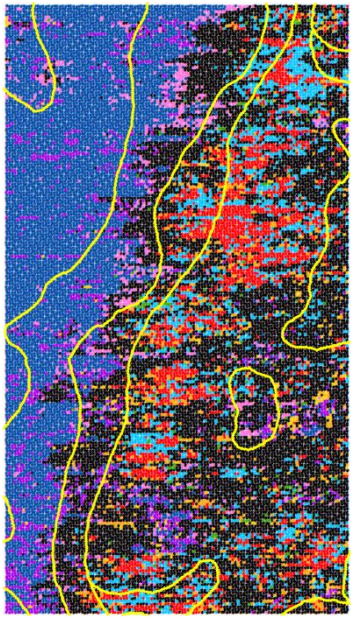
α=4 Ω.m



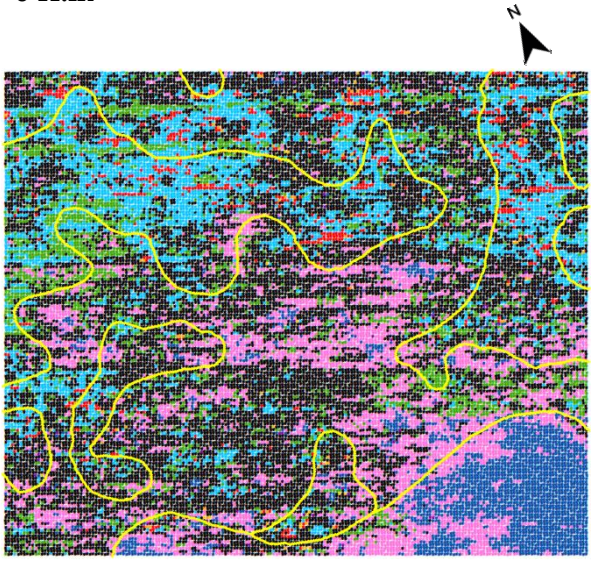


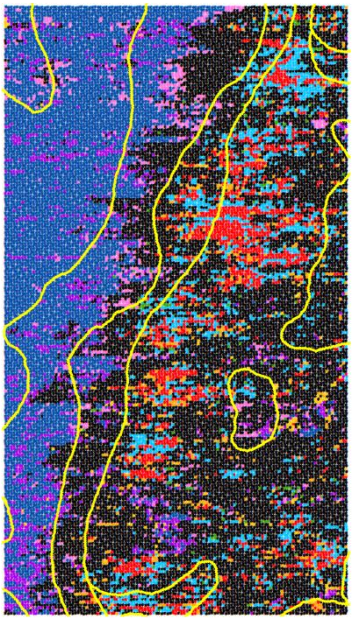
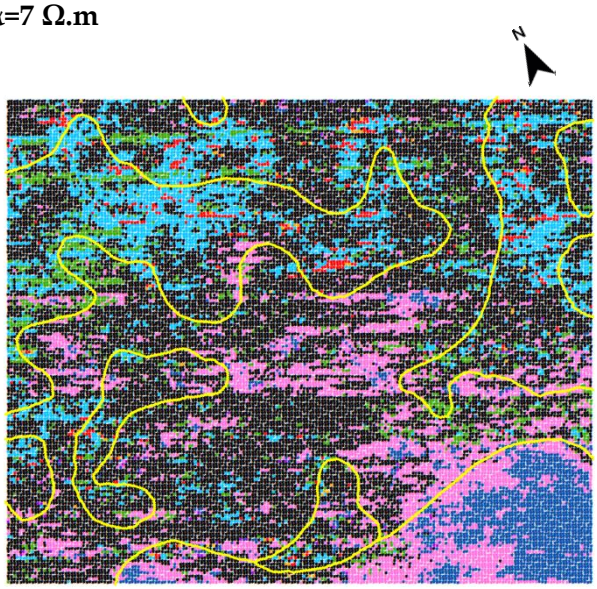
α=5 Ω.m





α=6 Ω.m





α=7 Ω.m