Comparaison et couplage de méthodes géophysiques pour l'amélioration des reconnaissances des sols dans les projets géotechniques en milieu périurbain

Olivier Guerrero

▶ **To cite this version:**

Olivier Guerrero. Comparaison et couplage de méthodes géophysiques pour l'amélioration des reconnaissances des sols dans les projets géotechniques en milieu périurbain. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2014. Français. NNT : 2014BORD0137 . tel-01133753

HAL Id: tel-01133753

https://theses.hal.science/tel-01133753

Submitted on 20 Mar 2015

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.

université de BORDEAUX

THÈSE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

(ED209)

SPÉCIALITÉ : MÉCANIQUE

Olivier GUERRERO

Comparaison et couplage de méthodes géophysiques pour l'amélioration des reconnaissances des sols dans les projets géotechniques en milieu périurbain.

Soutenue le 1er Juillet 2014

Membres du jury :

M. BREUL, Pierre	Professeur, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand	Président et rapporteur
M. COSENZA, Philippe	Professeur, Université de Poitiers	Rapporteur
M. LEBERT, François	Ingénieur, BRGM – Orléans	Examinateur
M. BREYSSE, Denys	Professeur, Université de Bordeaux	Directeur de thèse
M. LATASTE, Jean-François	Maître de Conférence, Université de Bordeaux	Co-directeur de thèse
M. MARACHE, Antoine	Maître de Conférence, Université de Bordeaux	Co-directeur de thèse

Résumé

Titre : Comparaison et couplage de méthodes géophysiques pour l'amélioration des reconnaissances des sols dans les projets géotechniques en milieu périurbain.

Résumé : Dans le cadre d'un projet d'aménagement, la reconnaissance du sous-sol est une étape prépondérante pour la construction d'un bâtiment. Le géotechnicien se doit de définir le comportement mécanique des sols à partir d'un nombre limité de sondages. La problématique soulevée par les prospections géotechniques est qu'il est difficile d'une part d'étendre une information ponctuelle dans l'environnement proche des sondages, et d'autre part d'estimer la variabilité latérale des matériaux.

Dans cette optique, cette thèse développe une approche novatrice de combinaison de méthodes géophysiques aidant à la quantification de la variabilité spatiale des structures géoélectriques du sous-sol. Dans un second temps, au regard des limites rencontrées dans la modélisation 3D des structures géoélectriques du sous-sol, nous avons mis au point un processus innovant de modélisation 3D des propriétés physiques du sous-sol par combinaison de méthodes géophysiques. Les travaux menés ont permis de caractériser les paramètres régissant le positionnement et la quantité de données sources nécessaires.

Enfin, un dispositif innovant de mesure de Tomographie de Résistivité Electrique en Cinématique (TREC) a été développé. La validation du dispositif sur trois sites différents a permis de mettre en évidence sa capacité à détecter les structures géoélectriques des sols sur un linéaire de plusieurs centaines de mètres. Ce dispositif constitue un outil précieux pour l'étude des structures géoélectriques du sous-sol dans le cadre de prospections géophysiques à grand rendement.

Mots clés : Variabilité spatiale, Combinaison de données, Modélisation 3D, Prospection géophysique à grand rendement, Reconnaissance des sols.

Unité de recherche

Institut de Mécanique et d'Ingénierie, UMR 5295, département Génie Civil Environnemental.
Bâtiment B18, Allée Geoffroy St Hillaire, CS 50023, 33615 Pessac cedex.

Abstract

Title : Comparison and coupling of geophysical methods for improving the recognition of soils in geotechnical projects in peri-urban areas.

Abstract : The geotechnical study of a building project is a decisive step for the construction of it. The geotechnical engineer must define the mechanical behavior of soils from a limited number of drills. The problem of the geotechnical surveys is, on the one hand that difficult to extend a punctual data in the near space to the drills, and on the other hand to estimate the lateral variability of materials.

In this context, this thesis develops an innovative approach by combination of geophysical methods to quantify the spatial variability of geoelectrical structures. In a second time, against the known limits of the 3D modeling of soil geoelectrical structures, we have developed an innovative process of 3D modeling of the physical properties of soil by geophysical methods combination. These works allow characterizing the parameters who governing the positioning and the number of necessary primary data.

Finally, an innovative measuring device of Kinematic Electrical Resistivity Tomography (KERT) has been developed. The validation of the device on three different site has allowed to highlight its ability to detect the soil geoelectrical structures within a linear of hundreds meters. This device is a valuable tool for studying soil geoelectrical structures in the context of high yield geophysical prospection.

Keywords : Spatial variability, Data combination, 3D modelling, High yield geophysical prospection, Soil prospection.

Unité de recherche

Institut de Mécanique et d'Ingénierie, UMR 5295, département Génie Civil Environnemental.
Bâtiment B18, Allée Geoffroy St Hillaire, CS 50023, 33615 Pessac cedex.

Remerciements

Le travail présenté ici est l'aboutissement de travaux menés au sein du département Génie Civil Environnemental de l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M-GCE). Je tiens en premier lieu à remercier mes trois directeurs de thèse pour leur encadrement durant ces travaux ; merci à Denys BREYSSE d'avoir accepté d'encadrer cette thèse ; merci à Jean-François LATASTE et Antoine MARACHE pour vôtre pédagogie et vôtre patience. Merci pour l'ensemble des remarques constructives qui m'a permis de mener ces travaux au stade actuel, à m'avoir appris ce que le mot condenser signifiait et pour le temps consacré à me faire appliquer ce concept.

Je tiens à remercier les membres du jury, Pierre BREUL, Philippe COSENZA et François LEBERT, pour la minutie et l'application avec lesquelles vous avez effectués la relecture de mon manuscrit. Merci à tous pour vos rectifications et vos remarques constructives.

A l'ensemble des partenaires du projet D²SOU : merci à Michel DABAS, Jean Marc DOUGUET, Mathieu GARNIER, Jean-Pierre LAMMENS, Annick LOSCHETTER, Gilles OLIVE, Jean-Marc VALET et l'ensemble du consortium D²SOU pour les nombreux échanges que nous avons pu avoir lors des différentes réunions. Et encore merci à François LEBERT pour l'enthousiasme avec lequel vous avez mené l'ensemble des réunions à travers la France, et l'ensemble des débats que nous avons pu avoir au cours de ces réunions.

Cette thèse n'aurait pu être ce qu'elle est sans son terrain expérimental, je remercie donc Christophe PIETTE, et par là même l'ensemble des contacts que j'ai eu avec la Mairie de Pessac, pour m'avoir autorisé l'accès aux différentes parcelles du quartier de l'Artigon. Pour l'ensemble des mesures effectuées sur ce terrain, je remercie Fabien NAESSENS qui m'a permis d'avoir pour chaque sortie du matériel fonctionnel, et pour ses conseils lors des différentes phases de développement du dispositif TREC.

Je tiens à remercier toute l'équipe travaillant au B18. Merci à Jacqueline, Marie-Charlotte et Martine pour avoir trouvé réponse à mes demandes tardives et pour avoir su trouver les papiers qui manquaient pour finaliser nombre de procédures. Je tiens à remercier l'ensemble des doctorants que j'ai pu côtoyer, que ce soit sur le terrain ou au B18, et plus particulièrement Jessica, Esra, Thibaut, Saber, Yassine, Tan et Shan. Sans oublier celles et ceux avec qui j'ai partagé de nombreux moments à "la cave", merci à Céline, Fanny, Marion, Nicolas, Sébastien et Atmane pour l'ambiance que vous avez su maintenir dans cette pièce et pour m'y avoir supporté malgré les crises de Nerf.

Merci à mes amis rockeurs, Blandine, Aurélie, Louise, Maggy, Julien, Ludovic, Craig, sans pouvoir tous les nommer, et notre chorégraphe à tous, Jeff, pour l'ensemble des Guinguettes. Ces moments m'ont permis de garder le rythme et de faire la rencontre. Merci à mes amis musiciens, Louisa, Nicolas, Arnaud, Pierre, et à notre Maestro, Sébastien, pour tout ce que l'on a réussit à jouer de concert et les canons involontaires.

Enfin, ma dernière pensée va à ma famille et mes parents pour leur précieux soutien durant toute la durée de ces travaux. Mon cher frère, même si tu n'as jamais compris le sous-sol, ne t'inquiète pas, je n'ai jamais vraiment compris tes cellules (je tacherai tout de même de consolider les acquis pour ta soutenance), bon courage à toi et à Camille pour cette dernière ligne droite.

Je ne pourrai terminer ces remerciements sans exprimer toute ma reconnaissance à Emmanuelle pour m'avoir soutenu (au propre comme au figuré) tout au long de ces travaux et qui a su apporter une contribution non négligeable à ce manuscrit.

Merci à tous de m'avoir accompagné durant cette aventure.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE ---------- 1

CHAPITRE I : La Reconnaissance des sols : Contexte et état de l'art. ---------- 4

Partie I – La reconnaissance du sous-sol, contexte. ---------- 5

1. Contexte d'étude, le projet ANR D²SOU. ---------- 5

1.1. Définition du projet ANR D²SOU. ---------- 5
1.2. Contexte réglementaire. ---------- 6

2. Variabilité du sol et du sous-sol. ---------- 7

2.1 Définition. ---------- 7
2.2. La notion de variabilité des sols. ---------- 8
2.3. Description de la variabilité des sols. ---------- 9
2.3.1. Variabilité spatiale. ---------- **9**
2.3.2. Variabilité temporelle. ---------- **10**
2.3.3. Notion d'hétérogénéité et d'homogénéité des sols. ---------- **10**

3. Incertitude des paramètres mesurés, de la mesure à la réalité. ---------- 12

3.1. Composante aléatoire de l'incertitude. ---------- 13
3.2. Composante systématique de l'erreur. ---------- 14
3.3. Sources d'erreur conditionnelles. ---------- 15
3.3.1. Erreur de l'instant. ---------- **15**
3.3.2. Erreur d'enquête. ---------- **15**
3.3.3. Erreur d'échantillonnage. ---------- **16**
3.4. L'incertitude sur le modèle. ---------- 16

4. La gestion du risque. ---------- 17

4.1. Définition du risque. ---------- 18
4.2. Identification des aléas géotechniques. ---------- 20
4.3. Illustration de l'aléa géotechnique, étude de cas. ---------- 21

5. Reconnaissance du sous-sol, l'étude globale par l'échantillon. ---------- 22

5.1. Les ensembles flous. ---------- 23
5.2. L'analyse statistique des bases de données. ---------- 23
5.3. L'analyse géostatistique. ---------- 25
5.4. Zonage des propriétés en parcelles homogènes. ---------- 26
5.4.1. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA). ---------- **26**
5.4.2. Analyse par Transformée de Fourier. ---------- **29**

6. Bilan Partie I. ---------- 31

Partie II – Reconnaissance du sous-sol, état de l'art. ---------- 32

1. Les moyens de reconnaissance des sols. ---------- 32

1.1. Reconnaissance géotechnique. ---------- 32
1.1.1. Contexte et objectifs. ---------- **32**
1.1.2. Les moyens d'investigation. ---------- **33**
1.1.3. Moyen d'essai géotechnique retenu pour la thèse : le pénétromètre dynamique. ---------- **34**
1.2. Reconnaissance géophysique. ---------- 37
1.2.1. Définitions. ---------- **38**

1.2.2. La prospection électrique. ---------- **40**
1.2.3. La prospection électromagnétique. ---------- **43**

2. La reconnaissance des sols en chantier.----------45

2.1. Organisation de la reconnaissance, une approche réglementée.----------45
2.2. Les recommandations.----------47
2.2.1. Recommandations sur la succession des reconnaissances géotechniques. ---------- **48**
2.2.3. Bilan des recommandations sur les reconnaissances géotechniques. ---------- **49**

3. Le grand rendement en prospection géophysique. ----------50

3.1. Notion de grand rendement. ----------50
3.2. Les différents dispositifs développés. ---------- **51**
3.3. Combinaison de méthodes de reconnaissance. ----------53
3.3.1. Lignes de recherche. ---------- **53**
3.3.2. Synthèse sur la combinaison de méthodes de reconnaissance.---------- **54**

4. Bilan de la Partie II.----------56

CHAPITRE II : Campagne de mesure et analyse de données----------57

1. Contextes du site d'étude. ----------58

1.1. Contexte géographique. ----------58
1.2. Contexte géologique. ----------59
1.3. Contexte hydrogéologique. ----------60
1.4. Contexte de l'étude, occupation des sols. ----------62

2. Reconnaissance des sols. ----------62

2.1. Etude géologique. ----------62
2.1.1. Analyse de fouilles. ---------- **63**
2.1.2. Sondages in-situ.---------- **65**
2.1.3. Classification des sols. ---------- **66**
2.2. Prospections géophysiques.----------68
2.2.1. Prospection par Tomographie de Résistivité Electrique (TRE). ---------- **68**
2.2.2. Slingram : EM-31.---------- **73**
2.3. Prospections géotechniques : PANDA. ----------77
2.4. Bilan. ----------80

3. Intégration des prospections à grand rendement mises en œuvre par les partenaires D²SOU.81

3.1. Méthodes des partenaires du projet D²SOU. ----------81
3.1.1. Prospection Géocarta : Automatic Resistivity Profiling (ARP®).---------- **81**
3.1.2. Prospection BRGM : l'OhmMapper.---------- **82**
3.2. Comparaison des investigations par les différentes méthodes. ----------83
3.2.1. Méthodes électriques résistives. ---------- **83**
3.2.2. Méthodes électromagnétiques.---------- **85**
3.3. Comparaison des cartographies de résistivité obtenues par les différentes méthodes.-----86
3.4. Bilan. ----------88

4. Prise en compte de la variabilité spatiale des propriétés physiques et mécaniques des sols. ---89

4.1. Classification Hiérarchique Ascendante sur TRE.----------89
4.2. Approximation d'un lien entre propriétés physiques et mécaniques.----------92
4.3. Analyse verticale des données.----------95
4.3.1. Tomographie de résistivité électrique.---------- **95**
4.3.2. Sondages Pénétrométriques PANDA. ---------- **97**
4.3.3. Structuration verticale du sous-sol.---------- **99**
4.4. Combinaison de bases de données. ---------- 100

4.5. Approche géostatistique, prospection électromagnétique. ---------- 101
4.6. Résultats, reconnaissance de la variabilité du sous-sol, parcelle n°1. ---------- 105

5. Conclusion. ---------- 106

CHAPITRE III : Modélisation 3D du sous-sol - Combinaison de données géophysiques. ------- 108

1. Bases bibliographiques et bases de développement. ---------- 109

1.1. Bibliographie sur la modélisation 3D du sous-sol. ---------- 109
1.1.1. Cartographie à plusieurs profondeurs d'investigation. ---------- **110**
1.1.2. Juxtaposition de coupes parallèles. ---------- **111**
1.1.3. Reconnaissance directe d'un volume. ---------- **111**
1.1.4. Interpolation des données : créer une continuité entre les mesures. ---------- **111**
1.2. Bases du processus PeP, liens entre mesures électromagnétiques et électriques. --------- 112
1.2.1. Approche 1D. ---------- **112**
1.2.2. Approche 2D. ---------- **114**
1.2.3. Données du site expérimental. ---------- **116**
1.3. La reconnaissance des structures. ---------- 119
1.4. Bilan, modélisation 3D du sous-sol. ---------- 119

2. Analyses des liens entre données EM et TRE. ---------- 122

2.1. Le processus Proche en Proche, mise en équation. ---------- 122
2.1.1. Etude des liens entre pixels de résistivité apparente. ---------- **123**
2.1.2. Le choix des pixels proches. ---------- **126**
2.1.3. Estimation de la structure géoélectrique au sein d'une colonne. ---------- **129**
2.2. Formulation de l'incertitude des résultats. ---------- 131
2.2.1. Formulation du critère de qualité. ---------- **131**
2.2.2. Interprétation des cartes de qualité. ---------- **132**

3. Illustration du processus PeP sur des données numériques synthétiques. ---------- 134

3.1. Modélisation de structures homogènes continues. ---------- 134
3.2. Modélisation d'une lentille d'argile. ---------- 138
3.3. Modélisation d'une discontinuité. ---------- 140
3.4. Bilan. ---------- 142

4. Application sur le site test. ---------- 142

5. Conclusion. ---------- 145

CHAPITRE IV : Prospection à grand rendement – Profilage cinématique. ---------- 147

1. Développement du matériel, caractérisation du dispositif de mesure. ---------- 148

1.1. Etat d'avancement du dispositif TREC. ---------- 149
1.2. Choix du dispositif de mesure de TREC. ---------- 150
1.3. Choix des électrodes d'injection du courant du dispositif TREC. ---------- 153
1.3.1. Le courant injecté pour des mesures TRE conventionnelles. ---------- **154**
1.3.2. Prototypes d'électrodes et potentiel d'injection du courant. ---------- **155**
1.3.3. Simulation numérique du champ de potentiel généré par les électrodes TREC. ----- **158**
1.4. Dispositif de mesure de TREC finalisé. ---------- 159

2. Traitement du bruit des mesures en TREC. ---------- 161

2.1. Mise en évidence du bruit de mesure. ---------- 161
2.2. Revue des moyens de filtrage et traitement de données bruitées. ---------- 162
2.3. Le lissage des données TREC par moyenne mobile pondérée. ---------- 163
2.3.1. Principe du lissage par itération de moyenne mobile pondérée. ---------- **163**

2.3.2. Détermination du nombre d'itérations nécessaires et des coefficients pondérateurs. ---- **164**
2.4. Lissage des données TREC par analyse de Fourier (FFT). ---- 166
2.5. Impacts sur les mesures de TREC du lissage des données. ---- 169
2.6. Discussion sur le lissage par MMP et FFT. ---- 170

3. Développement d'un processus de traitement des données TREC. ---- 171

3.1. Correction des gammes de résistivités apparentes mesurées. ---- 171
3.1.1. Principe de la correction. ---- **171**
3.1.2. Exploitation des résultats. ---- **172**
3.2. Part de la Résistance de contact Rc. ---- 174
3.2.1. Notions concernées. ---- **174**
3.2.2. Exploitation des résultats. ---- **175**
3.3. Correction de la résistance de contact. ---- 176
3.4. Impact des traitements sur le bruit des mesures. ---- 176

4. Prospections sur sites expérimentaux, traitement du bruit de mesure. ---- 178

4.1. Site de Pessac, prospections de faible linéaire. ---- 178
4.1.1. Analyse primaire. ---- **178**
4.1.2. Procédés de lissage des mesures. ---- **179**
4.2. Site de Cestas, prospection à grand rendement sur un grand linéaire. ---- 181
4.2.1. Analyse primaire des mesures. ---- **182**
4.2.2. Procédé de lissage des mesures. ---- **183**
4.2.3. Généralisation du traitement à l'ensemble du profil à grand rendement. ---- **185**
4.2.4. Comparaison du profil TREC avec un profil EM-31. ---- **186**
4.3. Discussion sur les résultats accessibles par le processus TREC. ---- 187

5. Conclusion. ---- 189

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES. ---- 191

BIBLIOGRAPHIE ---- 196

ANNEXES ---- 216

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 : Profil du sous-sol (d'après : Kubiëna 1950, in Hartemink 2009). 8

Figure 1.2 : Homogénéité et hétérogénéité du sol de fondation à différentes échelles. 11

Figure 1.3 : Analogie de l'incertitude, représentation d'une mesure juste et fidèle (adapté de : Smith 2013)..... 15

Figure 1.4 : Caractérisation probabiliste du modèle de transformation (Phoon et al 1999b). 16

Figure 1.5 : Distribution des paires journal/thème traitant de la structure des sols (Young et al 2001).18

Figure 1.6 : Taux empiriques de défaillance des installations en génie civil (Phoon et al 2000)..... 19

Figure 1.7 : Statistiques sur les dommages au sein de projets d'aménagement, Angleterre. (Hosseini, 2013)..... 20

Figure 1.8 : Cas d'étude, a) coupe lithologique issue des tarières et points de mesures pressiométriques, b) plan d'implantation (d'après : Etude Géotechnique - Sol Conseil)..... 21

Figure 1.9 : Nombres flous, possibilité des évènements. 23

Figure 1.10 : Caractéristiques principales d'un variogramme. 26

Figure 1.11 : Etapes d'une CHA, a) choix des couples d'individus, b) visualisation des distances entre clusters avec un dendrogramme. 28

Figure 1.12 : Signaux périodiques et transformées de Fourier associées. 30

Figure 1.13 : Principe de construction d'une pseudo-section (d'après : Loke et al 2013). 41

Figure 1.14 : Algorithme d'inversion d'une TRE (Comte 2008). 43

Figure 1.15 : Mesures Electromagnétiques, a) principe des champs primaire et secondaire, b) principe du déphasage du champ secondaire (d'après : Giroux 2005, Chouteau 2006)..... 44

Figure 1.16 : Comparaison des dipôles en orientation Verticale et Horizontale, a) réponse relative d'une couche de sol, b) réponse cumulative d'une couche de sol (d'après : McNeill 1980). 45

Figure 1.17 : Recommandations sur l'implantation des essais géotechniques (d'après : Magnan et al 1980)..... 49

Figure 1.18 : Dispositifs de mesure à grand rendement, a) dispositif MUCEP (CNRS), b) dispositif ARP-03 (Géocarta)..... 51

Figure 1.19 : Corrélation géophysique - géotechnique a) modèle géoélectrique obtenu par SEV, b) modèle obtenu par inversion des résistivités électriques, c) couples : résistance à la pointe ; résistivité inversée de TRE, d) couples : résistance à la pointe ; résistivité inversée de SEV (Cosenza et al 2006). 54

Figure 1.20 : Optimisation d'une reconnaissance des sols. 55

Figure 1.21 : Fusion de bases de données. 56

Figure 2.1 : Contexte géographique du site d'étude, a) Communauté Urbaine de Bordeaux, localisation de Pessac (source : artisans-gironde), b) Plan de localisation du quartier de l'Artigon et tissu urbain environnant. 58

Figure 2.2 : Topographie de la parcelle n°1, a) implantation de la coupe, b) coupe topographique. 59

Figure 2.3 : Estimation de la lithologie sur site, a) implantation des sondages, b) coupe géologique (d'après : Guekie Simo 2012). 60

Figure 2.4 : Pluviométrie et évapotranspiration estimées pour le site expérimental. 61

Figure 2.5 : Localisation des études géologiques. 63

Figure 2.6 : Coupe lithologique (1), a) paroi de l'excavation, b) coupe schématique (données fournies par : R. Fabre) 64

Figure 2.7 : Coupe lithologique (2), a) paroi de l'excavation, b) sols de surface, c) coupe schématique (données fournies par : R. Fabre). 65

Figure 2.8 : Tarières et coupes lithologiques associées. 66

Figure 2.9 : Classification GTR des sols. 67

Figure 2.10 : Prospection par TRE de la parcelle n°1, a) répartition des mesures, b) représentation 3D. 69

Figure 2.11 : Analyse statistique de TRE01, a) profondeur des niveaux, b) paramètres statistiques, c) définition des couches. 70

Figure 2.12 : Prospection par TRE des parcelles n°2 et n°3, a) répartition des mesures, b) TRE obtenues après inversion. 72

Figure 2.13 : Excavations sur chantier au droit de TRE11, a) observation des sols de surface débarrassés de 2m de terre végétale et de remblais, b) fosse d'observation de la lithologie. 73

Figure 2.14 : Cartographie de la prospection électromagnétique EM-31 (résistivité apparente), a) cartographie générale, b) champ vertical (0-6m), c) champ horizontal (0-3m). 74

Figure 2.15 : Coupe géologique théorique de la parcelle n°1. 75

Figure 2.16 : Cartographie électromagnétique de la parcelle n°2, champ vertical. 76

Figure 2.17 : Cartographie électromagnétique de la parcelle n°3, a) champ vertical, b) champ horizontal. 77

Figure 2.18 : Sondages au pénétromètre PANDA a) plan d'implantation b) 3 PANDA voisins (SP11-12-13), c) comparaison avec la lithologie observée à la tarière 3. 78

Figure 2.19 : Comparaison entre la lithologie déduite des tarières et les pénétromètres effectués aux mêmes coordonnées. 79

Figure 2.20 : Dispositif de mesure ARP et configuration des électrodes. 82

Figure 2.21 : Dispositif de mesure OhmMapper. 82

Figure 2.22 Comparaison des profils de résistivité apparente en ARP (voie3) et TRE01 (niv1-niv2). 84

Figure 2.23 : Fonction de répartition des résistivités apparentes mesurées en ARP (niv3) et pour les différentes TRE (niv1 & niv2). 85

Figure 2.24 : Comparaison des profils de résistivité apparente en OhmMapper EM-31 et TRE02. 86

Figure 2.25 : Analyse croisée des mesures a) EM-31, b) ARP niveau 3, c) OhmMapper niveau 1..... 86

Figure 2.26 : Fonction de répartition des mesures EM-31 et ARP..... 87

Figure 2.27 : Détermination du nombre approprié de clusters. 91

Figure 2.28 : Représentation des gammes de résistivité vraie en fonction des clusters des TRE. 92

Figure 2.29 : Comparaison des mesures, a) Tarière n°3, b) PANDA, c) TRE02, x=30m. 94

Figure 2.30 : Variation verticale des résistivités vraies et détail pour z = 4m de la fonction de répartition des résistivités vraies, a) TRE01, b) TRE02, c)TRE03, d)TRE04..... 96

Figure 2.31 : Profil des résistances à la pointe, a) étude statistique, b) log estimé, c) coefficient de variation. 97

Figure 2.32 : Critères d'identification d'alternance entre les différentes couches géomécaniques. 98

Figure 2.33 : Etapes dans la discrétisation de la variation de Qd en fonction de la profondeur..... 99

Figure 2.34 : Comparaison de la reconnaissance de l'hétérogénéité des sols par la géophysique et la géotechnique..... 100

Figure 2.35 : Recoupement des données au droit de TRE02, a) GTR et résistivité, b) GTR et zonage de TRE. 101

Figure 2.36 : Cartes obtenues par la méthode de krigeage des résistivités apparentes, a) carte variographique, b) variogramme expérimental et théorique ajusté selon les directions principales d'anisotropie, c) carte obtenue par krigeage, d) carte d'écart-type de krigeage correspondant. 104

Figure 3.1 : Modèle de sous-sol à 3 couches. 113

Figure 3.2 : Impact d'une anomalie conductrice sur la mesure de conductivité d'un milieu homogène, a) le long d'un profil, b) en cartographie (d'après : Westphalen et al 1992). 114

Figure 3.3 : Sensibilité des mesures EM-31 en champ horizontal. 115

Figure 3.4 : Volume d'investigation d'une mesure EM-31, a) sous forme de demi-sphère, b) sous forme de voxel. 116

Figure 3.5 : Comparaison des résistivités apparentes mesurées et calculées, a) panneaux individuels, b) comparaison avec un calcul 1D, c) comparaison avec un calcul 2D. 118

Figure 3.6 : Bases retenues pour la modélisation 3D de la structure du sous-sol, a) délimitation du volume à modéliser par deux TRE, b) carte EM-31 en champ horizontal, c) combinaison des bases de données TRE et EM, d) association au droit des TRE d'une structure géoélectrique à chaque mesure EM, e) base du processus PeP : modélisation des résistivités vraies au droit d'une mesure EM. 121

Figure 3.7 : Discrétisation de la base de données du processus PeP, a) cartographie EM-31, b) volume du sous-sol. 123

Figure 3.8 : Organisation des couples de pixels voisins. 124

Figure 3.9 : Fonction de répartition des pourcentages minimaux de variation de la résistivité apparente entre les couples de pixels. 125

Figure 3.10 : Fonction de répartition des écarts entre pixels au pas *i* et *i+1*. 126

Figure 3.11 : Récapitulatif des nomenclatures des poids des couples de pixels 129

Figure 3.12 : Récapitulatif des nomenclatures et liens au sein du processus PeP, vue 3D des différents éléments. 130

Figure 3.13 : Mise en évidence du critère de choix entre les TRE modélisées. 131

Figure 3.14 : Critère de choix de la qualité des colonnes modélisées, a) fonction de répartition de Δ_{min}, b) qualité en fonction du Δ_{min} retenu. 132

Figure 3.15 : Cartes de qualité des colonnes modélisées, a) avec une propagation de l'information de TRE A vers B et de TRE B vers A, b) carte de qualité du processus PeP, c) cartographie EM-31 de référence. 133

Figure 3.16 : Données sources pour la modélisation des structures homogènes continues, a) TRE ouest, b) TRE est, c) cartographie EM-31. 135

Figure 3.17 : Données récapitulatives de l'étude de modélisation de structures homogènes continues, a) structure géoélectrique du sous-sol, b) carte de qualité du processus PeP, c) TRE milieu issue du modèle, d) TRE milieu obtenue avec le processus PeP, e) comparaison des résistivités du processus PeP et avec celles du modèle, f) fonction de répartition des écarts entre données modélisées et données sources. 137

Figure 3.18 : Données récapitulatives de l'étude de modélisation d'une lentille d'argile, a) structure géoélectrique du sous-sol, b) carte de qualité du processus PeP, c) TRE milieu issue du modèle (X=40m), d) TRE milieu obtenue avec le processus PeP (X=40m), e) comparaison des résistivités du processus PeP et avec celles du modèle, f) fonction de répartition des écarts entre données modélisées et données sources. 139

Figure 3.19 : Données récapitulatives de l'étude de modélisation d'une discontinuité, a) structure géoélectrique du sous-sol, b) carte de qualité du processus PeP, c) TRE milieu (X=10m) issue du modèle (α=40°), d) TRE milieu (X=10m) obtenue avec le processus PeP (α=40°), e) qualité des mesures en fonction de l'angle α, f) fonction de répartition des écarts entre données modélisées et données sources en fonction de l'angle α. 141

Figure 3.20 : Comparaison des résistivités estimées avec les résistivités mesurées, a) comparaison des profils, b) fonction de répartition des écarts entre données mesurées sur le terrain et données issues de PeP. 143

Figure 3.21 : Résultats du processus PeP, a) carte de qualité, b) structure géoélectrique du sous-sol selon les 3 clusters principaux de résistivité. 144

Figure 3.22 : Récapitulatif des étapes principales du processus PeP. 146

Figure 4.1 : Dispositif TREC suite aux travaux de 2005. 149

Figure 4.2 : Fonction de sensibilité des dispositifs principaux (Roy et al 1971, in Marescot 2008)... 151

Figure 4.3 : Possibilité de prospection avec le dispositif TREC. 153

Figure 4.4 : Différents types d'électrodes développés. 155

Figure 4.5 : Potentiel d'injection du courant des électrodes expérimentales. 156

Figure 4.6 : Description des électrodes de type TREC, a) électrodes in-situ, b) roue dentée, c) géométrie des picots, d) géométrie des points d'injection vue de dessus. 157

Figure 4.7 : Potentiel en tout point à la surface du sol, a) injection en plusieurs points par une électrode de type TREC, b) injection en un point, c) différence (en %) entre les deux types d'électrode. 158

Figure 4.8 : Schéma du dispositif TREC, a) base opérationnelle, b) dispositif in-situ, c) électrode individuelle, d) liens entre les différents éléments. 160

Figure 4.9 : Comparaison des résistivités vraies obtenues suite à l'inversion des données de TRE et TREC..... 161

Figure 4.10 : Liens entre les points de mesure en fonction des itérations de moyenne mobile pondérée. 164

Figure 4.11 : Variation (%) du RMSE en fonction du nombre d'itérations..... 165

Figure 4.12 : Principe du processus de traitement des données TREC par FFT. 167

Figure 4.13 : Description des dimensions des structures géoélectriques en fonction des fréquences pour un pas de mesure de 50cm..... 167

Figure 4.14 : Perte d'information suite au lissage par filtre passe-bas. 168

Figure 4.15 : Impact des processus de lissage sur les données du niveau 1 d'un profil TREC, a) lissage par MMP, b) lissage par filtre passe-bas à différentes fréquences seuil..... 169

Figure 4.16 : Site expérimental pour le développement du traitement des données TREC. 171

Figure 4.17 : Relations entre les résistivités issues de TREC et de TRE, a) comparaison sans lissage, b) comparaison avec lissage par MMP, c) comparaison avec lissage par FFT (passe-bas = $0,2m^{-1}$), d) répartition des Xc pour l'ensemble des niveaux étudiés. 173

Figure 4.18 : Formule de calcul du facteur géométrique k pour un dispositif dipôle-dipôle. 175

Figure 4.19 : Résultats de la méthodologie de traitement des mesures TREC après traitement et inversion des mesures..... 178

Figure 4.20 : Prospection TREC brute et TRE, a) pseudo-sections TRE, b) pseudo-section TREC sans traitement, c) comparaison des valeurs de résistivité apparente aux points communs..... 179

Figure 4.21 : Prospection TREC lissée et TRE, a) pseudo-sections mesurées, b) pseudo-section lissée MMP, c) pseudo-section lissée FFT (passe-bas : $0,2m^{-1}$), d) comparaison des valeurs de ρ_{app} après lissage par MMP, e) comparaison des valeurs de ρ_{app} après lissage par FFT..... 180

Figure 4.22 : Zone d'étude, a) plan d'implantation des mesures, b) prospection EM-31. 181

Figure 4.23 : Résistivités apparentes mesurées par TRE et TREC, a) pseudo-section TRE au droit de TREC, b) pseudo-section TREC sans traitement, c) comparaison des valeurs de résistivité apparente. 182

Figure 4.24 : Effets des procédés de lissage sur les données TREC, a) profil au droit de la TRE avec différents effets de lissage, b) comparaison des ρ_{app} suite à une MMP, c) comparaison des ρ_{app} suite à une FFT (passe-bas : $0,2m^{-1}$), d) comparaison des ρ_{app} suite à une FFT (passe-bas : $0,1m^{-1}$). ... 184

Figure 4.25 : Résultats du lissage par FFT (passe-bas : 0,1m-1) et du calibrage des résistivités apparentes sur l'ensemble du profil TREC, a) totalité du profil inversé, b) détails du profil découpé en trois zones..... 185

Figure 4.26 : Profilage des structures géoélectriques..... 187

Figure 4.27 : Organigramme des procédés de traitement des mesures TREC. 190

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Revue des échelles de fluctuation de propriétés géotechniques (Phoon et al 1995)..... 10

Tableau 1.2 : Exemples d'erreurs systématiques et leur évaluation. 14

Tableau 1.3 : Sources d'aléas lors d'un projet d'aménagement (d'après : Philipponnat et al 2002, Mongereau et al 2003)..... 20

Tableau 1.4 : Variabilité des propriétés mécaniques mesurées 22

Tableau 1.5 : Variabilité des propriétés mécaniques au sein d'une couche lithologique pour chaque sondage. 22

Tableau 1.6 : Indices de similarité et méthodes de calcul des distances pour une CHA (Carpentier 2012)..... 27

Tableau 1.7 : Situations ayant conduit à une intervention de la justice (d'après : Petitjean 2010). 32

Tableau 1.8 : Synthèse des essais géotechniques les plus courants..... 34

Tableau 1.9 : Méthodes géophysiques et leurs applications principales (d'après : Reynolds 2011). 38

Tableau 1.10 : Caractéristiques des différents dispositifs (d'après : Samouëlian et al 2005). 42

Tableau 1.11 : Schéma d'enchaînement des missions types d'ingénierie géotechnique (NF P 94-500, 2006)..... 47

Tableau 1.12 : Recommandations sur le nombre d'essais géotechniques à réaliser (d'après : Magnan et al 1980)..... 50

Tableau 1.13 : Récapitulatif des différents dispositifs de prospection géophysique à grand rendement. 52

Tableau 2.1 : Estimation de l'état hydrique des sols lors des principales campagnes de prospection... 62

Tableau 2.2 : Propriétés des couches géoélectriques de la parcelle n°1. 71

Tableau 2.3 : Etat hydrique des sols aux dates des campagnes. 81

Tableau 2.4 : Principales caractéristiques des méthodes à grand rendement vis-à-vis d'une prospection d'un hectare. 89

Tableau 2.5 : Descriptif des TRE étudiées. 91

Tableau 2.6 : Association de gammes de comportements mécaniques à des clusters de résistivité. 93

Tableau 3.1 : Coefficients de corrélation entre les profils mesurés et les profils calculés avec une approche 1D et 2D..... 118

Tableau 3.2 : Tableau récapitulatif de l'étude du nombre de pixels voisins à considérer..... 125

Tableau 3.3 : Récapitulatif de l'étude Khi².... 127

Tableau 3.4 : Comparatif des résistivités du modèle et du processus PeP au droit de TRE milieu. ... 136

Tableau 3.5 : Comparatif des résistivités du modèle et du processus PeP au droit de TRE milieu. ... 138

Tableau 4.1 : Dispositifs et paramètres principaux (d'après : Chapellier 2001 et Bernard et al 2008). 152

Tableau 4.2 : Organisation des électrodes selon différents dispositifs.... 153

Tableau 4.3 : Gammes d'intensité de courant injecté en fonction de l'état hydrique des sols prospectés. 154

Tableau 4.4 : Répartition de l'intensité de courant injecté vis-à-vis des électrodes conventionnelles de TRE. 155

Tableau 4.5 : Potentiel d'injection des électrodes de TREC selon l'état hydrique des sols. 157

Tableau 4.6 : Coefficients pondérateurs des points à la droite de la mesure considérée.... 166

Tableau 4.7 : Corrélation entre les données TRE et les données TREC selon les différents niveaux de lissage.... 170

Tableau 4.8 : Détermination des facteurs Xc en fonction des niveaux de prospection TREC et du procédé de lissage des données. 174

Tableau 4.9 : Calcul de la résistance de contact Rcad en fonction des procédés de lissage.... 176

Tableau 4.10 : Evolution du bruit des mesures en fonction des traitements apportés aux mesures TREC. 177

Tableau 4.11 : Statistiques des facteurs $\boldsymbol{Xc}$ en fonction des procédés de lissage.... 180

Tableau 4.12 : Statistiques des facteurs $\boldsymbol{Xc}$ en fonction des procédés de lissage et calcul de Rcad.... 184

Tableau 4.13 : Comparatif des caractéristiques du dispositif TREC.... 188

TABLE DES ANNEXES

Annexe 2.1 : Découverte archéologique sur la commune de Pessac..... 217

Annexe 2.2 : Implantations des forages et logs géologiques numérisés (source : Infoterre). 218

Annexe 2.3 : Parcelle n°1, Feuille Cadastrale de 1968, Archives Municipales de Pessac (FRAAC033318_4Fi74)..... 219

Annexe 2.4 : Images d'archives Google Earth..... 220

Annexe 2.5 : Paramètres d'inversion des Tomographies de Résistivité Electrique..... 221

Annexe 2.6 : Tableau récapitulatif des lithologies rencontrées et typologie des sols. 222

Annexe 2.7 : Paramètres statistiques par niveau des TRE de la parcelle n°1..... 223

Annexe 2.8 : Pénétrogrammes SP1 à SP21 (parcelle n°1). 225

Annexe 2.9 : Cartographie ARP de la parcelle n°1, résistivité apparente (GEOCARTA©)..... 247

Annexe 2.10 : Cartographie OhmMapper de la parcelle n°1, résistivité vraie (BRGM©)..... 248

Annexe 2.11 : Descriptif de TRE02 en 6 clusters et localisation des clusters dans TRE02..... 249

Annexe 2.12 : TRE01-02 et 03 suite à une analyse par CHA et représentation 3D..... 250

Annexe 2.13 : Organisation d'une prospection basée sur une analyse par statistique inférentielle..... 251

Annexe 3.1 : Exemple de calcul de la conductivité apparente avec une approche 2D..... 252

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans le cadre d'un projet d'aménagement, la reconnaissance du sous-sol est une étape prépondérante pour la construction d'un bâtiment. Actuellement, un objectif de la reconnaissance géotechnique est de définir le comportement mécanique des sols. Cette reconnaissance peut être faite et par des essais en laboratoire, et par des essais in-situ ponctuels, ne permettant d'estimer les variations des propriétés mécaniques que sur une verticale à partir d'un nombre limité de sondages. La problématique soulevée par ce type de prospection géotechnique est qu'il est difficile d'une part d'étendre une information ponctuelle dans l'environnement proche du sondage, et d'autre part d'estimer la variabilité latérale des matériaux.

Dans le cadre du projet D²SOU (Développement Durable et SOls Urbains), au sein duquel ce travail est effectué, on étudie la prise en compte du sous-sol dans le développement et l'aménagement urbain. L'approche retenue par le projet D²SOU souligne notamment que les conséquences d'une méconnaissance de la variabilité spatiale des propriétés du sous-sol (et en particulier le comportement mécanique) peuvent entrainer à court et moyen termes des coûts lors des phases d'avancement d'un projet, liés à l'occurrence d'aléas ou à des dommages relatifs à une mauvaise adaptation des structures du projet aux contraintes du sous-sol.

Les méthodes géophysiques utilisant l'électromagnétisme, les ondes sismiques ou la propagation de courant électrique dans le sol, permettent des mesures de la variation latérale et en profondeur des champs de propriété des matériaux. La plupart de ces méthodes géophysiques sont adaptées à ce jour pour effectuer des prospections à grand rendement, permettant ainsi d'avoir une représentation à grande échelle de la variabilité spatiale des propriétés physiques du sous-sol pour une profondeur d'investigation donnée. L'inconvénient de ces prospections est que les propriétés mesurées ne peuvent être intégrées aux codes de calcul de dimensionnement d'un bâtiment, réduisant dans ce contexte l'utilisation de ces méthodes.

Parmi les méthodes géophysiques utilisées dans ces travaux, la résistivité électrique présente une large gamme de valeurs en réponse aux différents matériaux naturels (Chapellier 2000). Même si actuellement aucune étude ne permet de relier directement des propriétés mécaniques du sol aux propriétés physiques ou la structure géoélectrique du sous-sol, la résistivité électrique s'avère très sensible à la détection d'hétérogénéités résistives (tomographie de résistivité électrique) ou conductrices (électromagnétisme).

La stratégie adoptée dans ces travaux de thèse est basée sur une étude d'une part du potentiel des méthodes géophysiques dans leur ensemble, et d'autre part par combinaison de ces dernières pour l'estimation de la variabilité spatiale des structures géoélectriques du sous-sol au sein d'une parcelle. Ces deux approches sont basées sur une prospection fine et pluridisciplinaire d'un site expérimental et de la mise au point de processus et de dispositifs de reconnaissance géophysiques innovants.

Cette thèse s'articule en quatre parties :

La première partie de ce travail présente une synthèse bibliographique, d'une part du contexte dans lequel se placent les études menées et une présentation des connaissances actuelles dans la reconnaissance et la variabilité du sous-sol, d'autre part de l'état de l'art actuel dans la reconnaissance du sous-sol par prospections géophysiques et géotechniques.

La deuxième partie présente le site étudié, dans le cadre du projet D²SOU, à l'échelle de trois parcelles de un hectare sur la commune de Pessac (33) au sein duquel des prospections géotechniques, géophysiques et géologiques ont été menées. L'ensemble des données recueillies a été faite dans un premier temps dans les règles de l'art soulignées en première partie. Dans un second temps, nous avons mis en avant le potentiel des prospections géophysiques à grand rendement, proposées par les bureaux d'étude, à aider au positionnement des prospections géotechniques, et dans un troisième temps, une étude statistique et géostatistique des différentes sources de données a permis d'estimer la distribution spatiale des différentes propriétés mesurées par une combinaison de l'ensemble des sources de données disponibles. Une comparaison des avantages et inconvénients des différentes méthodes géophysiques à grand rendement mises en œuvre par les partenaires du projet D²SOU est également effectuée.

La troisième partie présente les différentes étapes menées dans le développement d'un processus de modélisation 3D des propriétés physiques du sous-sol. Le processus de modélisation de Proche-en-Proche (PeP) se base sur le lien mis en avant entre la méthode de prospection électromagnétique (cartographie 2D de surface), et la Tomographie de Résistivité Electrique (TRE). Ces deux informations de même nature (résistivité) sont obtenues selon des domaines différents et décrivent ainsi le sous-sol selon des dimensions différentes. Le processus PeP repose sur le principe de propagation de l'information fine contenue dans les TRE en basant l'évolution latérale des résistivités vraies d'après les variations de résistivité apparente mises en avant par la cartographie électromagnétique. Les études menées ont pour objectif de déterminer le nombre et la disposition des différentes campagnes de mesures permettant d'obtenir les données sources pour effectuer ce processus de modélisation du sous-sol, ainsi que de quantifier les limites quant aux domaines d'application et à l'utilisation des résultats.

La quatrième partie présente l'ensemble des expérimentations menées dans le développement d'un dispositif original de mesure pour des Tomographies de Résistivité Electrique en Cinématique (TREC). Y sont présentées l'ensemble des étapes de mise au point d'un dispositif fonctionnel permettant d'appliquer la TRE à des prospections à grand rendement, mais également l'ensemble des traitements à apporter aux données brutes pour les rendre interprétables. Il s'agit là d'un travail mené pour le développement d'une nouvelle technique de mesure, adaptée à la reconnaissance rapide et fine sur de grands linéaires ou surfaces.

CHAPITRE I

LA RECONNAISSANCE DES SOLS

CONTEXTE ET ÉTAT DE L'ART

Partie I – La reconnaissance du sous-sol, contexte.

La reconnaissance vise à évaluer les propriétés des sols en place. La variabilité naturelle de leurs propriétés n'est pas prise en compte en dépit de leurs effets. L'évaluation de cette variabilité permettrait de mieux reconnaître les sols par l'optimisation de cette phase. De la reconnaissance de la variabilité spatiale des propriétés du sous-sol dépend le devenir d'un projet d'aménagement et en particulier le bon dimensionnement des différentes structures le composant (tranchées, fondations,…).

Dans les domaines actuels de la reconnaissance des sols, le problème de la prospection de la variabilité spatiale d'un site, sur le plan des propriétés physiques et mécaniques, se pose aujourd'hui de manière accrue. Cette constatation émane du fait qu'une part majeure des projets urbains repose sur la réhabilitation en zones résidentielles des terrains industriels et urbanisés (Moussouteguy 2002), et que le dimensionnement des fondations, la viabilité d'un projet, et la sécurité des différentes phases d'un chantier reposent sur une bonne connaissance de la variabilité naturelle du sol et du sous-sol.

Pour répondre aux critères des zones résidentielles, le sous-sol et les projets d'aménagement associés se doivent de répondre à des obligations réglementaires, dont en particulier les aspects environnementaux, illustrés par le concept contemporain du Développement Durable. C'est dans ce contexte que le projet ANR Développement Durable & SOls Urbains (D²SOU) a vu le jour pour répondre aux attentes des aménageurs quant à l'impossibilité de définir une campagne de reconnaissance de l'ensemble des paramètres à prendre en compte pour mieux inscrire un projet dans un contexte de développement durable.

1. Contexte d'étude, le projet ANR D²SOU.

1.1. Définition du projet ANR D²SOU.

Le projet ANR Développement Durable & SOls Urbains (D²SOU) a pour objectif de développer les bases nécessaires à la prise en compte intégrée du sol et du sous-sol dans le développement urbain. Ce projet vise à développer des méthodes et des outils, dont l'objectif est de considérer les sols et sous-sols dans les projets d'aménagement, dans un contexte de développement durable.

Dans le cadre d'un projet d'aménagement, on peut aborder le sol de deux façons. La première approche consiste à l'évaluation du potentiel du sous-sol à se prêter à un projet d'aménagement. Il faut quantifier et qualifier ce qui est à préserver ou à valoriser au sein du sous-sol. La deuxième approche est de déterminer les impacts que peut avoir le sol sur le projet et inversement, les impacts du projet sur le sous-sol. Dans le cadre de cette étude, le sous-sol est pris en compte au sein d'un projet d'aménagement avec des critères de développement durable. Lorsque l'on évoque le développement durable, on évoque ici un mode de développement veillant au respect de l'environnement par une utilisation prudente des ressources naturelles afin de les rendre durables dans le long terme (Petit 2003).

1.2. Contexte réglementaire.

Un projet d'aménagement avec des critères de développement durable est décrit comme un projet mettant à contribution a minima les ressources disponibles. Une bonne reconnaissance des actions à mener minimise les retours sur les actions déjà effectuées. Dans le cadre de la reconnaissance des sols, on peut dire que les informations recueillies préalablement à la réalisation du projet doivent également réduire toute survenance d'aléas. Une meilleure connaissance des aléas permet de réduire leurs impacts lorsqu'ils surviennent.

Dans cette ligne de réflexion, le Guide à l'intention des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre, rédigé en 1976, et dont les observations furent complétées en 2009 par la publication du Cahier des Clauses Administratives Générales (CCAG) applicable aux Travaux, stipule le rôle prépondérant des sols, et surtout de leur reconnaissance, dans le bon déroulement d'un projet (CCM 2009) :

Article b.2 : « (…) *Les études préalables doivent permettre de réduire les aléas techniques (…). »*

« L'étude du terrain et la reconnaissance du sol sont essentielles. Des sondages doivent être exécutés à une profondeur suffisante et en nombre suffisant pour que l'estimation puisse tenir compte de la nature du sol rencontré. Mais les sondages coûtent cher et on aura souvent intérêt à définir leur programme à partir d'investigations préalables géologiques, géotechniques et géophysiques. On ne peut cependant éliminer totalement les aléas tenant au sol. Quant aux aléas climatiques et météorologiques (pluie, gel, tempêtes ou inondations), les études préalables peuvent, au mieux, cerner leur probabilité (…). [Il va de soi que, si des impératifs de délais imposent de s'affranchir dans toute la mesure du possible des aléas climatiques en acceptant des majorations de dépenses, l'estimation doit en tenir compte.] (...) C'est toujours au stade des études préalables à la consultation des entreprises que les services chargés de la conduite des opérations doivent analyser ou faire analyser de façon complète les conditions locales et les difficultés qui peuvent en résulter, en recherchant à cet effet tous les renseignements utiles intéressant les sols, les dessertes, les réseaux de raccordement, les données géographiques, sismiques, climatiques, en étudiant les dispositions réglementaires particulières à respecter et en se préoccupant de l'évolution prévisible des conditions économiques. »

Il ressort que le sol et le sous-sol apparaissent comme des contraintes essentielles dans un projet d'aménagement. Cette considération du sol en termes de contraintes résulte de ce qu'il est sujet à nombre d'aléas que l'on ne peut détecter/prospecter en totalité (que ce soit dans la finesse des prospections ou le choix des prospections pour en identifier le plus grand nombre).

Le projet D²SOU aborde un ensemble de domaines touchant au cadre d'un projet d'aménagement. Une liste non exhaustive des domaines abordés dans ce projet montre la diversité des sciences et des acteurs pouvant être impliqués :

- Etude d'aménagement pour l'implantation d'un projet dans le paysage urbain (Sociologie),
- Règles d'Urbanisme inscrites dans le Plan Local d'Urbanisme (PLU) et la Zone d'Activité Concertée (ZAC) (Sciences Juridiques),
- Conceptualisation du projet (Architectes),
- Etude de faisabilité (Bureaux d'étude, Ingénieurs),
- Etude environnementale (DRIRE),
- Etude documentaire de l'Historique du site (Archéologie, INRAP),
- Reconnaissance du site (Géophysique et Géotechnique),
- Concrétisation du projet (Entreprises de Génie Civil),
- Suivi et évolution du projet d'aménagement / exploitation (auscultation, usure).

La contribution de la thèse au projet ANR D²SOU porte sur l'amélioration de la reconnaissance du sol et du sous-sol en termes de géologie et géotechnique ; connaissance dont le projet D²SOU propose un mode de prise en compte dans un contexte de développement durable.

2. Variabilité du sol et du sous-sol.

2.1 Définition.

Le sous-sol peut être étudié dans différents contextes environnementaux, allant du naturel à l'urbain. Ces contextes d'études lui donnent également ses dénominations, à savoir :

- sol naturel - sol périurbain - sol urbain

Les définitions académiques du sol qui peuvent être trouvées sont les suivantes :

- Allaby 2008 : « Le matériau naturel, non consolidé, minéral et organique se situant au-dessus du substratum rocheux sur la surface de la Terre. En géologie de l'ingénieur, n'importe quel matériau lâche, mou, et déformable, par exemple des sables et argiles non consolidés. »
- McGraw-Hill 2003 : « Matériau rocheux non consolidé au-dessus du substratum rocheux »

Ces définitions peuvent être complétées par Webster (2000), abordant les processus de pédogénèse comme étant à la fois déterministes et aléatoires selon les échelles d'observation ; ainsi que les travaux de Phoon et al (1999a), soulignant les multiples sources d'incertitude quant à la définition et la détermination de la variabilité des sols.

Les études de Demolon (1932) permettent de synthétiser la définition du sous-sol comme étant une formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable. Cette formation est le résultat de la transformation, au contact de l'atmosphère de la roche mère sous-jacente. Ces transformations se font sous l'influence des processus physiques, chimiques et biologiques. De la diversité des processus mis à contribution dans la formation des sols, découlent les différents types de sols et les différents horizons majeurs le constituant (Figure 1.1), à savoir :

• Horizon O : couche d'humus principalement organique.

• Horizon A : couche arable, principalement des minéraux de la roche mère avec de la matière organique incorporée.

• Horizon E : sols lessivés, laissant une forte concentration de sable et de limons de quartz.

• Horizon B : sous-sol, riche en minéraux lessivés de l'horizon A ou E et accumulés en B.

• Horizon C : matériaux sources dont la dégradation a permis de former le sol de surface.

• Horizon R : roche-mère appelée bedrock.

Il ressort également de ces définitions que les sols recouvrent le substratum rocheux (horizon R), ce dernier étant généralement consolidé et rattaché à une unité stratigraphique temporelle plus ancienne. Le sous-sol est le résultat soit de l'interaction entre la dégradation physique et la décomposition chimique de la roche mère sous-jacente, soit du dépôt de sédiments non consolidés mis en place par des processus géologiques. En plus de ces caractéristiques fondamentales, un sol dans un contexte urbain ou périurbain présente des traces d'activités humaines sur une tranche de sol pouvant atteindre 6m d'épaisseur (Craul 1985, Morel et al 2005, Sandor et al 2005, Laurent 2007).

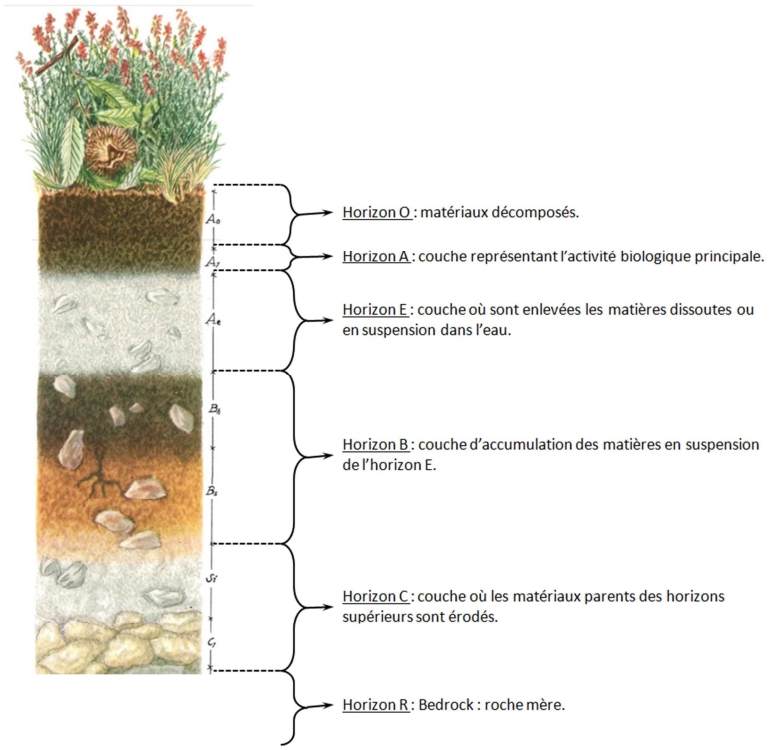


Figure 1.1 : Profil du sous-sol (d'après : Kubiëna 1950, in Hartemink 2009).

2.2. La notion de variabilité des sols.

Depuis le début du 20ième siècle, nombre d'études ont été menées pour répondre au problème de la reconnaissance de la variabilité spatiale et temporelle des propriétés physiques et mécaniques des sols (Rosat 2004, Smith 1938, Webster 1994). Les premières études visaient des cartographies du sous-sol pour lesquelles la variabilité du sol était considérée comme une nuisance indésirable réduisant la fiabilité des cartes. Progressivement, la nature générale de la variabilité des sols et leur imprévisibilité

ont été vues comme étant des attributs propre au sous-sol et non comme une nuisance (Burrough et al 1994).

De l'imprévisibilité des propriétés des sols découle la notion d'incertitude qui peut être décrite de deux manières. D'une part l'incertitude active ou aléatoire et, d'autre part, l'incertitude passive ou épistémique (Lacasse et al 2007, Uzielli et al 2008). L'incertitude aléatoire prend en compte principalement la variabilité naturelle d'une propriété (la variabilité spatiale et temporelle). Les propriétés considérées sont à la fois physiques (teneur en eau, résistivité,…) et mécaniques (résistance à la pointe, compacité,…). A elle seule, l'expérience des experts effectuant des campagnes de reconnaissance des sols ne peut permettre de prendre en compte ou d'estimer cette incertitude naturelle. Cette incertitude est donc parfois nommée incertitude irréductible (Imanzadeh 2013). L'incertitude épistémique regroupe les effets de l'incertitude statistique sur les modèles utilisés (liée à la qualité du modèle, telle la forme et les paramètres de ce dernier) et de l'incertitude statistique sur les mesures effectuées (cf. §I.2.). Cette incertitude peut être en théorie réduite en accroissant la qualité des mesures effectuées (plus de précision) ou en augmentant le nombre de points de données dans le but de réduire l'incertitude statistique.

2.3. Description de la variabilité des sols.

2.3.1. Variabilité spatiale.

Les propriétés physiques des sols regroupent un grand nombre de paramètres allant de la texture (granulométrie) à la structure du sol. Rentrent également en compte les différents constituants du sol et leur proportion, allant des compositions en minéraux à la teneur en eau (Mermoud 2006). La variabilité des propriétés physiques et mécaniques se déduit logiquement de l'origine naturelle des matériaux (Saglam et al 2011).

En considérant les propriétés mécaniques des sols, il existe des difficultés à caractériser leur variabilité spatiale, et donc à conformer au mieux les ouvrages aux particularités physiques et mécaniques des sols lorsque ces dernières ne peuvent être modifiées (consolidation, purge,…). Certains auteurs ont menés des études pour identifier les plus défavorables échelles de fluctuation des propriétés mécaniques (Fenton et al 2003). Une revue de la littérature a été menée pour estimer la taille (échelle) des fluctuations pour les propriétés géotechniques les plus communément utilisées (Phoon et al 1995a), et dont les résultats sont résumés dans le Tableau 1.1. L'échelle des fluctuations représente la distance au sein de laquelle les propriétés du sol montrent une forte corrélation (Wickremesinghe et al 1993), et dont la méthode de calcul repose principalement sur une étude statistique de la base de données à l'étude (Jamshidi Chenari et al 2010).

Propriétés	Type de sol	Nombre de revues	Echelle de fluctuation (m)	
			Etendue	Moyenne
Fluctuation Verticale				
s_u	Argile	5	0,8 – 6,1	2,5
q_c	Sable, Argile	7	0,1 – 2,2	0,9
q_t	Argile	10	0,2 – 0,5	0,3
$s_u(VST)$	Argile	6	2,0 – 6,2	3,8
w_n	Argile, Glaise	3	1,6 – 12,7	5,7
w_L	Argile, Glaise	2	1,6 – 8,7	5,2
γ	Argile, Glaise	2	2,4 – 7,9	5,2
Fluctuation Horizontale				
q_c	Sable, Argile	11	3,0 – 80,0	47,9
q_t	Argile	2	23,0 – 66,0	44,5
$s_u(VST)$	Argile	3	46,0 – 60,0	50,7

Tableau 1.1 : Revue des échelles de fluctuation de propriétés géotechniques (Phoon et al 1995).

avec : s_u : résistance au cisaillement non-drainée. q_c : résistance à la pointe de cône
q_t : résistance à la pointe corrigée $s_u(VST)$: su par essai de cisaillement à palier
w_n : teneur en eau naturelle w_L : limite de liquidité
γ : poids volumique

2.3.2. Variabilité temporelle.

La variabilité des sols est nettement dépendante des conditions hydriques de ces derniers, et de ce fait de leurs variations quotidiennes et/ou saisonnières. Cette sensibilité est observable pour les prospections géotechniques dans le cas où les sols gardent leur cohésion ; les mesures de résistance à la pointe sont corrélées à la teneur en eau des sols (Bernard et al 2007, Benz Navarrete 2009), pour les sols sensibles à l'eau. Pour les propriétés physiques, il convient de souligner que leur mesure (au sein d'un volume d'investigation) est liée à la teneur en eau des sols (Chrétien 2010) et, à l'exception des argiles, que ce lien est décrit par la loi d'Archie (Niwas et al 2012). Ainsi, une attention doit être portée à la mesure de la teneur en eau des sols lorsqu'un suivi temporel des propriétés physiques des sols est mené et que l'étude repose en partie sur la répétabilité des mesures (Peter-Borie et al 2007, Chrétien et al 2013). La détermination de la hauteur de la nappe et son suivi temporel ont donc toute leur importance. Retenons aussi le lien entre la résistivité et la température des sols, nécessitant de ce fait une correction de température (Pellicer et al 2012) lorsqu'un suivi temporel des résistivités du sous-sol est prévu (Genelle 2012).

2.3.3. Notion d'hétérogénéité et d'homogénéité des sols.

a) Hétérogénéité.

A la notion d'hétérogénéité des sols doit être rattachée à celle de l'échelle à laquelle l'analyse est effectuée, mais également de la propriété étudiée (Rey 2005). Un sol est dit hétérogène lorsqu'une structure/couche manque d'unité, présentant des éléments de nature différente. Cette variabilité du sol peut être classée en deux catégories (Elkateb et al 2003) :

• l'hétérogénéité lithologique se manifeste par l'alternance de couches rigides et souples ou l'inclusion d'une lithologie particulière au sein d'une masse considérée comme uniforme.

• la variabilité spatiale inhérente aux sols rend compte de la variation des propriétés du sol d'un point à un autre dans un volume d'étude ; ceci étant causé par des conditions de dépôt des sols différentes et à l'historique des contraintes subies.

Dans le cas d'un projet d'aménagement, le sous-sol sera qualifié d'hétérogène lorsque la nature du sol (couche de sable ou de calcaire) ou ses propriétés physiques présentent une variation significative selon une longueur d'onde (échelle de fluctuation) inférieure à celle du projet.

b) Homogénéité.

La notion de sol homogène n'a, elle aussi, de sens qu'en intégrant le concept d'échelle à laquelle l'observation est faite (Oriola et al 1988). Par exemple, on peut mettre en avant une homogénéité des sols si le paramètre considéré est uniquement la nature des sols de fondation (calcaire) lorsqu'une telle couche est présente à une profondeur donnée sur l'ensemble d'une parcelle. Et cette même couche est considérée comme hétérogène lorsque des argiles de décalcification sont rencontrées au sein de cette couche sur une zone plus importante (quartier). Dans le domaine de la géotechnique, la notion de sol homogène est à rattacher à la notion d'unité fonctionnelle, présentant les mêmes caractéristiques physiques et mécaniques (comportement) face aux contraintes qui peuvent la solliciter (Li et al 2013a).

En ce sens, les termes géomécanique, géophysique, et lithologique permettront d'identifier des sols respectivement homogènes sur le plan du comportement mécanique (résistance à la pointe,…), des propriétés physiques (teneur en eau, résistivité,…) et de la composition des sols (argile, sable,…). Ces descriptions doivent également considérer les volumes auxquels elles se rattachent ainsi que les propriétés décrites. L'homogénéité d'une propriété doit être décrite par une gamme de variation (moyenne, écart-type), comme décrit dans le §I.4.2 pour pouvoir donner des limites à la zone homogène considérée.

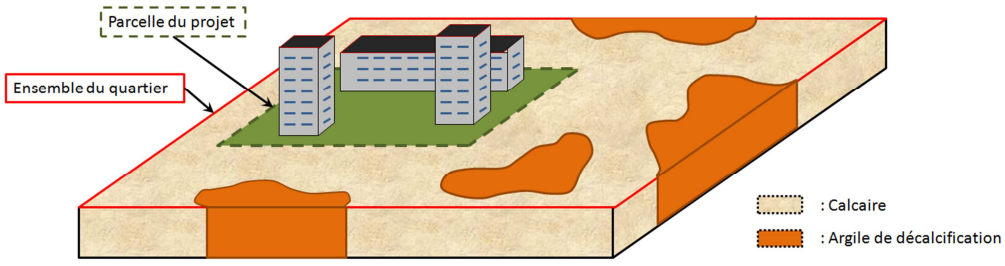


Figure 1.2 : Homogénéité et hétérogénéité du sol de fondation à différentes échelles.

2.4. Cas particulier, le sous-sol urbain.

Le sous-sol urbain est caractérisé principalement par sa variabilité et son hétérogénéité (échelle de fluctuation d'ordre métrique), pour chaque propriété physique, mécanique ou encore lithologique (Heuvelink et al 2001, Lew 1997, Jung et al 2005). Le sous-sol urbain est décrit tout d'abord par la présence en surface et parfois sur plusieurs mètres d'épaisseur (Breysse 2003, Laurent 2007) d'une couche d'origine anthropique associée aux activités humaines. La période à laquelle se rattache cette couche de sol est nommée Anthropocène (Crutzen 2006) ou encore « poubellien » par certains archéologues, géologues et géotechniciens (Breysse 2003, De Wever 2012). L'Anthropocène est par nature très hétérogène, sa distribution spatiale est difficile à prévoir, tant sur le plan des superficies couvertes que sur l'épaisseur de la couche (Price et al 2011, Stinchcomb et al 2013).

Les matériaux constituant les couches de surface peuvent aller des sols naturels remaniés, déplacés et mis en remblais, jusqu'aux vestiges de constructions anciennes (Morel et al 2005). Les activités naturelles et humaines qui se sont produites au sein des sols de surface (remaniement, déblais, compactage,…) ont conduit à rendre totalement imprévisible ce milieu (Cherubini 1993). L'hétérogénéité du sous-sol est à la fois une trace chronologique d'évènements passés (géologie), mais aussi des traits de l'Histoire de ce dernier. L'archéologie est donc une composante à prendre en compte dans la reconnaissance du sous-sol, permettant d'interpréter l'hétérogénéité du sous-sol à travers son passé historique et non seulement géologique (Galinié 2003). Des travaux récents ont eu pour objectif d'estimer l'épaisseur de la couverture anthropique (Thierry et al 2006), voire à en estimer la distribution statistique des propriétés (Laurent 2007). En ce qui concerne les projets d'aménagement, si ces couches sont en général à exclure du fait de leurs propriétés mécaniques non prévisibles, elles peuvent avoir un impact significatif, du fait par exemple de la présence de vestiges ou de pollutions anciennes.

3. Incertitude des paramètres mesurés, de la mesure à la réalité.

Que ce soit pour les mesures géophysiques ou géotechniques, la reconnaissance d'une parcelle dans le cadre d'un projet d'aménagement doit appréhender et caractériser l'hétérogénéité du site à partir d'un nombre réduit de points de reconnaissance. Nombre de termes existent pour caractériser la variabilité des sols (aléatoire, erreur, répétabilité, incertain,…), majoritairement explicités par Boissier et al (2005) ainsi que par Favre (2000).

Soulignons que le sous-sol peut être considéré comme étant aléatoire du fait que malgré une bonne connaissance des règles régissant sa formation, des variations locales de ces dernières mènent à une connaissance imparfaite de la variabilité la rendant donc en apparence aléatoire. La mesure d'une propriété au sein d'un milieu aléatoire induit un résultat incertain, non ou peu maîtrisé, compris dans une gamme de variations. En cela, une propriété du sous-sol peut être mesurée un certain nombre de fois dans des conditions identiques sans pour autant présenter deux fois la même valeur. Chaque sol

étant unique et ses propriétés évoluant selon leur environnement et la date d'observation, chaque étude devient un cas particulier qu'il faut décrire en des termes généraux. On envisage traditionnellement qu'une erreur possède deux composantes, à savoir les incertitudes aléatoires (matériaux, appareils de mesure) et les erreurs conditionnelles et systématiques.

3.1. Composante aléatoire de l'incertitude.

L'erreur aléatoire Δ provient des variations temporelles et spatiales non prévisibles de grandeur d'influence. Les effets de telles variations appelés effets aléatoires entraînent des variations pour les observations répétées du mesurande (bien que le mesurage soit effectué dans des conditions aussi constantes que possible).

Cette source d'incertitude est principalement liée à la variabilité intrinsèque du sol (Webster 2000), dont le descriptif est fait dans le §I.1. Lors d'une prospection, le sol présentera à des échelles différentes (régionale, locale, accidentelle,…) des conditions particulières qui affecteront la gamme de valeurs de la propriété étudiée (Phoon et al 1999a). Ces conditions sont rarement maitrisées (c'est le but de la reconnaissance des sols), de ce fait, la variabilité naturelle du sous-sol, qui ne peut être totalement connue, est considérée comme une incertitude.

Cette incertitude est présente à toutes les échelles, de la variabilité de la teneur en eau au sein d'une strate de sable, au comportement mécanique d'une lentille d'argile. Par opposition aux incertitudes épistémiques (conséquence directe des mesures), Uzielli et al (2008) qualifie cette incertitude d'aléatoire. L'incapacité à déterminer les phénomènes régissant la variabilité des sols, qu'ils soient passés ou futurs, conduit également à rendre la variabilité des sols incertaine (Boissier et al 2005).

En cela, le géotechnicien est bien confronté à un problème de méconnaissance du sol, qui se traduit par une incertitude sur l'occurrence et la détection des hétérogénéités du sous-sol. Lorsque ces hétérogénéités surviennent lors d'un chantier, alors qu'elles n'étaient pas détectées, il est courant de les qualifier d'aléas géologique ou géotechnique. L'identification de ces aléas est effectuée dans le §I.3.2.

Soulignons donc que l'incertitude aléatoire est principalement liée aux conditions opératoires. Les erreurs de mesure sont liées à l'appareil lui-même (calibrage) et à l'opérateur (mode opératoire). Même en suivant scrupuleusement la méthodologie pour effectuer les mesures, il existe toujours une incertitude, caractérisant une dispersion des mesures, aussi minime soit-elle. Cette erreur est généralement nommée bruit de mesure, car souvent rattachée à l'incertitude de l'appareil que l'opérateur utilise selon les normes (Lacasse et al 2007, Davidovic et al 2010). Il n'est de ce fait pas possible de compenser l'incertitude aléatoire d'un résultat de mesure, mais elle peut être réduite en augmentant le nombre d'observations.

3.2. Composante systématique de l'erreur.

L'erreur systématique ε se produit sur un résultat de mesure à partir d'un effet reconnu d'une grandeur d'influence. Cet effet, appelé effet systématique, peut être quantifié et s'il est significatif par rapport à la précision requise du mesurage, une correction est appliquée au résultat. Le Tableau 1.2 présente de nombreuses sources d'erreurs systématiques, et différentes méthodes pour détecter et évaluer ces erreurs.

Sources d'erreur systématique	**Méthodes de détection et d'évaluation**
Effet des grandeurs d'influence (température, pression,…)	Mesurer la même grandeur avec un instrument différent
Erreur de justesse des instruments (décalage du zéro, chronomètre mal réglé,…)	Mesurer la même grandeur avec des méthodes différentes
La position de l'objet mesuré	Mesurer une grandeur étalon (contrôle de justesse)
La perturbation due à la présence des instruments d'observation	Mesurer un même mesurande dans des laboratoires différents

Tableau 1.2 : Exemples d'erreurs systématiques et leur évaluation.

L'erreur systématique peut être considérée comme une erreur constante qui affecte chacune des observations. Le plus souvent on aura seulement une majoration de cette erreur constante. L'erreur systématique d'un résultat de mesure ne peut être réduite en augmentant le nombre d'observations, mais par l'application d'une correction. Il subsiste tout de même un doute quant à la valeur des corrections à apporter aux mesures.

Pour illustrer ces notions d'erreur systématique, il est commun de se référer à l'analogie de l'incertitude reposant sur l'image d'un tir sur cible (Figure 1.3). En s'appuyant sur cet exemple, on peut dire que les mesures doivent être justes et fidèles pour être de qualité. En effectuant plusieurs fois les mesures (tirs), la dispersion (écart-type) doit être la plus faible possible pour que la détermination de la valeur (centre de la cible) soit la plus juste possible.

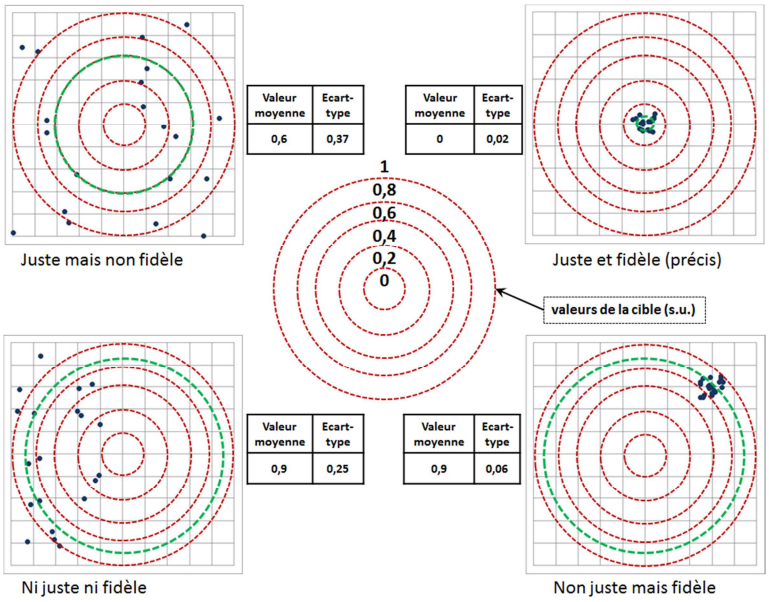


Figure 1.3 : Analogie de l'incertitude, représentation d'une mesure juste et fidèle (adapté de : Smith 2013).

La Figure 1.3 ne permet que d'illustrer théoriquement les erreurs de mesure, car lors des mesures effectives, on ne peut connaître la valeur cible, la dispersion des mesures ne peut renseigner que sur les erreurs aléatoires ; mais l'existence d'une erreur systématique est souvent difficile à mettre en évidence sans mettre en place des mesures d'étalonnage ou de vérification (Tableau 1.2).

3.3. Sources d'erreur conditionnelles.

3.3.1. Erreur de l'instant.

Les erreurs de l'instant sont liées au fait, principalement en géophysique, que les propriétés physiques des matériaux sont variables en fonction du temps (variation des propriétés hydriques, de la température,…) et qu'elles peuvent donc nettement modifier les mesures effectuées (Peter-Borie et al 2007). Il convient donc de déterminer un référentiel précis (date ou conditions particulières) auquel l'ensemble des mesures devront être normées. Dans les sols, l'influence des variations temporelles de teneur en eau est un facteur essentiel.

3.3.2. Erreur d'enquête.

Cette erreur, rarement prise en compte, est liée à une mauvaise conduite des reconnaissances des sols (Boissier et al 2005). Cette erreur peut survenir lorsque qu'une investigation est effectuée uniquement sur les sols de surface alors que les fondations de l'ouvrage atteignent le substratum rocheux profond. De ce fait, la plupart du temps, comme les données recueillies par cette enquête ne sont pas pertinentes voire même inexploitables, la prospection effectuée est généralement non avenante. C'est dans cette logique que les Eurocodes définissent la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG), volume susceptible d'affecter la réponse de l'ouvrage ou d'être affecté par ce dernier. Dès lors, une reconnaissance pertinente doit être menée sur l'ensemble du volume de la ZIG.

3.3.3. Erreur d'échantillonnage.

Les erreurs d'échantillonnage apparaissent lorsque l'on souhaite estimer le comportement mécanique ou les propriétés physiques d'un sol en se basant sur un échantillon dont on suppose le volume représentatif de l'ensemble de la structure étudiée (Qasim et al 2012). Cette approche fait fi de la variabilité naturelle des sols (Moussouteguy 2002). Pour ces erreurs, il faut aborder la notion de représentativité des mesures effectuées, en déterminant si d'une part les quelques mesures effectuées sont représentatives de la population totale (le sous-sol dans son entier) et si le volume de matériau prospecté peut être considéré comme homogène à l'échelle à laquelle est effectuée la prospection (Lacasse et al 1998, Favre 1998).

3.4. L'incertitude sur le modèle.

La mesure d'une propriété physique ou mécanique n'est généralement pas directement applicable pour concevoir un ouvrage ou représenter la variabilité du sous-sol. Par exemple, pour déterminer la résistance électrique d'un matériau, on mesure une différence de potentiel (ΔU) et l'intensité (I) permettant de calculer la résistance : $R=\Delta U/I$. Un modèle de transformation de la donnée source est usuellement nécessaire pour relier la mesure à la propriété visée. Un certain degré d'incertitude sera introduit par le modèle du fait que le modèle est une simplification de la réalité et est en général calibré via des données empiriques (Phoon et al 1999b). L'éparpillement des données sur le modèle de transformation est illustré par la Figure 1.4. Il faut donc souligner que l'erreur sur le modèle est l'écart entre l'observation sur site et la modélisation (Park et al 2010, Marinoni 2003).

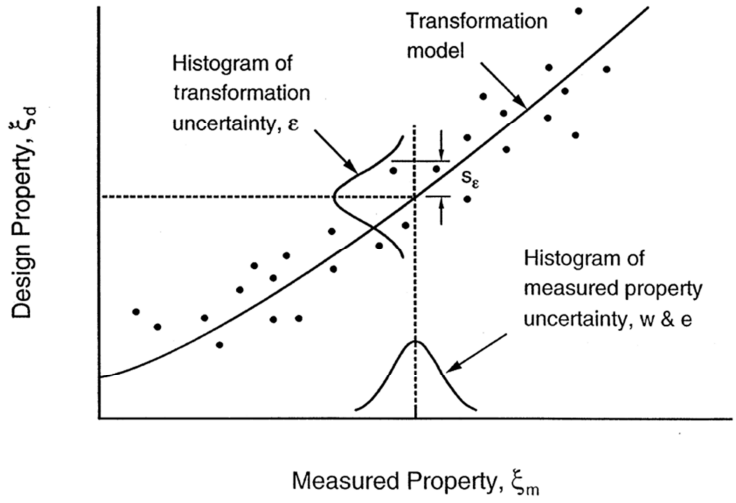


Figure 1.4 : Caractérisation probabiliste du modèle de transformation (Phoon et al 1999b).

Pour compléter cette analyse des erreurs de modèle, il est bon de souligner que la base de tout modèle est de représenter et éventuellement de prévoir l'évolution de paramètres réels par des approches et analyses théoriques et mathématiques de mesures réelles. Aussi précis que puisse être un modèle, sa conception et son usage nécessitent une réduction de la complexité du phénomène étudié, du nombre de variables et de paramètres analysés. Cette étape simplificatrice introduit également des erreurs dans

l'interprétation des données, nécessitant de formuler des hypothèses quant à l'acceptabilité des approximations des résultats obtenus (Boissier et al 2005).

Soulignons également qu'une source d'erreur est attachée aux modèles numériques, et plus précisément aux paramètres du logiciel gérant ces modèles. On prendra l'exemple du logiciel Res2Dinv pour lequel l'utilisateur doit faire le choix des différents paramètres d'inversion et donc des hypothèses à formuler quant à l'interprétation des résultats : choix du modèle mathématique (éléments finis ou différences finies), du nombre d'itérations à effectuer, des facteurs de robustesse fonction de la rhéologie du site étudié, de la résolution (maillage, convergence des résistivités,…), l'interpolation, etc. (Loke et al 1996a).

On pourra retenir que pour passer d'une mesure à la donnée recherchée, il existe des erreurs liées au modèle (forme du modèle, valeurs des paramètres,…) et des erreurs liées à la discrétisation de l'objet prospecté (généralement une valeur est associée à un volume représentatif supposé homogène). Il ressort donc que dans le cas de l'utilisation de modèle, il existe des erreurs liées à l'inversion et à l'interpolation.

4. La gestion du risque.

Dans le cadre d'un projet d'aménagement, la reconnaissance des sols a pour but d'appréhender la variabilité des sols et d'identifier les hétérogénéités majeures qui peuvent affecter le devenir d'un projet. Cette observation est appuyée par Young et al (2001) qui a effectué une analyse de 178 publications contenant dans leur résumé les mots ''structure des sols'' et/ou ''agrégat''. Cette revue de publications regroupe une analyse de 6 journaux (Soil Science, Society of America Journal, Soil Biology and Biochemistry, European Journal of Soil Science, Soil and Tillage Research et Geoderma). Les résultats de cette revue d'articles sont synthétisés par la Figure 1.5, en montrant d'une part dans quels journaux sont majoritairement publiés tels ou tels sujets (par exemple 24% des sujet sur le Management de la structure des sols sont publiés dans Soil and Tillage Research), d'autre part cette étude permet de rendre compte que les thèmes traitant de la stabilité vis-à-vis de la structure du sous-sol sont sur représentés (plus de 40% des publications de l'ensemble des journaux étudiés). Cette étude montre que la reconnaissance des sols (et les études actuellement menées) vise principalement à maîtriser la stabilité du sous-sol, donc à réduire l'incertitude sur les aléas géologiques pouvant survenir lors d'un projet d'aménagement. D'après les résultats de cette étude, l'un des thèmes prédominants qui justifie la reconnaissance des sols est la détermination de la stabilité des structures des sols. De la reconnaissance de la stabilité des structures découle naturellement la détermination du risque de rupture et plus généralement du risque encouru par des ouvrages par le manque de stabilité des sols.

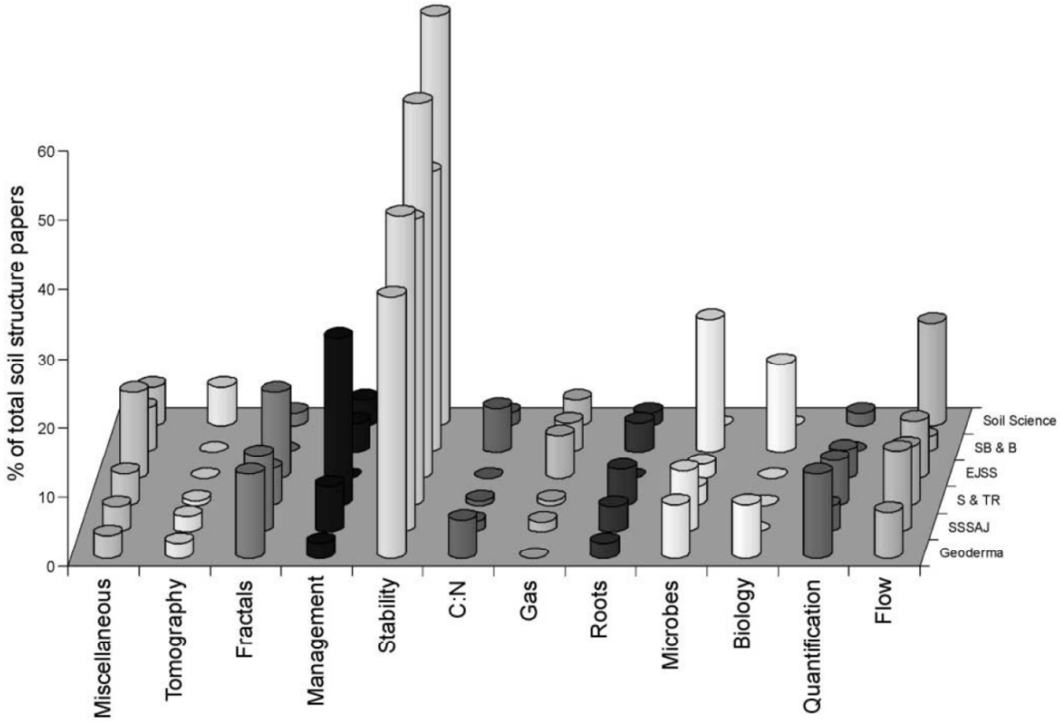


Figure 1.5 : Distribution des paires journal/thème traitant de la structure des sols (Young et al 2001).

4.1. Définition du risque.

Le risque est associé à la notion de probabilité qu'un évènement survienne. L'occurrence de cet évènement (aléa) est imprévisible et le plus souvent défavorable vis-à-vis d'un projet du fait des conséquences qu'il peut avoir sur le projet.

Une composante à prendre en compte dans la définition du risque est la présence humaine, ainsi que tout élément y faisant référence (activité économique, infrastructures, habitations,…), définissant les enjeux en cas d'occurrence d'un aléa. La vulnérabilité de chaque enjeu face à un aléa est caractérisée par sa résistance à l'aléa, et par sa résilience (Dauphiné et al 2013). La résilience mesure la capacité d'un système à absorber les conséquences d'un aléa et à perdurer au-delà de la perturbation occasionnée par ce dernier. Face à chaque aléa, la société (le facteur humain) décide du degré de protection souhaité et du niveau de risque acceptable, définissant ainsi l'acceptabilité d'un système face à un aléa et ses conséquences.

Dans le cadre d'un projet, toute occurrence d'un aléa, éventuellement non prévue, a des conséquences (tels que les investigations complémentaires, l'adaptation des techniques, les retards…) et implique souvent des conséquences financières. Plus généralement, dans nombre de domaines, le risque est défini comme le produit de la probabilité d'occurrence d'un aléa par la conséquence de cet évènement (vulnérabilité). Cette approche permet de hiérarchiser les conséquences en cas d'occurrence d'un aléa. Cette notion est illustrée par l'Équation 1.1.

Équation 1.1

$$\boldsymbol{Risque} = \sum_{\boldsymbol{i}} \boldsymbol{p_i} * \boldsymbol{c_i}$$

avec : p_i : probabilité d'occurrence de l'aléa.

c_i : conséquence selon les différents degrés de dégat/ruine.

Le risque peut alors être appréhendé comme étant une estimation d'un danger en combinant l'estimation de l'occurrence d'un aléa et une estimation de ses effets (Mousavi et al 2011, Varners 1984, Fell 2000).

L'ensemble de ces concepts est illustré par la Figure 1.6, représentant les conséquences des aléas majeurs touchant aux domaines civils, associées à la probabilité d'occurrence de ces derniers. Cette illustration permet également d'observer que les conséquences d'un aléa sont associées à des pertes financières et humaines ; dans ce cas, l'aléa peut être défini comme un danger vis-à-vis de la population. Pour la lecture de cette étude, la ligne « accepted » représente la limite en-deçà de laquelle la société admet l'acceptabilité de l'aléa et des conséquences de ce dernier ; la détermination de cette limite est faite en fonction d'études de cas historiques. La ligne « marginally accepted » illustre une limite représentant l'acceptabilité des conséquences d'un aléa face à une prise de risque. Par exemple, historiquement, les expéditions maritimes (shipping) étaient effectuées en connaissance de la forte probabilité de ruine/perte de cette dernière.

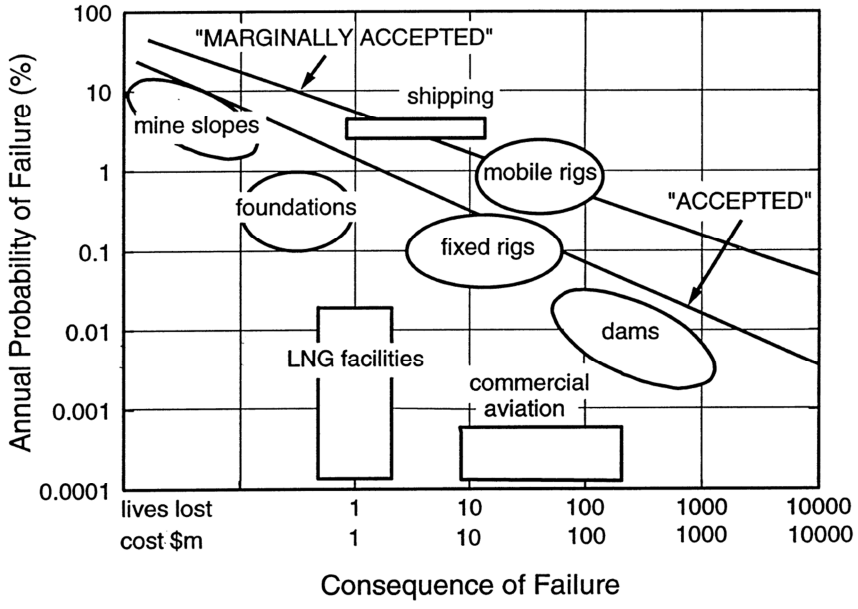


Figure 1.6 : Taux empiriques de défaillance des installations en génie civil (Phoon et al 2000).

4.2. Identification des aléas géotechniques.

Dans le cadre d'un projet, lorsque des hétérogénéités sont rencontrées alors qu'elles n'étaient pas envisagées (étude des sols déficiente ou hétérogénéité locale imprévisible), elles sont généralement qualifiées d'aléas géotechniques. Les sources d'aléas géotechniques et géologiques sont multiples, ainsi on ne soulignera que les principales énoncées par Philipponnat et al (2002) et Mongereau et al (2003) dans le Tableau 1.3. La Figure 1.7, associée à ces informations, illustre le fort pourcentage de dommages rencontrés au sein de projets causés par une mauvaise considération du comportement mécanique des sols, ou dans la même catégorie de dommage, une mauvaise cartographie des différentes propriétés prospectées.

Cas courants	**Pour information**
Sols	**Phénomènes Géologiques**
• tassements différentiels • diversité lithologique • altération des sols (puits de décalcification)	• éboulements rocheux • glissements de terrain • phénomènes karstiques (karst et doline)
Hydrogéologie	**Déroulement de projet**
• eaux superficielles (sols saturés) • eaux souterraines (rabattement de nappes) • fluctuation des nappes	• accidents techniques
Paramètres anthropiques	**Occupation des sols**
• Remaniement anthropique des sols • Remblais et aménagement du relief	• prise en compte du bâti ancien • cavités souterraines (carrières)

Tableau 1.3 : Sources d'aléas lors d'un projet d'aménagement (d'après : Philipponnat et al 2002, Mongereau et al 2003).

La Figure 1.7 permet d'appréhender la part des différentes sources d'aléas au sein de projets d'aménagement en Angleterre. On remarque que lors d'un projet, les causes majeures de retard ou d'arrêt des projets (Tableau 1.7 en complément) sont principalement liées (42%) à la nature du sous-sol, qu'elles soient liées à une mauvaise reconnaissance des propriétés physiques des sols (nécessitant une réadaptation des dimensions des ouvrages) ou à un mauvais suivi des conditions hydriques (rendant impossible le terrassement des sols). Soulignons également l'ensemble des études menées par Faisantieu (2010) sur la sinistralité des géotechniciens, en axant ces études sur les conséquences financières de ces aléas et des recommandations visant à en limiter l'occurrence ou du moins les impacts.

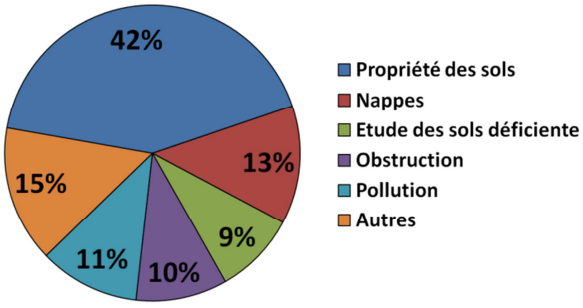


Figure 1.7 : Statistiques sur les dommages au sein de projets d'aménagement, Angleterre. (Hosseini, 2013)

4.3. Illustration de l'aléa géotechnique, étude de cas.

Cet exemple présente les données pressiométriques recueillies sur un chantier situé sur l'une des parcelles composant le site expérimental. L'analyse vise à mettre en avant la variabilité des propriétés mécaniques des sols. Les sondages ont été réalisés dans le cadre d'une reconnaissance des sols, pour l'implantation d'un complexe de 6 résidences avec parking souterrain. L'ensemble des résidences a une emprise au sol de 3345m², représentant 41% de la surface de la parcelle sujette au projet.

Cette étude de cas est faite pour mettre en avant la variabilité des propriétés mécaniques mesurées au sein d'une formation donnée (Figure 1.8), définie par des sondages à la tarière, mais également en comparant les propriétés mesurées au sein des différents forages. La campagne de reconnaissance géotechnique comprend 4 sondages à la tarière au sein desquels sont effectuées des mesures pressiométriques (implantation en Figure 1.8b). La lecture de cette coupe lithologique permet de souligner la difficulté des essais géotechniques à déterminer si la faible épaisseur des sables rencontrée pour SP3 peut être qualifiée « d'accident géologique » et, si tel est le cas, quelle est la distribution spatiale de cet « accident ».

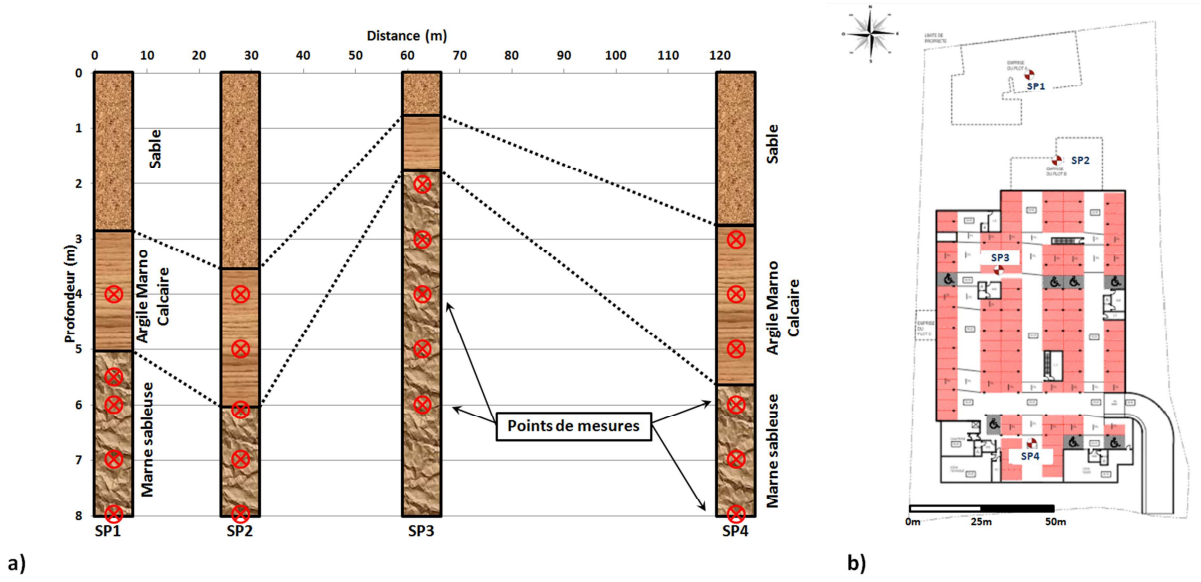


Figure 1.8 : Cas d'étude, a) coupe lithologique issue des tarières et points de mesures pressiométriques, b) plan d'implantation (d'après : Etude Géotechnique - Sol Conseil).

D'après la coupe lithologique, seules les mesures effectuées au sein des argiles marno-calcaires et des marnes sableuses sont retenues, du fait que les 1 à 2 premiers mètres du sous-sol vont être excavés lors des travaux. Au sein de chaque forage et des différentes couches lithologiques prospectées, sont calculés les moyennes, les écart-types et les coefficients de variation des modules pressiométriques (Em) et des pressions limites (Pl) mesurés (Tableau 1.4).

Couches	Propriétés	Moyenne (MPa)	Ecart-Type (MPa)	Coefficient de Variation (%)	Nombre de mesures
Argile Marno Calcaire	Em	36,2	35,2	97	6
	Pl	1,9	1,3	66	
Marne Sableuse	Em	67,3	42,5	63	15
	Pl	3,3	0,8	20	

Tableau 1.4 : Variabilité des propriétés mécaniques mesurées

L'analyse du Tableau 1.4 montre qu'à l'échelle du site, les argiles ainsi que les marnes présentent de fortes variations de leurs valeurs de module pressiométrique dispersées, tout comme les pressions limites mesurées au sein des argiles. Ces variations indiquent qu'au sein d'une même couche lithologique, en fonction du paramètre mécanique étudié, les plages de mesure peuvent être importantes, révélant des niveaux de résistance plus ou moins important pour une même entité lithologique. Seules des pressions limites mesurées dans les marnes présentent une plus grande homogénéité. Du fait que seuls 5 points de mesures sont réalisés pour chaque forage, l'analyse de la variabilité des mesures pour chacun d'eux n'est possible que pour la couche de marne sableuse (la couche d'argile ne présentant que 1 ou 2 mesure par sondage). Cette analyse de la variabilité des mesures des propriétés mécaniques de la couche de marne sableuse au sein de chaque sondage est synthétisée par le Tableau 1.5.

Sondages :	SP1		SP2		SP3		SP4	
Propriétés mécaniques	Moyenne	C.V. (%)	Moyenne	C.V. (%)	Moyenne	C.V. (%)	Moyenne	C.V. (%)
Em	87	72	56	13	54	70	72	25
Pl*	2,9	40	3,7	17	3,4	16	3,5	0

Tableau 1.5 : Variabilité des propriétés mécaniques au sein d'une couche lithologique pour chaque sondage.

Attribuer une valeur représentative pour une couche lithologique supposée homogène et qui ne l'est vraisemblablement pas pose de sérieux problèmes de choix. Une analyse complémentaire nécessiterait de choisir un paramètre physique ou mécanique complémentaire pour faire la distinction entre les différentes couches lithologiques qui sont supposées être homogènes.

5. Reconnaissance du sous-sol, l'étude globale par l'échantillon.

Le nombre et l'emplacement des essais géotechniques sont actuellement dépendants de l'expérience du géotechnicien. L'interprétation des données recueillies doit permettre d'estimer sur l'ensemble de la parcelle à l'étude, ou du moins dans le voisinage proche des sondages, la variabilité du sous-sol. La représentativité des échantillons a donc toute son importance pour pouvoir estimer des propriétés ou généraliser une information ponctuelle à quelques m^3 du sous-sol ou à l'ensemble de la parcelle étudiée. La géotechnique vise à caractériser la variabilité du sous-sol par l'interprétation de l'ensemble des forages répartis sur la parcelle. La pertinence de chaque moyen de reconnaissance permet de définir les différents coefficients de sécurité à adopter pour couvrir l'incertitude de mesure et l'hétérogénéité du sous-sol. Ainsi, nombre d'approches et d'interprétations sont possibles quant à

l'étude et l'estimation d'un paramètre sur la totalité d'un volume lorsque cette étude est basée sur l'analyse de quelques informations ponctuelles.

5.1. Les ensembles flous.

Les données dont disposent les géotechniciens à propos des paramètres des sols sont peu nombreuses, hétérogènes, incertaines ou éparses au sein de la parcelle ; elles ne peuvent pas constituer une série statistique acceptable. Conçus pour permettre la modélisation de la notion d'appartenance vague à un ensemble, les nombres flous présentent une alternative intéressante en remplaçant le concept de probabilité par celui de possibilité (Maïolino et al 2002, Zadeh 1978).

La méthode des ensembles flous permet d'estimer la possibilité d'occurrence d'évènements. Pour une étude par éléments flous, on repère dans la série de données dont dispose le géotechnicien, les évènements considérés comme certains, d'intensité comprise entre deux valeurs moyennes observées I_2 et I_3, dont la probabilité est estimée à 1, et ceux que l'on considère comme impossible, d'intensité jamais observée, inférieure à I_1 et supérieure à I_4 dont la probabilité est estimée à 0 (Figure 1.9). Les évènements compris entre I_1 et I_2 ou entre I_3 et I_4 sont possibles (Martin 2010).

Pour une telle étude, il faut donc disposer d'une série d'au moins quatre valeurs qu'il est possible de compléter par la suite pour affiner le résultat. Par cette approche, la réalisation d'un évènement attendu d'intensité dangereuse I_0 sera possible si $I_2<I_0<I_3$, probable si $I_3<I_0<I_4$ ou $I_1<I_0<I_2$, impossible si $I_0<I_1$ ou $I_4<I_0$.

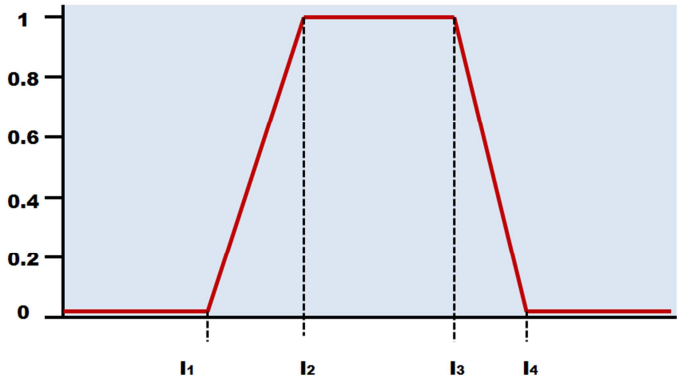


Figure 1.9 : Nombres flous, possibilité des évènements.

5.2. L'analyse statistique des bases de données.

L'une des approches retenue pour estimer et prendre en compte l'hétérogénéité des sols est l'étude statistique des données recueillies. Cette approche repose, entre autres, sur l'établissement de relations entre les différents paramètres mesurés, dans le but d'établir des corrélations entre paramètres et de faciliter les études géotechniques pour le dimensionnement des ouvrages. La détermination de ces relations n'est possible que par une étude statistique. L'analyse de cas passés, en relation avec l'estimation du cas d'étude, permet de définir les seuils I_n déterminant la possibilité d'un évènement.

De par l'observation de nombreux cas (Magnan 1996), il ressort que la détermination des relations empiriques entre différents paramètres est affectée par la variabilité spatiale des données et des incertitudes liées aux mesures. Il convient de définir l'échelle d'étude pour cerner les gammes de variation et d'occurrence des évènements étudiés. Pour rendre compte de cette observation, on détermine l'autocorrélation spatiale des valeurs d'une variable. C'est la traduction statistique du concept selon lequel les valeurs d'un paramètre en deux points proches sont plus susceptibles d'être voisines que celles correspondant à deux points plus éloignés. La qualité de la relation statistique établie peut dépendre également du volume de sol investigué avec les différents essais. L'une des limites de la détermination des corrélations est qu'elles sont souvent spécifiques aux sites investigués.

L'étude statistique des données vise à exploiter les mesures en les comparant à des lois de distribution théoriques connues, telle l'étude de la distribution de valeurs selon une loi normale (test du Khi²). Par l'intermédiaire de l'écart-type, ces études permettent de prendre en compte la dispersion des paramètres du sous-sol (Abdul Baki 1992). Les bases de la statistique inférentielle servent à calculer (pour une population de données aléatoires répondant à une loi normale) le nombre minimal de points de mesure nécessaires pour pouvoir quantifier l'écart-type ou la moyenne réelle d'une variable, selon un seuil de confiance et une marge d'erreur (Indira et al 2010). L'Équation 1.2 permet d'estimer le nombre minimal de mesures géomécaniques ou géophysiques à réaliser au sein d'une couche pour déterminer la valeur moyenne d'une propriété, en fonction d'un seuil de confiance.

Équation 1.2

$$\boldsymbol{n = t^2 \times \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2}}$$

avec : n : la taille minimale d'échantillonnage,

σ : l'écart-type de la variable à étudier,

ε : la marge d'erreur acceptée,

t_α : variable centrée réduite (chance de ne pas se tromper à un seuil de confiance $1-\alpha$ donné).

Lors d'une prospection géomécanique, il est ainsi possible d'estimer le nombre d'essai ou de mesure à réaliser au regard de la variabilité (σ) des propriétés mesurées. Parallèlement, suite à une prospection, au regard de la variabilité des propriétés étudiées (σ) et du nombre d'essais réalisés (n), il est possible de déterminer la marge d'erreur (ε) avec laquelle la valeur moyenne de la propriété prospectée peut être estimée. Cette approche permet de donner du poids aux résultats des essais géotechniques, qui ne fournissent généralement pas assez de points de mesure pour décrire convenablement (marge d'erreur minimale) les propriétés mesurées.

5.3. L'analyse géostatistique.

Les premières études géostatistiques furent menées par Matheron (1970). Son objectif était de résoudre le problème de l'estimation de variables spatialement corrélées et présentant un comportement irrégulier.

Les outils développés par la géostatistique permettent, entre autres, d'estimer des valeurs en des points non prospectés sur une parcelle, en utilisant les corrélations spatiales (ou temporelles) entre les points de données échantillonnés. L'outil mathématique permettant l'étude des variables régionalisées est le semi-variogramme, que le langage de vulgarisation nomme variogramme (Matheron 1970).

Le semi-variogramme permet de décrire la structure spatiale d'une variable et de déterminer la distance (a) au-delà de laquelle les propriétés en deux points de mesure ne sont plus corrélées (portée de la variable). Pour une analyse variographique, la variable régionalisée considérée, définie dans l'espace ou le temps par un ensemble de points, est supposée être la réalisation particulière *z(u)* d'une fonction aléatoire *Z(u)*, où *u* est la position de la mesure, et *Z(u)* la mesure en cette position *u* d'une propriété du sol. Dans le cas d'une variable stationnaire, répondant à l'hypothèse de stationnarité d'ordre 1 et 2, à savoir :

• 1 : Les accroissements de la moyenne et de la variance de Z(u) sont indépendants de u.

• 2 : La covariance entre deux points u et (u+h) ne dépend pas de u, mais de l'intervalle h (temps ou distance).

Les valeurs du variogramme augmentent avec l'intervalle *h* (distance ou temps), jusqu'à ce que cet intervalle atteigne la portée (a) au delà de laquelle les valeurs du variogramme se stabilisent autour d'une valeur appelée palier. Ce palier est égal à la variance de la variable étudiée si cette dernière est strictement stationnaire (Figure 1.10). Soulignons l'existence d'un effet de pépite si la valeur du variogramme n'est pas nulle pour un intervalle très faible (proche de 0), traduisant des erreurs de mesure (discontinuité spatiale des mesures).

Le semi-variogramme expérimental est obtenu selon l'Équation 1.3 :

Équation 1.3

$$\boldsymbol{\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(u_i + h) - Z(u_i)]^2}$$

avec : *γ(h)* est la valeur du semi-variogramme calculée pour une distance *h* entre les points,

N(h) est le nombre de couples de points distants de h,

$Z(u_i)$ est la variable étudiée.

La géostatistique permet de donner de la pertinence à l'étude des données de campagnes de mesures géophysiques et géotechniques. Les études géostatistiques permettent l'établissement de cartes rendant

compte de la distribution spatiale de propriétés mécaniques (Vanmarcke 1983, Laurent 2007, Lepetit 2002, Chaplot 2010) avec un intérêt particulier porté aux données issues des essais de pénétration statique et dynamique (Dawson et al 2005, Lenz et al 2007, Basarir et al 2010), dans le domaine de la géophysique (De Benedetto et al 2011, André et al 2011), et dans la modélisation des structures géologiques (Marache et al 2009). La géostatistique permet également de définir un schéma d'implantation d'essais dans le but de réduire l'incertitude sur l'interpolation (Van Groenigen 2000).

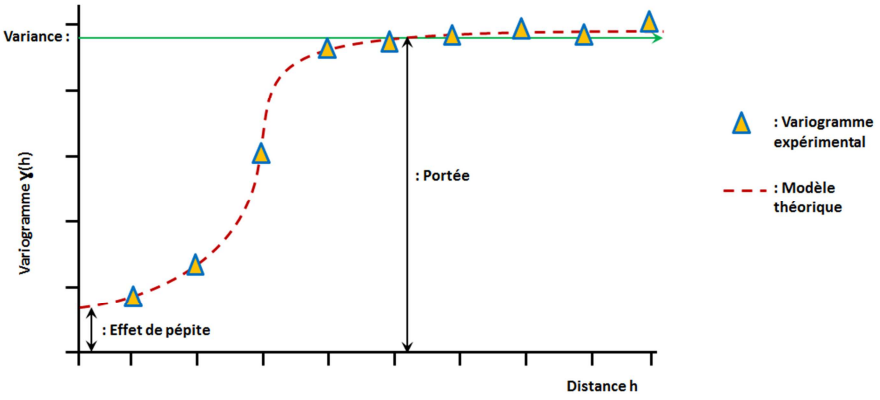


Figure 1.10 : Caractéristiques principales d'un variogramme.

5.4. Zonage des propriétés en parcelles homogènes.

Un des objectifs de la reconnaissance des sols est de pouvoir représenter au mieux la variabilité du sous-sol en identifiant les hétérogénéités et les gammes des variations des principales propriétés étudiées. Pour aider à la représentation d'une parcelle, une sectorisation des propriétés mesurées en zones homogènes permet de différencier les parties pertinentes, telles les anomalies ou les hétérogénéités majeures. Ce type d'analyse prend en compte la répartition des données et la variabilité des propriétés mesurées.

5.4.1. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA).

Le principe d'une analyse hiérarchique ascendante est de rassembler les observations d'une ou plusieurs variables au sein d'un groupe (cluster) selon un critère de ressemblance défini au préalable. Les observations les plus semblables seront ainsi regroupées dans des clusters homogènes. La taille de ces clusters dépendra de la finesse des paramètres de distinction entre les différentes variables (Wilks 2001, Zirnea et al 2013, Genelle 2012).

a) Choix d'un indice de similarité.

De nombreuses mesures de la distance/différence entre deux valeurs d'une variable existent ; le choix d'une d'entre elles dépend des données étudiées et des contrastes que l'on souhaite favoriser ou réduire. Par exemple, le calcul par distance Euclidienne prend en compte uniquement la distance géométrique, tandis que la distance Euclidienne au carré permet de surpondérer les objets atypiques. Soulignons également la méthode de calcul par pourcentage de variation qui est particulièrement

adaptée si les données des dimensions utilisées dans l'analyse sont de nature catégorielle (Carpentier 2007). Dans le cadre de cette thèse, la distance Euclidienne est choisie pour la classification des données recueillies, les principales méthodes de calcul étant récapitulées dans le Tableau 1.6. L'indice de similarité (distance entre individus/clusters) permet de faire les choix successifs d'agrégation (Figure 1.11a).

Indice de similarité	**Formule de calcul de la distance (*d*)**
Distance Euclidienne	$d(I_i, I_j) = \sqrt{\sum_k (x_{ik} - x_{jk})^2}$
Distance Euclidienne au carré	$d(I_i, I_j) = \sum_k (x_{ik} - x_{jk})^2$
Distance de City-block	$d(I_i, I_j) = \sum_k \lvert x_{ik} - x_{jk} \rvert$
Distance de Tchebychev	$d(I_i, I_j) = Max \lvert x_{ik} - x_{jk} \rvert$
Distance à la puissance	$d(I_i, I_j) = \left(\sum_k \lvert x_{ik} - x_{jk} \rvert^p \right)^{1/r}$

Tableau 1.6 : Indices de similarité et méthodes de calcul des distances pour une CHA (Carpentier 2012).

avec : I_i : individu *i* *k* : dimension des vecteurs de l'individu *i* (ou nombre de paramètres sur lesquels repose la CHA).

x_{ik} : vecteur *k* de l'individu *i* (coordonnée ou paramètre à comparer).

p : pondération progressive affectée aux différences entre les dimensions individuelles.

r : pondération progressive affectée aux grandes différences entre les objets.

si $p = r = 2$: formule de la distance Euclidienne.

si $p = 1$: formule de la distance de City-Block.

si $p = \infty$: formule de la distance de Tchebychev.

si $p = r$: formule de la distance de Minkowsky.

La variation sur les paramètres p et r permet de trouver l'équilibre voulu entre l'importance du nombre d'éléments différents et l'importance de la différence elle-même (Carpentier 2012).

b) Choix d'un indice d'agrégation.

L'application de la méthode suppose également de faire le choix des paramètres d'agrégation entre clusters. Dans cette étape de nombreux choix existent, permettant chacun de calculer la distance entre deux clusters quelconques sans avoir à recalculer celles qui existent entre les individus composant chaque cluster. La méthode la plus performante, donc retenue dans le cadre de cette thèse, d'après Griffith et al (1984), est la méthode de Ward. Cette méthode consiste à choisir le regroupement de clusters qui induit la plus faible augmentation d'inertie (ou de la variance) intracluster. La distance entre le cluster Ck et le cluster Ck' est la différence entre l'inertie intracluster Iw actuelle et l'inertie intracluster après une agrégation de Ck et Ck'. Le choix d'un indice d'agrégation permet de représenter les distances entre les différents clusters grâce à un dendrogramme (Figure 1.11b).

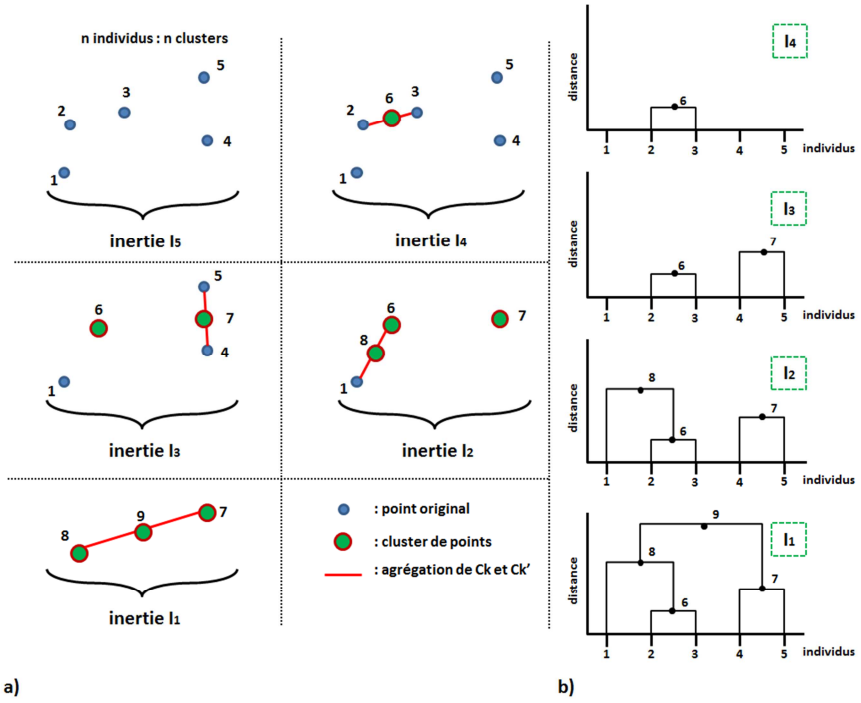


Figure 1.11 : Etapes d'une CHA, a) choix des couples d'individus, b) visualisation des distances entre clusters avec un dendrogramme.

A titre indicatif, on peut indiquer trois méthodes complémentaires :

• complete linkage : les distances entre clusters sont déterminées par la plus grande distance existant entre deux objets de clusters différents.

• moyenne non pondérée : la distance entre deux clusters est calculée comme la moyenne des distances entre tous les objets pris dans l'un et l'autre des deux clusters différents.

• centroïde pondéré des groupes associés (médiane) : la distance entre deux clusters est déterminée par la distance entre les centroïdes respectifs ; une pondération est introduite dans le calcul afin de tenir compte des tailles des classes (nombre d'objets contenus dans chaque cluster).

L'exécution d'une CHA demande également de faire un choix sur les critères d'agrégation pour former *n* clusters. Le critère d'agrégation permet de comparer les clusters deux à deux pour sélectionner les plus similaires. Les critères majoritairement utilisés sont le plus proche voisin, le diamètre maximum, la distance moyenne et la distance entre les centres de gravité. La représentation de l'ensemble de ces distances entre cluster se fait avec un dendrogramme, donnant la composition des différents clusters (nombre et valeurs des variables), ainsi que l'ordre dans lequel ils ont été formés.

L'analyse par CHA ne permet pas de déterminer le nombre optimal de clusters à prendre en compte pour avoir une représentation pertinente de la variabilité des propriétés mesurées. Par exemple, dans le cas d'une CHA sur une cartographie de résistivité apparente, le choix du nombre de clusters va seulement limiter l'homogénéité des groupes créés et non la taille (dimension spatiale) de ces derniers,

ce qui peut amener à la détermination d'un groupe de quelques dm² au sein d'une reconnaissance de plusieurs dizaines de m². La pertinence du nombre de clusters dans CHA doit donc à la fois répondre à une bonne représentativité de la variabilité de la base de données (σ), mais également la dimension des clusters créés (nombre de données et dimension spatiale à laquelle le cluster se rattache).

5.4.2. Analyse par Transformée de Fourier.

L'analyse de Fourier est parmi les outils les plus pertinents pour étudier les variations temporelles ou spatiales d'une base de données. En soulignant que les variations étudiées doivent présenter plusieurs cycles pour être convenablement décrites par ses fréquences propres. Ainsi, du fait que cette étude soit basée sur le concept physique d'une analyse de fréquences (spatiales ou temporelles), elle se révèle mal adaptée à la description de fonctions ou signaux couramment rencontrés dans les domaines de la reconnaissance des sols, et plus particulièrement en géophysique (Rosat 2004). L'analyse de Fourier est bien adaptée dans un contexte stationnaire, quand le signal analysé présente certaines propriétés d'invariance par translation. Toutefois, les signaux géophysiques et géotechniques, par nature ne peuvent être intégrés dans ce contexte, car le pas de mesure est souvent non constant et qu'il y a une absence de période au sein du signal.

Soulignons que le traitement théorique de l'analyse en ondelette des données géophysiques, initié par Grossmann et al (1984) a été développé dans les domaines de la reconnaissance géophysique. A noter que l'étude menée par Kumar et al (1997) présente les propriétés élémentaires faisant de l'analyse en ondelette un outil attrayant et puissant pour des applications géophysiques. L'analyse en ondelette complète bien les limites liées à l'étude de signaux quasi-stationnaires, de l'analyse des données par la méthode de transformée de Fourier. Cette dernière n'apporte aucune information quant à l'évolution du spectre au cours du temps (Mabille et al 2012). On notera également les applications dans la réduction du bruit des mesures géophysiques (Li et al 2013b) et la mise en avant de la notion d'échelle de variation des propriétés en géophysique (Lark et al 2003) où l'analyse par ondelette prend en compte le fait que les propriétés du sous-sol ne sont pas stationnaires dans leur variance. L'analyse en ondelette permet également d'identifier des corrélations entre le coefficient des ondelettes et les successions de faciès lithologiques mesurés par diagraphie de forage, mettant alors en avant les différentes échelles des structures lithologiques du sous-sol (Perez-Muñoz et al 2013).

a) Principe.

La transformation de Fourier $\boldsymbol{F}$ est une opération qui transforme une fonction $\boldsymbol{f}$ intégrable sur $\mathbb{R}$ en une autre fonction décrivant le spectre fréquentiel $\hat{\boldsymbol{f}}$. La transformée de Fourier est la fonction $\boldsymbol{F(f) = \hat{f}}$, donnée par l'Équation 1.4 dont les résultats sont illustrés par la Figure 1.12 pour le cas de signaux périodiques simples.

Équation 1.4

$$F(f) : \xi \rightarrow \hat{f}(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\xi x} dx$$

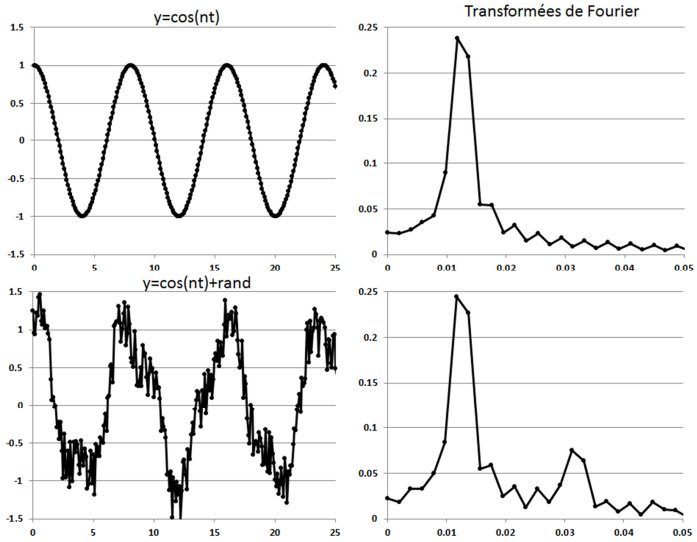


Figure 1.12 : Signaux périodiques et transformées de Fourier associées.

b) Exploitation des résultats.

L'utilité de décrire une série de données par ses fréquences propres est d'appliquer le principe des filtres passe-haut et passe-bas pour filtrer le signal, soit par exemple pour extraire le bruit, soit pour identifier un phénomène par sa longueur d'onde. Dans le cas illustré par la Figure 1.12, la mise en place d'un filtre passe-bas pour une fréquence de 0,02 (s^{-1} ou m^{-1} selon l'unité du signal étudié) permet d'obtenir le signal ''propre'' de forme y=cos(nt) en effectuant une transformée inverse (Cheng et al 2012).

De plus, dans le cas d'études de données issues de campagnes de reconnaissance des sols, la dimension majoritaire est spatiale, les fréquences propres sont donc en m^{-1}. Cette caractéristique permet de déterminer la taille des principales structures prospectées. Pour l'interprétation d'un tel zonage il faut également intégrer la notion de seuil de détection des propriétés mesurées, qui pour le cas des résistivités apparentes est fixé à une variation de 10% de la résistivité entre deux structures pour que ces dernières puissent être différentiables (Buvat 2012).

6. Bilan Partie I.

Il ressort de cette partie que le sol et le sous-sol sont des milieux naturellement hétérogènes. Cette hétérogénéité est à la fois spatiale et temporelle selon les différentes propriétés mécaniques et physiques qui sont considérées.

Du fait de la variabilité spatiale des sols, nous avons soulevé le problème de l'incertitude sur les gammes de valeurs des propriétés étudiées. Cette incertitude peut être due à la nature propre des sols (aléatoire, erreur active) ou à différentes erreurs de mesure qui peuvent exister (épistémique, erreur passive).

De la notion d'incertitude découle celle de risque lorsque des impacts sont à prévoir lors de l'occurrence d'aléas géotechniques durant un projet d'aménagement. Nous avons souligné que dans le cadre d'un projet d'aménagement, la gestion du risque repose avant tout sur l'identification et la cartographie des aléas, permettant d'une part de réduire la probabilité d'occurrence de l'aléa, et d'autre part de préparer les différents acteurs du projet à l'occurrence de l'aléa, réduisant ainsi les impacts et donc les risques.

Enfin, dans le cadre de la reconnaissance des sols, il est convenu qu'une parcelle ne peut être prospectée en totalité, par une prospection continue sur l'ensemble du volume des sols. Cela nécessite donc d'estimer la variabilité des sols à partir d'un nombre limité d'échantillons/mesures.

Une réponse pertinente à apporter par la reconnaissance des sols est de pouvoir déterminer un zonage du sous-sol en différents blocs dont les propriétés considérées sont homogènes. Ces différents blocs permettront de représenter la variabilité et l'hétérogénéité des sols.

Partie II – Reconnaissance du sous-sol, état de l'art.

1. Les moyens de reconnaissance des sols.

1.1. Reconnaissance géotechnique.

1.1.1. Contexte et objectifs.

La reconnaissance géotechnique des sols vise à acquérir diverses informations, dont connaître l'état des sols et de l'eau interstitielle qu'ils contiennent, à évaluer les propriétés mécaniques des sols ainsi que leurs variabilités et à déterminer la présence éventuelle d'anomalies (hétérogénéités).

Les paramètres du sous-sol pouvant affecter le devenir d'un projet se retrouvent autant sur le plan de la reconnaissance géologique (répartition spatiale des couches), que sur le plan du comportement mécanique des couches prospectées (capacité portante,…). Pour appuyer ces propos, la Fédération Nationale des Travaux Publics a publié un rapport (Petitjean 2010) qui fait le point de la jurisprudence sur le problème de la reconnaissance des sols. Ce rapport présente les contraintes imprévues (sujétions imprévues) qui sont définies comme étant des « difficultés matérielles anormales et exceptionnelles […] raisonnablement imprévisibles lors de la conclusion du marché et qui ont pour effet de rendre plus difficile mais non impossible l'exécution des travaux ». Ces contraintes ne doivent pas être confondues avec l'imprévision ni la force majeure. Le Tableau 1.7 regroupe les situations ayant amené la Justice à statuer (Petitjean 2010) :

Date	Lieux	Contextes rencontrés	Impacts sur les projets
Oct. 1978	Vendée	• nature des sols • épaisseur sous-évaluée	• économie du contrat bouleversée
Déc. 1991	Bordeaux	• nature des terrains rencontrés	• modification du système de fondation
Fév. 2006	Versailles	• reconnaissance des sols non effective	• obstacle à la bonne réalisation du chantier
Mai 2006	Marseille	• résistance exceptionnelle d'une large zone rocheuse	• obstacle à la bonne réalisation du chantier
Déc. 2006	Bordeaux	• hétérogénéité des sols mal appréhendée • présence d'une nappe de surface	• obstacle à la bonne réalisation du chantier
Juin 2007	Marseille	• erreur sur la nature de la roche	• obstacle à la bonne réalisation du chantier • bouleversement de l'économie du contrat, conséquences financières
Aout 2007	Nancy	• présence de cavités (carrière, karsts)	• modification du système de fondation

Tableau 1.7 : Situations ayant conduit à une intervention de la justice (d'après : Petitjean 2010).

Ces cas de jurisprudence sont rencontrés lorsqu'une faute est reconnue, que ce soit du côté des entreprises qui n'ont pas effectué correctement la reconnaissance des sols, ou des chefs de projet qui n'ont pas bien pris en compte les informations qui leur ont été fournies. Appuyé par les observations faites par Denis et al (2003), il ressort deux informations principales de ce rapport :

- La première est qu'un projet peut être bouleversé lorsque le sous-sol n'est pas correctement prospecté. Ces erreurs peuvent survenir lorsque le nombre d'essais réalisés n'est pas suffisant, ou que les essais effectués ne permettent pas de rendre compte de la distribution spatiale des propriétés physiques, mécaniques et lithologiques des sols.
- La seconde est que tout professionnel peut ne pas exploiter au mieux les informations qui sont mises à sa portée. Le contexte particulier de tel ou tel projet peut amener le responsable d'un projet à ne pas se poser les questions pertinentes pour le bon déroulement du chantier.

La création sur des sols en milieu périurbain de structures pérennes demande une reconnaissance préalable des hétérogénéités du site considéré. Ces hétérogénéités peuvent être de l'ordre de la distribution au sein de la parcelle des zones de remblais, de la localisation des lentilles argileuses, et de la détermination de leur susceptibilité aux phénomènes de retrait gonflement. Dans la région bordelaise, et plus particulièrement sur la commune de Pessac (33600), s'ajoutent comme singularité régionale, l'identification du cryptorelief (Moussouteguy 2002) du calcaire du Miocène, avec le repérage des zones karstiques. L'analyse préalable des archives et bases de données est l'approche la plus pertinente pour déterminer les variations de sa constitution (niveaux argileux ou sableux, puits de décalcification…).

Si l'on considère la mise en place d'une nouvelle structure au sein de la parcelle (réseau de télécommunication, eaux usées, eau potable…), une mauvaise prise en compte de la variabilité spatiale (transition sable/argile) et temporelle (variation saisonnière du niveau des nappes) des propriétés physiques et mécaniques des sols conduira à la rupture de ces structures nouvellement installées à plus ou moins faible échéance (Guekie Simo 2012).

1.1.2. Les moyens d'investigation.

La reconnaissance géotechnique sur chantier est abordée de deux façons : d'une part via des essais in-situ, et d'autre part via des essais en laboratoire effectués sur des sols remaniés ou non. Un descriptif détaillé de l'ensemble des essais réalisables se trouve dans les ouvrages spécialisés ainsi que les normes rattachées à ces différents essais (Philipponnat et al 2003, NF P94-500, Eurocode 7 1997, SETRA et LCPC 1992a&b).

Le Tableau 1.8 recense les caractéristiques principales des essais géotechniques réalisés pour un projet. Comme souligné dans le §II.2, il est conseillé de combiner l'ensemble de ces essais dans le but d'obtenir une information pertinente sur le comportement mécanique des sols et une description de leurs propriétés physiques. Dans cette optique (§II.2.), l'Eurocode 7 propose diverses recommandations visant à avoir un plan d'implantation des différents essais géotechniques permettant d'être raisonnablement représentatif de la variabilité du sous-sol.

In-situ		En laboratoire	
Essais	**Pas de mesure vertical**	**Essais**	**Echantillonnage**
Pénétromètre : Essais statiques ou dynamiques permettant d'identifier les différentes couches de sols et de quantifier leurs comportements mécaniques (résistance à la pointe statique q_c et dynamique q_d).	continu (statique) 1cm-1dm (dynamique)	**IPI :** L'indice de portance immédiat permet de qualifier la traficabilité des sols naturels, ou suite à un traitement aux liants hydrauliques et/ou à la chaux.	sols de surface remaniés
Scissomètre : Permet de mesurer l'angle de frottement (φ) et la cohésion (CU et Cr) des sols pour le calcul de stabilité des remblais.	1m entre deux mesures au minimum	**Limite d'Atterberg :** Vise à identifier le domaine hydrique dans lequel le sol argileux a un comportement plastique (limite de plasticité et de liquidité).	sur tous les sols argileux rencontrés
Pressiomètre : Essai majeur pour le dimensionnement des fondations, en France uniquement. Permet de déterminer la pression limite (Pl*) et le module pressiométrique des sols (Em).	fonction des dimensions de la sonde (1,5 à 5m)	**Identification des sols :** Permet d'identifier les différents sols rencontrés selon les termes GTR. Les normes indiquent également la sensibilité des sols aux conditions hydriques ainsi que la traficabilité (IPI) de ces derniers. A titre indicatif : Essai Proctor, valeur au bleu, granulométrie, perméamétre.	sur tous les sols présents sur le site
Tarière : Permet d'identifier les alternances lithologiques des sols en observant les différents échantillons de sols remaniés, remontés en surface.	continu	**Essai de cisaillement et triaxial :** Permet de quantifier la cohésion et l'angle de frottement des sols. Ces résultats permettent entre autres de déterminer la stabilité des pentes pour une fouille ou la mise en place d'un remblai.	sur l'ensemble des sols sujets à être mis à contribution par des efforts latéraux
Sondage carotté : Permet d'étudier l'alternance lithologique des sols via un prélèvement de sols non remaniés.	continu		

Tableau 1.8 : Synthèse des essais géotechniques les plus courants.

1.1.3. Moyen d'essai géotechnique retenu pour la thèse : le pénétromètre dynamique.

Dans le cadre de cette thèse, la reconnaissance géotechnique des sols sera effectuée principalement avec des essais pénétrométriques dynamiques, et complétée par des sondages à la tarière.

Les sondages pénétrométriques dynamiques consistent à faire pénétrer un train de tige dans le sol par battage. Le train de tiges est conventionnellement constitué de tubes métalliques au bout duquel se situe une pointe métallique de section A_c. De nombreux dispositifs répondent à ces quelques caractéristiques, le diamètre du train de tiges étant usuellement inférieur à celui de la pointe conique, limitant ainsi sensiblement les frottements du sol par la création d'une cavité entre le train de tiges et le sol encaissant (nommée espace annulaire). L'utilisation principale des pénétromètres dynamiques est le contrôle de la compacité des sols non cohésifs, pour lesquels le prélèvement d'échantillons n'est pas envisageable (déstructuration du sol en place). En France, les essais de pénétromètre dynamique ne permettent pas le dimensionnement des fondations car des sollicitations dynamiques ne permettent pas d'estimer les sollicitations ''statiques'' des fondations superficielles (Waschkowski 1983). Soulignons aussi qu'en dehors de la France, toutes les fondations sont dimensionnées via des mesures au pénétromètre.

a) Approche mécanique.

Une des caractéristiques principales des pénétromètres dynamiques vis-à-vis des statiques est l'irrégularité du pas de mesure. Pour un essai dynamique, on enregistre le nombre de coups N_x nécessaires pour enfoncer le cône d'une épaisseur x dans le sol. Une relation relie l'énergie de battage

et la résistance du sol à l'enfoncement de la pointe, en quantifiant la résistance à la pointe dynamique, notée q_d.

Il existe deux catégories de pénétromètre lorsque l'on s'intéresse au type de battage, selon que l'énergie de battage est constante ou variable/adaptée. Dans le cas d'une énergie constante, le mouton (marteau) tombe en chute libre d'une hauteur constante ; l'énergie transmise à l'enclume est donc constante pour chaque impact. Dans le deuxième cas, la chute du mouton peut être accélérée ou ralentie, augmentée ou diminuée. Ce type de prospection a l'avantage de pouvoir contrôler la vitesse d'avancement de la pointe dans le sol, et donc le pas de mesure des essais. Cependant, dans ce cas, le calcul de l'énergie transmise au train de tiges ne répond pas à un abaque.

Du fait d'une adaptation de l'énergie de battage à la résistance des sols prospectés, l'essai au pénétromètre dynamique peut être effectué dans les sols mous d'une manière aussi significative qu'avec un pénétromètre statique, avec l'avantage d'une maîtrise du pas de mesure. Pour le cas des sols graveleux et caillouteux, le pénétromètre dynamique fournit des résultats plus réalistes que le pénétromètre statique (Waschkowski 1983). En France, actuellement, ces outils font l'objet de normes les classant en pénétromètres dynamiques de type A (NF P 94-114) et de type B (NF P 94-115), différence principale faite sur l'utilisation (Type A) ou non (type B) de bentonite dans les trous de sondage pour limiter les frottements des sols créés sur le train de tiges.

Les atouts du pénétromètre sont, d'une part la non nécessité d'une énergie de battage mécanique pour des prospections sur de faibles profondeurs (5-10m), et d'autre part le faible encombrement au sol permettant une bonne accessibilité aux sites à prospecter (Benz Navarrete 2009).

Les mesures pénétromètriques dépendent, outre du comportement mécanique des sols, de la granulométrique ainsi que de la structure, de la compacité des sols et de la teneur en eau. Plus localement, la résistance à la pointe mesurée à chaque coup de marteau résulte des propriétés du terrain présent dans un volume autour de la pointe de la tige, estimé être une sphère de 5cm de rayon, pour une pointe de 2cm² de section (Laurent 2007). De ce fait, la mesure est très sensible à la présence d'anomalies telle la présence de cailloux dans le sol.

b) Calcul de la résistance à la pénétration de la pointe.

La résistance à l'enfoncement de la pointe dans le sol est directement liée à l'énergie transmise par le mouton sur le train de tiges étant donné que les frottements sur le sol environnant sont négligés. Les résultats obtenus au pénétromètre dynamique à cône peuvent être présentés de trois façons différentes :

→ par le nombre de coups, N_d, nécessaires pour un enfoncement donné (en général, 5-10-20 ou 30cm).

→ par la résistance dynamique unitaire, r_d.

→ par la résistance dynamique de pointe, q_d.

Des études (Frazer 1971, Lowery et al 1968, Waschkowski 1983) pour relier l'énergie cinétique du marteau à l'énergie de battage ont mené à de nombreuses formules prenant en compte une approche newtonienne du battage par application de la théorie des chocs (Brossard 1994). L'Équation 1.5 nommée également formule des Hollandais, prend en compte l'ensemble des paramètres régissant un essai au pénétromètre dynamique.

Équation 1.5

$$q_d = \frac{M.g.H}{A.e} \cdot \frac{M}{M+M'}$$

avec : M : masse du mouton,

M' : somme des masses du train de tiges, de la pointe, de l'enclume et de la tige guide

H : hauteur de chute,

e : pénétration moyenne par coup,

A : section droite de la pointe,

g : accélération de la pesanteur.

D'autres approches telles que la prise en compte de la propagation des ondes ou le principe de sollicitations rapides des sols sont présentées dans des travaux de thèse spécialisés sur les pénétromètres (Benz Navarrete 2009).

c) Le PANDA, un pénétromètre dynamique léger.

Pour répondre, à des besoins spécifiques (accessibilité limitée, rapidité d'intervention…), le pénétromètre dynamique léger PANDA fut développé dans l'optique de tester la plupart des sols sur les premiers mètres (Benz Navarrete 2009).

Il s'agit d'un Pénétromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté par ordinateur (PANDA), créé en 1989 par R. Gourvès (Gourvès 1991). L'énergie fournie par l'opérateur permet de traverser des couches de sols ayant des résistances à la pointe inférieures à 50 MPa pour des prospections atteignant une profondeur de 6m, permettant ainsi d'ausculter une grande partie des sols meubles.

Comme la tige est enfoncée à l'aide d'un marteau, le pas de mesure est irrégulier. L'avantage de ce mode de prospection est le contrôle de la vitesse d'avancement du train de tiges. Le contrôle du battage permet une prospection fine des couches à faible résistance à la pointe. Sur le terrain, le pas de mesure moyen observé est de 5mm.

Il est possible d'effectuer les mesures de deux façons. La première est de programmer le matériel pour qu'il enregistre une mesure de résistance à la pointe moyenne pour un enfoncement de la pointe de 5 ou 10cm. La deuxième est d'enregistrer la valeur de résistance à la pointe calculée pour chaque coup de marteau. Cette deuxième méthode est bien plus sensible aux anomalies locales, et permet également de localiser précisément de fines couches de sol (supposant un contraste de comportement mécanique notable). Dans le cadre de cette étude, les sondages sont réalisés en enregistrant le comportement

mécanique des sols à chaque coup de marteau. De l'ensemble de ces mesures on obtient un pénétrogramme, représentant généralement en échelle log la résistance à la pointe en fonction de la profondeur.

Une particularité du PANDA est d'autoriser l'utilisation d'une énergie de battage variable. En cela, il est donc possible d'accélérer la vitesse d'impact pour obtenir la même énergie d'impact qu'un mouton de plusieurs kilos avec un marteau de moins d'un kilo (Ali 2010).

1.2. Reconnaissance géophysique.

La principale distinction entre la géophysique générale et celle dite appliquée à l'ingénierie est que cette dernière est plus couramment concernée par l'étude de la structure, les types de matériaux présents au sein du sous-sol et susceptibles d'avoir des incidences sur le devenir d'un projet, sur le plan du dimensionnement ou des aléas présents (Sheriff 2002).

Dans le cadre de la prospection d'une parcelle sujette à un projet d'aménagement, l'emploi de la géophysique appliquée permet d'étudier les variations des structures peu profondes par l'exploration des eaux souterraines, la localisation de puits ou de cavités souterraines, la cartographie de vestiges archéologiques, la localisation de câbles ou canalisations enterrés. De l'ensemble des prospections associées au domaine de la géophysique appliquée, la profondeur maximale d'investigation est généralement inférieure à 100m (Reynolds 2011), nous ferons ici exception de la sismique pétrolière qui permet d'atteindre des profondeurs de l'ordre du kilomètre.

Selon Reynolds (2011), les méthodes géophysiques sont classées en deux catégories, d'une part les méthodes passives détectant les variations des champs naturels associées à la Terre (champ gravitationnel et magnétique), et d'autre part les méthodes actives pour lesquelles des signaux générés artificiellement sont transmis dans le sol. Ces signaux sont modifiés (fréquence, amplitude,…) en fonction des différents matériaux rencontrés. L'usage des méthodes actives a l'avantage de pouvoir maîtriser les différents paramètres pour la génération et la mesure des signaux.

Le Tableau 1.9 présente les méthodes géophysiques majoritairement utilisées ainsi que leurs principales applications. Dans le cadre des investigations menées pour un projet, Reynolds (2011) met principalement en avant l'usage des méthodes magnétique, électrique, radar et électromagnétique. Soulignons également que la pertinence d'une prospection géophysique peut être fortement dépendante du site à prospecter et des propriétés physiques à analyser, comme par exemple la faible profondeur d'investigation des ondes radar en cas de sols saturés ou de présence d'argile, et des bruits de mesure conséquents en cas de présence de lignes électriques à proximité des mesures électromagnétiques.

Au regard des contraintes associées aux méthodes géophysiques et aux applications principales de ces dernières (domaines de prédilection), notre choix s'est porté sur les méthodes électriques et électromagnétiques pour réaliser l'ensemble des prospections géophysiques dans ces travaux de thèse.

Des partenaires au projet D²SOU ont également participé à la prospection des sites d'études avec des techniques reposant sur les concepts présentés ci-après. Les méthodes de prospection utilisées par les partenaires seront présentées succinctement lors de l'interprétation des mesures.

Méthodes Géophysiques	**Propriétés physiques analysées**	**Domaines d'application**							
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Gravité	Densité	+++	++	++	++	++	-	-	++
Magnétisme	Susceptibilité	+++	+++	+++	-	+	-	+++	+++
Sismique	Module Elastique, Densité	+++	+	++	++	++	-	-	-
Résistivité	Résistivité	+	+++	+++	+++	+++	+++	++	+++
Potentiel Spontané	Différence de potentiel	-	+++	+	+++	+	+	+	-
Polarisation induite	Résistivité, Capacité	+	+++	+	++	+	+	+	++
Electromagnétisme (EM)	Conductivité, Inductance	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
EM-VLF	Conductivité, Inductance	+	+++	+	++	++	++	+	++
Radar	Permittivité Electrique, Conductivité	-	+	+++	+++	+++	++	+++	+++

Tableau 1.9 : Méthodes géophysiques et leurs applications principales (d'après : Reynolds 2011).

avec : +++ *: méthode primaire.*
++ *: méthode secondaire.*
+ *: peut être utilisé, mais n'est pas l'approche la plus pertinente, ou n'a pas encore été développé pour ce domaine d'étude.*
- *: inapproprié.*

(1) : étude géologique régionale (plus de 100 km²).
(2) : exploration des dépôts de minéraux.
(3) : investigation environnementale et technique de sites.
(4) : investigation hydrogéologique.
(5) : détection des cavités souterraines.
(6) : cartographie des panaches de pollution et de lixiviat.
(7) : localisation et dimensionnement des objets métalliques enfouis.
(8) : archéogéophysique.

1.2.1. Définitions.

Depuis une quarantaine d'années, la géophysique a peu à peu acquis une place importante parmi les méthodes utilisées pour l'étude des ouvrages et la recherche des anomalies du sous-sol. La géophysique est la seule approche qui permette d'obtenir de manière non destructive, des informations sur les structures présentes dans le sous-sol, que la prospection visuelle de surface, préalable, ne peut permettre de déceler, comme pour la prospection de l'état d'érosion des digues (Guerrero 2009).

La géophysique s'intéresse à la caractérisation des propriétés physiques des sols (tomographie de résistivité électrique, profil électromagnétique…). Cette caractérisation utilise des techniques de

mesures indirectes (gravimétrie, profil électrique, …). Une mesure indirecte signifie que la quantité mesurée est un indicateur de la propriété recherchée. Par exemple, une fois inversée, la résistivité apparente peut permettre de déterminer, sous certaines hypothèses, la nature lithologique d'une formation. Cette approche nécessitant de calibrer les mesures vis-à-vis d'une banque de sol ''modèles'', ou d'un forage à la tarière. Chaque type de prospection géophysique met à contribution un volume de sol : on parle de volume d'investigation. Ces volumes peuvent aller de plusieurs dm^3 à plusieurs m^3 en fonction de la méthode choisie et de son mode d'utilisation.

La mesure géophysique obtenue est conditionnée par l'ensemble des propriétés présentes dans le volume d'investigation. Ainsi, cette mesure est une moyenne de la propriété physique étudiée au sein de ce volume hétérogène. Par leurs principes de mesure, les prospections géophysiques décrivent la nature des sols sur le plan de leurs propriétés au sein d'un volume d'investigation, permettant de les considérer comme des approches qualitatives de la reconnaissance des sols. Des recommandations de bon sens appuient depuis de nombreuses années l'idée selon laquelle (Martin 1976) les prospections géophysiques doivent être utilisées lorsque l'ensemble des prospections géologiques ont été abordées (cartes géologiques, base de données, observations des sols affleurant,…) et avant de réaliser des prospections géomécaniques tels que des forages ou des sondages (Denis et Martinaud 2003).

Au final, l'analyse des résultats mène à un zonage de l'objet d'étude, c'est-à-dire à la détermination de coupes verticales (Tomographie de Résistivité Electrique (TRE) 2D), de profils (électromagnétique, trainé électrique), de cartographies (TRE 3D, radar) ou d'un sondage (Sondage Electrique Vertical). L'ensemble de ces zonages permet de représenter des champs de propriétés aux variations plus ou moins hétérogènes, susceptible de faire évoluer les caractéristiques propres de l'objet d'étude (érosion interne, tassement,…). L'interprétation de la reconnaissance géophysique doit être corrélée (Fourvel et al 2004) d'une part en amont avec les résultats de la phase d'étude préalable, et d'autre part en aval, avec les résultats des sondages, qui peuvent être implantés plus judicieusement, là où les mesures géophysiques traduisent un changement notable des propriétés physiques des sols.

Pour le déroulement d'une prospection géophysique, nous noterons les quatre étapes principales suivantes :

(1) : Etude de la géologie et identification des éléments à rechercher/caractériser avec les méthodes géophysiques.

(2) : Choix de la méthode la plus apte à répondre à la question et élaboration des hypothèses d'interprétation.

(3) : Mesure et interprétation des résultats.

(4) : Calage/étalonnage avec d'autres informations directes (tarière, forage,…) pour préciser l'interprétation.

1.2.2. La prospection électrique.

a) Historique.

Les travaux consistant à injecter un courant électrique dans le sol pour des fins de prospection géologique ont commencé il y a plus d'un siècle (Peterson 1907, Bergstrom 1913, Schlumberger 1920). Au départ, la méthode consistait à déplacer un couple d'électrodes de mesure (électrodes de potentiel MN) par rapport à un dipôle d'injection fixe (électrode de courant AB) pour localiser qualitativement des anomalies conductrices. En France, Schlumberger démarra son travail pionnier sur la prospection électrique en 1912 (Schlumberger 1920), largement cité comme les premiers balbutiements de la méthode électrique, suivi de près par Wenner aux Etats-Unis (Kunetz 1966).

Les principes du sondage électrique vertical (SEV), consistant à mesurer les variations de résistivité du sous-sol sur une verticale en écartant progressivement le dispositif d'électrodes autour d'un point central, ont été établis dans les années 1920 (Gish et al 1925). La méthode du traîné (ou profilage), enregistrant les variations horizontales de résistivité à l'aide d'un dispositif de taille fixe (donc à profondeur constante) a vu le jour à cette même période. Au début, l'interprétation des courbes verticales de résistivité restait qualitative, puis à partir des années 1930, le développement d'abaques a permis l'interprétation du milieu en séquences de couches de résistivités (Stefanescu et al 1930, Slichter 1933). Dans les années 1970, le développement des outils numériques a conduit à l'apparition de modèles de simulation, d'abord 1D (Ghosh 1971, Johansen 1977), puis 2D ou 3D (Dey et al 1979).

Au début des années 1980, la mise au point de câbles multi-électrodes avec système d'acquisition d'abord manuel (Barker 1981, 1992), puis automatique assisté par ordinateur (Dahlin 1989, 2001), a permis d'augmenter significativement la vitesse d'acquisition et dans le même temps de diminuer le nombre d'opérateurs sur le terrain. Toutefois les mesures restaient encore unidimensionnelles. Ce n'est que dans les années 1990 que les systèmes de câble multi-électrodes ont été mis à profit pour l'acquisition 2D ou 3D à haute résolution spatiale, par combinaison de sondages et traînés (Griffiths et al 1990, Griffiths et al 1993, Dahlin et al 1997). Conjointement, les techniques d'inversion automatique 2D ou 3D (modélisation numérique inverse), basées sur les méthodes des différences fines (FD) ou des éléments finis (FE) pour la résolution du problème direct, ont été développées en réponse au nouveau besoin (Li 1992c, Oldenburg et al 1994, Tsourlos 1995, Zhang et al 1995, Loke et al 1995, 1996a, 1996b) : on parle depuis lors d'imagerie de résistivité électrique ou Tomographie de Résistivité Electrique (TRE).

b) Principe.

Le principe de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité I entre deux électrodes d'injection AB et de mesurer la différence de potentiel ΔV induite dans un autre couple d'électrodes MN. A partir de la valeur du courant injecté I, de la mesure de la différence de potentiel ΔU et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la résistivité électrique apparente du sous-sol à partir de l'Équation 1.6 :

Équation 1.6

$$\rho_{app} = k * \frac{\Delta U}{I}$$

avec : ρ_{app} **:** résistivité apparente k **:** facteur géométrique du dispositif

La résistivité apparente d'un terrain hétérogène correspond à la résistivité d'un terrain homogène qui, pour une configuration identique des électrodes et un même courant injecté, donnerait la même mesure ΔU. Elle est fonction de la résistivité, de la géométrie des diverses couches et de la disposition des électrodes. Bien que toutes les configurations d'électrodes soient possibles, il existe plusieurs dispositifs d'électrodes classiques (Loke et al 1996b, Chapellier 2000, Rentier 2002) utilisés en pratique : Schlumberger, Wenner, pôle-pôle, dipôle-dipôle, etc.

La première étape dans l'interprétation des données en tomographie électrique consiste à construire une pseudo-section. Celle-ci est obtenue en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité et celles de profondeur ne sont pas « correctes » ; car l'image électrique initialement obtenue n'est qu'une représentation sur une pseudo-section de différentes résistivités apparentes. Il convient donc d'inverser ces valeurs pour obtenir la section vraie accompagnée des résistivités vraies. La Figure 1.13 illustre la disposition des électrodes et la construction d'une pseudo-section avec un dispositif dipôle-dipôle.

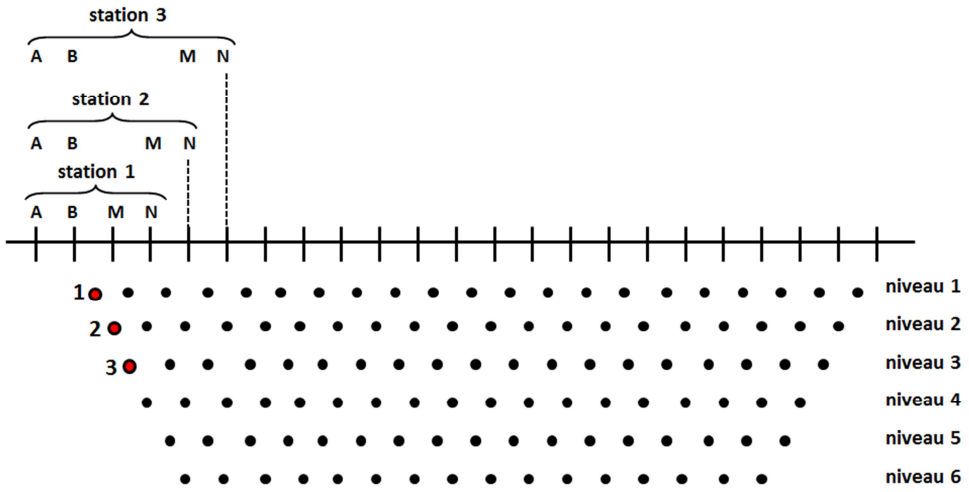


Figure 1.13 : Principe de construction d'une pseudo-section (d'après : Loke et al 2013).

c) Configuration des électrodes.

Pour déterminer la valeur de résistivité apparente du sous-sol on applique un facteur (*k*) dit géométrique (Chapellier 2000, Rentier 2002) à la mesure de potentiel. Ce facteur géométrique prend en compte la géométrie du dispositif d'implantation des électrodes (organisation et distance entre les électrodes). On utilise couramment diverses configurations qui présentent différentes aptitudes en fonction des profondeurs d'investigation et de la variabilité supposée (Tableau 1.10). Dans le cadre de cette thèse, la configuration Dipôle-dipôle est celle retenue selon les critères suivants :

• dispositif de mesure comparable aux mesures du dispositif TREC (Chapitre IV).

• des paramètres techniques externes liés au temps de mesure.

• l'absence d'électrodes à l'infini, difficile à implanter en site urbain.

	Wenner	Wenner – Schlumberger	Dipôle-dipôle	Pôle-pôle	Pôle-dipôle
Sensibilité aux structures horizontales	++++	++	+	++	++
Sensibilité aux structures verticales	+	++	++++	++	+
Profondeur d'investigation	+	++	+++	++++	+++
Couverture horizontale	+	++	+++	++++	+++
Intensité du signal	++++	+++	+	++++	++

Tableau 1.10 : Caractéristiques des différents dispositifs (d'après : Samouëlian et al 2005).

Les caractéristiques sont classifiées de (+) à (++++), équivalents d'une mauvaise à une haute sensibilité pour les différentes configurations considérées.

d) De la résistivité apparente à la résistivité vraie, le problème inverse.

La mesure de résistivité électrique intègre un volume d'investigation auquel on attribue une résistivité apparente. Cette résistivité apparente est en fait une composition des différentes géométries et résistivités dans le volume d'investigation. C'est une valeur résultante de ces facteurs, globalisant l'ensemble des propriétés du sous-sol comprises dans le volume d'investigation. On représente la distribution des mesures (valeurs de la résistivité apparente) sur une pseudo-section, qui est une représentation ordonnée avec des dimensions (positon des mesures en profondeur) arbitraires.

De cette cartographie, on peut déduire un modèle de distribution des résistivités vraies des structures du sous-sol en 2D. L'inversion des données suit un processus itératif qui minimise l'écart entre la pseudo-section mesurée et une pseudo-section recalculée à partir du modèle de résistivité électrique déduit des mesures de résistivité apparente, jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible, selon un processus décrit à la Figure 1.14. Le paramètre rendant compte de la concordance entre la pseudo-section mesurée et calculée est le Root Mean Square Error (RMSE), calculé pour chaque itération du processus d'inversion. Plus le RMSE est faible, plus les pseudo-sections mesurées et calculées sont concordantes, rendant compte d'une inversion de qualité (ici admis pour RMSE < 10%).

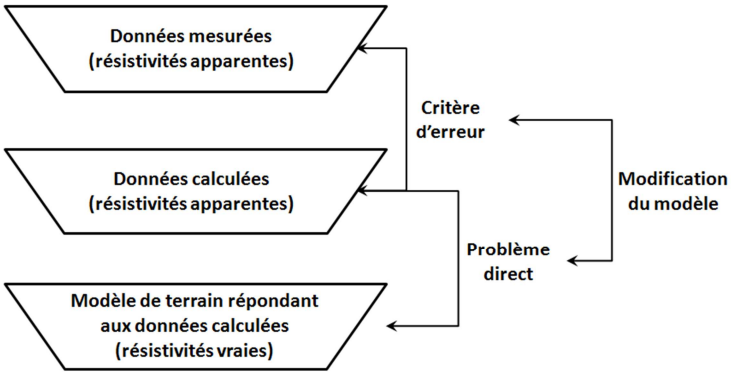


Figure 1.14 : Algorithme d'inversion d'une TRE (Comte 2008).

Les prospections par tomographie électrique ne présentent le sous-sol qu'à un instant t, les variations de teneur en eau ou de température des sols influençant les valeurs de résistivité apparente. On soulignera donc que sur une même section, les mesures de la résistivité apparente peuvent subir des variations même au sein d'une journée. Le suivi dans le temps d'un site devra donc prendre en compte ces variations ; et des corrections devront être appliquées sur les données pour harmoniser le suivi (Peter-Borie et al 2007). Soulignons également que l'injection du courant au niveau des électrodes AB se fait dans l'ensemble du sous-sol à proximité de ces dernières (3D), tandis qu'une pseudo-section limite la représentation de ce phénomène à une coupe 2D.

1.2.3. La prospection électromagnétique.

a) Principe

La prospection par champs électromagnétiques naturels ou artificiels, générés par des courants alternatifs, porte le nom de prospection électromagnétique (EM). Les phénomènes électromagnétiques sont régis par les équations de Maxwell. Il existe un nombre conséquent de matériels de mesures, associé à la possibilité de modifier les fréquences du courant électrique utilisé. Généralement, à chaque appareil de prospection est associée une fréquence électromagnétique. Dans le cadre de cette thèse, le choix s'est porté sur le matériel EM-31 développé par la société Géonics. Dans le cas de l'EM-31, ce sont les basses fréquences qui sont utilisées (9,8 kHz) ; les courants de déplacement du champ électromagnétique sont négligeables devant les courants de conduction (McNeill 1980). Dans ce cas, les courants induits par un champ électromagnétique (primaire) ont tendance à se concentrer au voisinage de la surface : c'est l'effet de peau. La fréquence influe sur la profondeur d'investigation de l'appareil (McNeill 1980).

Les prospections électromagnétiques utilisent en général un transmetteur (bobine ou câble) pour générer le champ électromagnétique (EM) primaire qui se propage dans et au-dessus du sol (air). Lorsque les ondes EM parcourent le sous-sol, elles sont légèrement modifiées vis-à-vis de celles parcourant l'air. Si un corps conducteur est présent dans le sous-sol, la composante magnétique du champ EM primaire induit des courants de Foucault (alternatifs) dans ce corps. Ces courants de

Foucault génèrent à leur tour un champ EM, secondaire, qui est détecté par le récepteur (Figure 1.15a). Le récepteur détecte également le champ primaire qui parcourt l'air, la réponse résultant du récepteur est donc l'effet combiné du champ primaire et secondaire. De ce fait, la réponse mesurée diffère tant par la phase que par l'amplitude vis-à-vis du champ primaire non modulé (Figure 1.15b). Le degré par lequel les composantes diffèrent permet de déduire des informations sur la taille, la géométrie et les propriétés de tout élément conducteur du sous-sol (Reynolds 2011).

Dans le cas des prospections EM, il est usuel de simplifier le sous-sol à un circuit électrique RLC composé d'une résistance R, d'une bobine d'inductance L et d'un condensateur de capacité C. Pour une prospection EM, un champ magnétique primaire Hp est appliqué au sous-sol, conformément aux propriétés d'un signal EM (Telford 1990) ; le champ magnétique est en phase avec la composante électrique orthogonale. On notera donc également que la force électromotrice (f.e.m) du champ EM secondaire est déphasée de $\pi/2$ par rapport à Hp. Le déphasage du courant et de Hs par rapport à Hp est de $\pi/2 + \varphi$. Le retard de la résultante par rapport à Hp est α (Figure 1.15b).

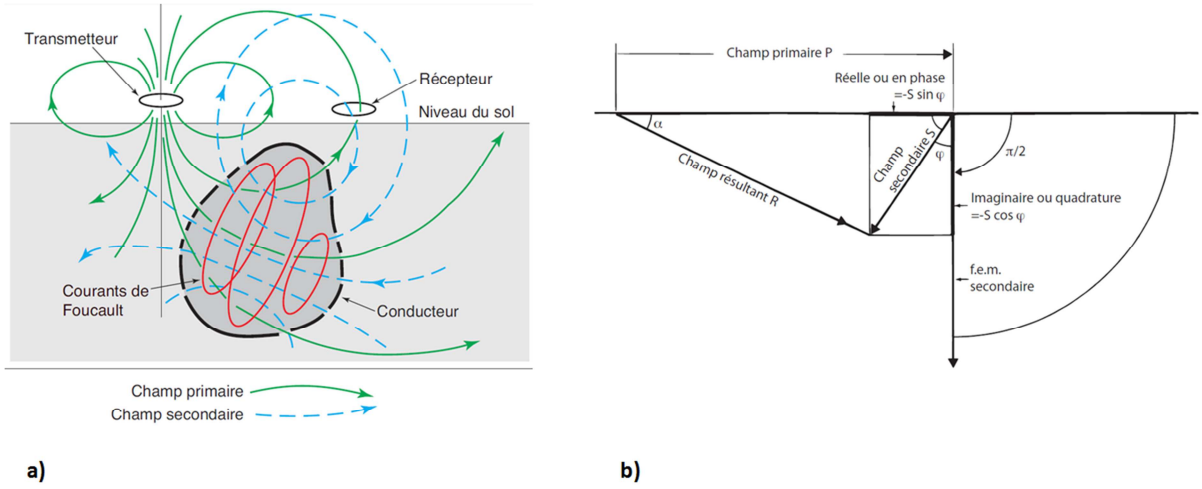


Figure 1.15 : Mesures Electromagnétiques, a) principe des champs primaire et secondaire, b) principe du déphasage du champ secondaire (d'après : Giroux 2005, Chouteau 2006).

La réponse du système (détection du signal secondaire), nommée Φ(z), dépend de l'espacement entre les bobines émettrices (s), de la profondeur de la couche prospectée (z) (Figure 1.16a). On note alors une profondeur normalisée Z=z/s (Wait 1962, McNeill 1980). Dans ces conditions, la distance entre bobines et leur orientation (verticale ou horizontale) par rapport à la surface du sol influent sur la profondeur d'investigation (Borne 1990). Pour une prospection en champ horizontal, les couches superficielles influencent de façon notable les mesures, alors qu'en champ vertical, les couches prépondérantes sont situées à Z=0,4. A noter également que les terrains localisés à une profondeur supérieure à Z=1,5 interviennent encore de façon non négligeable (20%) dans les valeurs de conductivité mesurées (Figure 1.16b). Les mesures obtenues avec cette technique de prospection sont traduites en termes de conductivité apparente (S/m) et plus fréquemment en résistivité apparente (Ω.m) (Fauchard et al 2004).

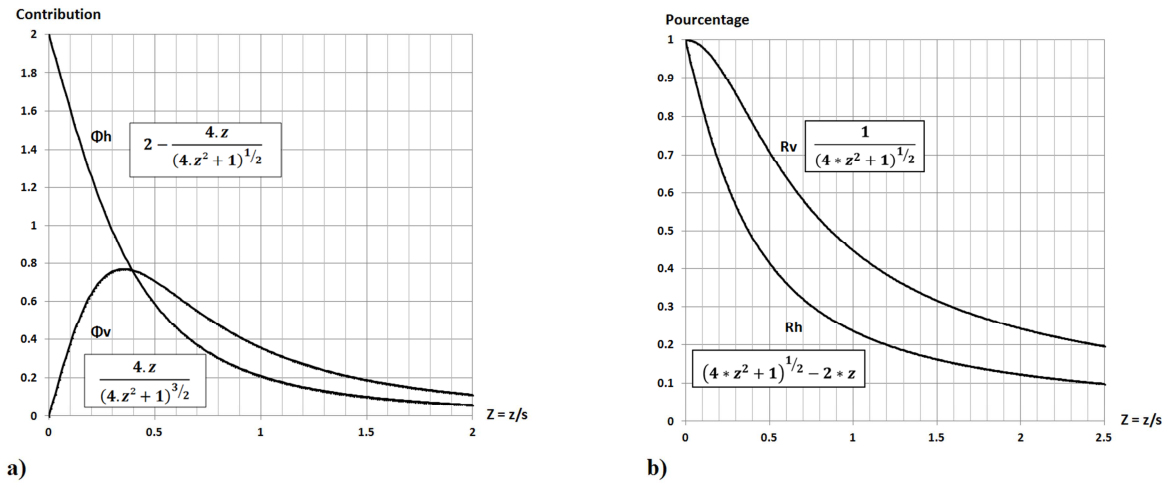


Figure 1.16 : Comparaison des dipôles en orientation Verticale et Horizontale, a) réponse relative d'une couche de sol, b) réponse cumulative d'une couche de sol (d'après : McNeill 1980).

La résolution atteignable par cette méthode dépend du pas de mesure que l'utilisateur souhaite mettre en place et de l'espacement entre la bobine émettrice et réceptrice. Ce pas peut varier du mètre à quelques mètres en mode pédestre, jusqu'à la mesure en pseudo-continu (1 mesure par seconde) dans le cas d'un matériel tracté. Soulignons que comparativement aux méthodes électriques (TRE), les prospections EM sont des méthodes ne nécessitant pas un contact direct entre l'appareil de mesure et le sous-sol. Du fait de sa sensibilité aux champs électromagnétiques, l'utilisation de cette méthode de prospection sur des parcelles présentant déjà un bâti ou des éléments métalliques sera sujette à réserves.

2. La reconnaissance des sols en chantier.

2.1. Organisation de la reconnaissance, une approche réglementée.

Pour répondre à ses obligations dans les règles de l'art, un maître d'ouvrage doit suivre un ensemble de normes qui dictent les types de missions géotechniques qui doivent être menées dans le but de « gérer les risques liés aux aléas géologiques » (NF P94-500, NF P94-110-1,…), en raison de la complexité du contexte géotechnique et de l'impossibilité d'avoir une connaissance absolu du site. Les missions géotechniques sont au nombre de cinq (G1 à G5), la mission G0 n'étant plus considéré comme une investigation géotechnique (c'est-à-dire détachée d'une procédure de projet d'aménagement). Ces missions permettent au géotechnicien d'apporter des réponses au maître d'ouvrage tout au long de la conception de son projet d'aménagement. A noter également que les missions G5 se limitent à l'étude dans le détail d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques dans le cadre d'une mission ponctuelle.

Une étude préliminaire à toute investigation géotechnique doit prendre en compte les risques naturels potentiellement présents sur la parcelle. L'étude de documents d'archives fournis par le BRGM (Infoterre) ainsi que la consultation des Plans de Prévention des Risques et Inondation (PPRI de la commune) fournissent une estimation de ces risques. L'ensemble de ces informations permet alors au

maître d'ouvrage d'estimer les impacts majeurs possibles sur la construction et de ce fait, comment en limiter les effets.

Les campagnes géotechniques suivent plusieurs étapes pour la reconnaissance d'une parcelle. Dans un premier temps, le projet n'est pas défini et le maître d'ouvrage souhaite connaître le type de fondation qui peut être envisagé pour le projet, ainsi que les préconisations retenues pour la mise en œuvre relative à l'agencement de la parcelle. Cette première étape est une investigation géotechnique (ex mission G0) qui permet d'effectuer une reconnaissance géotechnique de la parcelle et éventuellement définir une implantation préférentielle pour l'ouvrage. A ce stade, seuls des conseils et recommandations sont formulés au client vis-à-vis des principes de fondation qui sont mis en œuvre sur le site de l'étude. Un avis peut être formulé au sujet des préconisations d'exécution, fonctions de la configuration de la parcelle et des dispositifs permettant de préserver le projet des risques naturels. Il va de soi que pour apporter ces réponses, un géotechnicien doit faire une recherche non seulement sur les paramètres géotechniques des sols, mais également sur un ensemble de paramètres tels les différents horizons lithologiques rencontrés, les niveaux de la nappe, les risques naturels (inondation, glissement de terrain,…) et anthropiques (réseaux, potentiel archéologique, cavités,…) auxquels la parcelle est sujette.

L'étude géotechnique préalable se fait avec les missions G11 et G12, permettant de caler les hypothèses à prendre en compte au stade de l'avant-projet et définissant certains principes généraux de construction. A ce stade de l'étude préliminaire, le géotechnicien ne fournit pas au maître d'ouvrage les valeurs des propriétés mécaniques des sols, mais seulement les incertitudes et les aléas non résolus (nécessitant une adaptation de l'ouvrage). L'étude géotechnique de projet (mission G2) constitue une étude de projet pour définir les ouvrages géotechniques et les principes de construction dans le but d'approcher les quantités, les délais et les coûts.

La norme NF P 94-500 (2006) développe l'enchainement des missions géotechniques (Tableau 1.11), et présente également une synthèse des missions suivant les principales phases d'un projet, en décrivant les objectifs de la reconnaissance et les obligations des différentes parties mises en jeu. Cette synthèse met également en avant la problématique de maîtrise des risques.

Etape	Phase d'avancement du projet	Missions d'ingénierie géotechnique	Objectifs en termes de gestion des risques liés aux aléas géotechniques	Prestations d'investigations géotechniques*
1	Etude préliminaire Etude d'esquisse	Etude géotechnique préliminaire de site (G11)	Première identification des risques	Fonction des données existantes
	Avant-projet	Etude géotechnique d'avant-projet (G12)	Identification des aléas majeurs et principes généraux pour en limiter les conséquences	Fonction des données existantes et de l'avant-projet
2	Projet Assistance aux Contrats de Travaux (ACT)	Etude géotechnique de projet (G2)	Identification des aléas importants et dispositions pour en réduire les conséquences	Fonction des choix constructifs
3	Exécution	Etude et suivi géotechniques d'exécution (G3)	Indentifications des aléas résiduels et dispositions pour en limiter les conséquences	Fonction des méthodes de construction mises en œuvre
		Supervision géotechnique d'exécution (G4)		Fonction des conditions rencontrées à l'exécution
Cas particuliers	Etude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques	Diagnostic géotechnique (G5)	Analyse des risques liés à ces éléments géotechniques	Fonction de la spécificité des éléments étudiés
*** : A définir par l'ingénierie géotechnique chargée de la mission correspondante.**				

Tableau 1.11 : Schéma d'enchaînement des missions types d'ingénierie géotechnique (NF P 94-500, 2006)

Concernant ces travaux de thèse, nous nous intéresserons principalement à une approche visant à optimiser la reconnaissance du sol et sous-sol dans le cadre des missions G1 à G2. Pour compléter cette approche, des recommandations seront faites sur l'utilisation des prospections géophysiques avant et pendant la phase d'investigation géotechnique.

2.2. Les recommandations.

Etant donné que chaque sous-sol est unique, il n'existe pas de schéma d'implantation d'essais géophysiques et géotechnique parfait permettant une reconnaissance idéale de la variabilité du sous-sol. Il n'existe pas non plus de norme indiquant ou suggérant le nombre et l'emplacement des essais géophysiques et géotechniques à réaliser (Webster 2000, Heuvelink et al 2001, Sivakumar 2004).

La prise de décision du géophysicien et/ou du géotechnicien quant à l'implantation de leurs essais est la plupart du temps intimement liée à leur expérience et leur expertise préalable du sous-sol à prospecter. L'Association pour la qualité de la Géophysique Appliquée (AGAP-Qualité) produit depuis 1992 des guides et des recommandations visant à promouvoir la bonne utilisation de la géophysique. De multiples textes réglementaires décrivent la manière de réaliser les essais géotechniques, ce qui fait défaut dans le domaine de la géophysique.

Pour la reconnaissance géotechnique du sous-sol, le code de bonne pratique mise en place par le Centre de Recherche Routière (C.R.R., Fascicule I&V 1980) ainsi que les travaux de Magnan et al (1980) permettent d'exposer les points principaux d'une reconnaissance géotechnique. Aux dates de rédaction de ces recommandations, on peut souligner que l'analyse géotechnique d'une zone doit présenter quatre niveaux de reconnaissance, illustrant la progressivité des études : enquête préliminaire sur les sites et les sols (recherches bibliographiques), reconnaissance géotechnique sommaire (ex-

mission G0) puis préliminaire (mission G11), étude géotechnique de projet (mission G2). D'après Magnan et al (1980), dès le stade de la reconnaissance sommaire, les essais géotechniques ne devraient plus différer par les moyens mis en œuvre, mais seulement par la densité des points de mesure. Cette approche permet de comparer à différentes étapes de la reconnaissance géotechnique la nature exacte et les propriétés mécaniques des sols investigués.

2.2.1. Recommandations sur la succession des reconnaissances géotechniques.

Le présent paragraphe est une synthèse des principales recommandations au sujet des reconnaissances géotechniques énoncées par Magnan et al (1980) et appuyées par Martin (2010). Ces recommandations font écho aux missions d'ingénierie géotechnique, en intégrant plus les prospections et leur organisation en fonction de la taille des parcelles prospectées et des prospections effectuées.

a) Enquête préliminaire.

C'est une phase primordiale, consistant en la recherche des contraintes géotechniques propres à la parcelle étudiée en basant la réflexion sur l'ensemble de la documentation à disposition :

- cartes topographies
- photographies aériennes
- cartes géologiques
- bibliographie régionale
- cartes pédologiques
- base de données (archives, PLU, PPRI,…)

Vis-à-vis des missions d'ingénierie géotechnique, cette enquête est antérieure aux missions G0-G1. La base de données prend en compte les études géologiques et géotechniques effectuées préalablement dans l'environnement proche de la parcelle à l'étude ainsi qu'au sein des formations géologiques identiques (Martin 2010).

L'ensemble de cette documentation devra être complétée par une visite sur site, permettant de détailler la stratigraphie et la topographie des sols, d'appréhender l'écoulement des eaux et l'agencement prévisionnel de l'occupation des sols (végétation classée, zones humides,…). A l'issue de cette étape de reconnaissance, une carte sera produite, classifiant les contraintes géologiques selon 3 catégories (Magnan et al 1980, Pissart et al 1998, Ek et al 1999) qui sont, par ordre croissant de difficulté, l'absence de difficulté géotechnique, les contraintes géotechniques à incidence économique marquée et les points « durs » nécessitant un aménagement particulier du projet. L'ensemble de ces informations peut être synthétisé sous forme d'une cartographie des différentes zones sensibles.

b) Reconnaissance géotechnique sommaire.

Cette phase permet, par une reconnaissance géotechnique légère (Figure 1.17), de rendre compte des problèmes majeurs qui seront rencontrés sur la parcelle. Cette analyse doit fournir des informations assez pertinentes pour évaluer approximativement la stabilité des sols et les différentes phases de construction. Ces recommandations font un parallèle avec les missions G1. Il est également conseillé

d'identifier chacune des couches de sol mise en évidence par les sondages carottés (et une mesure tous les 4-5m dans le cas de couches épaisses).

Pour le cas d'une parcelle, l'objectif est de mettre en lumière des mailles *a priori* homogènes au sein desquelles un nombre d'essais géotechniques est recommandé (Tableau 1.12, Magnan et al 1980). Pour mieux prendre en compte la géométrie des couches de sol, les méthodes géophysiques sont recommandées.

c) Reconnaissance géotechnique détaillée.

Cette étape de la reconnaissance géotechnique permet de fournir les bases du dimensionnement du projet rattaché à la parcelle. Les moyens mis en œuvre doivent être identiques à ceux de la reconnaissance sommaire, et ne différer que par la densité des sondages.

L'organisation des sondages se fait en gardant le même maillage que la phase précédente (Figure 1.17), et dans le cas où les dimensions de la maille sont trop réduites (côtés du carré inférieurs à 500m), il est conseillé d'adopter une répartition des sondages de façon à ne pas descendre en dessous d'une distance de 50m entre les sondages.

L'objectif de ces différentes étapes est de caractériser la distribution et les propriétés des sols dans toute l'emprise du projet. Dans le cas d'une détection d'anomalie ou de la nécessité d'une reconnaissance détaillée du comportement mécanique des sols, il est recommandé de mettre en place une reconnaissance géotechnique spécifique (Magnan et al 1980).

2.2.3. Bilan des recommandations sur les reconnaissances géotechniques.

Les différentes phases de reconnaissance géotechnique ainsi que le nombre d'essais recommandés sont illustrés par la Figure 1.17 et le Tableau 1.12. La finesse et/ou la pertinence de la reconnaissance des sols sera donc fonction de l'implantation des sondages et des différentes couches de sol prospectées.

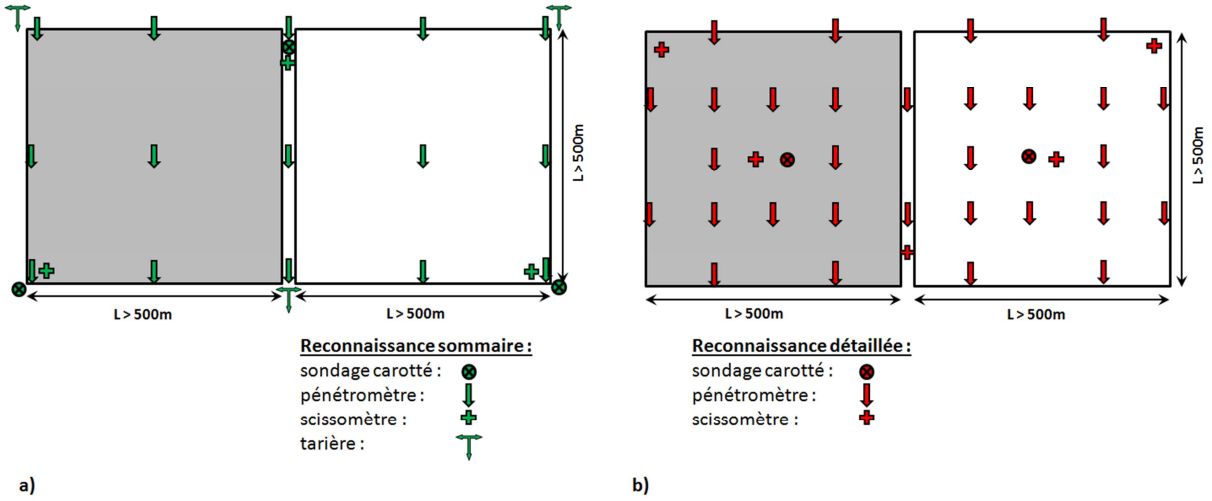


Figure 1.17 : Recommandations sur l'implantation des essais géotechniques (d'après : Magnan et al 1980).

avec : L : dimension (m) de la maille carrée délimitant à zone à l'étude.

Nombre d'essais par hectare		
Reconnaissance sommaire	**Type d'essai géotechnique**	**Reconnaissance détaillée**
0,3	**Sondage pénétrométrique**	0,64
0,06	**Scissomètre**	0,08
0,06	**Tarière**	0,02
0,06	**Sondage carotté**	0,06

Tableau 1.12 : Recommandations sur le nombre d'essais géotechniques à réaliser (d'après : Magnan et al 1980).

Cette approche met également en lumière la très faible utilisation des prospections géophysiques qui permettraient, par l'obtention de champs de propriétés, d'estimer plus précisément la variabilité des propriétés physiques des sols, et à défaut, les différents horizons des couches lithologiques (lorsque les données sont calées par des sondages à la tarière ou les bases de données existantes).

La densité des sondages géotechniques ne peut être organisée indépendamment d'une étude préalable de la variabilité des sols. Au regard des recommandations et des normes en vigueur, il ressort que la reconnaissance de la variabilité des sols peut être optimisée en améliorant l'organisation des sondages (nombre et emplacement), mais également, par l'étude des mesures pour permettre de quantifier (gamme de variation, marge d'erreur,…) cette variabilité des sols. Soulignons également que la susceptibilité des ouvrages aux risques doit rentrer en compte dans la phase décisionnelle (Dubost 2009).

3. Le grand rendement en prospection géophysique.

3.1. Notion de grand rendement.

Le développement technique de ces dernières années sur l'appareillage autorise la conduite de prospections extensives dans un délai relativement court. La vision du sous-sol peut être plus ou moins détaillée suivant les objectifs fixés. Dans le cadre de prospection à grande échelle (recherche de sites Archéologiques), la priorité est de reconnaître les limites des sites repérés et d'estimer la distribution spatiale des propriétés physiques des sols. Ce type de prospection est principalement porté sur des études de grands espaces (plusieurs hectares), avec la représentation de l'ensemble d'une zone par le biais de systèmes d'études tels que la sismique, le radar ou la résistivité. A une autre échelle, la prospection des digues demande à prospecter des ouvrages sur des linéaires conséquents (plusieurs centaines de mètres).

En cela, les mesures à grand rendement peuvent être considérées de deux façons : la première étant d'obtenir autant de point de mesures que les méthodes traditionnelles en un temps réduit ; la seconde d'obtenir plus de points de mesures qu'une méthode traditionnelle durant le même temps imparti.

La prospection à grand rendement ne concerne pas exclusivement le Génie Civil et Géologique, mais s'applique également dans les domaines de la prospection archéologique. Nous pouvons citer Michel Martinaud, qui donna des bases à la prospection à grand rendement (Clomont 2008).

Le développement de telles méthodes vise à exploiter les caractéristiques de certaines techniques (électrodes capacitives en électromagnétique) pour se soustraire à l'obligation d'un contact entre le sol et les électrodes de mesure ou d'injection du signal (Shima et al 1996), permettant ainsi un déplacement plus aisé de l'ensemble du dispositif de mesure.

Dans le cadre de prospections à grand rendement, le temps de prospection peut directement être corrélé à la vitesse de déplacement du dispositif ; en l'occurrence, une forte majorité de techniques de mesures en géophysique grand rendement sont tractées, ou du moins associées à des dispositifs roulants. La nécessité de tracter le matériel de mesure implique un développement des techniques existantes pour les adapter à ce nouveau protocole de mesure. On peut trouver trace de ces travaux précurseurs depuis les années 60 (Hesse et al 1986, Panissod et al 1997, 1998).

3.2. Les différents dispositifs développés.

3.2.1. Dispositifs de cartographie.

Le MUCEP, illustré par la Figure 1.18a, est un dispositif développé par le CNRS dans le cadre des prospections des champs de culture. L'ARP (Automatic Resistivity Propsection), présenté à la Figure 1.18b, exploité par Géocarta, a comme application principale la reconnaissance de zones archéologiques, mais peut également s'appliquer à la prospection de nombreux types de terrains (Panissod et al 1997b). Le principe de ces deux dispositifs repose sur un double système d'électrodes : des électrodes d'injection de courant et un triple jeu d'électrodes de mesure de potentiel (écartées de 0.5 m, 1 et 2 m) qui permet d'accéder aux horizons profonds du sol jusqu'à 1.5 à 2 mètres. L'ensemble des électrodes est relié à un résistivimètre situé dans le véhicule. Soulignons qu'au regard des profondeurs d'investigation, ces dispositifs de mesure ne sont pas adaptables aux domaines de la reconnaissance géotechnique (5-10m), mais principalement pour l'archéologie et l'agriculture.

Figure 1.18 : Dispositifs de mesure à grand rendement, a) dispositif MUCEP (CNRS), b) dispositif ARP-03 (Géocarta).

3.2.2. Dispositif pour une reconnaissance verticale des sols.

Le PACES (Pulled Array Continuous Electrical Sounding system) est un dispositif de tomographie de résistivité électrique tracté, développé à l'Université d'Aarhus, Danemark (Christensen et al 2001), utilisant des électrodes capacitives (ne nécessitant pas d'injecter directement du courant dans le sol via des électrodes). La mesure est obtenue en continu dans l'espace, le long du profil, avec un intervalle faible entre deux points de mesure. L'utilisation de plusieurs quadripôles, présentant chacun une configuration d'électrodes et un espacement interélectrodes fixes, permet d'obtenir des mesures électriques pour différents volumes du milieu investi. La densité de mesures dans un plan vertical est, par contre, relativement restreinte, liée au nombre de quadripôles mis en œuvre, limitant l'inversion théorique des données (Besson 2007).

3.2.3. Dispositif visant à identifier et zoner les sols de surface.

Le Veris 3100 Soil EC Mapping System est un dispositif composé de deux quadripôles en ligne de configuration Wenner, développé par Veris Technologie, Kansas, USA (Lund et al 1999). Les espacements interélectrodes sont fixes et égaux à 0,25 m et 0,75 m respectivement pour les quadripôles permettant les mesures dites « shallow » et « deep », et atteignant des profondeurs d'investigation respectivement de 0,3m et 0,9m. Les électrodes de courant, C1 et C2, sont communes aux deux quadripôles (Besson 2007).

Dans le cadre de la thèse, un des objectifs visé est de développer un dispositif permettant d'effectuer des mesures de TRE en cinématique (TREC). Les premiers développements remontent aux travaux de B. Durot en 2005 sous la responsabilité de M. Frappa, qui furent poursuivis par Y. Bonaldi, F. Naessens et J.F. Lataste (Lataste 2007). La dernière phase de développement du dispositif de mesure TREC fut reprise en 2010 (Guerrero 2010), puis à partir de 2011 dans le cadre de cette thèse. Les caractéristiques principales de l'ensemble des dispositifs de prospection géophysique à grand rendement détaillé précédemment, peuvent être récapitulées au sein du Tableau 1.13.

Dispositif	Nombre de niveaux prospectés	Type d'électrode	Profondeur d'investigation	Organisation des dipôles vis-à-vis du sens de prospection	Configuration du dispositif	Usage principal des données
MUCEP	3	Electrodes plantées	2m	Polygone	Carré AB=0.5m MN=0.5 ;1 ;2m	Cartographie (3 niveaux)
ARP	3	Electrodes plantées	2m	Polygone	Carré AB=0.5m MN=0.5 ;1 ;2m	Cartographie (3 niveaux)
PACES	8	Electrodes capacitives	13-14m	En ligne	Multiple & Wenner AB=30m MN∈10-30m	Sondage électrique vertical et cartographie
Veris 3100	2	Electrodes plantées	10-20cm	Perpendiculaire	Wenner AB=70cm MN=25; 217cm	Cartographie, zonage des sols de surface

Tableau 1.13 : Récapitulatif des différents dispositifs de prospection géophysique à grand rendement.

3.3. Combinaison de méthodes de reconnaissance.

3.3.1. Lignes de recherche.

Les prospections géophysiques sont volumiques et associent un champ de propriétés à un volume d'investigation, alors que les prospections géotechniques sont associées à des analyses ponctuelles du comportement mécanique du sous-sol. L'idée est d'associer les deux types de mesures pour tirer parti de leurs avantages respectifs, à savoir l'investigation volumique et à grand rendement d'une part, l'identification des propriétés géomécaniques utiles à l'ingénieur d'autre part. On vise ainsi à augmenter la quantité des informations disponibles, ce qui permettra de mieux quantifier la variabilité, et leur fiabilité, en repérant plus aisément les zones de moins bonnes propriétés.

Les premiers travaux menés visent à rechercher des corrélations entre paramètres géophysiques et géotechniques dans le but de généraliser les informations ponctuelles du comportement mécanique des sols à l'ensemble de la parcelle prospectée par des essais géophysiques. Les premières études majeures consistent à identifier les limites des volumes mis en jeu dans des glissements de terrain (Friedel et al 2006) en corrélant la résistivité des sols avec la teneur en eau des sols (élément déclenchant pour les glissements de terrain).

Cette approche est également menée avec l'utilisation de la fusion floue (§I.5.1.) de données géophysiques et géotechniques (Grandjean et al 2007, Hibert et al 2012). Le principe de cette approche est d'estimer, au sein du volume de sol mis à contribution par le glissement, la possibilité que différentes hypothèses soient rencontrées. Chaque hypothèse (fracturé, saturé, argileux) étant fonction des gammes des propriétés mécaniques et physiques des sols, on peut estimer pour tout point présentant ces informations la possibilité que le sol présente telle ou telle hypothèse.

L'approche retenue par Cosenza et al (2006) consiste à étudier les corrélations existantes entre le comportement mécanique des sols (q_d au sondage pénétrométrique) et leurs propriétés physiques (ρ via la TRE). D'un point de vue qualitatif, les deux types de prospection mettent en évidence les différents horizons lithologiques composant le site expérimental, mais cette étude souligne également les difficultés inhérentes à la prospection par TRE pour définir précisément les interfaces entre couches lithologiques. Cette étude montre qu'il n'existe pas de corrélation entre les valeurs de résistance à la pointe et les résistivités vraies obtenues par inversion des tomographies (TRE) ou des sondages électriques (SEV) extraits des TRE. De plus, si la couche lithologique de surface (sable et gravier) n'est pas prise en compte dans l'étude de la corrélation des couples (ρ, q_d), il ressort que ces couples peuvent être considérés comme des discriminateurs lithologiques pertinents. Cette étude souligne également que la pertinence des couples (ρ, q_d) est d'autant plus importante si les résistivités vraies considérées proviennent, non pas d'une tomographie (TRE), mais d'un sondage électrique vertical (SEV) extrait de la TRE. L'ensemble de ces résultats est résumé par la Figure 1.19.

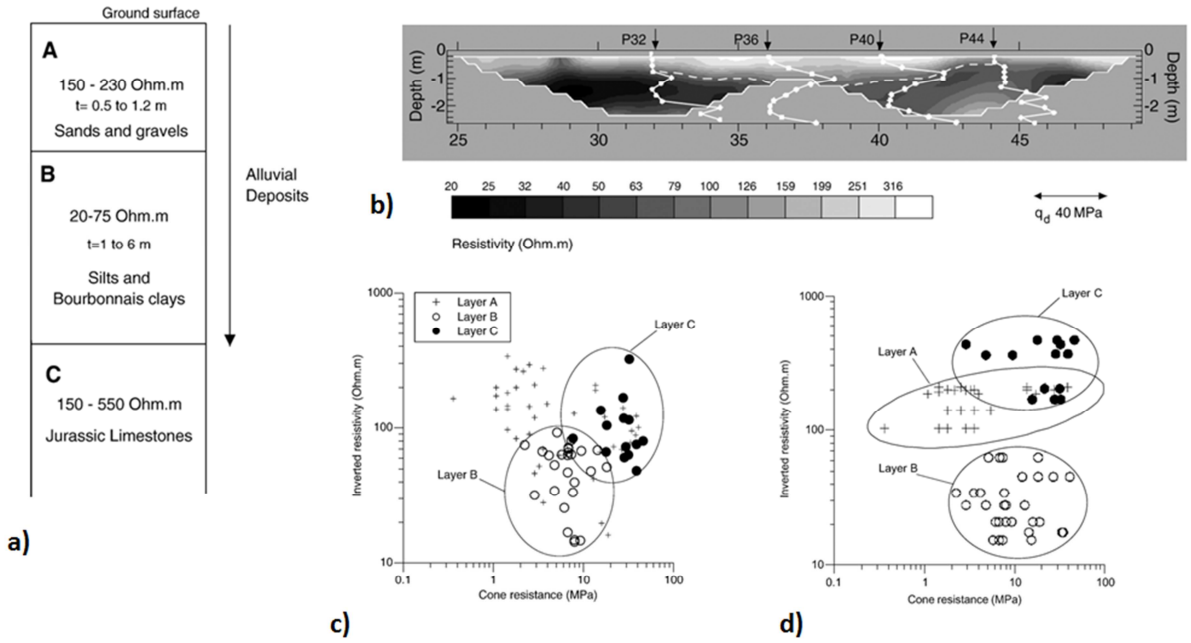


Figure 1.19 : Corrélation géophysique - géotechnique a) modèle géoélectrique obtenu par SEV, b) modèle obtenu par inversion des résistivités électriques, c) couples : résistance à la pointe ; résistivité inversée de TRE, d) couples : résistance à la pointe ; résistivité inversée de SEV (Cosenza et al 2006).

La mise en évidence de corrélations entre paramètres géophysiques (résistivité) et géotechniques (résistance de pointe) ne peut être effective que pour un site donné. Cette corrélation est fonction de nombreux paramètres dont la teneur en eau, la composition des sols (rhéologie), l'historique des sols (contraintes passées), etc… De ce fait, cette mise en évidence de corrélations doit être conduite en parallèle avec une phase de calibration de l'ensemble des données (géophysiques-géotechniques).

Une étude équivalente fut menée pour effectuer un zonage de versant présentant un risque de glissement causé par la présence d'argiles sensibles (Solberg et al 2012). L'approche retenue consiste à zoner le site selon les différentes gammes de résistivité mesurées, permettant de généraliser les informations recueillies des sondages en pénétromètre statique à l'ensemble de la parcelle et de créer ainsi une carte d'aléas.

3.3.2. Synthèse sur la combinaison de méthodes de reconnaissance.

La combinaison de bases de données a pour but principal de réunir en un seul groupe divers éléments distincts. Le fait de combiner plusieurs sources d'informations pour en déduire une nouvelle ou une information plus précise, plus fiable, est rattaché dans la littérature à la fusion de données (Rouchouze 1994, Grandin 2006). La fusion de données y est présentée comme étant la confrontation et l'intégration d'informations multiples dans le but de réduire l'incertitude sur l'information résultante. Dans le but d'illustrer cette approche, les deux cas suivants soulignent d'une part la réduction de l'incertitude quant à la localisation de lentilles d'argiles, et d'autre part à la détermination du comportement mécanique de sols non prospectés mécaniquement.

a) Optimisation de la base de données.

Illustrons cette approche dans le cas de la détection de lentilles argileuses par des essais géotechniques seuls, puis par l'optimisation de la reconnaissance géotechnique. La Figure 1.20 permet de schématiser cette approche. Conformément aux recommandations du §.II.2.2.3, un certain nombre d'essais géotechniques sont implantés sur la parcelle (Figure 1.20a). Les résultats de cette reconnaissance mettent en évidence l'occurrence d'un aléa sur deux sondages, desquels est déduite la répartition de la probabilité d'occurrence de l'aléa sur l'ensemble de la parcelle (Figure 1.20b). A l'image des travaux menés sur l'optimisation des reconnaissances par couplage de base de données (Lundström et al 2009, Solberg et al 2012), on envisage d'effectuer une prospection géophysique préalable (trainé EM ou panneaux TRE) sur l'ensemble de la parcelle (Figure 1.20c). L'analyse de la variation spatiale des champs de propriétés combinées aux propriétés physiques des argiles permet d'optimiser la répartition de la probabilité d'occurrence de l'aléa (Figure 1.20d). Connaissant la répartition des anomalies par les méthodes géophysiques, il est possible d'optimiser non pas l'analyse des sondages géotechniques, mais l'emplacement et le nombre de ces derniers pour ne prospecter que les zones présentant une forte probabilité de l'aléa, telle les approches retenues pour la prospection des digues (Lepetit 2002).

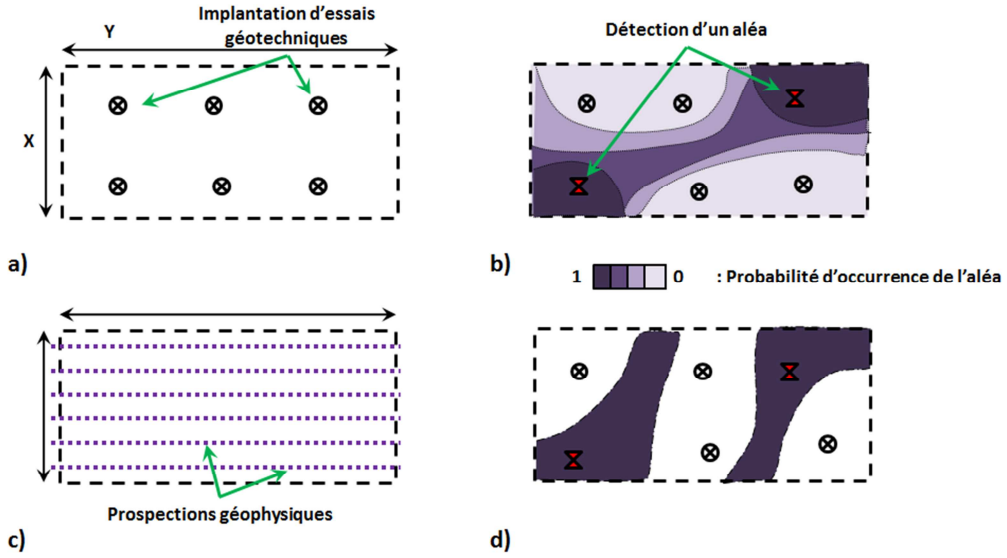


Figure 1.20 : Optimisation d'une reconnaissance des sols.

b) Combinaison de base de données.

Cette approche visant à combiner plusieurs bases de données permet par l'utilisation d'outils de calcul telle que la géostatistique, d'estimer des valeurs de paramètres en tout point du volume de sol considéré (interpolation). Il est ainsi possible d'obtenir une information plus pertinente vis-à-vis de l'analyse d'un type de prospection (Solberg et al 2012, De Benetto et al 2001), permettant par exemple d'éviter de conduire une prospection radar lorsque les sols à prospecter sont saturés en eau. L'information déduite de ces calculs est toujours associée à un indice de confiance des résultats qui est un indicateur de la pertinence des calculs effectués.

La Figure 1.21 schématise l'approche par combinaison de bases de données, composée d'une TRE et d'un ensemble de sondages pénétrométriques. Le zonage du profil géoélectrique en différentes gammes de résistivité permet de faire correspondre à chaque gamme de résistivité une gamme de comportement mécanique (Grandjean et al 2007, Hibert et al 2012). La combinaison de l'ensemble de ces données permet de réunir ces sources d'information pour estimer en tout point du profil géoélectrique le comportement mécanique des sols.

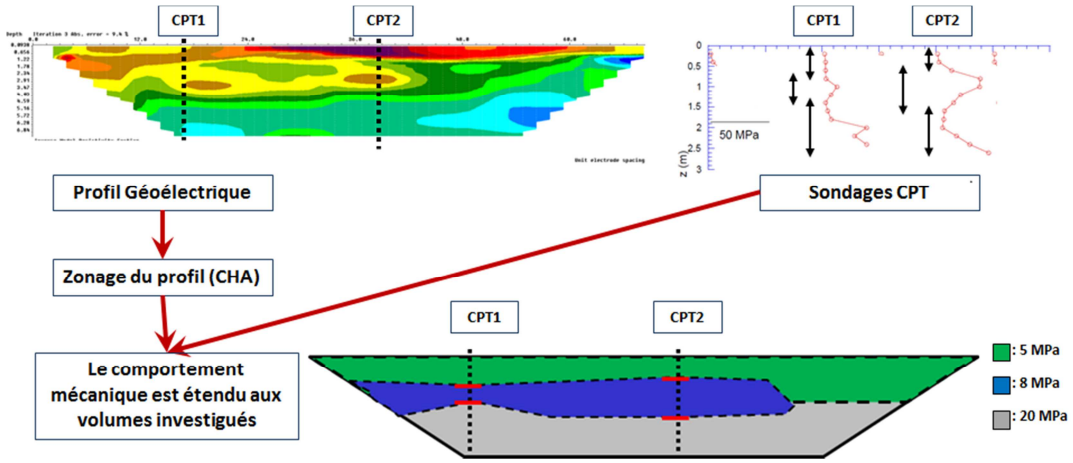


Figure 1.21 : Fusion de bases de données.

4. Bilan de la Partie II.

La reconnaissance de la variabilité du sous-sol et donc des aléas qui lui sont rattachés, est majoritairement effectuée par l'usage d'essais géotechniques. La prépondérance des essais géotechniques vis-à-vis des essais géophysiques est majoritairement due au fait que les résultats des prospections géotechniques sont majoritairement directement intégrables au calcul des ouvrages, tandis qu'aucun lien ne permet de dimensionner une fondation à partir des propriétés physiques des sols. Notons également que les essais géotechniques sont réglementairement prescrits.

Un certain nombre de recommandations sont à la disposition des géotechniciens dans le but de conduire une reconnaissance géotechnique pertinente. Cependant, comme l'illustrent les études de cas, nombre de campagnes de prospection ne donnent pas entière satisfaction et l'occurrence des aléas géotechniques n'est pas réduite en moyenne.

Nous avons souligné que l'implantation d'essais géotechniques peut à la fois ne pas suivre les recommandations d'ouvrages spécialisés et pour autant donner des résultats pertinents lorsque d'autres sources d'informations sont prises en compte. Par là même, la reconnaissance préliminaire de l'impact potentiel des aléas géotechniques au sein de la parcelle est une étape déterminante dans le bon déroulement d'une reconnaissance des sols. Les avancées récentes montrent le fort potentiel des prospections géophysiques comme une source pertinente d'information visant à orienter l'implantation d'essais géotechniques. Elles peuvent également aider le géotechnicien à généraliser l'information des essais géotechniques à l'ensemble de la parcelle.

CHAPITRE II

CAMPAGNE DE MESURE ET ANALYSE DE DONNÉES

Cette partie présente les contextes dans lesquels est abordée l'étude du site expérimental. On présente l'ensemble des prospections effectuées sur le site dans le cadre d'une reconnaissance géologique, géophysique et géotechnique du sol et du sous-sol. Ces prospections sont menées dans l'optique de présenter d'une part, les résultats atteignables avec des campagnes de mesure et une interprétation des données usuelles, et d'autre part les traitements et analyses qui ont été développés par ces travaux de recherche dans le but d'améliorer la reconnaissance des sols dans un contexte de projet urbain.

1. Contextes du site d'étude.

1.1. Contexte géographique.

L'ensemble des campagnes d'investigation est réalisé sur la commune de Pessac (Gironde, 33), située au Sud-ouest de l'agglomération bordelaise (Figure 2.1a). Les investigations sont effectuées sur un site expérimental composé de 3 zones de 1 hectare, proches du centre bourg (Figure 2.1b) dans le quartier de l'Artigon. Le tissu urbain autour des parcelles est assez dense, avec la présence d'une ligne SNCF, d'une ligne haute tension au Nord et d'une ligne de tramway Nord-Sud passant entre les différentes parcelles. Une étude bibliographique (PPR, Infoterre,…) montre un certain nombre d'aléas auxquels peuvent être sujets des projets à différentes étapes de leur avancement (élaboration, construction, exploitation,…). Ces aléas correspondent aux risques de retrait et de gonflement des argiles, représentant plus de 200 sinistres sur la commune depuis 1989 (Vincent et al 2009), à la présence de nappes superficielles avec la présence de zones humides et du ruisseau l'Ars à proximité pouvant impacter sur le déroulement du projet lors de la phase travaux et sur l'intégrité du bâti, ou encore à la présence de vestiges archéologiques (Annexe 2.1).

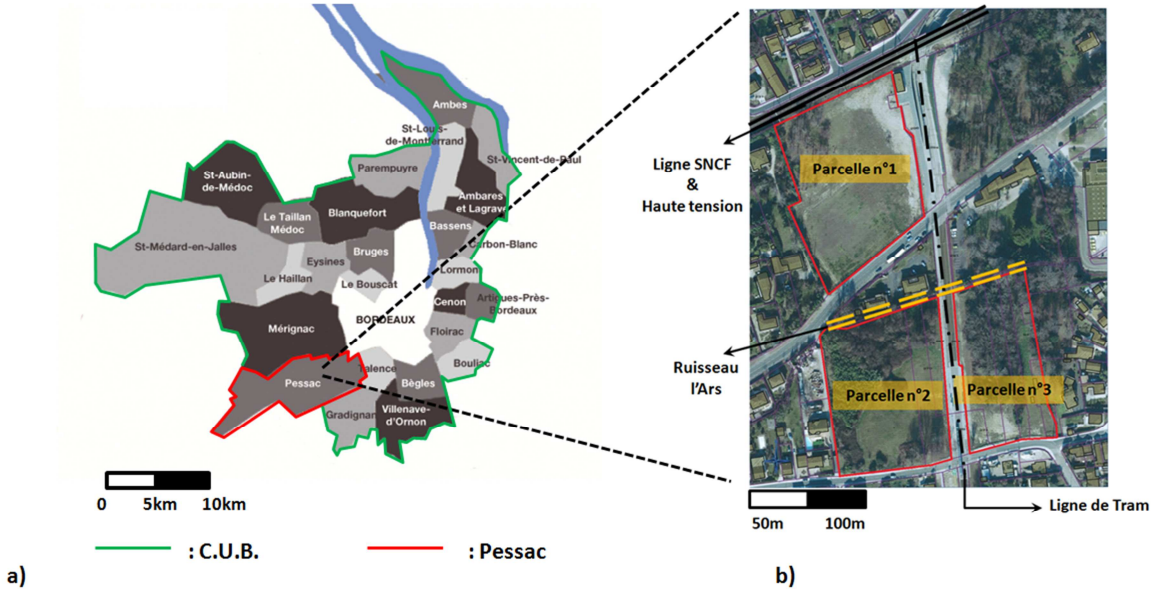


Figure 2.1 : Contexte géographique du site d'étude, a) Communauté Urbaine de Bordeaux, localisation de Pessac (source : artisans-gironde), b) Plan de localisation du quartier de l'Artigon et tissu urbain environnant.

L'altitude des secteurs évolue entre 38m et 33m NGF. La parcelle n°1 présente un devers topographique nord-sud causé par l'incision de l'Ars dans le profil topographique (Figure 2.2b). Ce profil topographique a son point le plus haut au nord de la parcelle n°1. Les parcelles n°2 et n°3 peuvent être considérées comme planes à un niveau NGF de 33m.

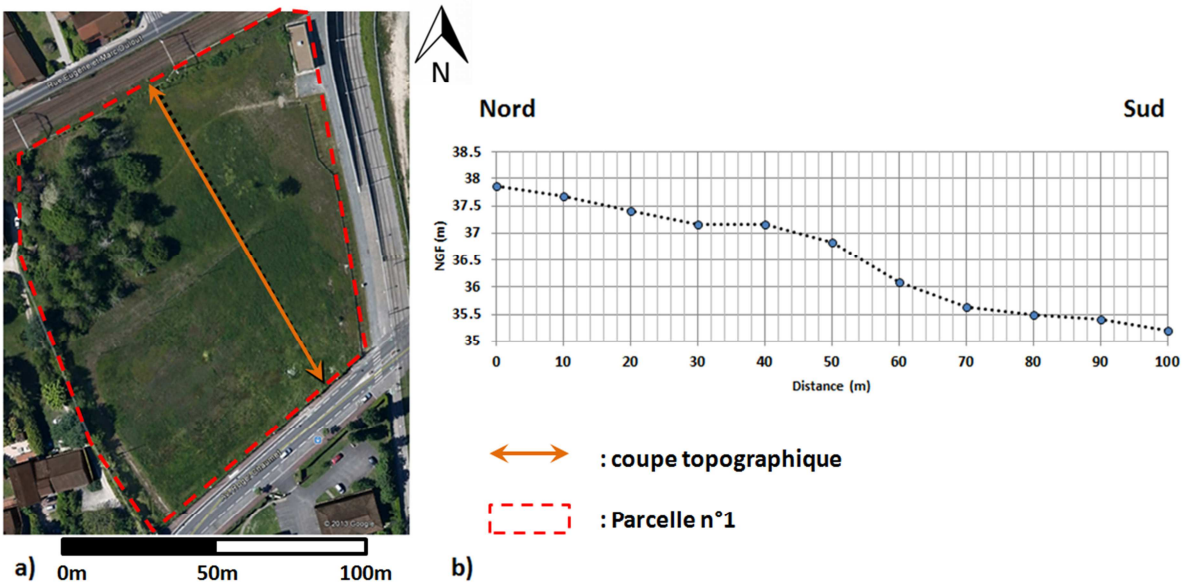


Figure 2.2 : Topographie de la parcelle n°1, a) implantation de la coupe, b) coupe topographique.

1.2. Contexte géologique.

En recoupant les informations des cartes géologiques du BRGM au 1/50.000ième et les données fournies par Infoterre, il ressort que le terrain d'étude est constitué sur la tranche 0-8m par les formations suivantes, de la surface vers la profondeur (Pratviel et al 1978), de :

- **CFD** : Formations colluvionnaires sablo-argileuses d'origine fluviatile et éolienne contenant des graviers colluvionnés épars d'épaisseur supérieure à 1 m.

- **Fxa-b** : Formation du Pléistocène inférieur et moyen constituée de sables plus ou moins grossiers argileux feldspathiques, blanchâtres et grisâtres, et de petits graviers. La phase argileuse est dominée par la kaolinite (8/10) associée à des minéraux micacés (illites). Cette formation a été mise en place par remaniements de dépôts (Fxa, Formation de Dépée) au contact de terrains alluvionnaires de la Garonne (Fxb). De ce fait cet horizon stratigraphique a reçu une dénomination mixte Fx a-b (épaisseur variable).

- **Fxb** : Formation du Pléistocène inférieur à moyen d'origine alluvionnaire issue de la Garonne principalement d'origine détritique (Fxb) constituée de sables et de graviers inclus dans une gangue argileuse jaune à rougeâtre (épaisseur variable).

- Au-delà de 8 mètres de profondeur, on rencontre le toit de la Formation du Miocène Inférieur (Aquitanien), constitué de calcaire quartzeux, et dont la limite avec les formations du Quaternaire est

marquée par la présence de nombreux puits de décalcification de taille métrique comblés par des argiles.

Pour estimer la lithologie pouvant être rencontrée sur le site expérimental, nous avons analysé les données issues d'un ensemble de 8 sondages anciens (base de données Infoterre), répartis le long d'une coupe Nord-Sud sécante aux parcelles (Figure 2.3a). Cette étude montre que les sols pouvant être rencontrés sont (de haut en bas) des remblais, sables et graviers, des sables avec une teneur en argile variable (sols du Quaternaire), puis les calcaires du Miocène. Une coupe géologique schématique reprenant les informations principales issues des comptes rendus des forages numérisés (Infoterre) est présentée en Annexe 2.2. Pour compléter cette approche, des travaux visant à modéliser le sous-sol (Gueki Simo 2012) permettent d'appréhender l'épaisseur des principales formations géologiques, à savoir le Quaternaire et le Miocène. L'estimation des différentes épaisseurs est basée sur une étude par krigeage sous contraintes d'inégalité en fonction des différentes formations répertoriées par les forages. Sur la zone couverte par le site expérimental, il ressort que l'épaisseur du Quaternaire varie entre 6 et 10m (Figure 2.3b). La côte de cette limite géologique évolue donc de ±1m vis-à-vis de la côte décrite dans la Figure 2.3b. Un descriptif plus détaillé de cette limite est fait dans le paragraphe 2.1.1.

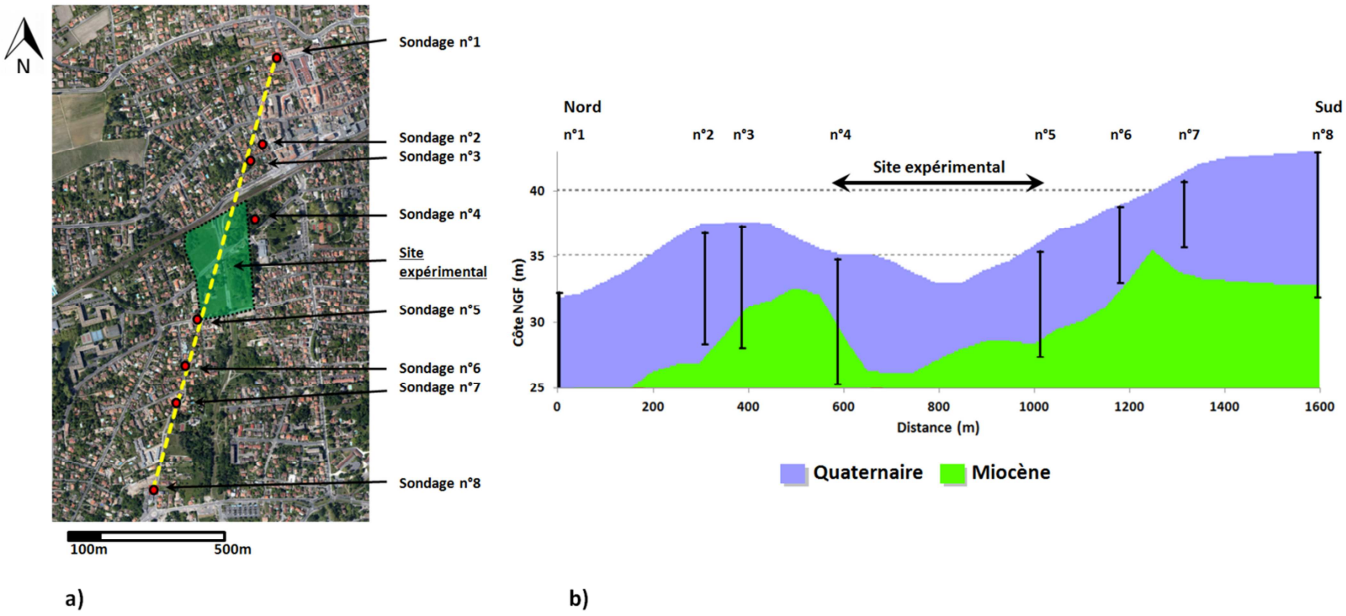


Figure 2.3 : Estimation de la lithologie sur site, a) implantation des sondages, b) coupe géologique (d'après : Guekie Simo 2012).

1.3. Contexte hydrogéologique.

Les 3 parcelles composant le site expérimental sont traversées au centre d'Ouest en Est par l'Ars, un ruisseau partiellement canalisé (Figure 2.1b). Ce dernier est le déversoir de l'ensemble des nappes superficielles présentes sur les parcelles. La nappe superficielle des formations argilo-sableuses aquifères (0-8m) présente un niveau piézométrique souvent proche de la surface en période de hautes

eaux et fluctuant suivant les conditions météorologiques. Des relevés effectués en avril 2011 indiquent un niveau piézométrique à 2 mètres de profondeur (soit 31m NGF).

Concernant les précipitations, la pluie efficace (pluie brute – évapotranspiration) enregistrée à Pessac (travaux de thèse, Fernandes 2013) varie entre -10mm et +40mm, avec une moyenne de -0,45mm (période de sécheresse) du 01/01/11 au 09/07/13. La Figure 2.4 représente la pluviométrie et la pluie efficace observées à 3,5km à l'ouest du site expérimental. La connaissance de l'état hydrique des sols est une information majeure permettant de comparer de façon pertinente l'ensemble des mesures géophysiques et géotechniques réalisées sur site. Dans le but de faciliter la lecture croisée de l'ensemble des informations recueillies lors des prospections, les dates des principales prospections apparaissent également sur la Figure 2.4.

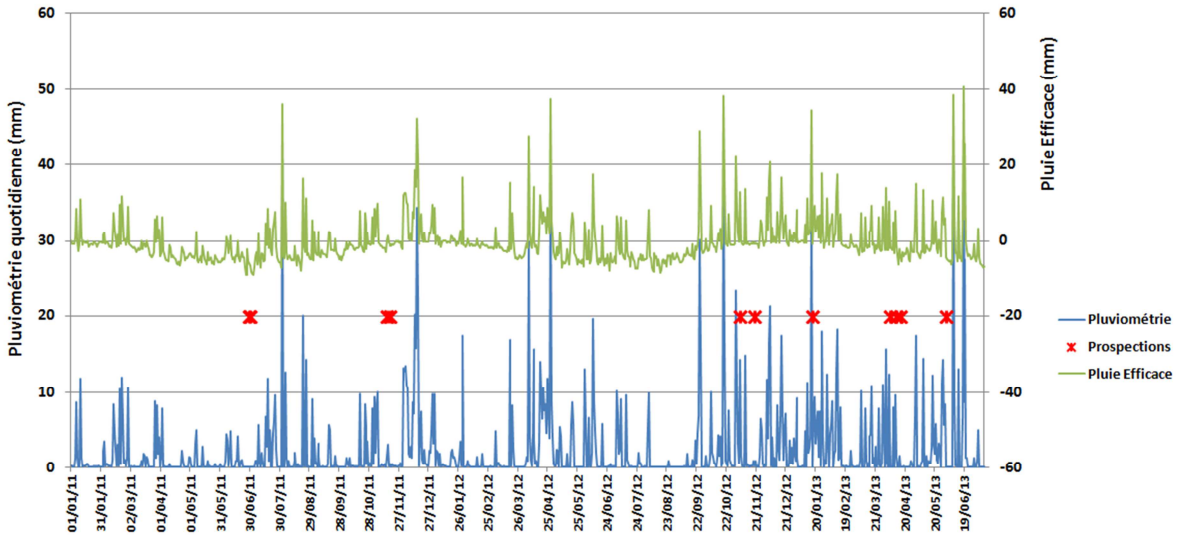


Figure 2.4 : Pluviométrie et évapotranspiration estimées pour le site expérimental.

L'estimation de l'état hydrique des sols lors des campagnes de prospection est faite en étudiant la pluviométrie (Pl) et l'évapotranspiration (ETP) enregistrées durant les 5 et 10 jours avant la date de prospection. L'état hydrique possible des sols est soit humide (Pl – ETP > 0), soit sec (Pl – ETP < 0). Une étude (Chrétien et al 2013) souligne le fait que la pluviométrie n'impacte de façon notable l'état hydrique des sols (variation de la teneur en eau) que sur les deux premiers mètres de sol, ces observations étant faites dans le cas où les sols considérés sont à dominante argileuse avec quelques passées sableuses. Le couvert végétal présent sur la parcelle étant non négligeable, le facteur d'évapotranspiration est à prendre totalement en compte pour l'étude de l'état hydrique des sols sur cette parcelle. Cette étude est récapitulée dans le Tableau 2.1 pour les principales campagnes de mesure réalisées.

Dates	Pluie efficace cumulée (mm)		Etat Hydrique
	10 jours	5 jours	
29-06-11	-53.3	-31.7	**Sec**
30-06-11	-54.12	-32.8	**Sec**
15-11-11	+4.9	-4.9	**Humide / Sec en surface**
18-11-11	-10.8	-3.8	**Sec**
05-11-12	+26.5	+31.4	**Humide / saturé**
20-11-12	+8.1	-3.3	**Humide / Sec en surface**
17-01-13	+55.7	+52.3	**Humide / Saturé**
05-04-13	+20.2	+17	**Humide**
11-04-13	+17.1	-0.5	**Humide / Sec en surface**
16-04-13	-6.4	-5.9	**Sec**
01-06-13	+15.7	+25.5	**Humide**

Tableau 2.1 : Estimation de l'état hydrique des sols lors des principales campagnes de prospection.

1.4. Contexte de l'étude, occupation des sols.

Une étude historique de l'occupation des sols, basée sur l'analyse du cadastre de la parcelle n°1 de 1968 (Annexe 2.3) permet de mettre en évidence la présence de plusieurs bâtiments au centre de la parcelle. Pour l'historique plus récent, la lecture des photos aériennes de la parcelle n°1 (GoogleMap), prises en Mai 2003, Août 2006, Août 2011 et Mai 2012 (Annexe 2.4) permet de suspecter la présence résiduelle de fondations d'anciens bâtiments maintenant détruits, ainsi qu'une zone de terrain remanié liée à la mise en place de la plate-forme de stockage pour le chantier du tramway lors de sa construction en 2006 (déchets de chantiers, déblais, terre végétale…).

Actuellement, l'ensemble des parcelles constituant le site expérimental fait l'objet d'un projet d'aménagement urbain. L'ensemble du projet urbain vise à développer un programme de construction alliant mixité sociale, générationnelle et fonctionnelle sur 3 parcelles (1-2 et 3).

2. Reconnaissance des sols.

2.1. Etude géologique.

L'étude géologique des sols du site expérimental a pu être réalisée avec d'une part l'analyse des sols mis à jour durant une phase d'excavation sur un chantier voisin et, d'autre part l'observation des échantillons obtenus de sondages à la tarière réalisés sur le site expérimental. Les localisations des différentes observations sont regroupées sur la Figure 2.5. Les coupes (1) et (2) sont issues d'observations réalisées au sein d'une excavation des sols jusqu'à 5 mètres de profondeur sur plus de 200 mètres de long. Soulignons que les structures géologiques observées sur les coupes (1) et (2) peuvent être appliquées aux structures de la parcelle n°1 du fait de la proximité des observations. De plus, la coupe (2) est effectuée sub-parallèlement aux tarières 1 à 4 à une distante d'environ 75m, permettant par là même de comparer la succession des logs lithologiques « ponctuels » à la coupe lithologique continue observée avec la coupe (2).

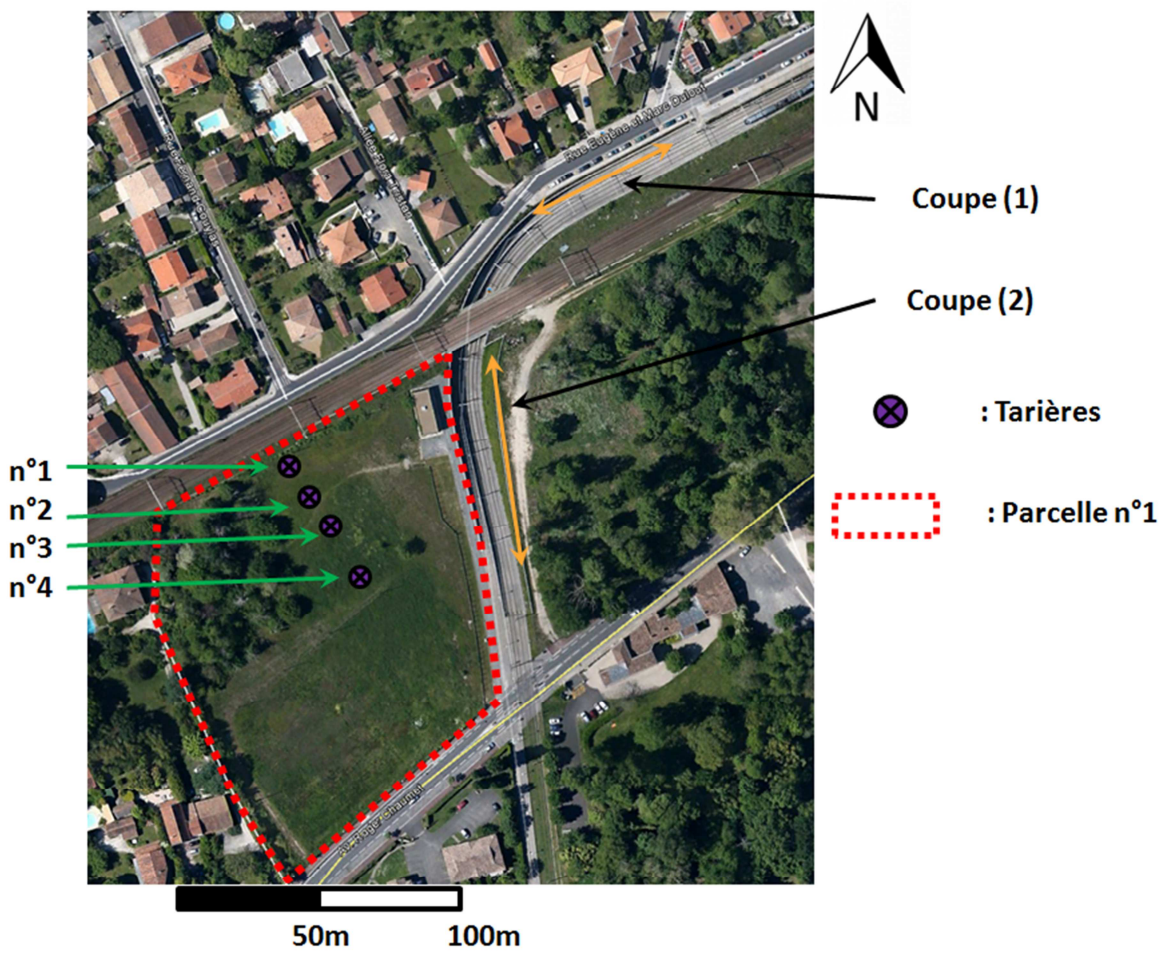


Figure 2.5 : Localisation des études géologiques.

2.1.1. Analyse de fouilles.

L'étude géologique des sols ainsi que les coupes schématiques sont rendues possibles par les travaux d'observation et les suivis de chantier menés sur la commune de Pessac (Fabre et al 2012) lors des travaux d'avancement de la mise en place de la plateforme du Tramway. Les coupes (1) et (2) (Figure 2.6) ont été observées après excavation d'une fouille (passage de la voie de tramway sous la voie ferrée) dont les parois sont sécurisées par des palplanches.

L'analyse des coupes (1) et (2) permet de rendre compte du degré d'hétérogénéité de l'interface entre les lithologies du Quaternaire et du Miocène. La coupe (1) (Figure 2.6) met en évidence la présence non négligeable de puits de décalcification à l'interface entre le Quaternaire et le Miocène. Ces puits de décalcifications sont de taille métrique et circulaire, comblés par des argiles ocre sablo-silteuses. Notons qu'à la date de l'observation (Figure 2.6a), les couches du Quaternaire (argiles sablo-silteuses) avaient été excavées pour la sécurité du chantier, tandis que le calcaire (Miocène) resté en place ne présentait pas de risque (chutes, éboulis,…).

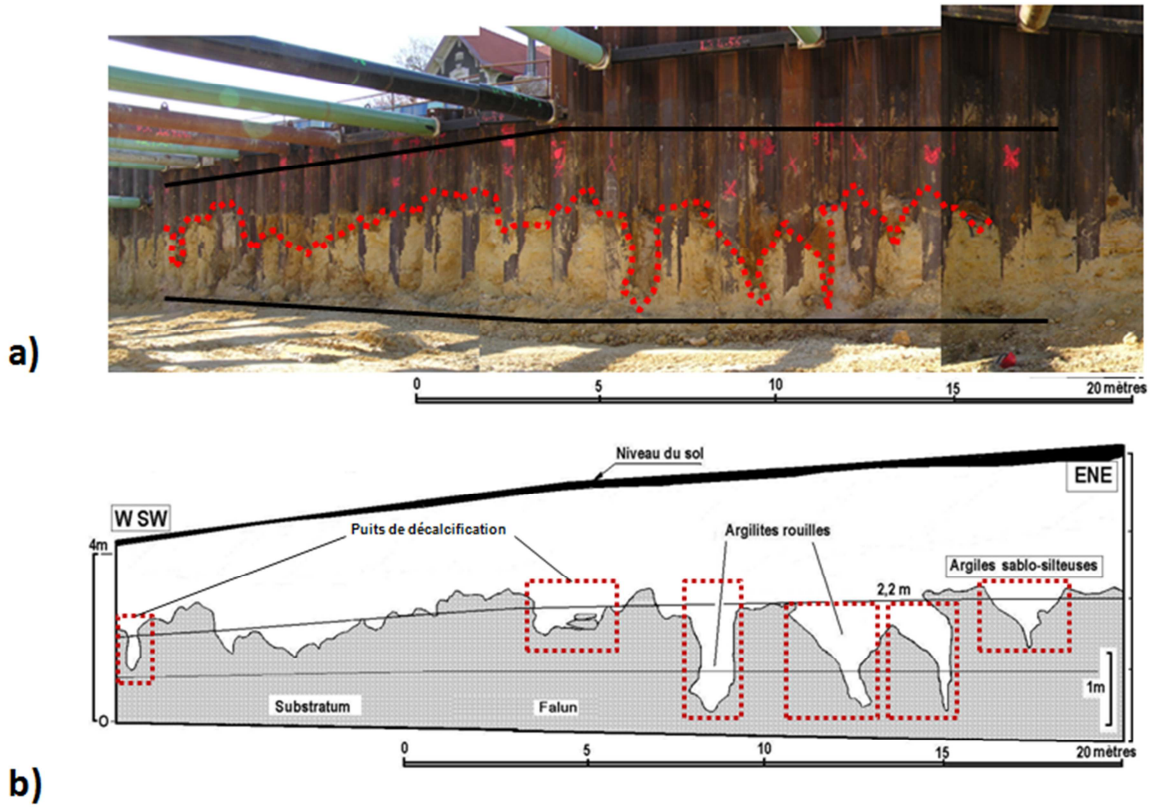


Figure 2.6 : Coupe lithologique (1), a) paroi de l'excavation, b) coupe schématique (données fournies par : R. Fabre).

La coupe (2) (Figure 2.7) met en évidence la variabilité horizontale des lithologies qui peuvent être rencontrées. La Figure 2.7b représente les 2 premiers mètres de déblais avant que les sols sableux instables du Quaternaire ne soient excavés. La formation du Quaternaire est constituée d'une alternance de couches à dominantes sableuses et argileuses. Notons que dans cette formation du Quaternaire est comprise celle de l'Anthropocène (terre végétale et graves remaniées), nous permettant de formuler le log suivant, en prenant en compte (Figure 2.7c) que les épaisseurs des différentes couches ci-après nommées présentent des variations notables :

- Anthropocène : 0 - 0,5m.

- Quaternaire : 0,5 – 2,5m.

- Miocène altéré (puits de décalcification) : 2,5 – 4m.

- Miocène sain : 4m et plus.

Une couche d'argile verte d'une épaisseur d'environ 1m ayant une répartition spatiale discontinue (absence de dépôt à certains endroits) (Figure 2.7c) permet de délimiter la transition entre le Quaternaire et les argiles de décalcification au-dessus de la formation du Miocène.

Notons que dans le cadre d'un projet réel d'aménagement, l'accès à une telle source détaillée d'information est rarement possible. De ce fait, pour mieux rendre compte d'une prospection préalable

à un projet urbain, un ensemble de sondages à la tarière est effectué sur les parcelles du site expérimental.

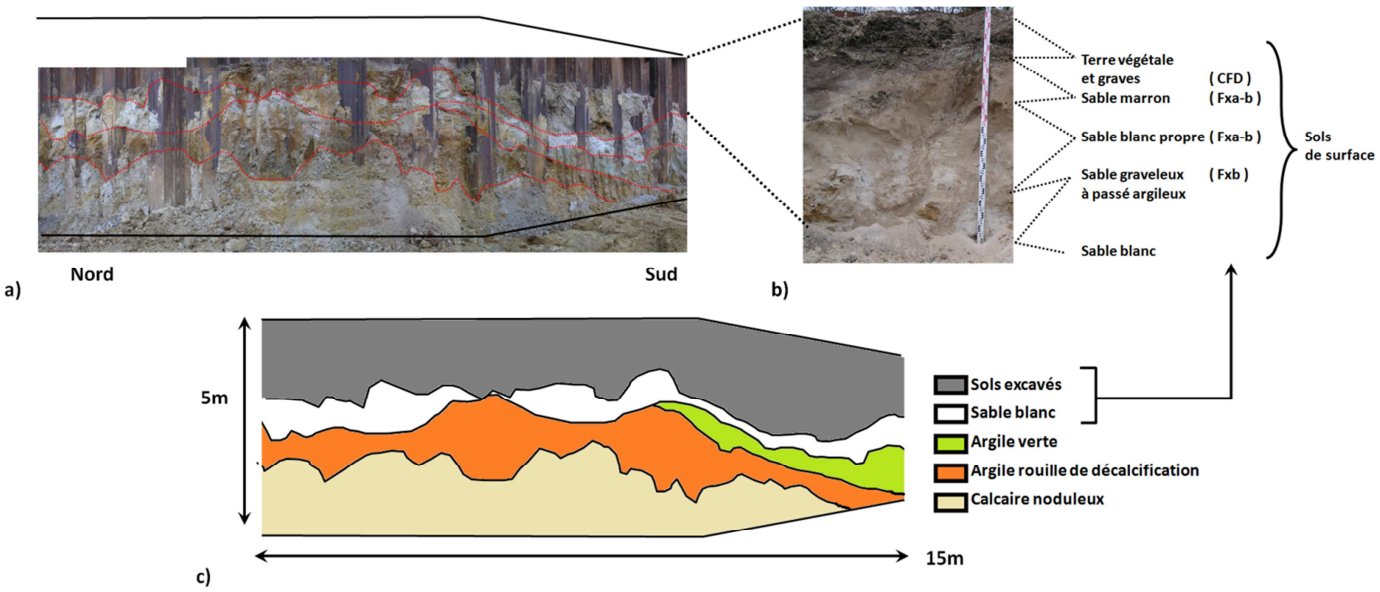


Figure 2.7 : Coupe lithologique (2), a) paroi de l'excavation, b) sols de surface, c) coupe schématique (données fournies par : R. Fabre).

2.1.2. Sondages in-situ.

Des sondages à la tarière, réalisés en avril 2013, permettent d'observer les lithologiques présentes jusqu'à 3 mètres de profondeur. L'alignement des 4 tarières, orientées N156°, couvre une distance de 30m. Une nappe de surface à 1m de profondeur a été rencontrée pour la tarière effectuée au nord de la parcelle, conduisant à un arrêt du sondage ; les autres sondages à la tarière n'ont pas rencontré de nappe.

La Figure 2.8 présente le log lithologique des trois tarières exploitables espacées de 10m, entre 0 et 3,2m de profondeur, avec un descriptif succinct des principales lithologies des sols rencontrées, en s'appuyant sur les échantillons prélevés durant les sondages. Le log estimé montre une couche de surface constituée de terre végétale et de graves remaniées sur les premiers 50 cm. L'hétérogénéité notable des sols et sa variabilité latérale (variation entre les deux tarières) supposent que cette couche correspond à l'Anthropocène. La limite entre cette formation et les couches non remaniées du Quaternaire est marquée par la présence d'une couche d'argile ocre-vert à 1 mètre de profondeur. Cette couche d'argile surplombe une succession de couches de sables blancs avec une teneur en argile variable entre 1,2m et 2,5m de profondeur. Les tarières rendent compte d'une variabilité notable de la profondeur à laquelle cette couche de sable blanc peut être rencontrée, mais également de son épaisseur : 1,3m à la tarière (1) et 0,8m à la tarière (2), espacées de 10m. Les sondages se terminent sur une succession de couches de sable fin ocre et de sable vert à forte teneur en argile.

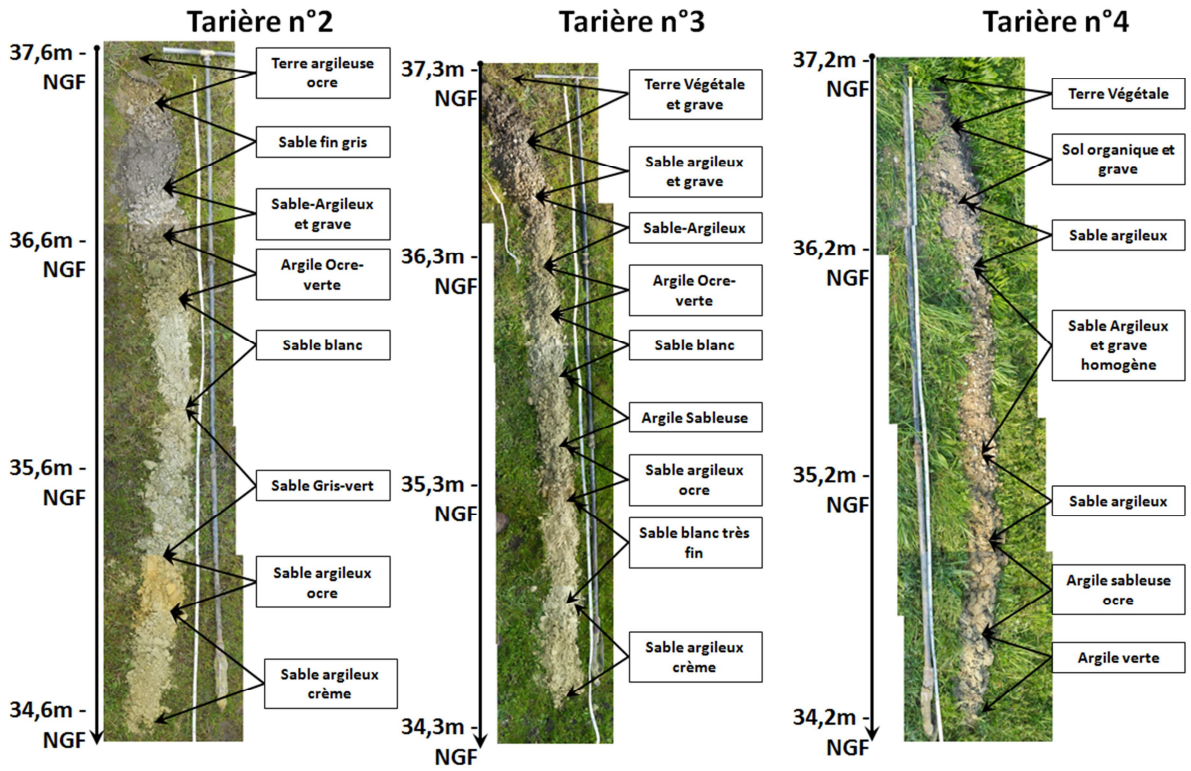


Figure 2.8 : Tarières et coupes lithologiques associées.

Un tableau récapitulant la profondeur et l'épaisseur des différentes couches de sol rencontrées est présenté dans l'Annexe 2.6. Dans le cadre d'un projet d'aménagement, soulignons qu'une étude géologique avec des tarières est pertinente pour rendre compte de l'hétérogénéité verticale (les différentes lithologies rencontrées) ainsi que de la variabilité horizontale avec les variations d'épaisseurs des différentes couches rencontrées. L'analyse des tarières met en évidence l'hétérogénéité d'une part de la nature des sols rencontrés sur 0-3m (argile, sable, grave), et d'autre part de leur variabilité spatiale.

D'après l'étude des documents d'archive, ainsi que la carte géologique et les tarières, on peut émettre l'hypothèse qu'entre 0 et 10m de profondeur, les couches géologiques de la parcelle n°1 ont une stratigraphie horizontale et ne présentent pas de pendage.

2.1.3. Classification des sols.

Suite aux sondages à la tarière, un ensemble de 17 échantillons de sol a pu être analysé dans le but de classer les sols selon les normes NF P 11 300, NF EN 933-9 - P 18-622-9. La classification des sols repose principalement sur une analyse granulométrique et une détermination de la valeur au bleu de méthylène des sols (passant à 5mm). Cette analyse permet à la fois d'étudier les sols selon leur lithologie, et leur utilité en tant que matériel de remblais selon les recommandations de la classification des matériaux GTR 92 (SETRA/LCPC, 2000a, 2000b). La Figure 2.9 représente l'ensemble des résultats de classification des sols pour les 17 échantillons prélevés à différentes profondeurs au sein des tarières. On remarque qu'au sein d'une même couche géologique (par

exemple les sables blancs entre 1,1 et 2,5m de profondeur), la classification des sols n'est pas homogène. Cette hétérogénéité des caractéristiques physiques des sols (granulométrie, teneur en argile,…), au sein d'une même couche lithologique est une information pertinente pour un aménageur car dans le cadre d'un projet d'aménagement, la réutilisation des sols doit prendre en compte la qualité de ces derniers vis-à-vis de leur utilité en tant que matériau de remblai/déblai d'une part et, d'autre part de leur potentiel de traficabilité (indice portant immédiat NF P97-078).

La comparaison entre la coupe lithologique n°2 (Figure 2.7) et la coupe lithologique déduite de la classification GTR des sols (Figure 2.9) souligne la variabilité spatiale des différentes couches lithologiques composant le sous-sol à l'étude. Tout comme sur la coupe (2), les résultats de la classification GTR des sols montrent que la profondeur à laquelle la couche d'argile peut être rencontrée est variable.

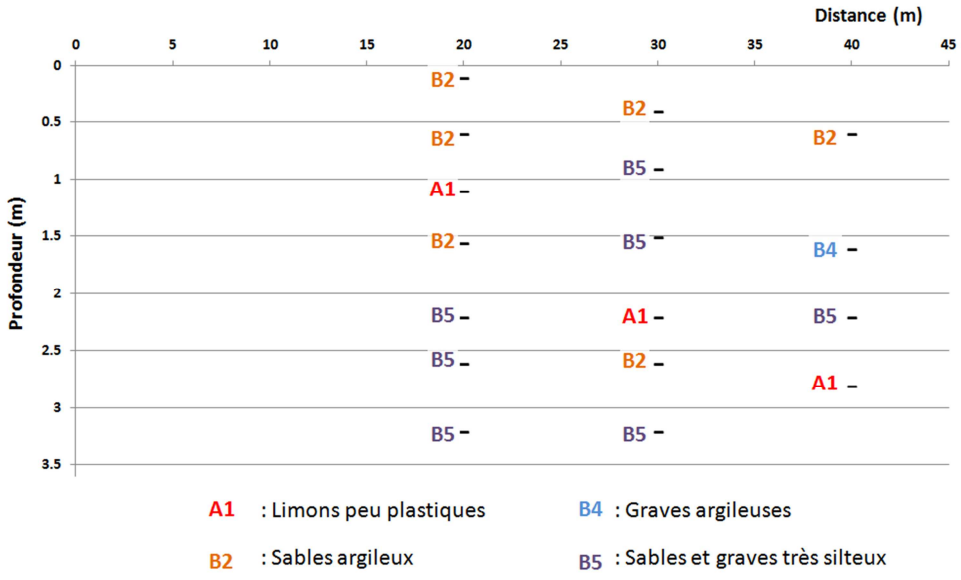


Figure 2.9 : Classification GTR des sols.

L'étude géologique confirme l'hétérogénéité des sols autant sur le plan de la lithologie (épaisseur et variabilité horizontale) que sur celui des propriétés physiques des sols. Un enjeu de la prospection est donc de déterminer un zonage spatial en fonction de paramètres pouvant être considérés comme homogènes au sein d'un volume représentatif. Les paramètres à considérer peuvent être d'ordre qualitatif (argile, sable,…) ou quantitatif (résistance à la pointe, résistivité,…). La détermination de ce maillage des principales structures géoélectriques, lithologiques ou géomécaniques est un des points auxquels pourront répondre les prospections géophysiques et géotechniques.

2.2. Prospections géophysiques.

2.2.1. Prospection par Tomographie de Résistivité Electrique (TRE).

a) Partie Nord : Parcelle n°1.

Sept panneaux de Tomographie de Résistivité Electrique (TRE) ont été réalisés selon les positions reportées sur la Figure 2.10. L'indicateur de la qualité d'inversion est le Root Mean Square Error (RMSE, Chapitre I, §II.1.2.). L'ensemble des TRE mises en place sur les sites expérimentaux sont effectuées avec un dispositif dipôle-dipôle constitué de 48 électrodes. L'espacement interélectrode est de a = 1,5m pour les TRE 01 à 05, et a = 2m pour les TRE 06 et 07. L'organisation et le nombre de niveaux prospectés pour ces TRE sont organisés ainsi :

• TRE 01 à 05 : - 10 niveaux prospectés en (a).

- 10 niveaux prospectés en (2a) avec recoupement des niveaux 9-10 en (a).

• TRE 06 et 07 : - 10 niveaux prospectés en (a).

- 10 niveaux prospectés en (2a) avec recoupement des niveaux 9-10 en (a).

- 10 niveaux prospectés en (3a) avec recoupement des niveaux (7-8) en (2a).

Les paramètres d'inversion de ces tomographies, fixés pour obtenir le RMSE le plus faible, sont présentés dans l'Annexe 2.5.

Pour les profils 5, 6 et 7, le RMSE est supérieur à 10% après 4 itérations. L'analyse des mesures permet d'identifier un niveau de bruit relativement élevé pour ce type d'investigation, ce qui peut expliquer la difficulté à obtenir un modèle de bonne qualité. Etant donné le contexte (proximité du bourg et surtout d'une voie SNCF et de Tramway) et en considérant les tests d'usage lors des mesures sur site, nous faisons l'hypothèse que ces bruits sont liés à des courants vagabonds et à une forte hétérogénéité du milieu à l'étude. En dépits de ces niveaux élevés de bruit, les données interprétées sont cohérentes avec la géologie du site (calage sur les tarières). La localisation de l'ensemble des TRE exploitées au sein de la parcelle n°1 est illustrée par la Figure 2.10a, et la Figure 2.10b permet de visualiser l'ensemble des panneaux TRE inversés avec une présentation 3D.

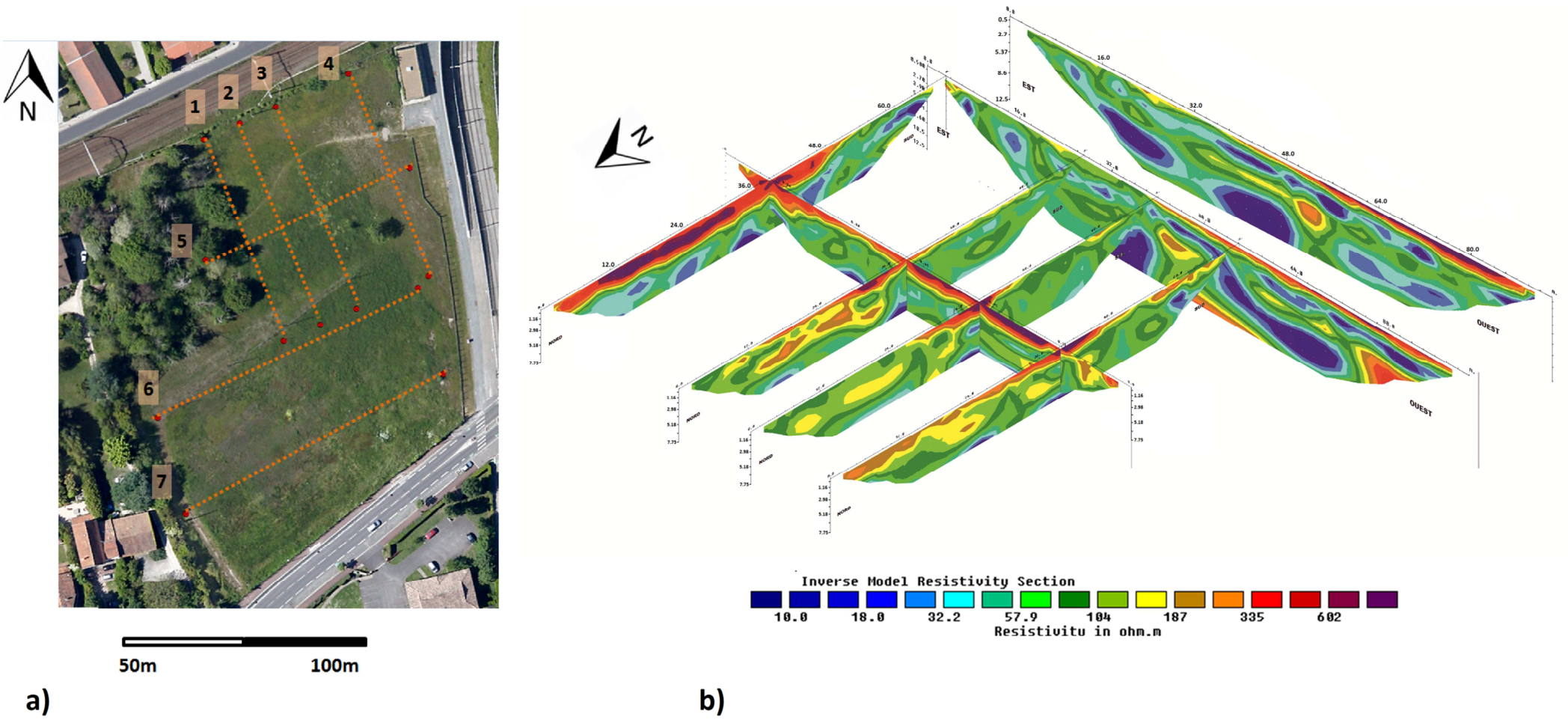


Figure 2.10 : Prospection par TRE de la parcelle n°1, a) répartition des mesures, b) représentation 3D.

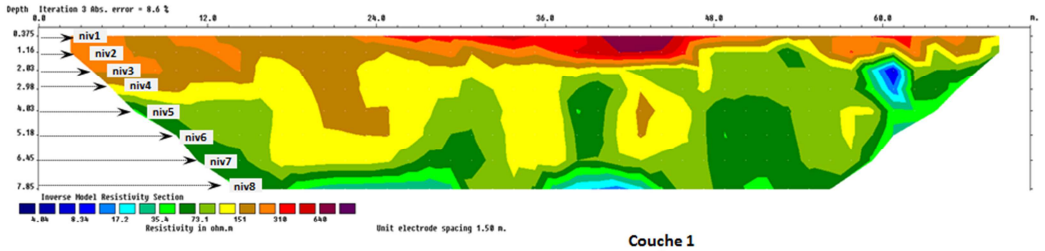
D’après le relevé topographie effectué sur la parcelle n°1 (Figure 2.2), la différence de niveau couverte par les TRE 01 à 04 est de :

- Pour x=0, on a un niveau NGF de 37,8m.

- Pour x=70,5, on a un niveau NGF de 35,6m, soit une différence de 2,2m sur 70,5m.

La pente générale des TRE 01 à 04 est donc de 3,1%, on peut alors faire l’hypothèse que même si les TRE sont effectuées dans cette pente, elles sont représentatives des structures horizontales mises en évidence par les études géologiques du site. Dans le but d’identifier les principales couches géoélectriques composant la parcelle n°1, une étude statistique sur les résistivités vraies des TRE01 à 07 a été effectuée. Avec l’exemple de la TRE01 (Figure 2.11a), à chaque niveau de la TRE sont calculés la moyenne, l’écart-type et le Coefficient de Variation (C.V.) des résistivités vraies (Figure 2.11b). La Figure 2.11c représente la variation en fonction de la profondeur de la moyenne des résistivités vraies ainsi que du C.V. de ces dernières. Le recoupement de ces informations permet de discrétiser le sous-sol en plusieurs couches géoélectriques. D’une part en étudiant les variations majeures des résistivités moyennes, permettant d’identifier les différentes couches homogènes, et d’autre part les zones ayant une variabilité significative. On constate qu’en surface les C.V. sont élevés, indiquant une forte variabilité des sols, tandis qu’en profondeur, les C.V. vont en diminuant, mettant en évidence des structures géoélectriques plus homogènes.

a)



b)

	Profondeur (m)	Moyenne	Ecart-type	C.V.
niveau 1	0,375	370	313	0,84
niveau 2	1,16	255	163	0,64
niveau 3	2,03	135	50	0,37
niveau 4	2,98	96	38	0,39
niveau 5	4,03	105	47	0,44
niveau 6	5,18	115	47	0,4
niveau 7	6,45	73	11	0,15
niveau 8	7,85	47	20	0,42

c)

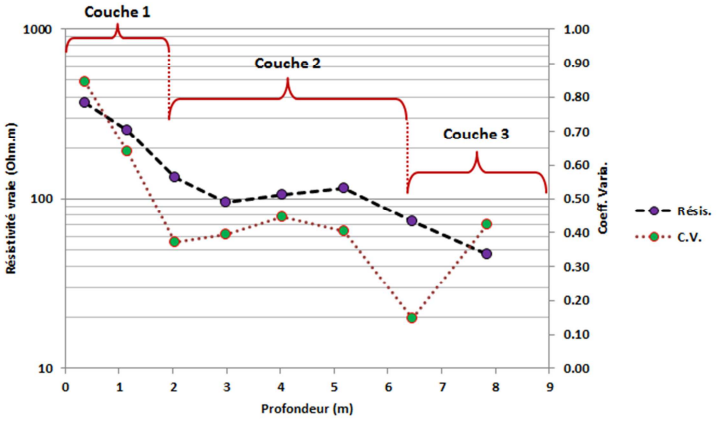


Figure 2.11 : Analyse statistique de TRE01, a) profondeur des niveaux, b) paramètres statistiques, c) définition des couches.

Cette analyse est également effectuée sur l'ensemble des TRE réalisées sur la parcelle n°1 (Annexe 2.7), permettant de discrétiser chaque TRE en 3 couches géoélectriques dont les propriétés sont récapitulées par le Tableau 2.2.

TRE	**01**			**02**			**03**			**04**		**05**		**06**			**07**		
Couches	**C1**	**C2**	**C3**	**C1**	**C2**	**C3**	**C1**	**C2**	**C3**	**C1**	**C2**	**C1**	**C2**	**C1**	**C2**	**C3**	**C1**	**C2**	**C3**
Moyenne	312	113	61	197	103	66	225	107	60	400	52	522	103	584	71	69	2168	129	49
Ecart-type	256	48	20	206	44	31	183	59	28	312	23	295	81	539	37	51	1528	142	40
C.V. (%)	82	42	33	105	42	47	82	55	48	78	43	57	79	92	53	74	70	110	82

Tableau 2.2 : Propriétés des couches géoélectriques de la parcelle n°1.

Au regard de la géologie pouvant être rencontrée sur cette parcelle (Figure 2.8), on peut schématiser la parcelle comme étant composée 1m d'épaisseur de sols de remblais/remaniés, de sables argileux sur 4m d'épaisseur, et des sols à dominante argileuse en deçà de ces formations.

b) Partie Sud : Parcelles n°2 et n°3.

La localisation de l'ensemble des TRE réalisées sur les parcelles n°2 et n°3 est illustrée par la Figure 2.12a et les panneaux obtenus après inversion par la Figure 2.12b.

Quatre TRE sont effectuées sur les parcelles n°2 et n°3. Les positions de ces panneaux sont reportées sur la Figure 2.12. On observe le même phénomène que sur la parcelle n°1 ; les indicateurs de qualité (RMSE) sont tous supérieurs à 10%. Ces valeurs élevées sont sans doute liées à des biais (courants vagabonds par exemple), mais les données interprétées sont cohérentes avec la géologie.

L'ensemble des TRE fait apparaitre une couche, en surface d'épaisseur 1 à 2m, plus résistante (gamme supérieure à 300 Ω.m). Plus en profondeur, les résistivités des terrains évoluent entre 10 et 300 Ω.m. Le substratum calcaire ne semble pas avoir été atteint avec ces tomographies électriques. En profondeur, le sous-sol à l'étude présente des alternances de couches géoélectriques horizontales. Cette alternance se traduit par la présence de couches géoélectriques conductrices (résistivité comprise entre 20 et 60 Ω.m), encadrant une couche géoélectrique plus résistante (résistivité entre 60 et 300 Ω.m), ce qui permet de supposer la présence de couches de sable-argileux (couche résistante) avec des teneurs en argile variables, présentes sous forme de lentilles pouvant atteindre une dimension horizontale de 5 à 6m. A l'image des observations faites dans le §2.1., les couches d'argile (conductrices) présentent une variabilité spatiale notable.

Au regard de la géologie présente sur ces parcelles (Figure 2.8), on peut supposer que les sols rencontrés sont constitués entre 0 à 1m et 0 à 2m de sols de remblais/remaniés. Puis en deçà, d'une alternance de sable-argileux avec une variation marquée de la teneur en argile.

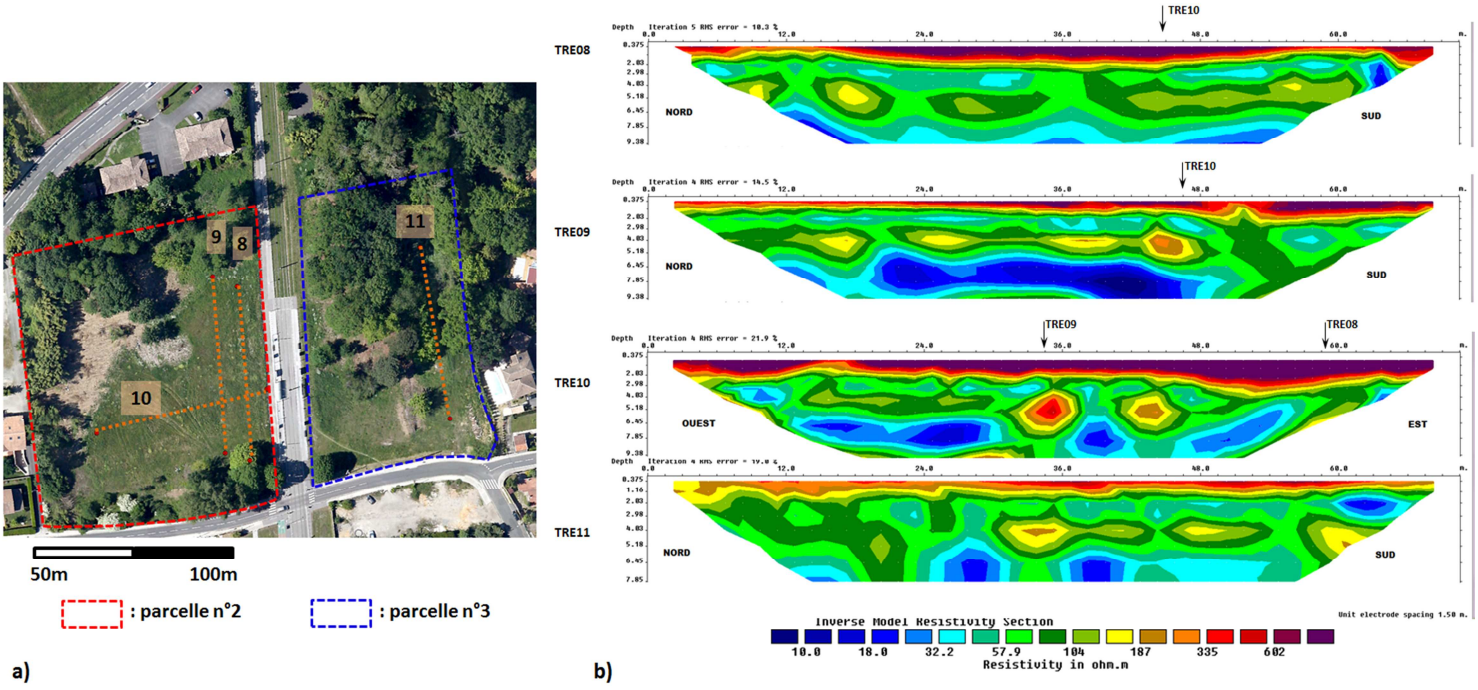


Figure 2.12 : Prospection par TRE des parcelles n°2 et n°3, a) répartition des mesures, b) TRE obtenues après inversion.

Les structures géoélectriques des parcelles n°2 et n°3 sont décrites par une couche de surface d'une résistivité moyenne de 600Ω.m et de 1 à 2m d'épaisseur. Les couches géoélectriques en deçà présentent une résistivité moyenne de 80Ω.m avec la présence de nodules sphériques de 2 à 3m de diamètre, d'une résistivité de 400Ω.m en moyenne. Ces TRE mettent également en évidence des sols avec une résistivité inférieure à 20.m en deçà de 6m de profondeur.

Durant les travaux de thèse, les premiers travaux d'excavation effectués sur la parcelle n°3 ont permis d'observer un ensemble de coupes géologiques. A noter que pour des raisons de sécurité du chantier et des fronts de fouille, la nappe de surface a été rabattue d'une dizaine de mètre lorsque les observations in-situ ont été effectuées. La Figure 2.13a montre les sols de surface débarrassés de la terre végétale et des remblais sur les deux premiers mètres environ, on y remarque la coupe des nodules de taille métrique constitués de calcaire non saturés. L'excavation des sols au centre de la parcelle (Figure 2.13b) permet d'observer une coupe des différents sols en place, et particulièrement :

• la couche de sols résistants en surface (1 à 2m d'épaisseur) est associée à de la terre végétale et des remblais.

• la couche d'une résistivité moyenne de 80Ω.m (d'une épaisseur de 4 à 5m) est associée à du calcaire friable.

• les sols en deçà de 6m de profondeur correspondent à une couche d'argile surplombant des calcaires gréseux du Miocène (observés ultérieurement).

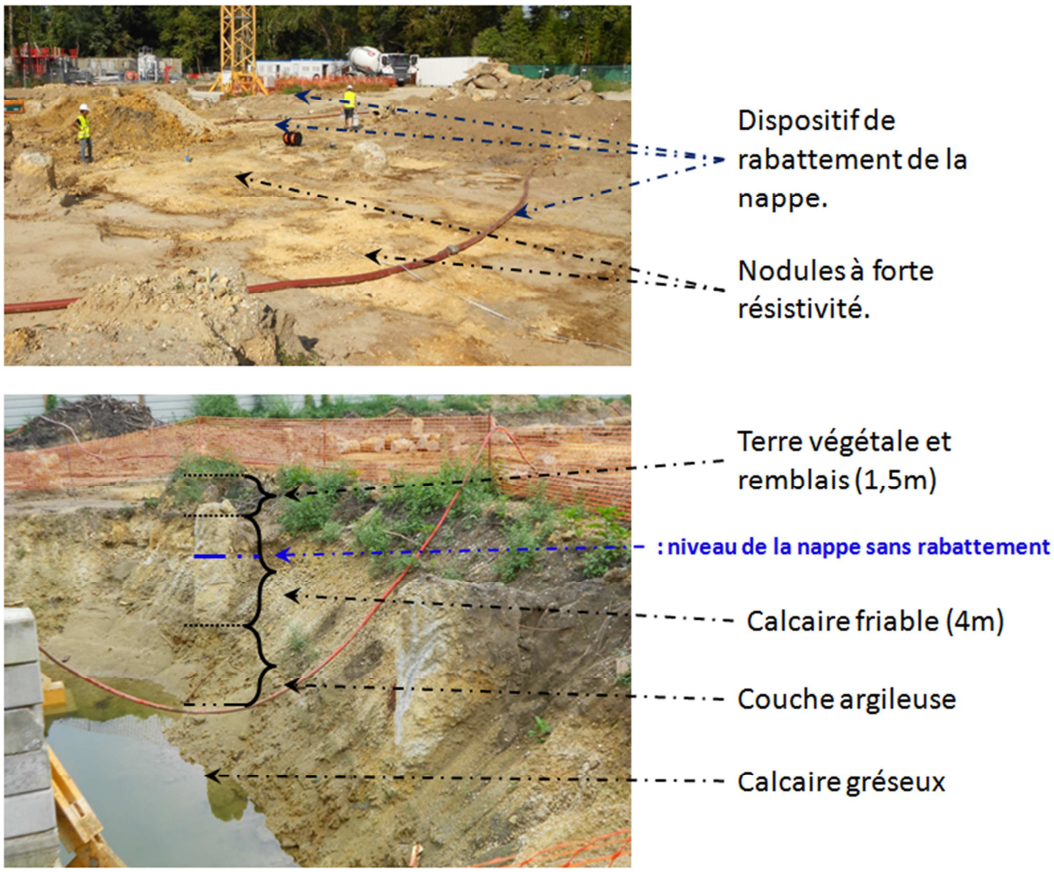


Figure 2.13 : Excavations sur chantier au droit de TRE11, a) observation des sols de surface débarrassés de 2m de terre végétale et de remblais, b) fosse d'observation de la lithologie.

2.2.2. Slingram : EM-31.

a) Partie Nord : Parcelle n°1.

Une campagne de mesures électromagnétiques a permis de mesurer les variations spatiales des résistivités électriques des sols au sein de la parcelle n°1. Les mesures sont réparties sur toute la parcelle avec un maillage de 5x5 m² (Figure 2.14). Celles effectuées avec un champ électromagnétique orienté verticalement permettent d'estimer les propriétés physiques des sols sur une profondeur d'investigation de 6m sous l'appareil, et avec un champ horizontal sur une profondeur de 3m sous l'appareil. L'appareil de mesure étant positionné 1m au-dessus du sol, les profondeurs d'investigation dans le sol sont donc respectivement de 5 et 2m (McNeill 1980)

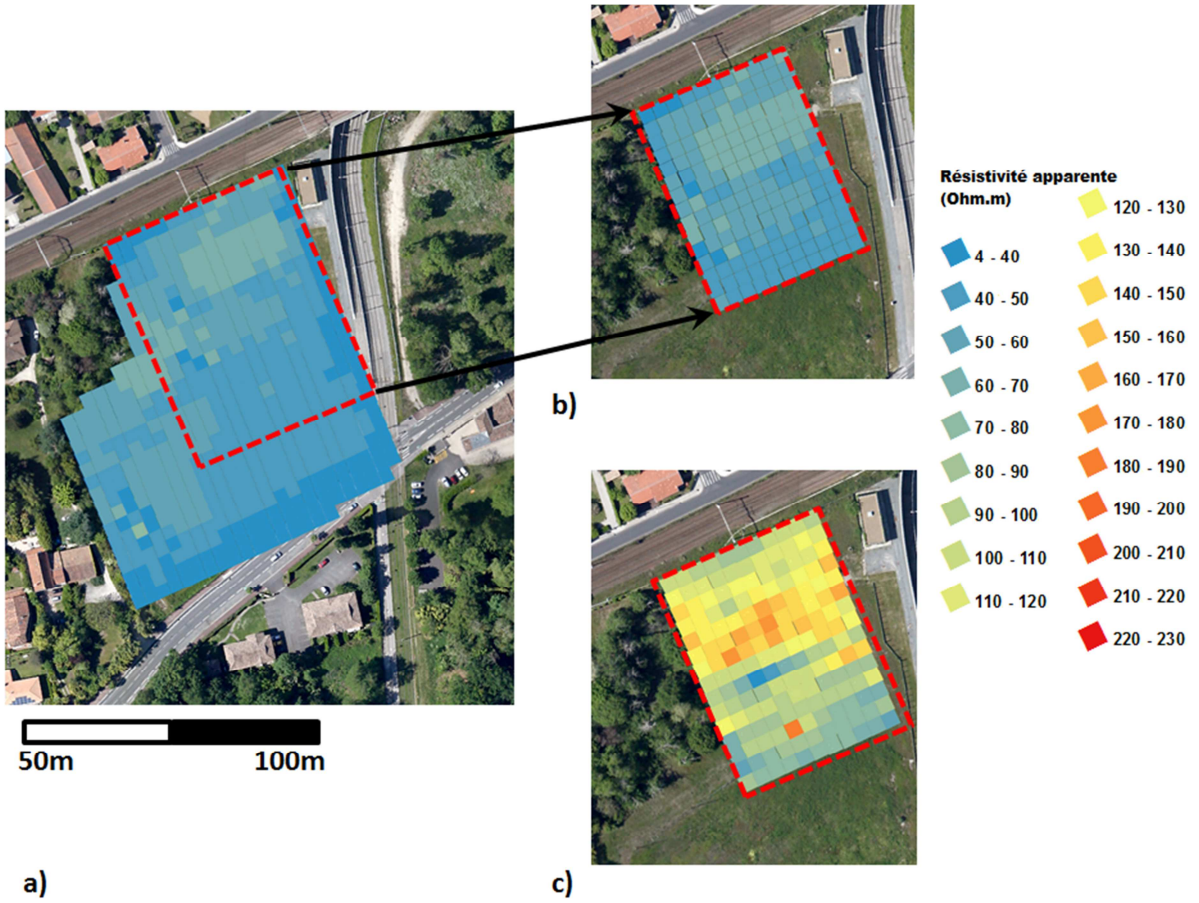


Figure 2.14 : Cartographie de la prospection électromagnétique EM-31 (résistivité apparente), a) cartographie générale, b) champ vertical (0-6m), c) champ horizontal (0-3m).

L'investigation en champ vertical (Figure 2.14b), ne permet pas de mettre en évidence de transition notable entre deux formations, mais elle présente des résistivités apparentes variant dans une gamme de 40 à 60 Ω.m. La carte de résistivité apparente (Figure 2.14c), issue des mesures EM-31 effectuées en champ horizontal (profondeur d'investigation : 2m dans le sol), révèle une structure résistante localisée dans la partie nord de la parcelle n°1. D'après l'historique du site, cette zone pourrait être causée par une empreinte du chantier de la plateforme tramway, construite en 2008. La présence, visible en surface, de matériaux issus du chantier (grave, infiltration ciment) appuie cette hypothèse.

La partie sud présente une répartition plus homogène des résistivités. Les plans d'occupations des sols montrent l'existence passée d'un terrain de football à cet emplacement, ce qui explique le remaniement des sols, et son homogénéisation apparente en surface.

L'investigation en champ vertical (Figure 2.14b) met en évidence des sols dont les résistivités apparentes sont homogènes (gamme de variation : 40 à 60 Ω.m). En comparant les mesures faites en champ horizontal et vertical, on peut souligner l'existence d'un contraste notable entre les résistivités apparentes dans la partie nord de la parcelle. Des mesures complémentaires effectuées dans la partie sud indique que ce contraste s'atténue, à l'image des faibles contrastes observés au sud des mesures présentées en Figure 2.14b et c. Cette observation semble indiquer que la couche de sol prospectée

dans la partie nord n'est plus présente dans la partie sud de la parcelle. En combinant ces informations avec le profil topographique ainsi que les observations faites avec les sondages à la tarière (T2 à T4), on peut supposer la coupe géologique illustrée par la Figure 2.15.

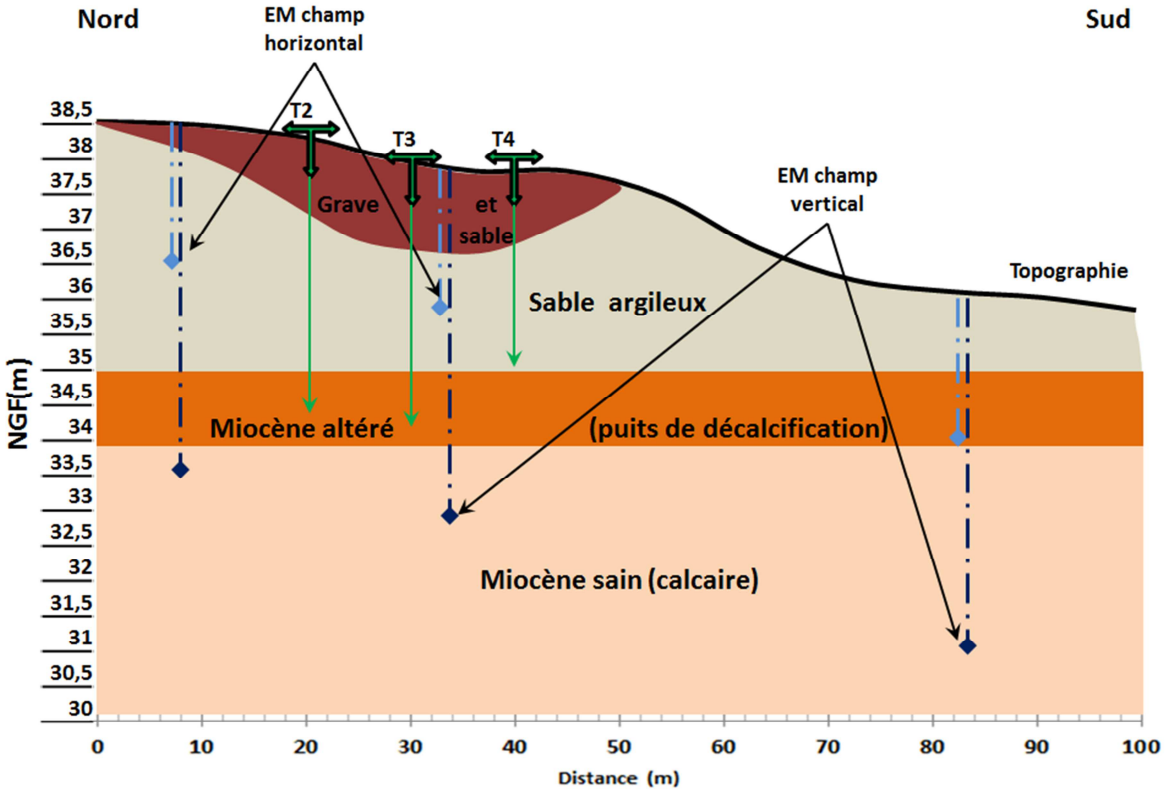


Figure 2.15 : Coupe géologique théorique de la parcelle n°1.

b) Partie Sud : Parcelles n°2 et n°3.

L'ensemble des mesures EM-31 effectuées sur les parcelles n°2 et n°3 ont été faites entre le 29 et le 30 Juin 2011. La parcelle n°2 a été prospectée selon un cheminement avec l'appareil de mesure électromagnétique EM-31 couplé à une antenne GPS ayant une précision latérale de 50cm (Figure 2.16). La reconnaissance de cette parcelle a été effectuée uniquement avec un champ électromagnétique vertical, donc sur une profondeur d'investigation de 5m dans le sol. La combinaison de l'appareil de mesure avec un antenne GPS a permis d'effectuer les mesures en continu avec une cadence d'échantillonnage de 1 mesure par seconde.

Les données recueillies traduisent un sol relativement homogène (résistivité apparente de 40 à 90Ω.m). Dans la partie centrale les résistivités apparentes atteignent 90 Ω.m. On observe que pour les points les plus à l'Est les valeurs sont biaisées du fait de la proximité de la clôture métallique (résistivités estimées inférieures à 20 Ω.m), elles ne seront pas considérées dans la suite de l'analyse (Figure 2.16).

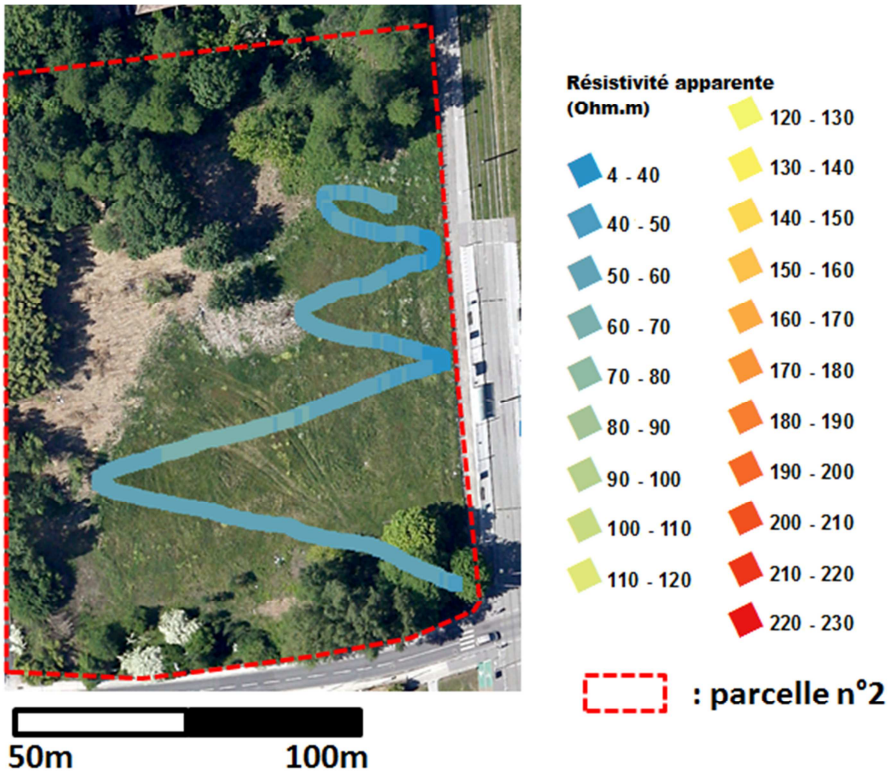


Figure 2.16 : Cartographie électromagnétique de la parcelle n°2, champ vertical.

Sur la parcelle n°3, les mesures électromagnétiques sont organisées le long d'un profil se composant d'une première partie orientée Nord vers Sud, puis d'une deuxième orientée Sud vers le Nord-ouest (Figure 2.17). Le pas de mesure est de 2m, avec une prospection en champ vertical et horizontal. La présence d'une végétation dense sur le secteur limite l'accessibilité. Cela oblige à effectuer l'investigation uniquement le long de deux profils (un quadrillage régulier du site n'étant pas possible) (Figure 2.17). Les mesures sont faites avec les deux orientations du champ magnétique sur l'appareil.

On observe des variations de résistivité apparente dans une gamme de 80 à 120 Ω.m qui traduit un terrain relativement homogène le long du profil pour les volumes d'investigation prospectés. Soulignons le contraste entre les résistivités apparentes mesurées en champ horizontal (gamme de variation : 90 à 130 Ω.m) (Figure 2.17a) et en champ vertical (gamme de variation : 40 à 60 Ω.m) (Figure 2.17b). L'ordre de grandeur de ce contraste est uniquement comparable à celui rencontré dans la partie sud de la parcelle n°1. De ce fait, en combinant cette observation au contexte hydrique des sols lors de la campagne de mesure (§1.3.) et à la géologie du site (§2.1.), ce contraste montre que les sols du quaternaire (remblai et sable argileux) ne sont présents qu'entre 0 et 2m de profondeur et que la couche de grave et sable n'est pas présente sur cette parcelle. Des mesures de niveau de la nappe de surface sur la parcelle n°3 effectuées le jour de reconnaissance EM indiquent une nappe présente à 2m de profondeur (31m NGF). De ce fait, ce contraste de conductivité mis en évidence entre les prospections en champ horizontal et en champ vertical pourrait être causé par la présence d'une nappe.

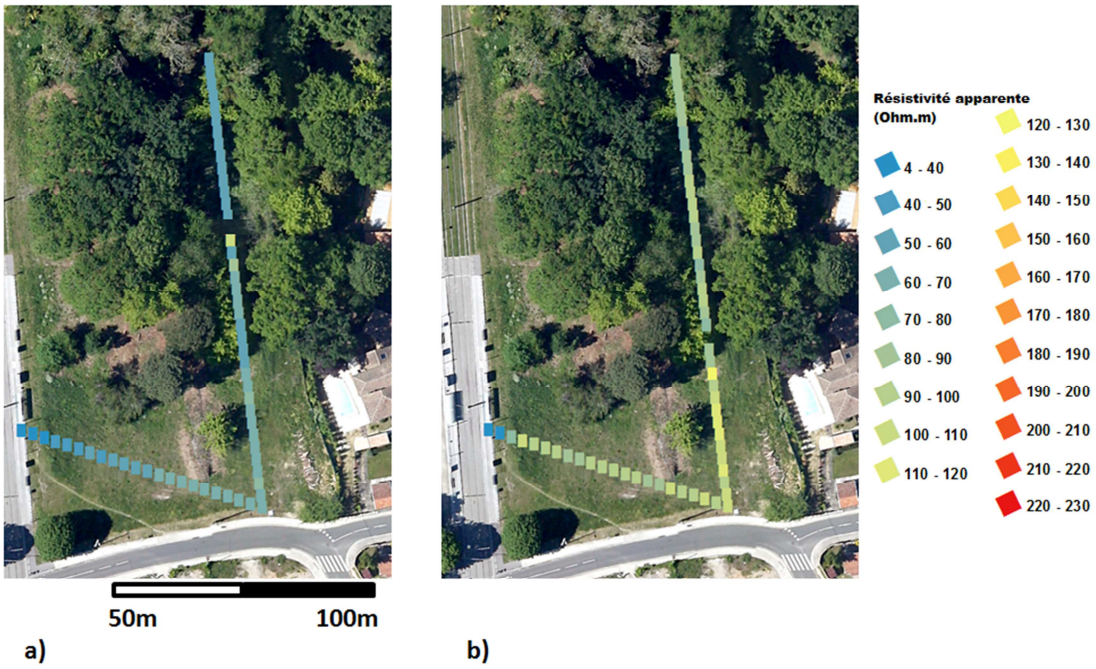


Figure 2.17 : Cartographie électromagnétique de la parcelle n°3, a) champ vertical, b) champ horizontal.

2.3. Prospections géotechniques : PANDA.

Sur la parcelle n°1, 21 sondages PANDA ont permis de mesurer la résistance à la pointe des sols (q_d) jusqu'à 4m de profondeur pour certains sondages. La résistance à la pointe des sols est un paramètre permettant d'estimer le comportement mécanique des sols. L'analyse des pénétrogrammes permet de délimiter différentes couches géomécaniques. La localisation des sondages et les pénétrogrammes de 3 d'autre eux (SP11-12-13) sont présentés à la Figure 2.18, et l'ensemble des pénétrogrammes est en Annexe 2.8. Le refus des sondages est ici généralement obtenu pour des valeurs faibles de q_d. Cela est caractéristique d'un refus dans les sols argileux, lié au frottement latéral sur le train de tiges.

L'ensemble des pénétrogrammes met en évidence une couche de sol entre 0 et 0,5m dont la résistance à la pointe est supérieure à 10MPa. Cette couche de sol correspond à de la terre végétale, mais également à des sols remaniés dans lesquels apparait de la grave (§2.1.2.). Une couche de sol peu résistante mécaniquement est rencontrée sur plusieurs sondages entre 0,6 et 1m de profondeur. Les tarières réalisées sur le secteur permettent de relier ces faibles caractéristiques mécaniques à la couche de sable argileux (Figure 2.8).

En deçà de cette couche de sable argileux, les sols présentent le comportement mécanique de matériaux normalement consolidés, où les valeurs de résistance à la pointe augmentent avec la profondeur (Laurent 2008), sur 20 à 30cm d'épaisseur. En deçà de 1,5m de profondeur, au regard des lithologies observées à la tarière, les variations successives des valeurs de q_d sur des épaisseurs de 10 à 20cm peuvent être associées à l'alternance des couches de sables à teneur en argile variable. Les sondages ayant atteint les 4 mètres de profondeur permettent de bien mettre en évidence ces alternances de lithologie des sols sur le plan du comportement mécanique.

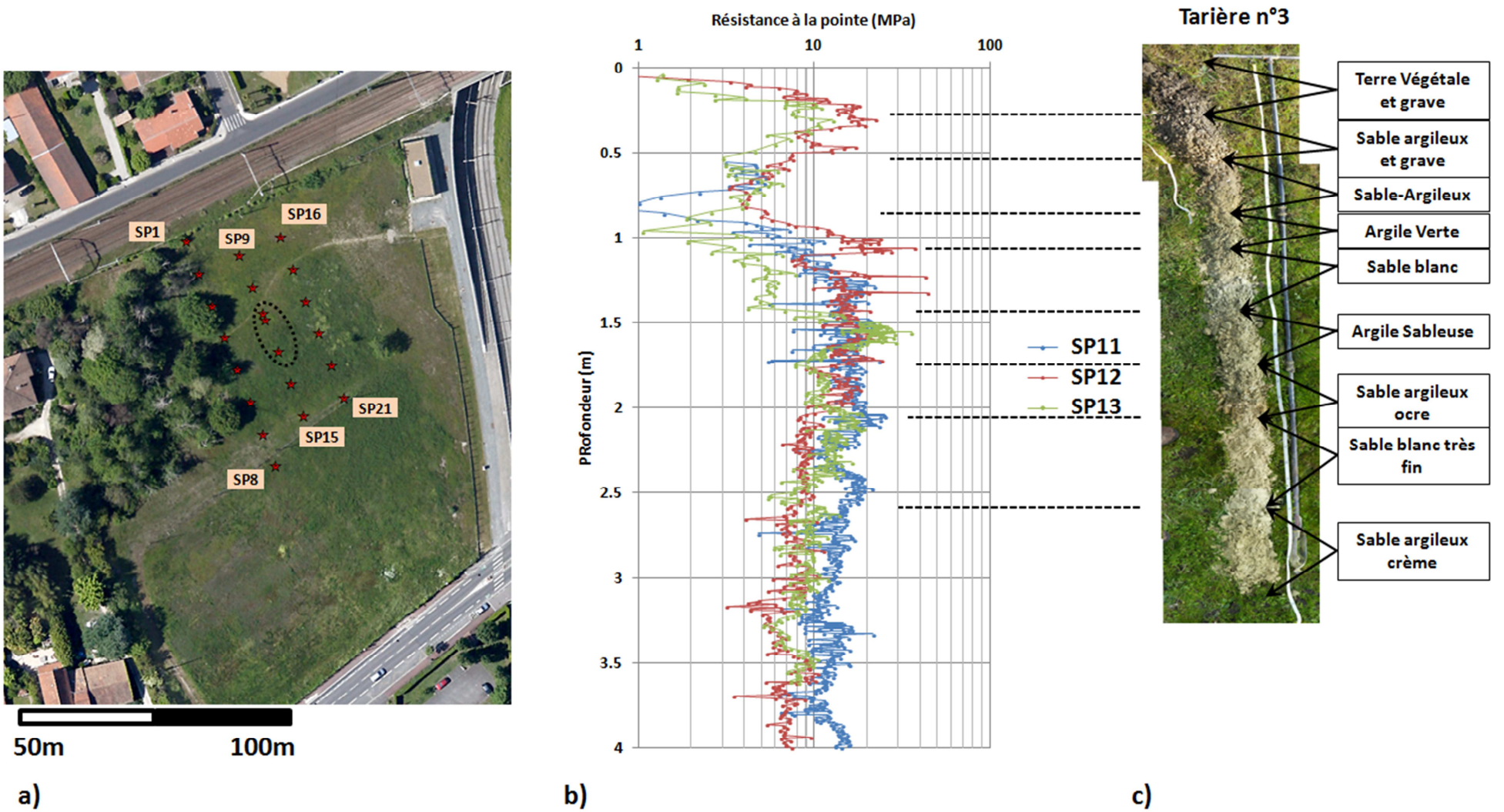


Figure 2.18 : Sondages au pénétromètre PANDA a) plan d'implantation b) 3 PANDA voisins (SP11-12-13), c) comparaison avec la lithologie observée à la tarière 3.

En reprenant la nomenclature des sols rencontrés lors des sondages à la tarière (Annexe 2.6), on peut comparer les profils géomécaniques des pénétrogrammes aux profils lithologiques déduit des tarières (Figure 2.19). Notons que le sondage SP10 a rencontré un refus à 40cm de profondeur, et au regard de la lithologie des sols et à titre indicatif, le sondage SP17 situé à 10m de SP10 au droit d'une structure géophysique équivalente (valeurs de résistivité apparente (Figure 2.14c)), est rajouté à la comparaison.

La Figure 2.19 permet d'étudier le lien entre les profils lithologiques obtenus suite aux tarières et les pénétrogrammes. Pour chaque couple T-SP, les sondages ont été effectués aux mêmes coordonnées (PANDA précédent les tarières). On remarque que les principales transitions lithologiques observées à la tarière sont reprises par des variations des valeurs (q_d) des pénétrogrammes. Pour T2, on note que le passage de la couche de sable à la couche de sable argileux (z = 0,6m) marque une évolution du comportement mécanique 2 MPa à une valeur constante de 5 MPa. Pour T3, le passage de la couche de sable argileux à celle d'argile (z = 1,2m) est marqué par une augmentation progressive de qd jusqu'à 20 MPa au sein de la couche de sable-argileux qui baisse à 8 MPa au sein de la couche d'argile. Ces observations indiquent que les différentes natures géologiques de matériaux peuvent être reliées à des variations de propriétés mécaniques.

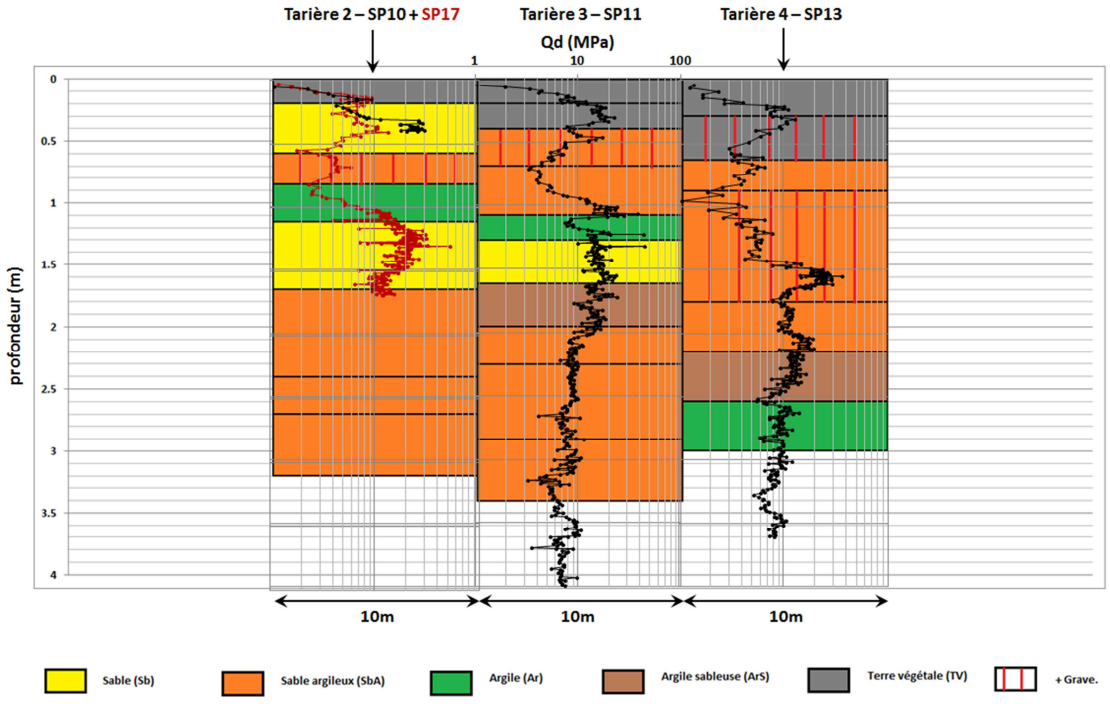


Figure 2.19 : Comparaison entre la lithologie déduite des tarières et les pénétromètres effectués aux mêmes coordonnées.

Les prospections au pénétromètre sont menées pour obtenir un point de mesure à chaque coup de masse. Ainsi le pas de mesure est en moyenne de 0,5cm. Cette précision permet de décrire de façon détaillée le comportement mécanique d'une couche lithologique. On peut observer que des couches

jugées lithologique homogènes avec les tarières (T2 : z = 1,1-1,7m ; T3 : z = 0,4-0,7m ; T4 : z = 0,9-1,8m et 1,8-2,2m) présentent des comportements mécaniques plus variables.

Notons que l'exécution d'un sondage pénétrométrique nécessite d'effectuer dans le voisinage proche de ce dernier un forage pour associer un comportement des sols (q_d) à une lithologie. L'avantage d'avoir une lecture croisée de ces deux sources d'information permet d'une part d'associer un comportement mécanique aux couches géologiques majeures qui sont prospectées à la tarière, et d'autre part de fixer les profondeurs et les épaisseurs des observations discontinues des tarières (sols remaniés lors de l'extraction). Cette information apportée à un ingénieur géotechnicien lui permet d'appréhender l'hétérogénéité lithologique et mécanique des sols avant d'effectuer des essais géotechniques de plus grande ampleur (pressiomètre, carottage,…).

2.4. Bilan.

A l'issue de ces campagnes de mesure et du recoupement de l'ensemble des informations recueillies sur le sous-sol au sein des archives et autre base de données, il ressort qu'une analyse doit être effectuée pour déterminer comment les informations recueillies peuvent permettre de déterminer où les essais géophysiques et géotechniques les plus pertinents doivent être effectués et estimer par là même leur nombre.

Il ressort que dans l'état de l'art actuel, il n'est pas envisageable d'effectuer une vingtaine d'essais PANDA sur 0,25 Hectare pour prospecter les structures du sous-sol. De plus, comme appuyé dans le chapitre I, les méthodes géophysiques à grand rendement permettent de prospecter l'ensemble d'une parcelle en un temps réduit (vis-à-vis des prospections géophysiques traditionnelles), cette source d'information permet ainsi (en fonction des volumes de sol investigués) de mieux intégrer les prospections géophysiques dans les processus de reconnaissance géotechnique des sols.

L'analyse préliminaire des prospections effectuées sur les parcelles n°2 et n°3 met en évidence la présence de sols plus homogènes à structures horizontales avec des épaisseurs bien identifiées. L'analyse des TRE, cartes EM, ainsi que des sondages PANDA effectués sur la parcelle n°1 montre une hétérogénéité structurelle des sols. Cette variabilité plus marquée des sols nous a fait choisir la parcelle n°1 pour effectuer l'ensemble des recherches et développements de recoupement d'informations et de combinaison de bases de données. D'un côté plus pratique, cette parcelle est également plus praticable pour les autres acteurs du projet D²SOU, venus ultérieurement compléter la base de données par des campagnes de mesures à grand rendement.

3. Intégration des prospections à grand rendement mises en œuvre par les partenaires D²SOU.

3.1. Méthodes des partenaires du projet D²SOU.

Avec la participation des partenaires du projet D²SOU (BRGM et Géocarta), des prospections géophysiques à grand rendement ont été réalisées en parallèle des campagnes de mesure menées dans le cadre de cette thèse. L'analyse de ces prospections à grand rendement permet d'étudier l'intérêt de telles prospections sur la reconnaissance des sols, vis-à-vis de celles généralement à l'usage en géophysique. Le Tableau 2.3 récapitule à quelles dates les prospections géophysiques des partenaires ont été effectuées, et l'état hydrique des sols à ces dates. Soulignons que les campagnes de mesure de Géocarta et du BRGM ont prospecté des sols avec un état hydrique sec, imputant des résistivités apparentes plus élevées (en surface) que celles obtenues pour les campagnes EM-31 et TRE.

Prospection	Dates	Pluie efficace cumulée (5 jours)	Pluie efficace cumulée (10 jours)	Etat hydrique des sols
EM-31	20/11/2012	-3,3mm	+8,1mm	Humide / sec en surface
TRE	20/11/2012	-3,3mm	+8,1mm	Humide / sec en surface
Géocarta	16/07/2012	-10,4mm	-16,7mm	Sec
BRGM	03/08/2012	-2,4mm	-51,6mm	Sec

Tableau 2.3 : Etat hydrique des sols aux dates des campagnes.

3.1.1. Prospection Géocarta : Automatic Resistivity Profiling (ARP®).

Le dispositif de mesure ARP repose sur le même principe que le dispositif MUCEP décrit dans le Chapitre I §II.3.1.2. Cette version améliorée mise en œuvre par Géocarta permet d'effectuer les campagnes de mesure sur des terrains au minimum accessibles avec un quad. La faible emprise au sol du dispositif permet d'effectuer des prospections sur des terrains en exploitation agricole (Figure 2.20). Les écartements entre les électrodes d'injection du courant (AB) est de 1m et l'écartement des différents dipôles de mesure de différence de potentiel (M_1N_1, M_2N_2, M_3N_3) sont respectivement de 0,5-1 et 2m (Figure 2.20), permettant d'atteindre des profondeurs d'investigation équivalentes à celles d'un dispositif dipôle-dipôle carré (Chapitre I §II.1.2.2.), soit 0,5-1 et 1,7m (Buvat 2012).

Un radar embarqué code le déclenchement des mesures tous les 10cm environ dans le sens de déplacement du dispositif. L'espacement entre deux profils est compris entre 1 et 5m, et chaque profil est guidé en temps réel vis-à-vis de ceux précédemment effectués par une lecture continue de la géolocalisation des mesures sur l'ordinateur de bord.

La cartographie de la parcelle obtenue est composée de 3 niveaux d'investigation décrivant la résistivité des sols aux pseudos profondeurs précédemment citées. En termes de quantité de points de mesures, ce dispositif permet d'atteindre 100 000 mesures par hectare pour des profils espacés de 1m (Buvat 2012).

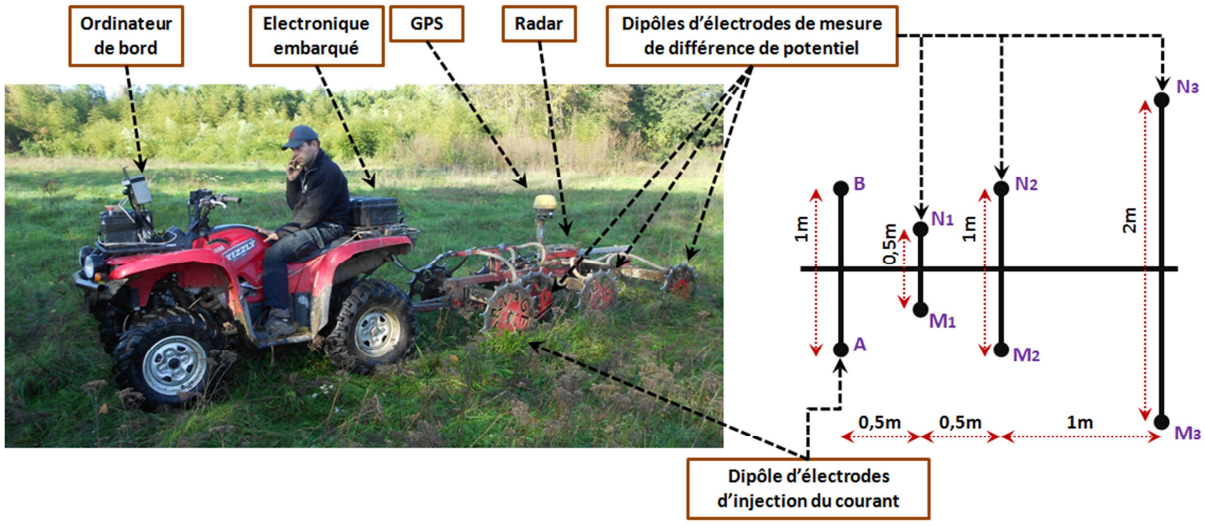


Figure 2.20 : Dispositif de mesure ARP et configuration des électrodes.

3.1.2. Prospection BRGM : l'OhmMapper.

Le dispositif OhmMapper développé par Geometrics est un résistivimètre reposant sur l'utilisation d'électrodes capacitives. La circulation du courant dans le sol est induite par le champ électrostatique parcourant le transmetteur (T). Les récepteurs (R) mesurent le champ secondaire induit lié à la circulation électrique dans le sol, permettant d'en déduire les propriétés physiques des sols (base physique du dispositif pour un couple transmetteur-récepteur à l'image des prospections électromagnétiques décrites dans le chapitre I §II.1.2.3.). Les mesures recueillies (résistivité apparente) sont semblables à celles acquises avec un dispositif dipôle-dipôle conventionnel utilisant le courant continu, ce qui rend possible une inversion par le logiciel Res2Dinv pour obtenir des résistivités vraies à des profondeurs vraies.

Le dispositif utilisé est composé de 3 récepteurs et d'un transmetteur espacés de 10m chacun (Figure 2.21), l'ensemble est connecté à la console en tête du dispositif, associée à un GPS. La profondeur d'investigation accessible avec cette configuration est estimée à 20% de l'écartement maximal entre transmetteur et récepteur (35m), soit une profondeur comprise entre 6 et 7m. Cette tranche de sol est discrétisée en 3 profondeurs, correspondant aux 3 récepteurs composant le dispositif. Le dispositif tracté par l'utilisateur permet un pas de mesure de 1m à une allure de 3km/h.

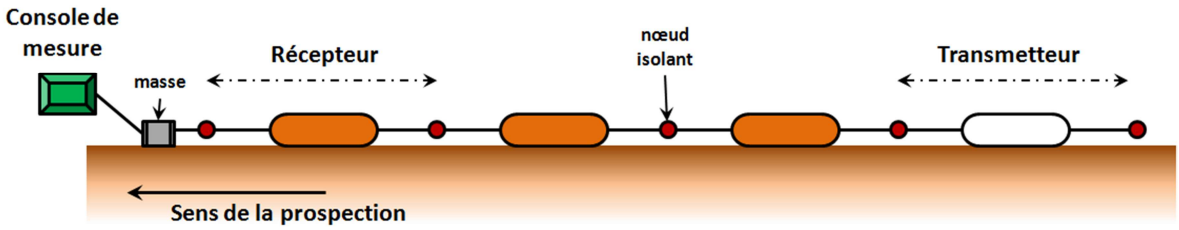


Figure 2.21 : Dispositif de mesure OhmMapper.

Par la suite, les méthodes électriques (ARP et TRE) ainsi que les méthodes par induction (OhmMapper et EM-31) seront comparées pour mettre en évidence l'apport d'information de ces prospections à grand rendement dans la base de données déduite des méthodes traditionnelles.

3.2. Comparaison des investigations par les différentes méthodes.

3.2.1. Méthodes électriques résistives.

Nous nous intéressons à l'étude des mesures géophysiques en étudiant les valeurs de résistivité mesurées pour des profondeurs d'investigation comparables, sans tenir compte des disparités des volumes d'investigation du fait d'une configuration différentes des dispositifs de mesure (ARP : dispositif carré ; TRE : dispositif en ligne). Cette étude des gammes de résistivité apparente se fait en comparant les fonctions de répartition des résistivités apparentes mesurées pour l'ensemble des méthodes.

Les TRE effectuées sur la parcelle n°1 (Figure 2.10) le 20/11/12 et la prospection ARP (Annexe 2.9) effectuée le 16/11/12, sont donc deux techniques de prospection des sols complémentaires. Par la suite, nous avons comparé les résultats issus des deux techniques en décrivant statistiquement les variations des résistivités apparentes (les mesures). Les données ARP sur les trois profondeurs d'investigations sont comparées aux mesures en TRE sur les points en commun aux deux investigations.

Au regard de l'emprise au sol du dispositif ARP (§3.1.1.) et de celui d'un dispositif dipôle-dipôle avec un espacement inter-électrodes de 1,5m, les mesures de résistivité apparente associées au volume d'investigation de la voie 3 de l'ARP peuvent être comparées aux résistivités apparentes mesurées au premier et au second niveau composant les TRE (Barker 1981). A titre d'exemple, la Figure 2.22 illustre la comparaison entre les valeurs de résistivité apparentes de TRE01 pour les niveaux 1 et 2, ainsi que des mesures de la voie 3 ARP effectuées au plus proche, sur la parcelle n°1.

Les mesures obtenues présentent, dans l'ensemble, les mêmes variations de résistivité. Les augmentions notables à 40m et 60m sur le profil sont relevées avec les deux méthodes. On note que les variations entre les ρ_{app} mesurées par les deux techniques (ARP-TRE) sont liées d'une part au fait que l'on compare des données qui sont rattachées à des volumes d'investigation non strictement identiques (configuration des électrodes en ligne pour le dispositif TRE en dipôle-dipôle, et configuration des électrodes en quadrilatère pour le dispositif ARP). D'autre part, la nature du contact entre le sol et les électrodes ARP ou TRE ne sont pas identiques, aboutissant à des sources de bruit qui ne sont également pas identiques.

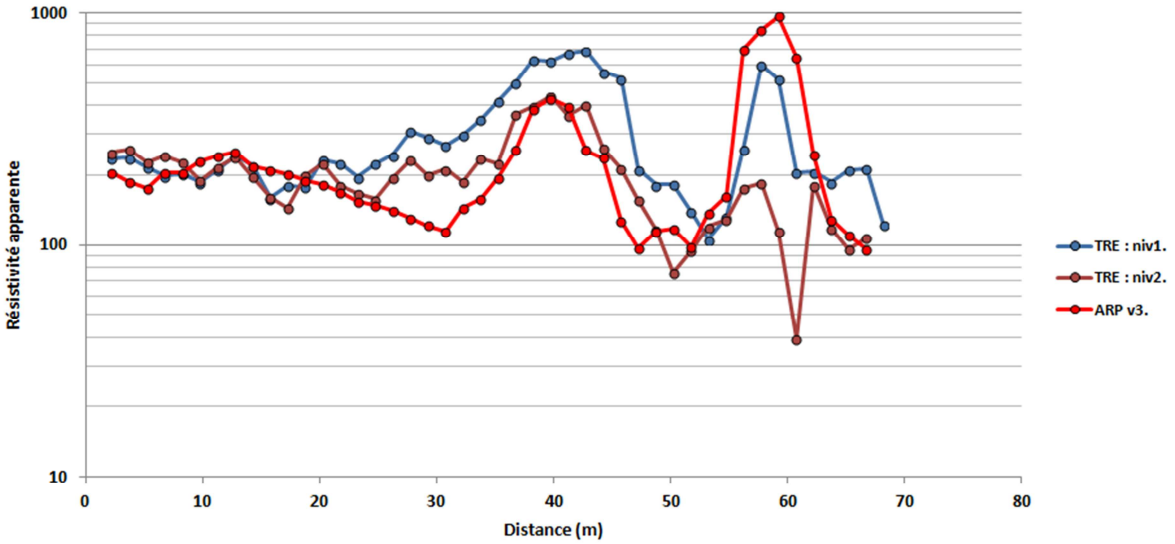


Figure 2.22 Comparaison des profils de résistivité apparente en ARP (voie3) et TRE01 (niv1-niv2).

Pour appuyer ces observations, on compare les mesures de ρ_{app} effectuées par ces deux méthodes pour des coordonnées communes (au droit de TRE à1 à 04), en construisant les fonctions de distribution des gammes de ρ_{app} mesurées pour les niveaux 1 et 2 des TRE et niveau 3 de l'ARP. Sur la Figure 2.23 on remarque que ce sont les niveaux 2 et 3, respectivement des TRE et de l'ARP qui sont comparables du point de vue des ρ_{app} mesurées. L'écart entre le niveau 1 de TRE et le niveau 3 de la prospection ARP, ce dernier présentant des résistivités apparentes plus élevées, est sans doute lié aux effets de surface.

Il ressort que les données issues de ces deux techniques de prospection sont cohérentes entre elles. On notera que la prospection ARP permet de couvrir une grande surface, mais que l'inversion des mesures de ρ_{app} n'est pas envisagée, tandis que la TRE permet l'inversion des ρ_{app} mais sur des couvertures (linéaires) plus faibles. En cela, l'ARP permet d'effectuer un zonage latéral des classes de ρ_{app} des sols de surface, et les TRE d'effectuer des investigations en profondeur avec inversion des données pour obtenir des ρ_{vraies} à des profondeurs vraies. Notons aussi que les cartographies ARP permettent d'estimer la représentativité latérale des TRE pour les couches de surface (communes entre les deux moyens de prospection). La combinaison des données ARP et TRE permet à un aménageur d'avoir une vue d'ensemble (3D) de la variabilité spatiale des propriétés physiques des sols.

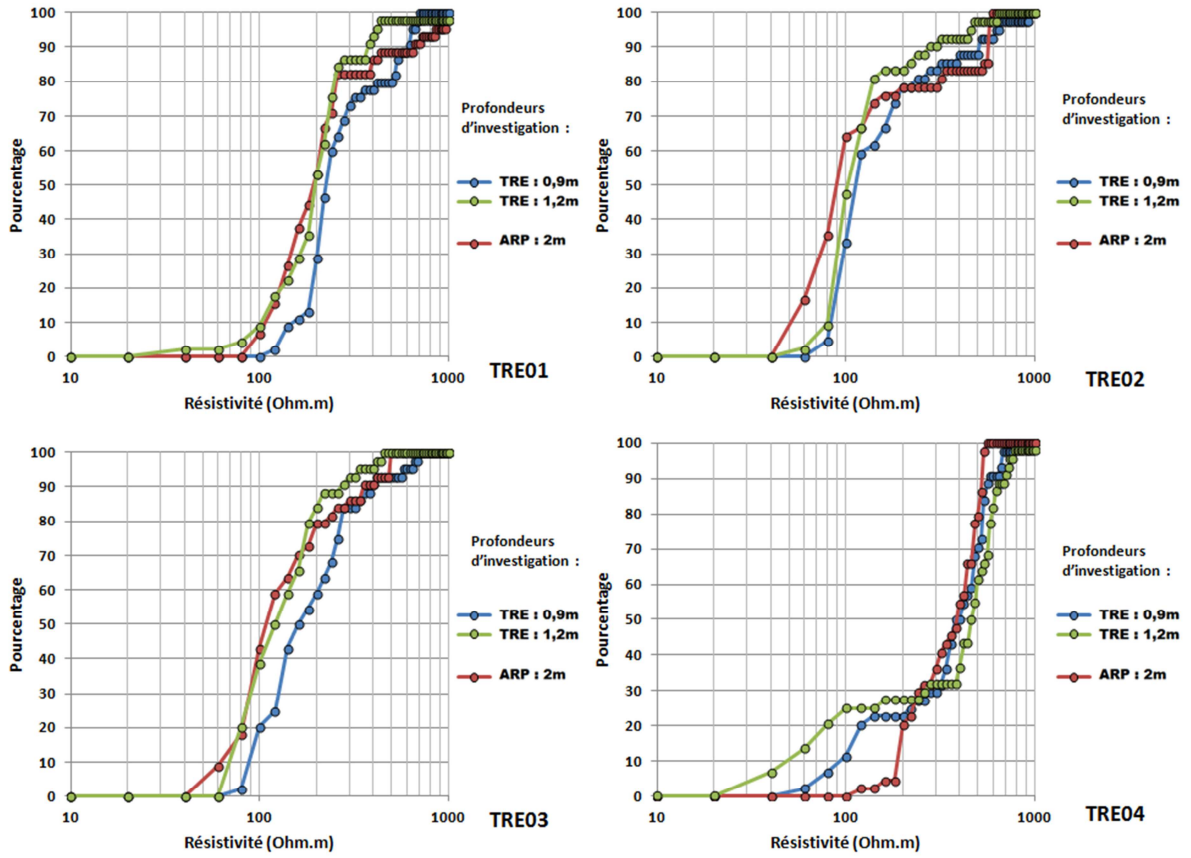


Figure 2.23 : Fonction de répartition des résistivités apparentes mesurées en ARP (niv3) et pour les différentes TRE (niv1 & niv2).

3.2.2. Méthodes électromagnétiques.

Nous étudions ici les gammes de ρ_{app} mesurées par l'EM-31 et l'OhmMapper vis-à-vis des ρ_{app} de référence, pour des mêmes profondeurs d'investigation équivalentes, mesurées en TRE. La comparaison entre des profils obtenus avec les méthodes électromagnétiques (OhmMapper et EM-31) et le profil de TRE02 (Figure 2.24) met en évidence que les variations des gammes de résistivité mesurées sont similaires sur l'ensemble du profil. Notons également que les trois techniques mettent en évidence l'augmentation locale de résistance à x=50m. A l'image des cartographies obtenues (Figure 2.25), l'étude des mesures met en évidence un écart absolu sur les résistivités mesurées, mais les variations principales des résistivités mesurées sur les trois profils sont équivalentes. Ainsi, il est possible d'effectuer le même zonage avec les trois techniques.

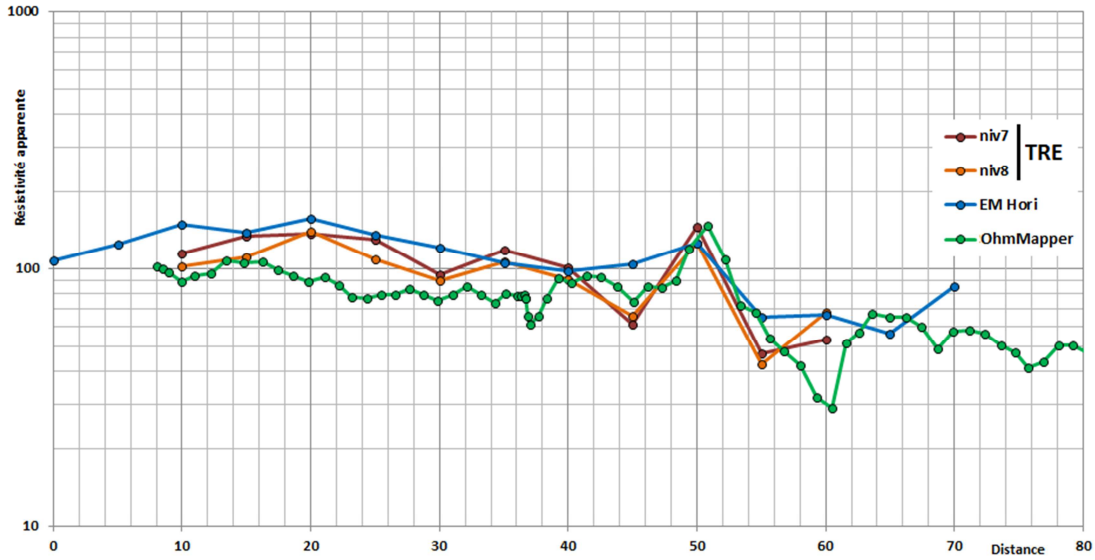


Figure 2.24 : Comparaison des profils de résistivité apparente en OhmMapper EM-31 et TRE02.

3.3. Comparaison des cartographies de résistivité obtenues par les différentes méthodes.

L'étude des données EM-31, ARP et OhmMapper permet de comparer les mesures de résistivité apparente effectuées avec les trois méthodes de prospection à grand rendement. Elles permettent d'évaluer les variations de résistivité apparente des terrains. Elles sollicitent toutes des volumes comparables de sol, de 2 à 3 mètres de profondeur d'investigation. La profondeur d'investigation des mesures EM-31, avec le protocole de mesure choisi, est de 2m dans le sol en champ horizontal. Les mesures ARP ont une profondeur d'investigation de environ 1,7m de profondeur (espacements entre les électrodes : AB=1m ; MN=2m). Les mesures OhmMapper permettent d'investiguer jusqu'à 3m de profondeur en considérant un espace inter-électrodes de 10m.

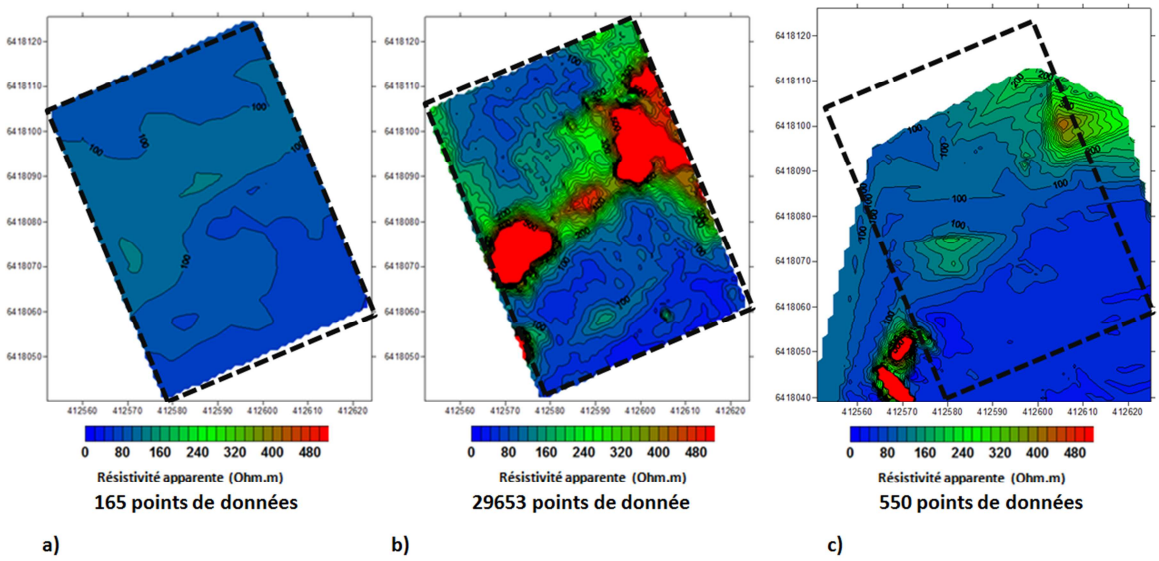


Figure 2.25 : Analyse croisée des mesures a) EM-31, b) ARP niveau 3, c) OhmMapper niveau 1.

Notons que la campagne de mesure EM a été effectuée en aout 2012, celle en OhmMapper durant juillet 2012, et celle de l'ARP en novembre 2012. Au regard du contexte hydrique des sols à ces différentes périodes, on admet que la campagne de mesure par ARP ont été effectuées sur des sols plus saturés que lors des campagnes de mesure EM et OhmMapper.

La Figure 2.26 présente les fonctions de répartition des mesures de résistivité apparente effectuées avec l'EM-31, l'OhmMapper et l'ARP sur une zone commune dans la partie nord de la parcelle n°1. Les 3 dispositifs de mesure permettent d'investiguer la résistivité apparente des sols mais selon deux principes. A savoir, les champs électromagnétiques pour l'EM-31 et l'OhmMapper, et l'injection directe de courant dans les sols pour l'ARP. De par les propriétés des instruments et les principes physiques sur lesquels reposent les mesures, les données obtenues avec l'EM-31 et l'OhmMapper sont plus sensibles à la présence de matériaux conducteurs et l'ARP aux matériaux résistants. Soulignons également que le dispositif ARP peut être sujet au problème de résistance de contact entre les électrodes et le sol (Chapitre IV), ajoutant un biais (résistant) aux mesures de résistivité apparente. Ces caractéristiques expliquent que 80% des résistivités apparentes mesurées en EM-31 et OhmMapper sont inférieures à 100 Ω.m, tandis que celles de l'ARP sont à 80% inférieures à 300 Ω.m.

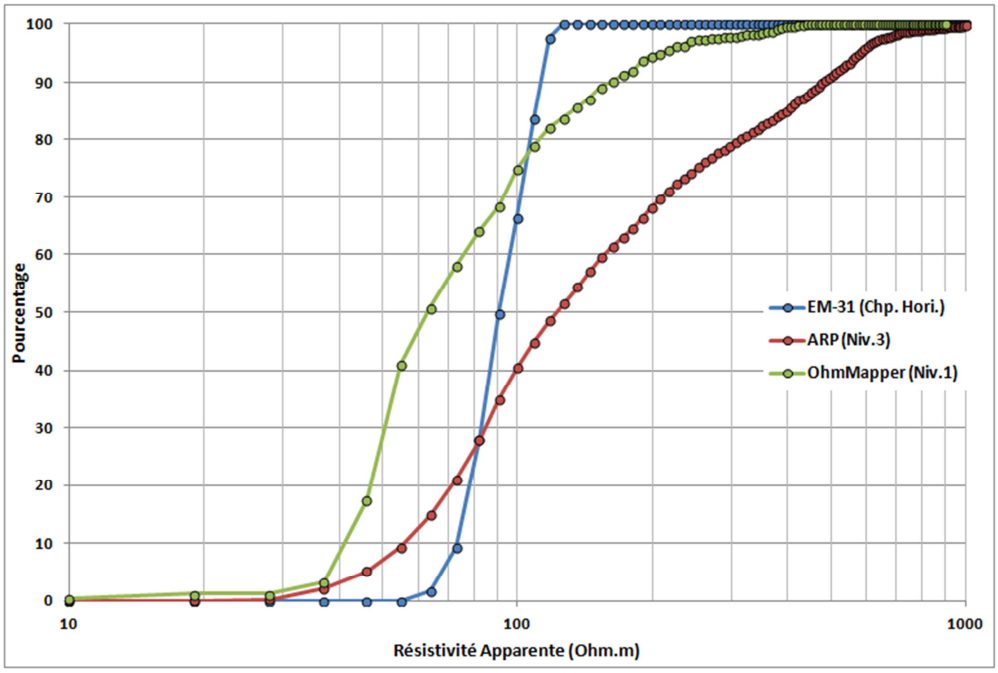


Figure 2.26 : Fonction de répartition des mesures EM-31 et ARP.

L'utilité d'emploi de ces deux principes de mesure est que les méthodes électromagnétiques mettent en avant les zones conductrices, localisées dans la partie sud et extrême nord de la parcelle n°1, tandis que la méthode électrique met en évidence une zone résistante située au centre de la parcelle n°1(Figure 2.25). Le choix d'utiliser l'une ou l'autre méthode sera donc fonction des caractéristiques du sous-sol recherchées (d'où l'intérêt d'effectuer une analyse bibliographique préalable des sols présents sur la parcelle). D'un point de vue de l'usage de ces 3 dispositifs sur le terrain,

l'encombrement de l'OhmMapper (longueur du dispositif) n'a pas permis de prospecter la partie nord de la parcelle n°1. L'ensemble des mesures ARP effectuées sur la parcelle n°1 est illustré dans l'Annexe 2.9, et les résistivités vraies déterminées avec la prospection OhmMapper sont représentées en Annexe 2.10.

3.4. Bilan.

Une comparaison des gammes de résistivité apparente mesurées en ARP, EM et OhmMapper montre que ces trois méthodes permettent d'obtenir un zonage des parcelles comparable en termes de géométries des principales structures géoélectriques. Une étude quantitative des données recueillies montre que les gammes de résistivité mesurées ne sont pas équivalentes pour de faibles volumes d'investigation. Même si les volumes d'investigation des différentes techniques sont similaires, les propriétés physiques ne sont pas prospectées de la même façon de par le dispositif de mesure ou le principe de la mesure (électrique, électromagnétique). Soulignons également qu'une grande partie des différences entre les gammes de résistivité apparente mesurées entre les différentes méthodes géophysiques est imputable aux différences de date et donc de condition hydrique des sols lors des prospections.

Nous avons montré (Chapitre I et §3) que les méthodes à grand rendement diffèrent principalement par le principe physique sur lequel repose la prise de mesure (électromagnétique et injection de courant). La comparaison de ces méthodes a permis de révéler que le choix de la méthode la plus adaptée dépend de la finalité des prospections, à savoir d'une part la profondeur d'investigation visée, et d'autre part la description spatiale des structures géoélectriques (coupes ou cartographie). La prospection ARP étant plus adaptée à l'étude pédologique des sols et les méthodes électromagnétiques précédemment énoncées, sont adaptées pour la reconnaissance géotechnique des sols de surface (0-5m) et la description des structures géoélectriques susceptibles d'interagir dans la prise de décision du type de fondation d'une bâtisse.

On notera que les 3 méthodes à grand rendement que nous venons d'étudier présentent le même type de résultat, ce qui permet de ne recommander l'usage que d'une méthode par campagne de reconnaissance d'une parcelle, d'une part pour éviter la redondance des informations et d'autre part pour ne pas complexifier l'interprétation. Comme souligné dans le §3.2 et §3.3, la combinaison des méthodes géophysiques à grand rendement avec les méthodes traditionnelles permet à un prospecteur d'avoir une meilleure représentation de la variabilité spatiale (3D) des propriétés physiques des sols. Les méthodes à grand rendement permettant de visualiser la distribution spatiale des champs de propriétés et donc d'estimer les liens entre les différents points de mesure statiques/traditionnels. Les différentes caractéristiques des méthodes de prospection géophysique précédemment étudiées sont regroupées dans le Tableau 2.4, ces différentes caractéristiques permettant d'aider dans le choix de la méthode à grand rendement la plus adaptée à l'étude visée.

	Nombre d'opérateurs	Temps de prospection (min)	Résolution spatiale du profil (m)	Espacement inter-profils (m)	Profondeur d'investigation (m)	Nombre de mesures
EM-31	1	220	1	5	2 (H) – 5 (V)	2000
ARP	1	20	0,1	3	0,5 – 1 et 1,7	150000
OhmMapper	2	240	2,5	5 à 25	3 – 5 et 7	3500

Tableau 2.4 : Principales caractéristiques des méthodes à grand rendement vis-à-vis d'une prospection d'un hectare.

Les informations obtenues par TRE peuvent paraître redondantes vis-à-vis de celles de prospection à grand rendement, mais doivent cependant être présentées comme complémentaires de ces dernières. En cela, la TRE permet d'acquérir une information locale plus précise (données inversées) ou plus en profondeur. La TRE est donc à utiliser en complément d'une méthode à grand rendement pour obtenir une reconnaissance détaillée d'une grande surface et avoir localement des mesures précises selon une coupe du sous-sol.

Le choix de la méthode à grand rendement sera également fonction de la visée de la prospection, en sachant que l'ARP pourra avoir une visée à reconnaissance pédologique, tandis que l'EM-31 aura une visée géotechnique dans la reconnaissance de la tranche du sous-sol sollicité par des fondations de surface.

4. Prise en compte de la variabilité spatiale des propriétés physiques et mécaniques des sols.

Ce paragraphe concerne une étude des liens entre les données géophysiques et géotechniques acquises à l'image d'une reconnaissance traditionnelle de parcelle. On effectue une étude qui se démarque des analyses traditionnelles des données des campagnes de mesures par une étude des liens entre les différentes sources d'information qu'un aménageur peut avoir à étudier pour estimer la variabilité spatiale du sous-sol.

4.1. Classification Hiérarchique Ascendante sur TRE.

La Classification Hiérarchique Ascendante (CHA, Chapitre I. §I.4.4.1.) permet de discrétiser les individus d'une base de données en groupes (clusters) présentant un comportement similaire selon un ensemble de variables (résistivité dans le cas d'une TRE). On peut l'employer pour mettre en évidence des gammes de résistivités au sein des TRE, non pas en fonction de leur organisation spatiale (concentration des points de mesure, représentativité d'une famille d'individus,…), mais selon les gammes de résistivités au sein des TRE. Les CHA sont effectuées en calculant l'indice de similarité par distance euclidienne et l'indice d'agrégation par la méthode de Ward (Chapitre I).

Une composante importante à prendre en compte pour effectuer une analyse par CHA est la détermination du nombre de clusters regroupant l'ensemble des données, car ce paramètre pouvant être fixé empiriquement, il est possible d'avoir autant de clusters que de données disponibles. Pour

définir le nombre de clusters représentatifs pour une base de données, des études (Yan 2005, Hardy 1996) mettent en lumière la méthode de Calinski et al (1974) présentant les résultats les plus pertinents par la prise en compte de la variabilité de chaque cluster vis-à-vis de la variabilité de l'ensemble de la base de données, composée de *n* mesures. Cette méthode permet de calculer l'indice CH(*g*) pour chaque nombre de clusters choisi (*g*), en fonction de la variance intra-cluster (within-cluster) B(*g*) et inter-cluster (between-cluster) W(*g*), illustré par les Équation 2.1, Équation 2.2 et Équation 2.3.

Équation 2.1

$$\boldsymbol{CH(g) = \frac{B(g)/(g-1)}{W(g)/(n-g)}}$$

Équation 2.2

$$\boldsymbol{B(g) = \sum_{i} n_i(\overline{Y_i} - \overline{Y})^2}$$

Équation 2.3

$$\boldsymbol{W(g) = \sum_{ij} \left(\overline{Y_{ij}} - \overline{Y_i}\right)^2}$$

avec : *n* : nombre total d'individus composant la base de données.

ni : nombre d'individus présents dans le cluster i.

g : nombre de clusters pris en compte pour l'indice CH(*g*).

$\overline{Y}$: moyenne de toute la base de données pour la variable concernée.

$\overline{Y_i}$: moyenne de la variable concernée au sein du cluster i.

$\overline{Y_{ij}}$: est la j^{ième} observation de la variable concernée dans le cluster i.

Le nombre de clusters le plus approprié à la base de données considérée est déterminé par la valeur la plus élevée de CH(*g*) (Figure 2.27). Cette étude est menée sur les TRE01-02 et 03, localisées dans le §2.1.1 et pour lesquelles le nombre de clusters approprié est respectivement de 3, 3 et 4. Ces résultats sont synthétisés dans le Tableau 2.5 présentant un ensemble de paramètres descriptifs pour le nombre de clusters choisis. Soulignons que pour TRE02, le nombre de cluster retenu est de 3 (bien que *CH(g) = 6*), car les 3 clusters additionnels comprennent chacun moins de 5% des points de mesure, ne pouvant être représentatifs au sein d'une TRE. Pour appuyer ce choix, un descriptif des 6 clusters de TRE02 ainsi que la répartition des clusters au sein de TRE02 sont présentés dans l'Annexe 2.11. Et l'Annexe 2.12 représente les TRE01 à 03 selon les différents clusters déterminés par CHA.

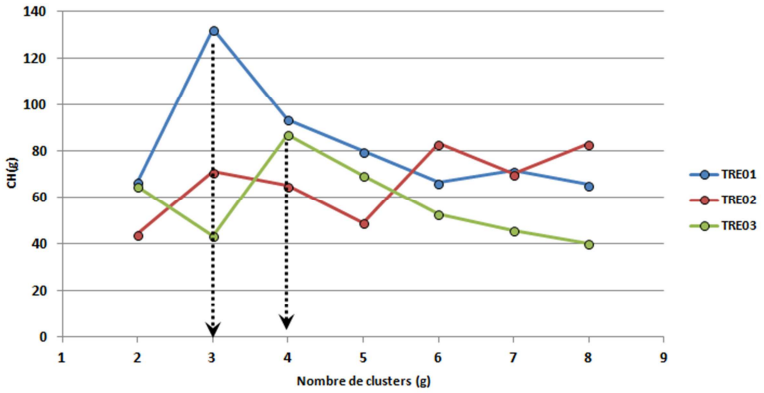


Figure 2.27 : Détermination du nombre approprié de clusters.

TRE étudiée	Clusters	Résistivité vraie					
		Minimale	Maximale	Moyenne	Ecart-type	Coefficient de variation	Pourcentage de la population
TRE01	1	2	138	96	28	0.02	43%
	2	140	376	209	57	0.28	48%
	3	394	2073	737	337	0.53	9%
TRE02	1	18	120	84	21	0.22	35%
	2	121	406	179	58	0.32	60%
	3	440	3108	766	476	0.58	5%
TRE03	1	29	90	67	13	0.43	39%
	2	91	152	121	17	0.14	26%
	3	154	281	203	37	0.76	21%
	4	284	1127	439	176	0.65	14%

Tableau 2.5 : Descriptif des TRE étudiées.

La Figure 2.28 représente les gammes de résistivité vraie associées aux différents clusters déterminés par analyse CHA. La lecture de ces données souligne que l'ensemble des clusters, c2&c3 de TRE03 regroupés, sont représentatifs des mêmes gammes de résistivité. On observe également que les mêmes découpages de la gamme totale de résistivité sont effectués au sein de l'ensemble des TRE. Ceci souligne que les différentes structures géoélectriques rencontrées de TRE01 vers TRE03 sont les mêmes et qu'une analyse des variations des résistivités entre ces dernières met en lumière les variations horizontales des structures géophysiques au sein des sols non prospectés entre ces différentes TRE.

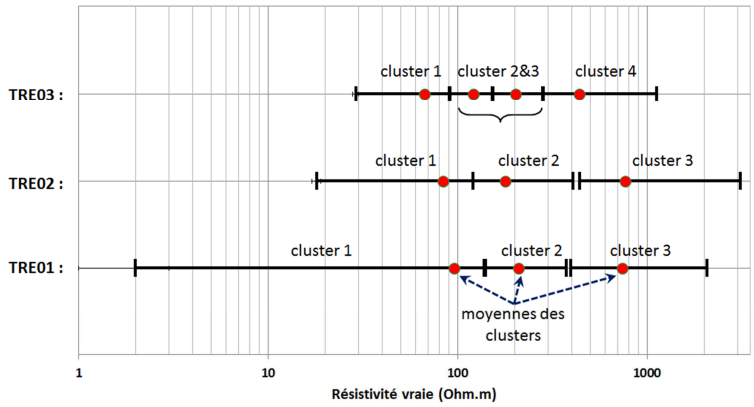


Figure 2.28 : Représentation des gammes de résistivité vraie en fonction des clusters des TRE.

4.2. Approximation d'un lien entre propriétés physiques et mécaniques.

Au droit des TRE 01 à 03, un ensemble de sondages PANDA permet d'effectuer une comparaison entre les paramètres physiques et mécaniques du sous-sol. Suite à la détermination des principales classes de résistivité du sous-sol, on intègre les données géotechniques (PANDA) à la base de données pour combiner les différentes sources d'information.

L'analyse menée dans le §4.1 a conduit à mettre en évidence la continuité des structures géoélectriques entre TRE01 et TRE03, de ce fait une analyse CHA est menée sur l'ensemble des résistivités vraies mesurées de TRE01 à TRE03 dans le but de pouvoir comparer les résistivités vraies de cette zone d'étude avec le comportement mécanique des sols au droit des TRE. Pour pouvoir comparer les mesures de résistivité vraie à celles des résistances à la pointe, on ne retient que les q_d dont les points de mesure à une profondeur z, correspondent à une valeur de résistivité vraie donnée par les TRE. Dans cette approche, on ne prend pas en compte la disparité entre les volumes représentatifs des mesures mécaniques de quelques cm^3 (Laurent 2008), à quelques dizaines de cm^3 pour les mesures électriques (Chapitre I, §II.1.2).

Pour rappel (Chapitre I, §II.3.3.), nous avons souligné qu'une comparaison directe entre les valeurs de q_d et de résistivité vraie ne fait pas ressortir de lien direct entre ces mesures. Ainsi, une autre approche retenue consiste non pas à comparer les valeurs point par point, mais d'étudier le lien possible entre une gamme de résistivité (moyenne, écart-type), et le comportement mécanique des sols (moyenne, écart-type). L'intérêt d'une analyse par CHA sur les résistivités vraies est de fixer les gammes de résistivité à comparer aux q_d. Il ressort qu'aux 3 clusters permettant de discrétiser les résistivités vraies, les gammes de q_d regroupées dans le Tableau 2.6 peuvent y être associées.

Clusters	Résistivité vraie (Ω.m)					Résistance à la pointe (MPa)				
	Min	**Max**	**Moyenne**	**E.T.**	**C.V.**	**Min**	**Max**	**Moyenne**	**E.T.**	**C.V.**
1	17	138	88	26	0,3	3,9	21,4	11,2	4,4	0,4
2	138	501	223	79	0,35	2,6	29,6	8,8	5,8	0,6
3	512	3133	1006	666	0,66	2,3	22,4	5,5	6,3	0,9

Tableau 2.6 : Association de gammes de comportements mécaniques à des clusters de résistivité.

L'analyse des différentes gammes de résistance à la pointe fait ressortir deux comportements mécaniques majeurs. D'une part celui du cluster 1 présentant les résistances à la pointe les plus élevées en moyenne associées à un CV moyen de 0,4, et d'autre part le cluster 3 qui présente des valeurs de résistance à la pointe deux fois plus faible en moyenne que celles du cluster 1, et dont la dispersion des valeurs est conséquente (CV=0,9). L'avantage d'effectuer une CHA sur les valeurs de résistivité des sols est dans la mise en évidence non pas d'un lien direct (fonction affine ou de degré n), mais qu'à un cluster de résistivité correspond une gamme de q_d. Par cette approche, et au regard des analyses précédentes sur la représentativité de la variabilité spatiale des sols, il est possible d'estimer l'ordre de grandeur du comportement mécanique des sols selon les gammes de résistivité de ces derniers. Pour reprendre et compléter le Chapitre I §II.2.2.3 sur l'organisation des campagnes de reconnaissance, les liens ici mis en évidence peuvent être effectués lors de la reconnaissance géotechnique sommaire, permettant à un prospecteur d'avoir une source d'information supplémentaire pertinente lors de l'exécution de la reconnaissance détaillée. Soulignons également que les liens ici mis en avant ne sont valables que pour la parcelle n°1, car l'établissement du Tableau 2.6 est tributaire de l'exécution d'une campagne de mesure pénétrométrique.

L'intérêt de cette approche est dans une analyse par statistique inférentielle de ces données. A titre d'exemple, en émettant l'hypothèse que la répartition des valeurs des propriétés mécaniques au sein des clusters répond à une loi normale, il est possible pour un prospecteur de déterminer le nombre de points de mesure nécessaires pour pouvoir quantifier la valeur moyenne d'une propriété selon un seuil de confiance et une marge d'erreur fixés (Indira et al 2010). Un exemple d'application basé sur les caractéristiques de la parcelle n°1 est présenté en Annexe 2.13. Une mise en situation de cette approche est abordée dans le Chapitre III.

Pour compléter cette analyse, les données les plus pertinentes de cette campagne de mesures sont recoupées entre elles pour illustrer les combinaisons de données précédemment énoncées. A la lecture de la Figure 2.29, on peut noter que la Terre végétale et le sol organiques sont regroupés dans le même cluster (3) de résistivité. L'influence de la couche d'argile sur les mesures de résistivité est notable, dans le cas de l'inversion des mesures d'une TRE, on parle de surestimation des couches conductrices entre des couches résistantes. Ainsi, la couche d'argile conductrice (donnée inversées) parait plus épaisse que son épaisseur réelle définie à la tarière ou d'après le pénétrogramme effectué au droit de la tarière n°3. L'alternance des couches de sable de différentes compositions apparait comme le second profil géoélectrique (cluster 2) prédominant.

Le sondage PANDA identifie les 4 premières couches lithologiques du sol, la transition entre chaque couche étant identifiée par une variation notable dans la courbe du pénétrogramme. A partir de 1,1m de profondeur, les sols rencontrés sont composés d'une alternance de sable-argileux à teneur en argile variable, ce que les mesures PANDA ne peuvent pas mettre en évidence du fait de l'absence de contraste notable dans le comportement mécanique de ces différentes couches de sols (même avec un pas de mesure de 0,5cm en moyenne).

La mesure du comportement mécanique des sols conduit à distinguer les différents horizons que sont la terre végétale, le sol organique et les graves. La mesure de la résistivité, principalement sensible à la teneur en eau des sols et à leur argilosité, ne permet pas de distinguer ces différentes couches de sols. La couche des argiles est quant à elle détectée par ces deux méthodes. La finesse des mesures PANDA conduit à déterminer précisément les côtes de la couche d'argile, tandis que les mesures géophysiques estiment sa présence par ses propriétés physiques.

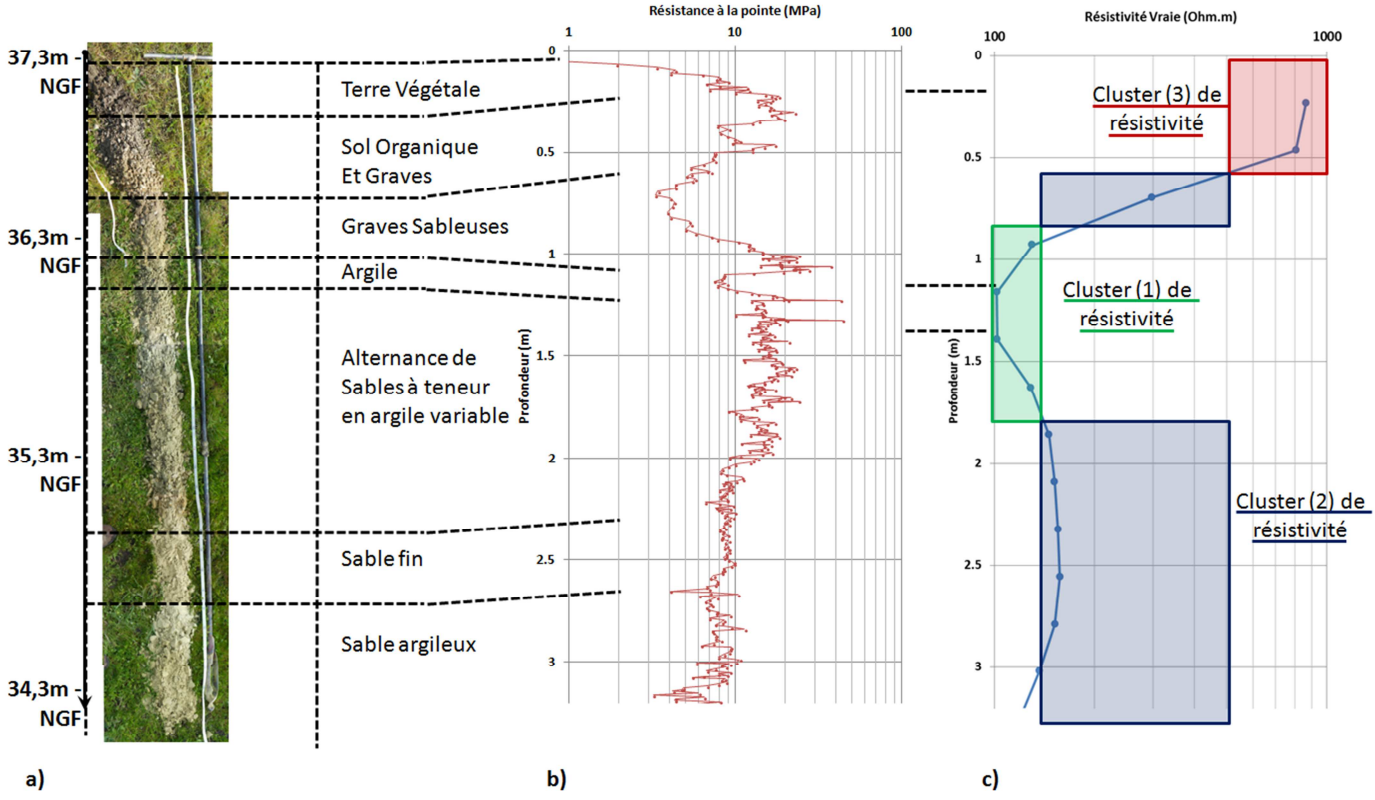


Figure 2.29 : Comparaison des mesures, a) Tarière n°3, b) PANDA, c) TRE02, x=30m.

4.3. Analyse verticale des données.

4.3.1. Tomographie de résistivité électrique.

En faisant l'hypothèse (§2.1.1.) que la structure des couches géologiques composant cette zone d'étude est principalement horizontale, il est possible d'aborder l'étude des TRE en cherchant à définir les principales formations géoélectriques. La détermination d'une couche géoélectrique est ici faite en fonction de la résistivité moyenne et de l'écart-type des résistivités mesurées à une même profondeur.

La Figure 2.30 illustre la répartition des résistivités vraies (après inversion) en fonction de la profondeur. Du fait de la discrétisation des blocs d'une TRE avec un dispositif dipôle-dipôle et un espacement interélectrode de 1,5m, la moyenne des résistivités vraies ainsi que l'écart-type associé sont calculés tous les 20cm. La Figure 2.30 représente un log des résistivités moyennes auxquelles est ajouté ou déduit l'écart-type des résistivités pour toutes les profondeurs considérées. La variation des résistivités selon les différentes profondeurs étudiées est également présentée en parallèle du log des résistivités mesurées, un exemple de cette fonction de répartition des résistivités étant donné pour chaque TRE à une profondeur de 4m. Les nuances de gris représentent la fonction de répartition des résistivités en fonction de la profondeur.

L'analyse de ces données est faite en combinant une lecture des résistivités moyennes en fonction de la profondeur, ainsi que de la variabilité (C.V.) des résistivités vraies au sein de chaque couche discrétisée par les résistivités moyennes. Pour TRE 01 les couches géoélectriques prédominantes sont entre 0-1m, 1-2m et 2-5m. On soulignera la forte hétérogénéité des couches géoélectriques de surface (C.V. > 0,4), tandis que la couche entre 2 et 5m présente une gamme de résistivité homogène sur toute son épaisseur (C.V.< 0,2). Les TRE 02 et 03 présentent un profil géoélectrique équivalent à TRE 01, à la différence de la couche entre 1 et 2m qui présente ici des variations de résistivité plus faible (C.V.<0,3). La TRE 04 présente une forte hétérogénéité des résistivités (C.V.>0,4) entre 0 et 4m de profondeur, et met en évidence des résistivités supérieures à 500Ω.m entre 1 et 2m de profondeur (présence localisée de déchets sous forme de granulats de béton). A partir de 5m de profondeur, les TRE présentent le même profil géoélectrique homogène (C.V.<0,2) avec des résistivités inférieures à 90Ω.m. On notera que la parcelle n°1 présente une forte hétérogénéité des structures géoélectriques entre 0 et 5m de profondeur, et une structure géoélectrique homogène en deçà de 5m de profondeur.

Au regard de la géologie de la parcelle n°1, ces différentes couches géoélectriques mettent en lumière l'hétérogénéité de la couche de terre végétale en surface (0-1m), de la couche de remblai à forte teneur en grave (1-2m) et des différentes successions de couches de sable et d'argile (2-5m), avant d'atteindre les argiles de décalcification du Miocène à partir de 5m de profondeur.

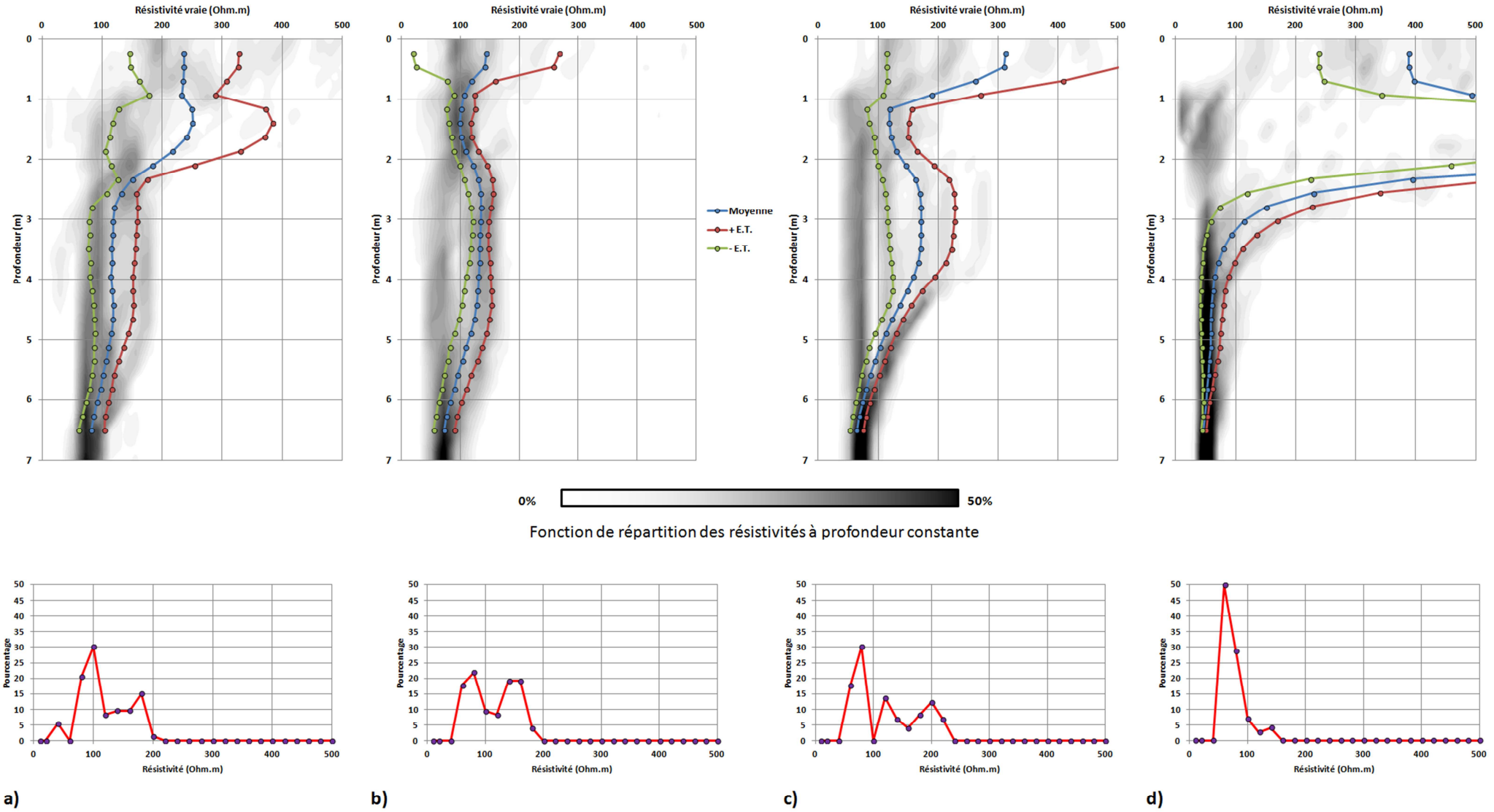


Figure 2.30 : Variation verticale des résistivités vraies et détail pour z = 4m de la fonction de répartition des résistivités vraies, a) TRE01, b) TRE02, c)TRE03, d)TRE04.

4.3.2. Sondages Pénétrométriques PANDA.

En gardant la même approche que l'analyse effectuée sur les tomographies de résistivité électrique, une étude comparable est menée sur les mesures issues des sondages pénétrométriques PANDA. Pour prendre en compte l'effet d'un pas de mesure variable (de l'ordre du millimètre au centimètre), les valeurs de résistance à la pointe dynamique (q_d) étudiées sont moyennées par tranche de 5cm.

La Figure 2.31a illustre la variation des valeurs de résistance à la pointe et la Figure 2.31c illustre leur dispersion en fonction de la profondeur. Sur les 7 sondages pénétrométriques réalisés au droit de la tomographie TRE02 (Figure 2.18) on calcule la moyenne des q_d de 0 à 4m de profondeur (refus des sondages) avec un pas de 5cm (Figure 2.31). L'écart-type des q_d mesurés à chacune des profondeurs est également déterminé.

Ces analyses permettent de faire ressortir plusieurs profils aux comportements mécaniques distincts. En premier lieu les zones de transition (*trans.*) peuvent être décrites par une augmentation des valeurs de q_d avec la profondeur et réparties sur de faibles épaisseurs (<0,4m). La première zone de transition est plus à rattacher à la couche de terre végétale. La zone 1, entre 0,6 et 1,1m de profondeur, est décrite par de faibles valeurs moyennes de q_d et une hétérogénéité importante (CV > 0,8 (Figure 2.31c)). La zone 2, entre 1,5 et plus de 4m de profondeur, présente des valeurs de q_d décroissantes avec la profondeur et une hétérogénéité faible (CV ≈ 0,2), cette variation pouvant être le signe d'une augmentation de la teneur en eau des sols (Bernard et al 2007). Cette hypothèse d'une teneur en eau augmentant avec la profondeur est appuyée premièrement par la diminution progressive des résistivités en deçà de 4 m de profondeur (Figure 2.30), et deuxièmement par le fait que le profil géologique comporte une couche d'argile imperméable au-dessous des calcaires du Miocène (NGF 30m). A cela s'ajoute l'observation d'eau de ruissellement en contre bas de la partie nord de la parcelle n°1, au niveau de l'incision de l'Ars.

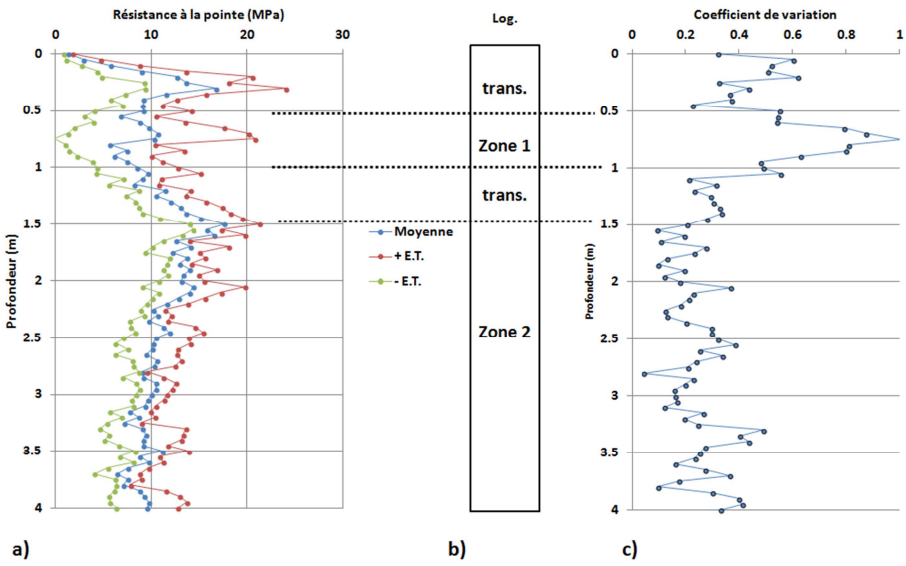


Figure 2.31 : Profil des résistances à la pointe, a) étude statistique, b) log estimé, c) coefficient de variation.

Au sein d'une couche de sol, la variation de la résistance à la pointe dynamique en fonction de la profondeur peut présenter 3 cas (Laurent, 2007) :

- une résistance à la pointe croissante en fonction de la profondeur (cas a)
- une résistance à la pointe diminuant en fonction de la profondeur (cas b)
- une résistance à la pointe constante en fonction de la profondeur (cas c)

L'ensemble de ces 3 cas, sont représentés à la Figure 2.32. Cette approche n'est valable que si les pénétrogrammes peuvent être discrétisés en des couches homogènes, la taille de ces couches peut être estimée d'après l'analyse de la variabilité verticale effectuée §4.3.2 et au regard des études menées par Laurent (2007), on estime la taille minimale des couches géomécaniques à 0,2m.

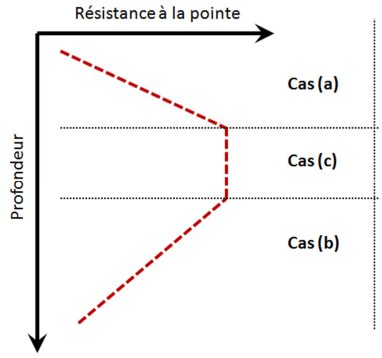


Figure 2.32 : Critères d'identification d'alternance entre les différentes couches géomécaniques.

Les différentes étapes de traitement d'un pénétrogramme sont synthétisées par la Figure 2.33, en prenant l'exemple du sondage effectué au droit de TRE02 à x=28m. La Figure 2.33a présente les données brutes d'un pénétrogramme ; la première étape consiste à calculer une moyenne des q_d mesurés par tranche de 5cm (Figure 2.33b), puis on étudie le critère de variation par tranche de 20cm (Figure 2.33c). Lorsque le signal est stable, la variation des valeurs de q_d en fonction de la profondeur est proche de 0. Donc lorsque la variation de q_d (pas de mesure constant) est compris entre -10 et 10%, on admet que le signal ne varie pas. De même, si la variation de q_d est inférieure à -10%, on admet que le q_d diminue, et si la variation est supérieure à 10%, le signal augmente. Suite à cette analyse, on remarque que 6 profils géomécanique peuvent être mis en évidence, à savoir :

- 0-0,6m : q_d stable en fonction de la profondeur : couche de la terre végétale.
- 0,6-1,2m : q_d augmentant avec la profondeur : couche de sables argileux.
- 1,2-2m : q_d stable en fonction de la profondeur : couche de sable et graves.
- 2-2,7m : q_d variable (pas de tendance) : succession de fines couches de sables et d'argiles.
- 2,7-3,2m : q_d stable en fonction de la profondeur : couche de sable.
- 3,2-4m : q_d variable (pas de tendance) : succession de fines couches de sables et d'argiles.

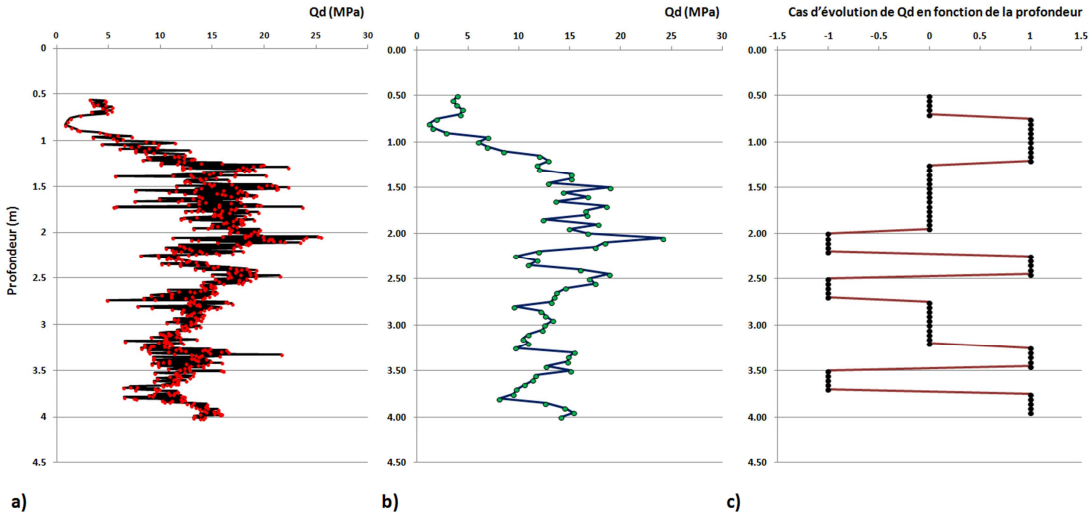


Figure 2.33 : Etapes dans la discrétisation de la variation de Qd en fonction de la profondeur.

Au regard des résultats obtenus de l'étude des évolutions des coefficients de variation des q_d en fonction de la profondeur (Figure 2.31), il ressort que l'étude de l'évolution de q_d avec les critères d'alternance des couches géoélectriques permet d'obtenir une meilleure discrétisation des différentes couches géomécaniques (zone 2 discrétisée en 3 couches distinctes). Soulignons également que cette approche peut être faite individuellement sur chaque pénétrogramme et permet ainsi de s'affranchir d'une étude moyenne sur l'ensemble d'une coupe.

4.3.3. Structuration verticale du sous-sol.

On prend les coefficients de variation (C.V.) comme étant des indicateurs de la variabilité des mesures, cette dernière étant soit liée au bruit de mesure, soit à la variabilité du terrain à l'échelle de la mesure. Les coefficients de variation des résistivités vraies et des résistances à la pointe dynamique sont calculés entre 0 et 4m de profondeur. La Figure 2.34 montre qu'en surface (0-1m), le coefficient de variation des résistivités vraies varie de 0,8 à 0,2, signifiant que les sols de surface sont plus hétérogènes, du point de vue des résistivités rencontrées, que ceux rencontrés en profondeur. Cette hétérogénéité des sols de surface est également notable du point de vue des résistances à la pointe. On note que les sols de surface présentent deux niveaux d'hétérogénéité, entre 0 et 0,5m (C.V. proche de 0,4), et entre 0,5 et 1m (C.V. proche de 0,8). A partir de 1m de profondeur, les résistivités et les résistances à la pointe (q_d) sont toutes deux moins variables, avec un coefficient de variation (C.V.) proche de 0,2.

Soulignons tout de même qu'une telle analyse n'est possible que sur des TRE représentant le sous-sol selon une coupe (2D). De ce fait, la généralisation de cette source d'information aux sols situés dans le voisinage proche du volume d'investigation des TRE est risquée puisque l'ensemble des TRE effectuées ne permettent pas d'obtenir une information continue (3D) de l'ensemble de la parcelle. De plus, le zonage du sol n'est pertinent que verticalement, ainsi l'hétérogénéité mécanique et géophysique horizontale des sols ne peuvent être déterminées par cette approche.

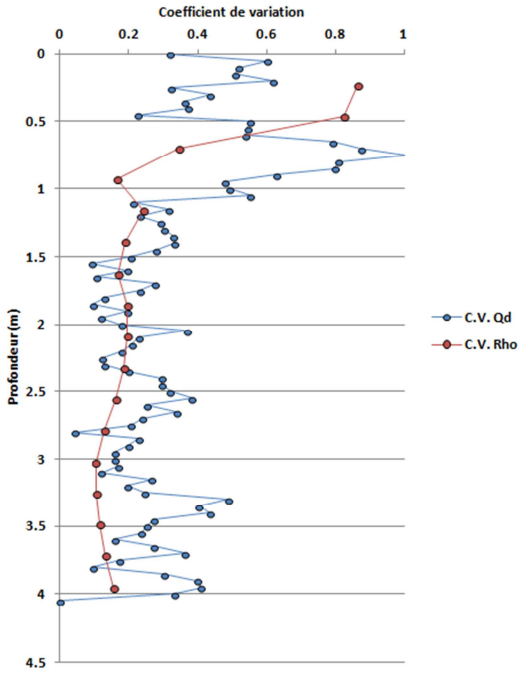


Figure 2.34 : Comparaison de la reconnaissance de l'hétérogénéité des sols par la géophysique et la géotechnique.

4.4. Combinaison de bases de données.

L'ensemble des informations obtenues en prospection accroit la compréhension du sous-sol, qu'il s'agisse de propriétés physiques ou de structuration spatiale. Cette réunion de diverses sources de données en un seul groupe/représentation par combinaison, vise à augmenter la connaissance des propriétés du sous-sol en valeur et distribution, elle vise aussi à réduire l'incertitude sur l'information résultante (Grandin 2006, Rouchouze 1994).

La Figure 2.35 représente la combinaison des résistivités vraies et de la classification GTR des sols. L'analyse de la Figure 2.35a met en évidence qu'un recoupement direct entre les classes GTR des sols et la résistivité vraie de ces derniers n'est pas concluant, car la classification des sols est associée à une analyse d'un échantillon de sol (remanié par le sondage à la tarière) et l'analyse de la TRE ne permet pas d'associer le point d'échantillonnage pour la détermination de la nature des sols à un volume représentatif de résistivité des sols. L'analyse par CHA, qui permet de se libérer d'une analyse spatiale de la répartition des résistivités, met en évidence que l'ensemble du cluster 2 (120-400 Ω.m) est essentiellement rattaché à des classes GTR B5, et que le cluster 3 (400-3000 Ω.m) est à rattacher à des classes GTR B2 et B4. Le cluster 1 (20-120 Ω.m) présente une grande variabilité de classes GTR à dominance argileuse (Figure 2.35b). Une délimitation de la répartition spatiale des différents clusters détermine 3 structures principales du sous-sol que sont :

- un sol de recouvrement à dominante argileuse jusqu'à 2,5m de profondeur,
- une couche à dominante sableuse en deçà de 2,5m de profondeur,

• une structure particulière localisée entre x=30m et x=42m, jusqu'à une profondeur de 1,5m présentant les caractéristiques d'un sol à dominante sable-graveleux argileux. Au regard des analyses précédentes, cette zone est également celle présentant de fortes valeurs de q_d.

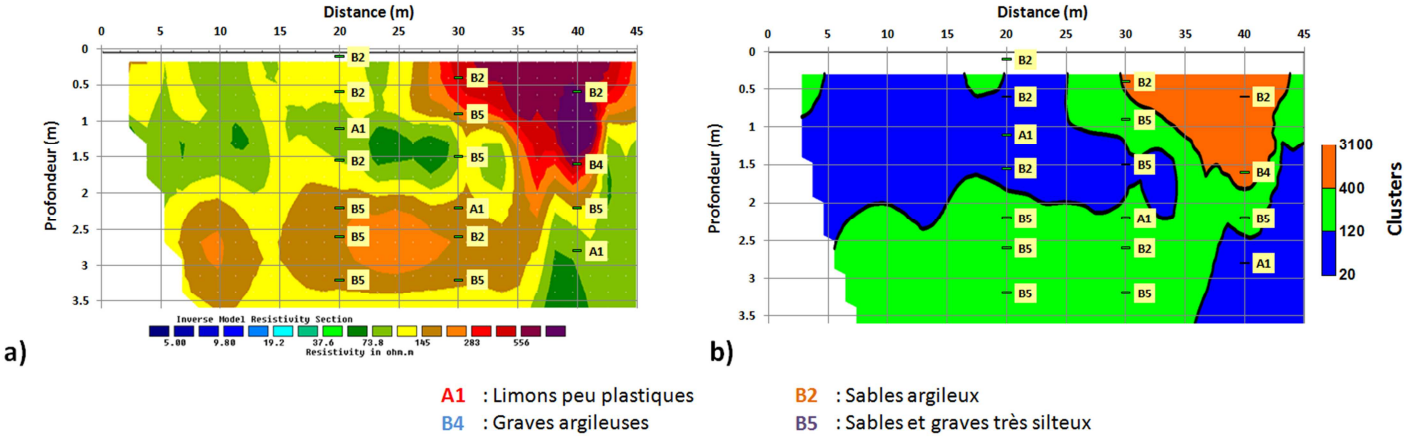


Figure 2.35 : Recoupement des données au droit de TRE02, a) GTR et résistivité, b) GTR et zonage de TRE.

4.5. Approche géostatistique, prospection électromagnétique.

Comme décrit dans le chapitre I, les mesures effectuées avec le matériel EM-31 en champ horizontal (tenu à 1m du sol) correspondent à 80% à une réponse des sols présents entre 0 et 3,4m de profondeur, les sols en deçà de 3,4m représentent donc 20% de la réponse. Ainsi 80% de la mesure EM-31 en champ horizontal correspond à un volume d'investigation atteignant 3,4m de profondeur. La profondeur d'investigation des mesures EM-31 (champ horizontal) et quant à elle de 1,8m (McNeill 1980). Notons également que d'après l'étude statistique des TRE (§4.3.1), les sols en deçà de 2m de profondeur sont géoélectriquement homogènes. Ainsi, les variations notables de conductivité apparente mesurées en EM-31 (champ horizontal) seront probablement imputables aux variations des propriétés physiques des sols dans la tranche de sol 0-2m.

Pour étudier au sein de la parcelle n°1, la variabilité des propriétés physiques du sous-sol dans la tranche de sol 0-2m, on utilise la géostatistique, reposant sur une étude de l'évolution de la variance en fonction de la distance entre deux points de mesure (Chapitre I). Cette étude permet de montrer les tendances et l'organisation spatiale des propriétés physiques du sous-sol. L'analyse variographique est focalisée sur la partie nord de la parcelle n°1 et sur la prospection électromagnétique effectuée en champ horizontal (Figure 2.14c). Cette analyse permet d'étudier la structuration spatiale des conductivités apparentes mesurées.

La carte variographique des résistivités apparentes (Figure 2.36a) montre une forte anisotropie avec une forte croissance de la variance dans la direction N150°. Les plus faibles variations de variance sont observables dans la direction N60°, permettant d'identifier les deux directions d'anisotropie. Ces directions sont à comparer à la géologie de la parcelle, et sont à rattacher à l'orientation de la limite topographique causée par l'incision de l'Ars (Figure 2.3c). Les variogrammes expérimentaux des

résistivités apparentes sont calculés pour ces directions principales d'anisotropie avec une tolérance angulaire de 10° en dix pas de 5m avec une tolérance sur la distance égale à la moitié du pas (pas de mesure constant selon un maillage 5x5m²). Le modèle de variogramme théorique qui est ajusté à ces variogrammes expérimentaux est stationnaire dans la direction N60° et non stationnaire dans la direction N150°. Le modèle expérimental est une somme d'un modèle de type exponentiel et d'un modèle de type puissance, dont les formules sont décrites par l'Équation 2.4.

Équation 2.4

$$\boldsymbol{\gamma(h) = 115 * \left(1 - exp^{\left(-h/\alpha\right)}\right) + 355 * \left(h/\beta\right)^{1,2}}$$

avec, dans la direction N60° : $\alpha = 20$ $\beta = 240$
dans la direction N150° : $\alpha = 300$ $\beta = 50$

h : distance séparant deux points d'une paire.

Les variogrammes des résistivités apparentes (Figure 2.36b) ne contiennent pas d'effet de pépite (Chapitre I), quelle que soit la direction d'anisotropie, signifiant que les mesures ne sont pas affectées par des erreurs d'acquisition des données et que la transition entre les différentes valeurs de résistivité est continue. Dans la direction N60°, le variogramme présente un palier, indiquant que la variable est stationnaire, avec une portée des résistivités de 20m, distance à partir de laquelle deux mesures sont indépendantes (Goovaert 1999, Kinal et al 2006). Dans la direction N150°, le variogramme ne présente pas de palier et suit une croissance parabolique. Cette évolution indique que la variable n'est pas stationnaire à une échelle d'une centaine de mètres, présentant donc une dérive.

Dans ce cas d'étude, la grille d'interpolation est la même que la grille de mesure. Ainsi, le krigeage et l'analyse préalable des données sont principalement utilisés pour identifier et filtrer les mesures se détachant trop de l'évolution générale des résistivités au sein de l'ensemble de la parcelle (variogramme), tels que des points isolés présentant une variation de résistivité apparente d'un ordre de grandeur vis-à-vis de ses points voisins ou pour lesquels l'impact de la clôture métallique biaise les mesures (contours de la parcelle).

Avec les modèles théoriques de variogramme, on estime par krigeage des résistivités apparentes des mesures filtrées. Le résultat est présenté sur la Figure 2.36c. La position des points de mesure est indiquée par des croix noires sur la carte. La carte des résistivités apparentes présente des valeurs conductrices à l'ouest de la parcelle, principalement associées à la présence d'une clôture grillagée, affectant les mesures EM31 sur plus de 5m. On note également la présence d'une anomalie conductrice orientée suivant la direction N60°. L'hétérogénéité mise en avant au sein des TRE est donc en partie causée par la présence de cette anomalie orientée N60°, autour de laquelle sont présentes des formations géoélectriques.

La carte d'écart-type de krigeage (Figure 2.36d) permet d'évaluer la précision de l'estimation en chaque point de la zone étudiée. La Figure 2.36d indique principalement des erreurs d'estimation inférieures à 0,5 Ω.m, ces erreurs sont plus notables au niveau des points filtrées (erreurs de mesure et anomalies ambiantes causées par des éléments enfouis), ne dépassant pas 5 Ω.m. La Figure 2.36d indique que les estimations de résistivité apparente sont fiables au sein de la parcelle étudiée.

L'étude des variogrammes théoriques permet également d'estimer la taille de zones aux propriétés physiques homogènes. On peut estimer ces zones d'après la portée du variogramme dans la direction N160° à 20m. De ce fait, le zonage de la première couche des TRE (0-1,5m) ne peut être raisonnablement effectué qu'avec des ''blocs'' de dimension proches de 20m, permettant également d'optimiser le pas de mesure.

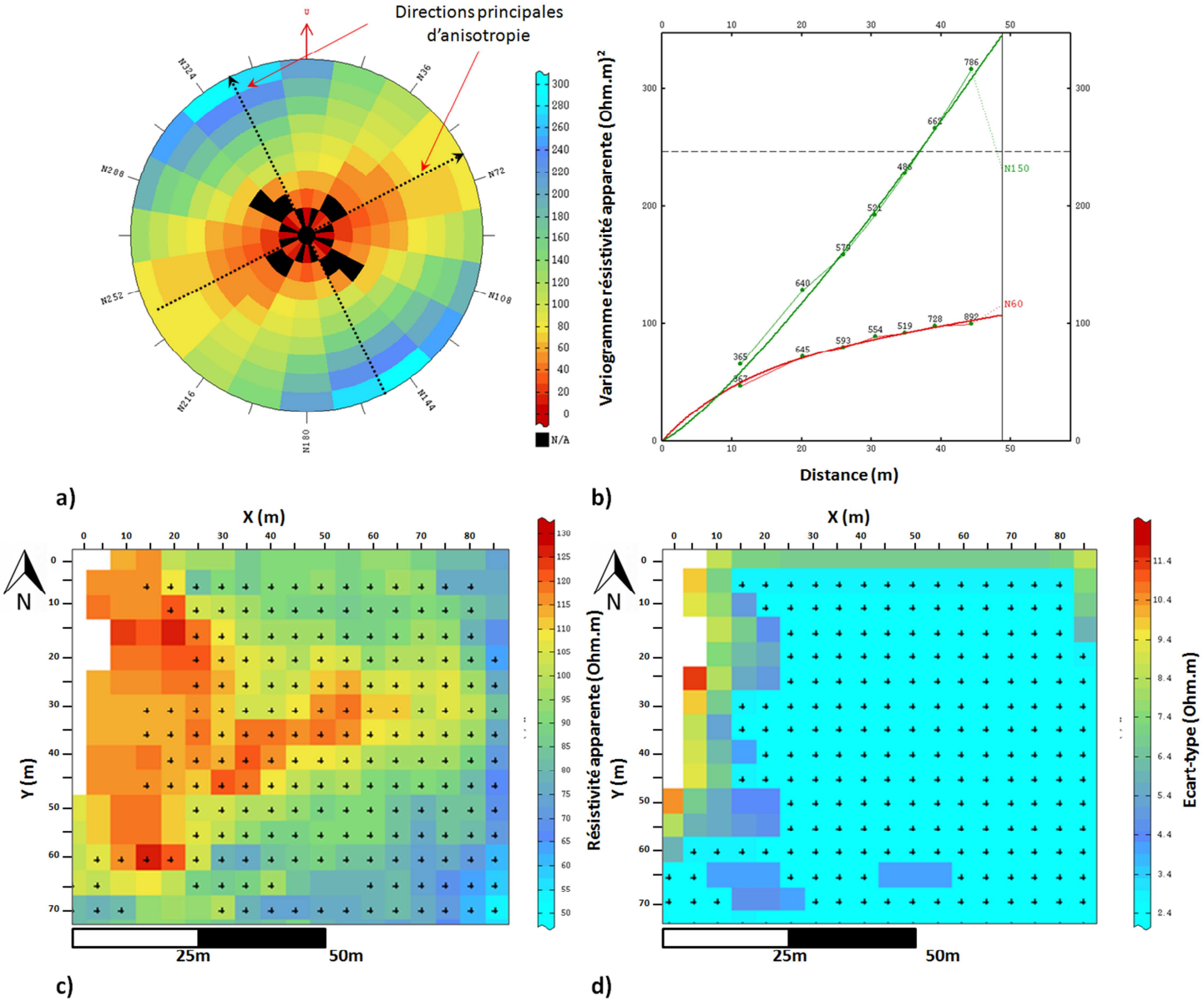


Figure 2.36 : Cartes obtenues par la méthode de krigeage des résistivités apparentes, a) carte variographique, b) variogramme expérimental et théorique ajusté selon les directions principales d'anisotropie, c) carte obtenue par krigeage, d) carte d'écart-type de krigeage correspondant.

4.6. Résultats, reconnaissance de la variabilité du sous-sol, parcelle n°1.

L'ensemble des mesures géophysiques effectuées sur la parcelle n°1 a permis d'effectuer en premier lieu un zonage de la parcelle en termes de résistivité des sols, donc de profils géoélectriques. Les cartographies ARP, OhmMapper et EM-31 ont permis de prendre en compte la distribution spatiale des propriétés physiques des sols. Le grand nombre de méthodes utilisées a permis d'appuyer le choix de la méthode à grand rendement la plus efficace pour effectuer une prospection de la parcelle en fonction de la visée de la campagne de mesure et des structures recherchées. Nous avons également montré qu'une combinaison de TRE avec une méthode à grand rendement conduit à avoir une description détaillée de la distribution spatiale des propriétés physiques du sous-sol. L'ensemble des observations ont conduit à mettre en évidence que les sols de surface (0-1 à 0-2m) présentent une anomalie résistante localisée dans la partie nord de la parcelle n°1.

Cette étude géophysique préalable permet à ce stade une première localisation des essais géotechniques à réaliser, mais également, à quelle profondeur les mesures les plus pertinentes doivent être menées. En cela, la prospection EM-31 permet d'estimer un maillage des principales zones géoélectriques au sein de la parcelle. L'étude géostatistique de cette cartographie (§4.5.) estime une portée des mesures à 20m dans la direction N60°. De cette analyse, trois TRE peuvent être raisonnablement implantées parallèlement à 25m d'intervalle, orientées N160° pour effectuer une reconnaissance verticale de la variabilité des propriétés physiques des sols au droit des principales zones. L'analyse par CHA de l'ensemble des résistivités (§4.1.) conduit à identifier trois couches géoélectriques principales au droit des TRE, ainsi que leur continuité latérale sur l'ensemble de la parcelle.

L'implantation des sondages PANDA au droit des TRE a pour but de quantifier le comportement mécanique des trois couches géoélectriques identifiées par les prospections géophysiques (§2.2.1.). Au regard de la répartition spatiale des différentes structures géoélectriques, et de leur épaisseur (une mesure de Qd traditionnellement effectuée tous les 5cm), il ressort que parmi les 21 sondages PANDA réalisés, ceux permettant d'obtenir le plus d'information sont localisés pour :

- TRE01 : x=52m (cluster 1) x=20m (cluster 2) x=40m (cluster3)
- TRE03 : x=55m (cluster 1) x=18m (cluster 2) x=38m (cluster3)
- TRE04 : x=50m (cluster 1) x=10m (cluster 2) x=32m (cluster3)

On remarque également qu'au regard de la distribution spatiale de la structure géoélectrique associée au cluster n°3 (bande de 8m de largeur et 1-2m d'épaisseur), on peut souligner la pertinence d'effectuer une étude géoélectrique préalable à l'implantation des essais géotechniques. En cela, l'exécution des prospections géophysiques préalablement aux prospections géotechniques, permet d'une part de mieux implanter ces essais, et d'autre part de mieux exploiter les mesures des propriétés mécaniques en se basant sur les liens mis en évidence entre physiques et techniques pour généraliser le comportement mécanique des sols à l'ensemble des volumes investigués par les mesures géophysiques.

5. Conclusion.

La combinaison de l'ensemble des données montre l'intérêt de la géophysique dans la reconnaissance d'une parcelle. Les mesures effectuées avec l'ARP, l'OhmMapper et l'EM-31 permettent de cartographier la distribution spatiale de la résistivité des sols pour différentes profondeurs d'investigation. La parcelle peut ainsi être zonée en fonction des profils géoélectriques majeurs constituant le sous-sol. Dans ce cas d'étude, la parcelle est représentée comme ayant un profil géoélectrique relativement homogène en surface sur l'ensemble de la parcelle et d'une zone (5x50m²) nettement résistante dans la partie nord de la parcelle n°1.

Les mesures de TRE effectuées sur cette parcelle visent à déterminer l'évolution en fonction de la profondeur du profil géoélectrique de surface mis en évidence avec la cartographie EM. L'analyse des TRE conduit à dire que le profil géoélectrique de surface ne dépasse pas une profondeur de 2m sur l'ensemble de la parcelle. Les coupes de résistivité obtenues après inversion décrivent localement (sur les coupes) les variations verticales et horizontales des profils géoélectriques. Il ressort de l'étude des TRE que l'hétérogénéité résistante mise en évidence dans la partie nord de la parcelle n°1 est présente sur une épaisseur de 1,5 à 2m. Plus en profondeur, les TRE mettent en avant un profil géoélectrique présentant une hétérogénéité horizontale plus marquée qu'en surface. Au regard de la géologie du site, cette hétérogénéité horizontale peut être causée par la présence d'une alternance de couches de sable-argileux avec une teneur en argile variable.

L'ensemble des sondages PANDA ont conduit à quantifier le comportement mécanique des profils géoélectriques mis en évidence par les méthodes géophysiques. Vis-à-vis de la localisation des sondages PANDA, les mesures géophysiques ont permis de localiser de façon pertinente les sondages pour permettre d'obtenir un maximum de mesures du comportement mécanique pour chaque profil géoélectrique traversé (épaisseur des profils suffisant). Chaque profil géoélectrique a pu être quantifié par un ou plusieurs comportements mécaniques prédominants.

L'ensemble des méthodes a permis d'obtenir rapidement une représentation de la structure géoélectrique du sous-sol. Un zonage du sous-sol a pu être effectué selon les structures principales.

- La première, en surface (0-2m), correspondant à une couche de sol remanié/remblais présente des résistivités élevées. Les mesures géotechniques ont montré que le comportement mécanique de ces sols est hétérogène principalement du fait de la nature lithologique des sols.

- La deuxième, intermédiaire (2-5m), correspond à une alternance de couches sable-argileux avec des teneurs en argile variables. Les mesures géotechniques ont montré que le comportement mécanique de ces sols est homogène pour la tranche de sol correspondant à ce profil géoélectrique.

- La troisième, en profondeur (5m et plus), associée à la présence des argiles de décalcification des calcaires du Miocène.

Soulignons que les résultats apportés par cette analyse ne sont valables qu'au sein des TRE effectués sur le site. La généralisation de l'information à l'ensemble de la parcelle ne peut se faire que dans le cas où le nombre des TRE effectuées est suffisant pour décrire les variations horizontales et verticales des propriétés physiques du sous-sol (interpolation entre TRE).

Cependant, comme vu dans le paragraphe 3.4., il existe un lien notable entre les mesures TRE et les mesures EM-31 dans le sens où, à une structure géoélectrique correspond une réponse électromagnétique unique. En se basant sur ce fait, le chapitre suivant a pour objectif d'étudier la possibilité de modéliser l'ensemble des résistivités du sous-sol. Cette étude a pour but de combiner les résultats de mesures électromagnétiques et de TRE, toutes deux étant des prospections dites 2D, mais dont les plans de représentation des données sont perpendiculaires (carte horizontale et coupe verticale). L'objectif de cette étude est de pallier au manque de données et aux limites de l'interpolation des mesures et des résultats du présent chapitre entre les TRE effectués au sein de la parcelle.

CHAPITRE III

MODÉLISATION 3D DU SOUS-SOL COMBINAISON DE DONNÉES GÉOPHYSIQUES

La problématique soulevée dans le Chapitre II est liée à la difficulté de représentation de la variabilité des sols dans son volume, à savoir que chaque méthode utilisée ne permet d'étudier la variabilité des sols que selon une orientation ou un profil. Nous allons, sur la base des informations fournies par la tomographie de résistivité électrique et la cartographie électromagnétique développer une méthode de reconstruction des propriétés dans le volume. On établira un modèle 3D des résistivités vraies du sous-sol en interpolant les résistivités vraies entre TRE parallèles en se basant sur les variations latérales des résistivités apparentes observées avec une cartographie électromagnétique effectuée au droit des TRE. Le processus mis en place consistera à estimer la résistivité vraie du sous-sol par la modélisation de Proche en Proche (PeP) d'une succession de TRE dont l'évolution horizontale des résistivités est guidée par les résistivités apparentes mesurées en électromagnétique.

1. Bases bibliographiques et bases de développement.

Les conclusions du Chapitre I §II.2, appuyées par les études de Young et al (2001) illustrent le fait que la reconnaissance des sols vise principalement à estimer le comportement mécanique, ainsi que la variabilité des propriétés physiques des différentes structures composant le sous-sol, et donc de déterminer la répartition spatiale des zones présentant un aléa.

Le Chapitre II a soulevé le problème qu'a un prospecteur pour généraliser à l'ensemble d'une parcelle des informations issues de sondages dits ponctuels. Cette limite à la généralisation de l'information repose sur le fait que la description des propriétés d'une parcelle (physiques et mécaniques) n'est pas continue, mais sous forme de coupe (TRE, sismique,…), de forage (tarière, pénétromètre,…), ou de mesure ponctuelle (EM, réponse d'un volume d'investigation). Ces prospections traditionnelles ne représentent la variabilité du sous-sol qu'au travers de volumes limités dans l'espace. Le Chapitre I §II.3, a souligné l'intérêt d'utiliser de façon combinée un ensemble de méthodes, permettant d'améliorer la généralisation de l'information issue de telle ou telle méthode à l'ensemble de la parcelle considérée.

Le paragraphe suivant est une revue bibliographique complémentaire au chapitre I, basée sur la combinaison de données géophysiques, permettant d'appuyer les bases du développement de la reconnaissance 3D des résistivités du sous-sol.

1.1. Bibliographie sur la modélisation 3D du sous-sol.

Actuellement, les recherches académiques et industrielles sont portées sur la détermination de la distribution spatiale des structures et des phénomènes géologiques. L'ensemble de ces avancées vise à réduire les incertitudes géologiques dans l'espace (gestion du sous-sol) et dans le temps (maîtrise des risques), comme l'illustre le projet de recherche GéoFrance (Achache et al 1997).

1.1.1. Cartographie à plusieurs profondeurs d'investigation.

Comme expliqué dans le Chapitre I §II.1.2.3, la profondeur d'investigation d'une prospection électromagnétique dépend principalement de la distance entre les bobines (émettrices et réceptrice), mais également de la fréquence du champ électromagnétique primaire. Ce deuxième point est exploité lors des prospections électromagnétiques aéroportées et prospections à grand rendement (Lane et al 2000, Shirzaditabar et al 2011). Le principe de la prospection électromagnétique aéroportée à fréquences multiples est de créer en un temps réduit (inférieur à 2ms) un signal composé d'une succession d'impulsions de 15 fréquences différentes. Ainsi, en chaque coordonnée de la prospection (latitude, longitude), il est possible d'obtenir une cartographie sur 15 niveaux d'investigation de la variabilité des propriétés physiques des sols. Bien que nécessitant une capacité de calcul importante (Sasaki 2001), une inversion des mesures en résistivités apparentes permet d'obtenir une cartographie 3D des structures géoélectriques du sous-sol.

Cette approche peut également être mise en œuvre en prospection pédestre avec l'EM-31 selon ses deux profondeurs d'investigation (champ vertical et horizontal), et l'EM-38 qui autorise trois profondeurs d'investigation (possibilité d'effectuer une prospection avec un angle du champ primaire à 45°) ; mais les possibilités d'inversion des données sont limitées car pour chaque mesure électromagnétique une infinité de modèles de structures géoélectriques sont compatibles avec les mesures (le problème d'inversion est très largement sous-conditionné). Le fait d'avoir uniquement 2 ou 3 profondeurs d'investigation permet éventuellement d'identifier la résistivité de la couche la plus en profondeur, mais ne permet pas d'estimer le nombre de couches investiguées, ni même la résistivité de ces dernières (principe de la mesure en champ de propriété et de la résistivité apparente). De ce fait, un sondage est nécessaire pour caler au moins les épaisseurs des différentes couches géologiques rencontrées.

La succession de cartographies avec différents volumes d'investigation se retrouve avec des prospections électriques (Andrenelli et al 2013). La juxtaposition de plusieurs cartographies à volume d'investigation croissant permet d'estimer l'évolution verticale et horizontale des propriétés physiques des sols. Le processus d'inversion des résistivités apparentes n'est concluant (nombre limité de modèles de terrain possible) que si la prospection présente un nombre suffisant de niveaux d'investigation. Par exemple, les prospections ARP (André et al 2012) ne permettent pas d'effectuer d'inversion des mesures, tandis que les prospections menées avec 5 niveaux de prospection (Lueck et al 2013) permettent d'inverser les mesures apparentes au sein des profils présentant le plus d'intérêt (analyse de la variabilité verticale des résistivités vraies, selon des profondeurs vraies).

1.1.2. Juxtaposition de coupes parallèles.

La reconnaissance 3D de la structure du sous-sol peut être atteinte par la juxtaposition de plusieurs coupes verticales. L'étude menée par Ekinci et al (2007) vise à effectuer une reconnaissance 3D de la variabilité spatiale des propriétés physiques du sous-sol pour guider la fouille de structures archéologiques. Pour estimer la résistivité vraie des sols non prospectés entre les profils TRE, on interpole linéairement entre les TRE espacées de 1,5m, permettant de décrire l'ensemble des résistivités au sein du volume délimité par les TRE les plus distantes. Cette décision d'implanter de façon parallèle des TRE a également été prise dans le Chapitre II §2.2.1, avec la mise en place de sept TRE au sein de la parcelle n°1. La juxtaposition des TRE permet d'étudier l'évolution verticale des structures géoélectriques du sous-sol, et d'appréhender leur évolution horizontale en fonction du positionnement des différentes structures au sein des TRE. Cependant l'information ne peut être généralisée aux parties de la parcelle non couvertes par ces TRE. De ce fait, des zones d'ombre quant à l'évolution verticale et horizontale des résistivités peuvent apparaître.

1.1.3. Reconnaissance directe d'un volume.

La reconnaissance directe de la totalité du volume d'une parcelle peut être effectuée avec une prospection électrique 3D, soit en implantant les électrodes sur la totalité du périmètre de la parcelle (Argote-Espino et al 2013), soit en implantant les électrodes sur l'ensemble de la parcelle (Marescot 2008) avec un espacement inter-électrodes répondant à un dispositif 2D (Chapitre I §II.1.2.2), ou en injectant le courant au sein d'un forage à différentes profondeurs et en mesurant la différence de potentiel en surface du sol pour des points rayonnant autour du forage (Ho 2009). L'inversion de ces données est possible avec le logiciel Res3dinv ou avec des applications développées spécifiquement pour les dispositifs mis en place. Ces types de prospection permettent de décrire les structures géoélectriques du sous-sol selon les résistivités et profondeurs vraies, localisant précisément les anomalies majeures d'une parcelle ou l'évolution spatiale des couches géoélectriques.

1.1.4. Interpolation des données : créer une continuité entre les mesures.

La prospection géophysique du sous-sol repose traditionnellement sur une implantation de campagnes de mesures permettant d'obtenir une représentation ponctuelle, selon une coupe ou une cartographie de la variabilité spatiale des propriétés physiques. La continuité de l'information entre ces différents points de mesure s'appuie soit sur un modèle de terrain supposé (géologie), soit sur une interpolation des données, soit sur des hypothèses. On notera comme exemples d'hypothèses celle de la tabularité des structures géologiques pour la véracité des essais de sismique réfraction, et celle selon laquelle la résistivité ne varie que dans le plan à l'aplomb de la ligne de mesure (et non dans la direction perpendiculaire) pour l'inversion des TRE (Lagabrielle 2007) A noter que l'utilisation de l'interpolation linéaire ou du krigeage par géostatistique ne conduit qu'à estimer les propriétés réelles du sous-sol.

Les prospections actuelles nécessitent :

• une capacité de calcul importante pour inverser les résultats d'une prospection électromagnétique à fréquences d'investigation multiples,

• d'effectuer un nombre suffisant de cartographies à des niveaux d'investigation différents pour pourvoir inverser les mesures de résistivité apparente,

• d'avoir un nombre de points de mesures suffisants pour effectuer une interpolation linéaire, ou un krigeage par géostatistique des données non mesurées.

1.2. Bases du processus PeP, liens entre mesures électromagnétiques et électriques.

L'objectif du processus de modélisation de Proche en Proche (PeP) est de répondre à la problématique de la reconnaissance 3D du sous-sol en combinant deux sources d'information, à savoir les TRE et la cartographie EM, dans l'objectif de modéliser un ensemble de TRE parallèles entre elles en basant le calcul des résistivités constituant les TRE modélisées d'après les variations latérales des résistivités apparentes mesurées par les cartographies EM.

Cette relation entre les données issues de mesures électromagnétiques et les TRE est le sujet de nombreuses études visant à modéliser la réponse électromagnétique des sols face à une structure des sols connue (Tabarovsky et al 1996, André et al 2012, Rödder et al 2013, Li et al 2013). Par souci de compréhension, les mesures de conductivité apparente par méthode EM seront nommées « mesures de surface », illustrant la réponse par mesure électromagnétique des structures géoélectriques sous-jacentes.

1.2.1. Approche 1D.

Le premier niveau d'analyse aborde le problème de la reconnaissance de la variabilité des propriétés physiques des sols par une modélisation 1D du sous-sol (McNeill 1980). La Figure 3.1 illustre un cas d'étude avec 3 couches de sol. Dans le but de rendre cet exemple plus proche des investigations effectuées dans le cadre de cette thèse, une couche de 1m d'air illustrant la hauteur à laquelle est maintenu le dispositif de mesure est intégrée à cet exemple. Le calcul de la conductivité apparente pour la structure de sol considérée est illustré par l'Équation 3.5.

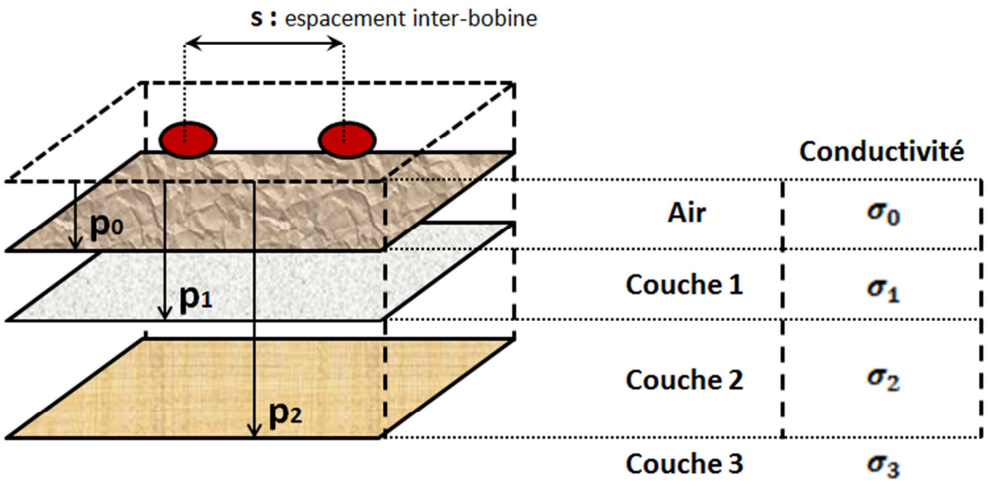


Figure 3.1 : Modèle de sous-sol à 3 couches.

Équation 3.5

$$\sigma_{app} = \sigma_0\left(1 - R_{\underset{v}{h}}z_0\right) + \sigma_1\left(R_{\underset{v}{h}}z_0 - R_{\underset{v}{h}}z_1\right) + \sigma_2\left(R_{\underset{v}{h}}z_1 - R_{\underset{v}{h}}z_2\right) + \sigma_3(R_{\underset{v}{h}}z_2)$$

La conductivité de l'air étant nulle, l'Équation 3.5 peut être simplifiée en :

$$\sigma_{app} = \sigma_1\left(R_{\underset{v}{h}}z_0 - R_hz_1\right) + \sigma_2\left(R_{\underset{v}{h}}z_1 - R_hz_2\right) + \sigma_3(R_{\underset{v}{h}}z_2)$$

avec : σ_i : conductivité de la couche i

p_i : profondeur de la couche i

s : espace inter-bobine

$z_i = {}^{p_i}/_{s}$: profondeur normalisée de la couche i

$R_{\underset{v}{h}}z_i$: contribution de la couche i, avec une orientation du champ EM horizontal (h) ou vertical (v).

Pour rappel, la fonction R_hz, rendant compte de la sensibilité relative du dispositif de mesure, en champ horizontal (et R_vz, en champ vertical), aux différents matériaux en fonction de la profondeur, est décrite par l'Équation 3.1. La profondeur z est la profondeur de la base de la couche considérée (p) normalisée par l'écartement entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice (s).

Équation 3.1

$$R_vz = \frac{1}{(4.z^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}$$

$$R_hz = (4.z^2 + 1)^{\frac{1}{2}} - 2z$$

Pour cette approche 1D, on fait l'hypothèse de couches géoélectriques d'extension latérale infinie (vis-à-vis du volume d'investigation), permettant de rattacher une mesure EM à la réponse en surface d'une colonne de sol dont on connait la succession des différentes couches géoélectriques. Une limite majeure de cette approche est qu'elle ne peut pas intégrer les cas présentant une anomalie (conductrice ou résistante) dans le voisinage proche de ladite colonne de sol étudiée.

1.2.2. Approche 2D.

Les études visant à analyser l'impact d'anomalies dans le voisinage proche d'un point de mesure se sont développées avec la recherche d'objets métalliques enterrés. Un ensemble de prospections menées par Westphalen et al (1992) met en évidence une distance (d) à partir de laquelle une anomalie (dans l'étude, un baril) en profondeur (p) affecte la mesure de conductivité d'un milieu homogène par une variation notable de la mesure de l'inphase (susceptibilité magnétique des mesures, Chapitre I). L'analyse de la Figure 3.2 permet d'estimer la zone au sein de laquelle la mesure de la conductivité apparente du milieu est modifiée par la présence de l'anomalie conductrice. Pour un baril enterré à la coordonnée x=25 pieds, la valeur de l'inphase est affectée entre x=18 et x=32 pieds, ce qui indique un rayon d'influence de 14 pieds au droit de l'anomalie (avec 10 pieds = 3,048m).

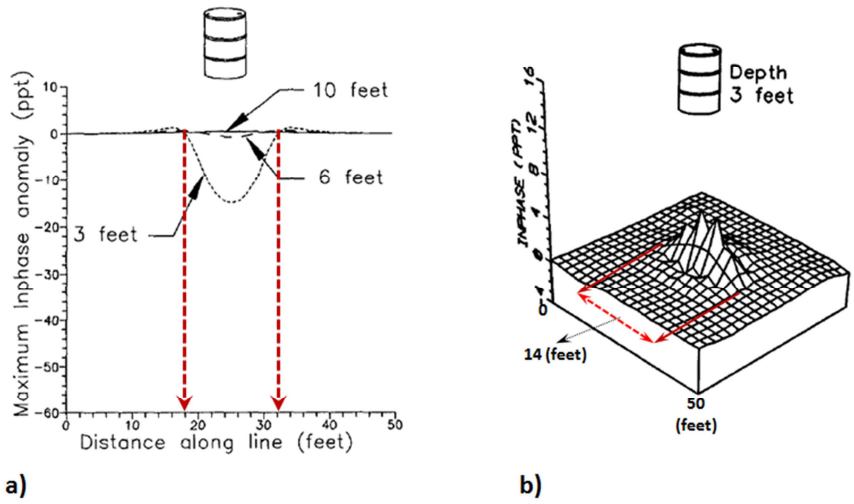


Figure 3.2 : Impact d'une anomalie conductrice sur la mesure de conductivité d'un milieu homogène, a) le long d'un profil, b) en cartographie (d'après : Westphalen et al 1992).

Nous avons souligné avec l'Équation 3.1 que la sensibilité du dispositif de mesure EM n'est fonction que des différents matériaux situés à la verticale du point de mesure, ne prenant pas en compte les structures dans le voisinage proche. L'approche 2D nous permet de montrer que les mesures EM sont également sensibles aux structures présentes dans un environnement proche de la mesure, et les études de Kang et al (2013) montrent que la sensibilité horizontale est comparable à celle de la sensibilité verticale. Dans le cadre d'un dispositif EM-31 avec une orientation horizontale du champ électromagnétique, la fonction permettant de déterminer la sensibilité de la mesure en surface aux

différentes couches présentes en profondeur est donnée par l'Équation 3.1, citée précédemment pour le cas d'une étude 1D.

Au regard de ces études, il est possible de formuler la sensibilité d'une mesure en un point x par l'Équation 3.2, permettant de prendre en compte l'ensemble des formations présentes autour du point de mesure en fonction de l'espacement entre bobines (s), de leur distance en surface (d) vis-à-vis du point de mesure et de leur profondeur (p) vis-à-vis du point de mesure considéré (Annexe 3.1).

Équation 3.2

$$R_h z = \left(4.e^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}} - 2.e$$

sachant : $e = \frac{\sqrt{d^2+p^2}}{s}$

Cette équation rend possible la prise en compte, pour tout point d'un profil, de l'effet qu'une structure géoélectrique peut avoir sur la conductivité électrique mesurée en un point x. La Figure 3.3 permet d'observer que pour une mesure de conductivité apparente avec un dispositif EM-31 en champ horizontal à 1m du sol, 80% de la conductivité apparente calculée en x=0m est fonction des structures géoélectriques présentes dans une demi-sphère de 4m de rayon.

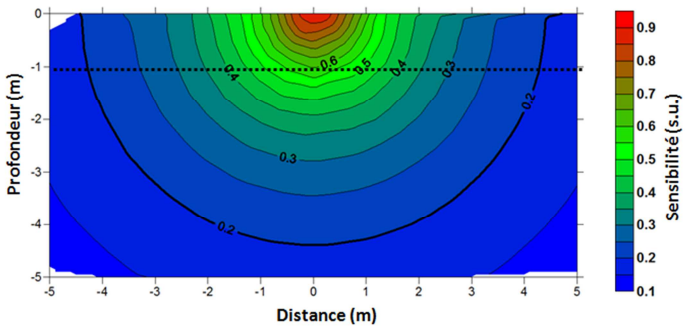


Figure 3.3 : Sensibilité des mesures EM-31 en champ horizontal.

Ainsi, il est possible de formuler l'Équation 3.3, permettant de calculer la conductivité apparente en surface en un point x en prenant en compte la structure 2D du sous-sol sous-jacente. Le sous-sol à l'étude est discrétisé en *c* colonnes, elles-mêmes discrétisées en *n* couches. Un exemple d'application de cette approche avec une structure tri-couche discrétisée en 3 colonnes est présenté en Annexe 3.1.

Équation 3.3

$$\sigma_{app} = \frac{\sum_{j=1}^{c}\sum_{i=1}^{r}\left(\sigma_i^j . k_i^j\right)}{\sum_{j=1;i=1}^{c;n}\left(k_i^j\right)}$$

avec : $k_i^j = R_h z_{i-1}^j - R_h z_i^j$ $\qquad R_h z_n = 0$

c : nombre de colonnes $\qquad$ r : nombre de couches au sein de la colonne j.

σ_i^j : conductivité de la $i^{ème}$ couche au sein de la $j^{ème}$ colonne.

Une lecture des résultats montre que 80% de la réponse du sous-sol dans une mesure EM est fonction des matériaux présents dans une demi-sphère d'un rayon *r* de 4m de rayon située sous le point de mesure (Figure 3.4a). Pour effectuer un parallèle avec la cartographie EM-31, chaque point de mesure peut être associé à une réponse de matériaux présents dans un voxel (Figure 3.4a), représenté en surface par un pixel carré de côté *L*. Il ressort donc qu'un voxel de 5,8m de côté et 4m de hauteur est équivalent en termes de volumes à la demi-sphère d'une mesure EM. En cela, un point de mesure EM en un point {x ; y} est essentiellement fonction de la structure géoélectrique du sous-sol comprise dans une colonne représentée en surface par un pixel de 5,8x5,8m² et d'une hauteur de 4m. Cette approche de la représentativité des mesures EM vis-à-vis de la structure du sous-sol sous-jacente est abordée par Tabbagh et al (2000).

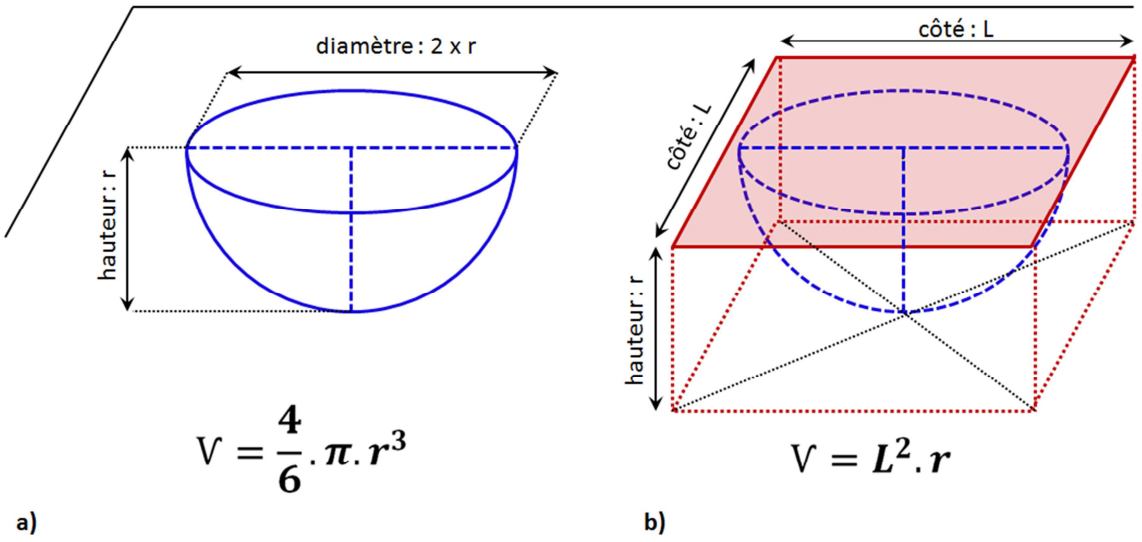


Figure 3.4 : Volume d'investigation d'une mesure EM-31, a) sous forme de demi-sphère, b) sous forme de voxel.

1.2.3. Données du site expérimental.

A partir des structures géoélectriques mises en évidence par les TRE01-02-03 et 04, on calcule d'une part la réponse électromagnétique en surface qu'il serait possible de mesurer en champ électromagnétique horizontal en appliquant les équations de McNeill (Équation 3.1) par une approche 1D de la structure géoélectrique du sous-sol. D'autre part, on calcule la réponse électromagnétique du sous-sol en prenant en compte la structure géoélectrique 2D mise en évidence au droit des TRE 01 à 04, en appliquant l'Équation 3.3 selon la méthodologie présentée en Annexe 3.1. Les modèles des structures géoélectriques prises en compte pour le calcul des réponses électromagnétiques correspondent aux TRE 01 à 04 (Chapitre II). De plus, à l'emplacement des TRE, une cartographie EM en champ horizontal a été effectuée le 21/11/12 (un jour après les mesures de TRE), avec un contexte hydrique tel que le sous-sol est humide en profondeur et sec en surface. Ainsi, au droit de chaque TRE, il est possible de comparer les mesures EM effectives et celles calculées avec une approche 1D (§1.2.1.) et 2D, déduites des structures géoélectriques déduites des TRE. La Figure 3.5

présente l'ensemble des résultats, avec les différents profils électromagnétiques mesurés et calculés (Figure 3.5a), ainsi qu'une comparaison des modélisations 1D (Figure 3.5b) et 2D (Figure 3.5c) vis-à-vis des points de mesure de la cartographie EM-31 (maille carrée de 5x5m²).

La Figure 3.5b et la Figure 3.5c comparent les valeurs de ρapp mesurées et calculées respectivement avec une approche 1D et 2D des structures géoélectriques du sous-sol. Ces résultats sont complétés par le Tableau 3.1, présentant les coefficients de corrélation entre les profils de ρ_{app} mesurées et calculées avec une approche 1D et 2D. L'analyse de ces résultats souligne que la méthode de calcul avec une approche 2D est plus pertinente (C.C. = 0,7343) que l'approche 1D (C.C. = 0,6000) pour calculer la réponse électromagnétique en surface des structures géoélectriques du sous-sol. Soulignons tout de même un biais dans les mesures effectuées au droit de TRE01. Pour rappel (Chapitre II §2.2.1.), la TRE01 est située en bordure du couvert végétal au sein duquel sont déposés divers déchets, l'écart entre la mesure et le calcul, vis-à-vis des observations précédentes, confirme que les mesures EM au droit de TRE01 sont biaisées par un artefact métallique située à x=40m (objet métallique que ne met pas en évidence la TRE). La présence de l'artefact métallique est mise en évidence par la mesure de l'inphase à x=40m qui se détache des mesures ambiantes par une variation de 15% (Figure 3.5a), car on fait l'hypothèse qu'au regard des structures géoélectriques présentes au sein de TRE01, même jusqu'à 8m de profondeur, aucune n'est en mesure d'impacter de telle manière les mesures EM-31.

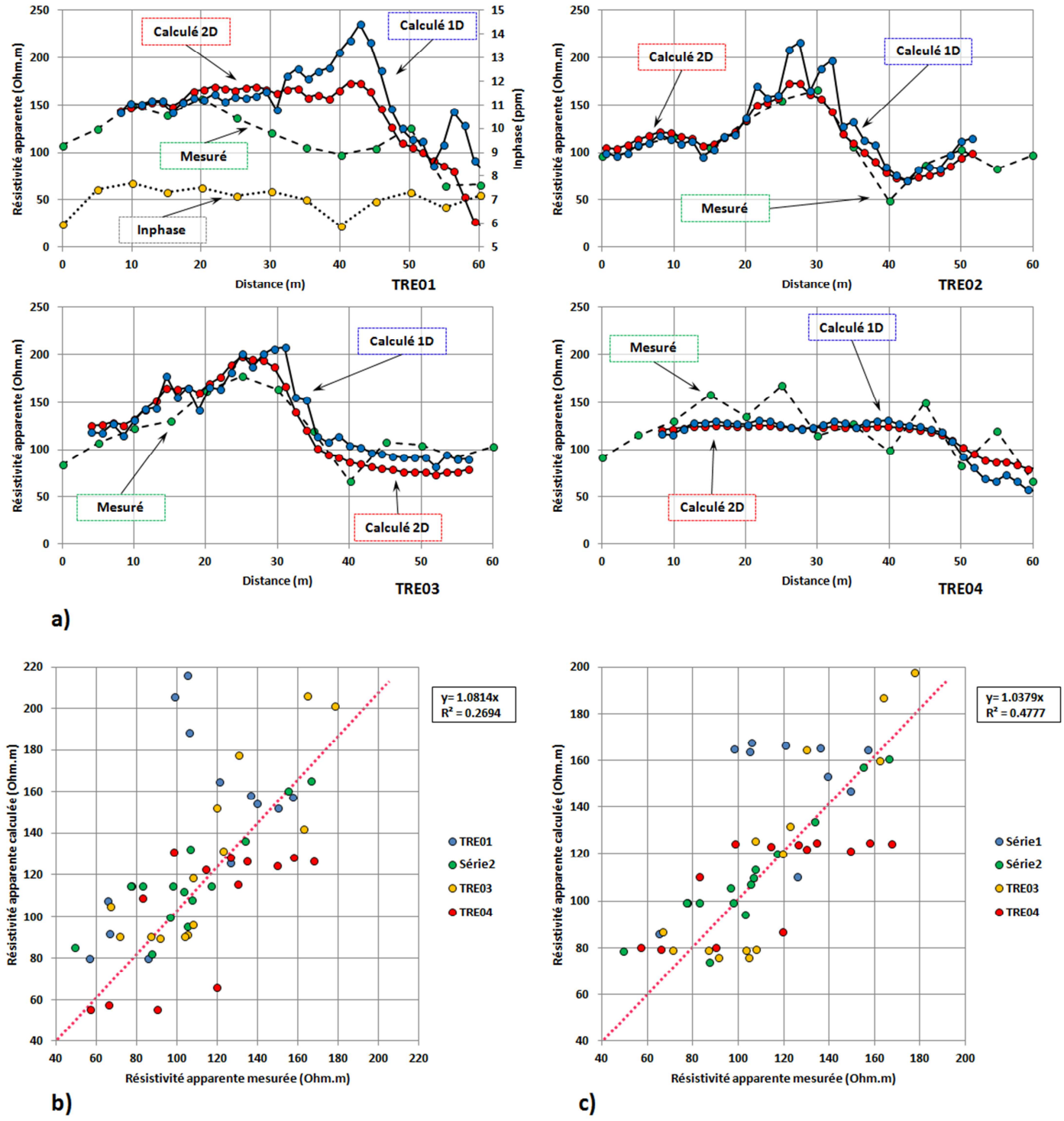


Figure 3.5 : Comparaison des résistivités apparentes mesurées et calculées, a) panneaux individuels, b) comparaison avec un calcul 1D, c) comparaison avec un calcul 2D.

	Approche 1D	Approche 2D
Sans prise en compte de TRE01	0,6000	0,7343
Avec prise en compte de TRE01	0,8275	0,9476

Tableau 3.1 : Coefficients de corrélation entre les profils mesurés et les profils calculés avec une approche 1D et 2D.

1.3. La reconnaissance des structures.

Un cas d'étude permettant d'illustrer la caractérisation spatiale d'une structure particulière du sous-sol est l'étude de la géométrie des dolines par l'utilisation combinée de prospection électromagnétique (EM-31) et TRE pour déterminer les limites géométriques (verticales et horizontales) d'une doline (Valois et al 2011). Il ressort qu'une cartographie électromagnétique permet de déterminer l'extension horizontale et que la TRE conduit à déterminer la profondeur maximale de la formation ainsi que les variations horizontales des propriétés physiques des matériaux au sein de la doline. Une TRE sécante à la doline ne suffit pas pour faire une étude spatiale de cette dernière, mais la combinaison avec une cartographie EM permet d'en caractériser l'extension latérale. Cette étude peut être mise en parallèle de celle effectuée par Le Roux et al (2012), illustrant la nécessité d'implanter un grand nombre de TRE (6 TRE) disposées radialement au droit d'une doline (surface estimée à 1 hectare) pour en déterminer l'extension latérale.

Un autre type de formation géologique remarquable nécessitant une reconnaissance détaillée de ses dimensions concerne les glissements de terrain pour lesquels une connaissance des volumes mis à contribution permet d'effectuer des calculs de stabilité en fonction des différentes sollicitations envisagées tels les séismes ou la saturation des sols par des pluies saisonnières. La combinaison de méthodes géophysiques dans le cadre d'une étude de glissement de terrain est abordée par Schmutz et al (2009) qui a mis en évidence le fort avantage à combiner une cartographie électromagnétique EM-31 et plusieurs TRE effectuées parallèlement. Pour généraliser l'information issue des TRE, on considère que dans le contexte de la cartographie d'une parcelle, une structure de sol unique sous-jacente peut être associée à chaque mesure EM. Les coupes issues des TRE effectuées au droit des mesures EM permettent d'associer ces dernières à une structure géoélectrique du sous-sol. Pour aboutir à cette relation, la carte EM doit être analysée pour faire ressortir un zonage de cette dernière en différentes mailles homogènes (représentées par des gammes de variation de la conductivité apparente).

1.4. Bilan, modélisation 3D du sous-sol.

Le lien est établi entre la structure géoélectrique du sous-sol et la réponse en surface par mesure électromagnétique. Nous avons également souligné que toute mesure EM de surface est représentative d'une colonne illustrée en surface par un pixel de 4x4m² et que d'après les résultats du §1.2.2, la colonne du sous-sol dont dépend la mesure EM atteint 4m de profondeur. Ainsi, pour une mesure EM en champ horizontal, on peut associer cette mesure à un pixel de 4x4m² correspondant à la réponse du sous-sol contenu dans une colonne de 4x4m² et 4m de profondeur. Ce lien entre données EM et TRE conduit à poser les bases d'une interpolation latérale des résistivités vraies des couches géoélectriques obtenues des TRE en se basant sur l'évolution horizontale des mesures EM.

La base de données du processus de modélisation des résistivités vraies par une estimation de proche en proche (PeP) repose sur deux TRE parallèles délimitant un volume du sous-sol (Figure 3.6a), et une cartographie effectuée au droit de ce volume (Figure 3.6b). La méthodologie du processus PEP consiste à modéliser un ensemble de TRE, parallèles entre elles, situées entre les TRE d'origine (TRE A et B). Au droit de TRE A et B, il est possible d'associer l'information des mesures EM aux structures géoélectriques du sous-sol décrites par les TRE (Figure 3.6c) : à chaque mesure EM effectuée au droit d'une TRE, on associe une structure géoélectrique unique.

Le principe du processus PeP repose sur le fait qu'au droit de TRE A et B, chaque mesure EM est associée à une structure particulière du sous-sol (Figure 3.6d). On estime la structure géoélectrique correspondant à une mesure EM à partir des structures et mesures EM voisines à cette dernière (Figure 3.6e). A l'échelle du sous-sol de surface, les variations horizontales de sa structure (exception des failles) sont mineures si l'on considère un pas de 4m. Ainsi, une mesure EM effectuée à x=4m est supposée semblable, ou du moins proche, d'une mesure EM effectuée à x=0m, ce qui permet d'estimer la structure géoélectrique associée à partir de celles mesurées (TRE.A) en x=0m.

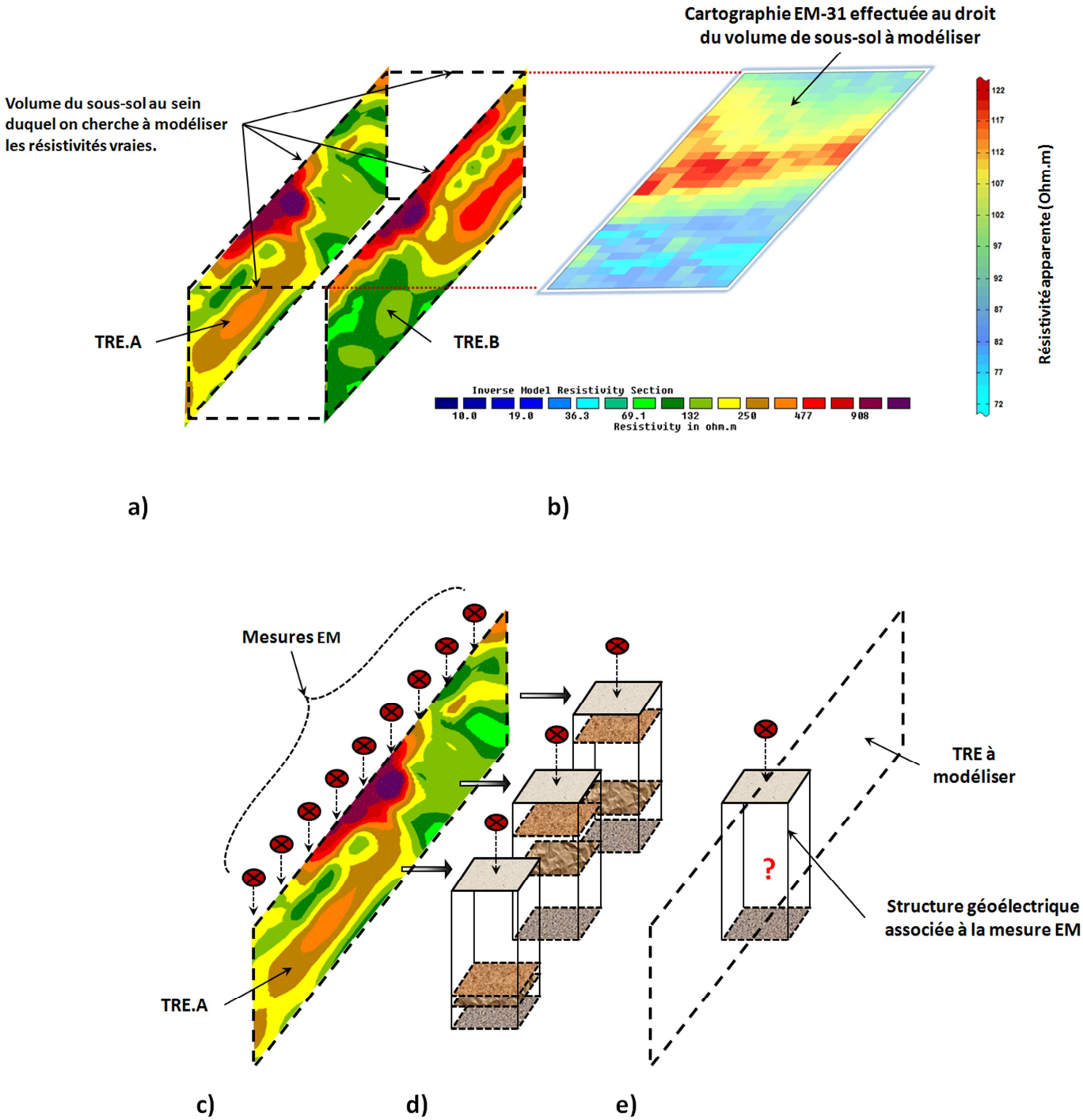


Figure 3.6 : Bases retenues pour la modélisation 3D de la structure du sous-sol, a) délimitation du volume à modéliser par deux TRE, b) carte EM-31 en champ horizontal, c) combinaison des bases de données TRE et EM, d) association au droit des TRE d'une structure géoélectrique à chaque mesure EM, e) base du processus PeP : modélisation des résistivités vraies au droit d'une mesure EM.

Les paragraphes suivants détaillent les différentes étapes visant à étendre l'information des TRE A et B à l'ensemble des TRE modélisées. On qualifie également les liens utilisés entre les mesures EM et les structures géoélectriques qui leur sont associées.

2. Analyses des liens entre données EM et TRE.

L'approche retenue avec le processus PeP consiste à propager de proche en proche les résistivités des panneaux sources (en s'éloignant d'un panneau). On conditionne cette propagation sur la base des mesures de résistivité apparente mesurées en surface par la cartographie EM-31. Cette méthode s'appuie sur le fait que ces deux grandeurs sont liées par la mesure de la même propriété physique du sol (McNeill 1980).

Cette approche est appuyée par les travaux de Shirzaditabar et al (2011) visant à estimer la structure géoélectrique 3D du sous-sol en basant la modélisation sur une cartographie EM constituée de cinq fréquences électromagnétiques (donc cinq profondeurs d'investigation). L'inversion des résultats de ces cartographies permet d'obtenir des coupes 2D de la structure géoélectrique du sous-sol au droit des différents profils EM constituant la cartographie.

2.1. Le processus Proche en Proche, mise en équation.

Les données de TRE décrivent par deux profils verticaux un modèle de la structure géoélectrique du sous-sol de la parcelle étudiée. L'obtention du modèle 3D passe par la détermination de la variation latérale des profils TRE pour couvrir l'ensemble du volume considéré dans cette étude. Les données EM-31 décrivent quant à elles la réponse en surface de la résistivité du volume investigué. Les variations latérales de cette réponse reflètent les variations latérales des structures géologiques sous-jacentes. Nous faisons l'hypothèse que la structure du sous-sol étudié est continue dans le sens de propagation du processus PeP ; ainsi à chaque pixel de surface est associée une colonne représentant une structure géoélectrique unique.

La Figure 3.7 permet d'appréhender la discrétisation des différentes données abordées. La cartographie EM-31 est discrétisée en *i* pixels selon l'orientation X, et en *j* pixels selon l'orientation Y (Figure 3.7a). Le pixel P_i^j correspond à la résistivité apparente d'une mesure EM pour la coordonnée x = *i* et y = *j*. A chaque pixel est associée une colonne discrétisée en k couches géoélectriques, nombre constant pour l'ensemble des colonnes (Figure 3.7b). L'ensemble des colonnes C_i^j est rattaché à des mesures de TRE et chaque pixel P_i^j à une mesure électromagnétique EM-31.

Notons que la coordonnée {x ; y} est à rattacher à deux sources d'information : d'une part la résistivité apparente associée au pixel P_i^j de la cartographie EM-31, et d'autre part les résistivités vraies des différentes couches *k* composant la colonne C_i^j. De ce fait, nous noterons que tout voxel à la coordonnée {x ; y ; z} décrit une résistivité vraie à laquelle est rattaché un pixel à la coordonnée {x;y}.

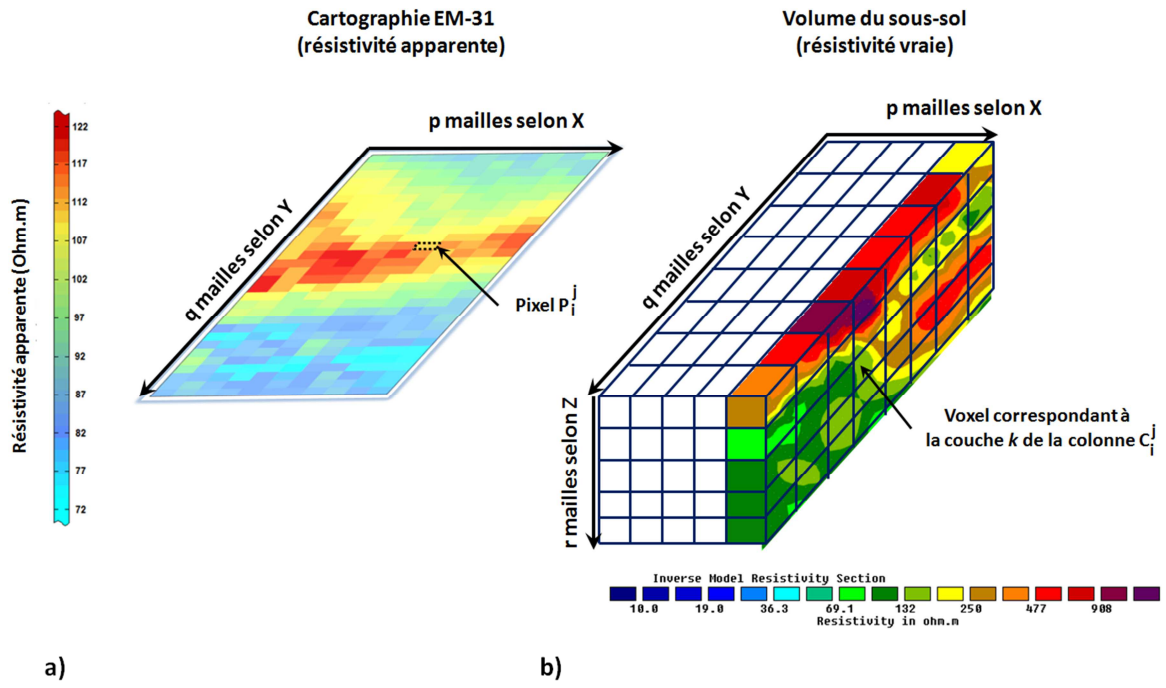


Figure 3.7 : Discrétisation de la base de données du processus PeP, a) cartographie EM-31, b) volume du sous-sol.

avec : $i \in [0 ; p]$ $j \in [0 ; q]$ $k \in [1; r]$

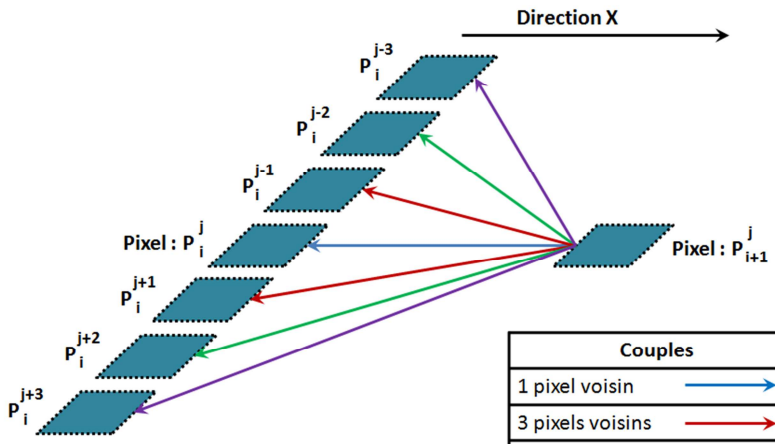
2.1.1. Etude des liens entre pixels de résistivité apparente.

Le principe du processus PeP est d'estimer la répartition des résistivités vraies le long d'une colonne de sol à partir des colonnes au « pas » précédent. Le « pas précédent » est relatif soit aux données modélisées à l'étape précédente du calcul, soit quand on initie le calcul, aux données mesurées. La base de ce processus est de déterminer le nombre de pixels à prendre en compte pour estimer la structure de la colonne recherchée. Pour ce faire, une cartographie de maillage 2,5x2m² obtenue par krigeage (Chapitre II §4.4) permet de déterminer dans quelle mesure deux pixels voisins peuvent être considérés comme proches et jusqu'à quelle distance le lien reste significatif. Nous avons déjà souligné dans le §1.2.2, qu'une mesure EM-31 peut être considérée comme représentative sur un pixel de 4x4m² et que deux mesures sont indépendantes (réponses de deux structures différentes) lorsqu'elles présentent une différence de 10% (Buvat 2012, Tabbagh 1985).

Considérons le paramètre *e* comme étant l'indice qui permet de prendre en compte un nombre fini de pixels ou de colonnes autour d'un pixel ou d'une colonne de référence. On peut noter par exemple que pour :

→ e ϵ [-n ; n] avec n=1, les pixels P_i^{j+e} sont les pixels correspondants aux coordonnées P_i^{j-1}, P_i^j et P_i^{j+1}.

Le processus PeP permet de modéliser les résistivités vraies de la colonne C_{i+1}^j d'après l'une des colonnes C_i^{j+e} avec laquelle elle est la plus semblable. Ce critère de similitude est déterminé par l'écart le plus faible entre les pixels P_i^{j+e} et P_{i+1}^j pour *i* et *j* fixes. De ce fait, l'approche menée pour déterminer le nombre de pixels voisins à prendre en compte pour estimer les résistivités de la colonne C_{i+1}^j est de déterminer le pourcentage minimal de variation (Min%Δ) existant entre P_i^{j+e} et P_{i+1}^j. Le paramètre *e* est donc lié au nombre de pixels voisins à P_i^j qui sont pris en compte. La Figure 3.8 illustre les différents couples de pixels considérés.



Couples	Distance (m)
1 pixel voisin →	2,5
3 pixels voisins →	3,2
5 pixels voisins →	4,7
7 pixels voisins →	6,5

Figure 3.8 : Organisation des couples de pixels voisins.

Pour chaque pixel P_{i+1}^j, on calcule le pourcentage minimal de variation des résistivités apparentes entre l'ensemble des P_{i+1}^j composant la carte EM et les *n* voisins à P_i^j selon l'Équation 3.4.

Équation 3.4

$$\boldsymbol{Min}\%\Delta = \frac{\boldsymbol{Min}\left|\boldsymbol{P_i^{j+e}} - \boldsymbol{P_{i+1}^j}\right|}{\boldsymbol{P_{i+1}^j}} * \mathbf{100}$$

avec : *e* ϵ [-n ; n]

sachant : *n* = 0 pour 1 pixel pris en compte,

n = 1 pour 3 pixel pris en compte,

n = 2 pour 5 pixel pris en compte,

n = 3 pour 7 pixel pris en compte,

On peut tracer la fonction de répartition des plus petites variations de résistivité apparente en fonction du nombre de pixels voisins considérés (Figure 3.9). Pour chaque nombre de pixels voisins considérés, on peut déterminer, la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation (C.V.) des variations minimales de résistivité apparentes entre deux « pas » du processus PeP (Tableau 3.2). On voit que le fait de considérer 3 pixels voisins permet de prendre en compte des pixels plus semblables entre eux car les écarts entre P_i^j et P_{i+1}^j sont majoritairement plus faibles. Il ressort également de cette analyse que le pixel le plus semblable à P_{i+1}^jn'est pas forcément le plus proche géométriquement parlant. Le choix de ne retenir que 3 pixels voisins résulte du fait que le coefficient de variation est le plus proche de 1 si l'on considère 3 pixels voisins (Tableau 3.2), mais également qu'au-delà de 3 pixels voisins, la distance entre P_i^j et P_{i+1}^j est supérieure à 4m (Figure 3.8), signifiant que les pixels comparés ne rendent pas compte de la même structure géoélectrique (§1.2.2).

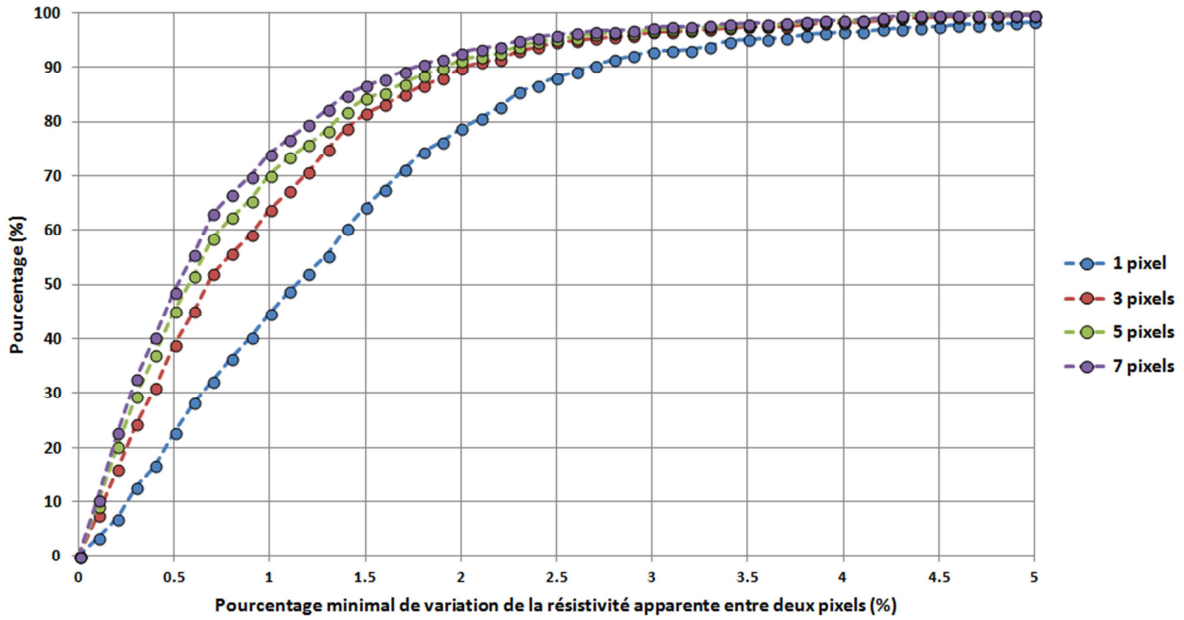


Figure 3.9 : Fonction de répartition des pourcentages minimaux de variation de la résistivité apparente entre les couples de pixels.

Couples pris en compte	Variation minimale de résistivité apparente (%) entre le « pas » de calcul i et i+1		
	Moyenne	Ecart-Type	C.V.
1 pixel voisin	1,37	2,05	1,49
3 pixels voisins	0,95	0,91	0,96
5 pixels voisins	0,84	0,87	1,03
7 pixels voisins	0,77	0,83	1,08

Tableau 3.2 : Tableau récapitulatif de l'étude du nombre de pixels voisins à considérer.

2.1.2. Le choix des pixels proches.

Le nombre de pixels à considérer pour estimer la structure sous-jacente au pixel du pas *i+1* est fixé à trois. Si deux mesures EM-31 sont semblables, alors les structures du sous-sol aboutissant à ces réponses en surface sont également semblables. Il convient donc de définir un critère de choix à intégrer dans la formulation du processus PeP pour rattacher le pixel *i+1* au pixel le plus semblable au pas *i*. Le critère retenu est d'affecter un poids à chaque pixel du pas *i*, fonction de la variation de la conductivité apparente mesurée entre le pixel au pas *i* et *i+1*.

a) Fonction de répartition des écarts.

La Figure 3.10 représente la fonction de répartition de la valeur absolue des écarts calculés (ΔE (mS/m)) entre le pixel au pas *i+1* et les trois pixels voisins au pas *i* (Équation 3.5), pour l'ensemble des pixels composant la cartographie EM étudiée au §2.1.1. Cette fonction de répartition est déduite d'une étude des 684 pixels. Une analyse de la courbe montre que la répartition de ces écarts obéit à une loi exponentielle. Pour valider cette hypothèse et quantifier le paramètre λ qui définit la loi exponentielle en question, un test Khi² est effectué sur cette base de données (Grammont 2003).

Équation 3.5

$$\Delta E = Min\left|P_{i+1}^{j} - P_{i}^{j+e}\right|$$

avec : $e \in [-1 ; 1]$

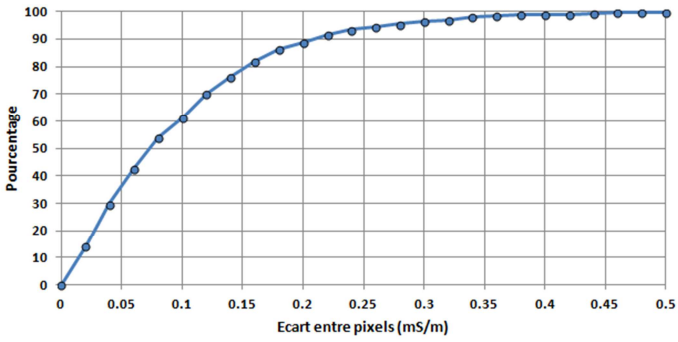


Figure 3.10 : Fonction de répartition des écarts entre pixels au pas *i* et *i+1*.

Les écarts mesurés entre les pixels au pas *i* et *i+1* sont associés à un phénomène aléatoire représenté par une variable aléatoire notée *X*. Par le test Khi² on souhaite vérifier l'hypothèse selon laquelle la variable aléatoire *X* (écarts entre pixels) suit une loi *Q* (supposée exponentielle, et de paramètre λ à déterminer). L'hypothèse est donc :

- (H_0) : *X* suit la loi *Q*.
- (H_1) : *X* ne suit pas la loi *Q*.

Pour déterminer la variable de décision, on dispose de *n* observations regroupées en *k* classes notées $C_1,\ldots C_k$. A chaque classe C_i correspond un effectif observé noté n_i. Si $X \sim Q$, on peut calculer la

probabilité de la classe C_i, notée pi ($p_i = P(X \in C_i)$) car on connait Q. L'écart entre la distribution théorique et expérimentale est mesuré par la distance d, selon l'Équation 3.6.

Équation 3.6

$$\boldsymbol{d = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}}$$

A cette distance d, on associe la statistique D dont la réalisation est d, selon l'Équation 3.7, où N_i est la variable aléatoire qui compte l'effectif de la classe C_i et dont la réalisation est n_i. On choisit comme variable de décision D.

Équation 3.7

$$\boldsymbol{D = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{(N_i - np_i)^2}{np_i}}$$

Si X ~ Q, alors $D \sim \chi^2_{k-r-1}$ où r est le nombre de paramètres de la loi Q qui sont estimés et k, le nombre de classes de X. On choisit le risque de type I α permettant de rejeter (H_0) si l'écart D est trop important. On détermine dans la table χ^2_{k-r-1}, le réel $k_{k-r-1(1-\alpha)}$ tel que $P(D<k_{k-r-1(1-\alpha)}) = 1-\alpha$. Le teste permet de conclure que si $d \in [k_{k-r-1(1-\alpha)}, +\infty[$ on rejette (H_0) avec le risque α de se tromper, sinon on ne la rejette pas. Les résultats sont présentés au Tableau 3.3. On peut dire avec un risque d'erreur de 5% que les écarts de conductivité apparente entre les pixels du pas i et $i+1$, au sein d'une cartographie au maillage 2,5x2m², suivent une loi exponentielle de paramètre λ=10.

Classes	**Effectifs observés**	**Effectifs théoriques**			
		λ=9	**λ=10**	**λ=11**	**λ=12**
]0 ; 0.04[	204	207	226	243	261
]0.04 ; 0.08[	164	144	151	157	161
]0.08 ; 0.12[	112	101	101	101	100
]0.12 ; 0.16[	80	70	68	65	62
]0.16 ; 0.20[	47	49	46	42	38
]0.20 ; 0.24[	32	34	31	27	24
]0.24 ; 0.28[	14	24	20	17	15
]0.28 ; 0.32[	10	17	14	11	9
]0.32 ; 0.36[	11	12	9	7	6
]0.36 ; 0.40[	3	8	6	5	3
]0.40 ; 0.44[	2	6	4	3	2
]0.44 ; 0.48[	2	4	3	2	1
]0.48 ; 0.52[	0	3	2	1	1
]0.52 ; +∞[	3	6	4	2	1
$\chi^2_{observé}$	-	**23.38**	**14.88**	**18.11**	**32.84**

Tableau 3.3 : Récapitulatif de l'étude Khi².

Règle de décision :

Avec une loi exponentielle dont λ=10 (plus petit $\chi^2_{observé}$ calculé), il faut vérifier que le $\chi^2_{observé}$ est inférieur à χ^2_{k-r-1}. Le calcul de $\chi^2_{observé}$ est donné par l'Équation 3.8.

Équation 3.8

$$\chi^2_{observé} = \sum_{k} \frac{\left(Effectifs_{observés} - Effectifs_{théoriques}\right)^2}{Effectifs_{théoriques}}$$

sachant : *k* : nombre de classes de *X*

avec : nombre de classes : 14

nombre de paramètres de la loi *Q* : r = 1 (λ est le seul paramètre de la loi exponentielle)

degré de liberté : k – r – 1 = 14 – 1 – 1 = 12

risque d'erreur (α) : 5%

D'après la table de distribution des χ^2, on a $\chi^2_{12\,;\,0.05} = 21{,}03$

Comme le critère $\chi^2_{observé} < \chi^2_{12\,;\,0.05}$ est validé, les écarts minimum de conductivité apparente entre les pixels du rang i+1 et les trois pixels voisins du rang i obéissent à une loi exponentielle de paramètre λ=10.

A souligner également que la répartition des écarts entre les pixels *i* et *i+1* suivent effectivement une loi exponentielle, mais que pour une même cartographie, le paramètre λ est fonction du maillage permettant de représenter ces données.

b) Pondération des pixels.

Au regard de la répartition des écarts de conductivité entre pixels, on fait le choix de pondérer chaque couple en fonction du taux de variation des conductivités apparentes d'un pixel à l'autre. Le choix de pondérer les couples de pixels conduit à modéliser les résistivités vraies de la colonne C^j_{i+1} en pondérant l'ensemble des informations portées par les différents couples de pixels considérés. Le coefficient pondérateur du pixel P^j_i vis-à-vis du pixelP^j_{i+1} est noté W^j_i(Figure 3.11).

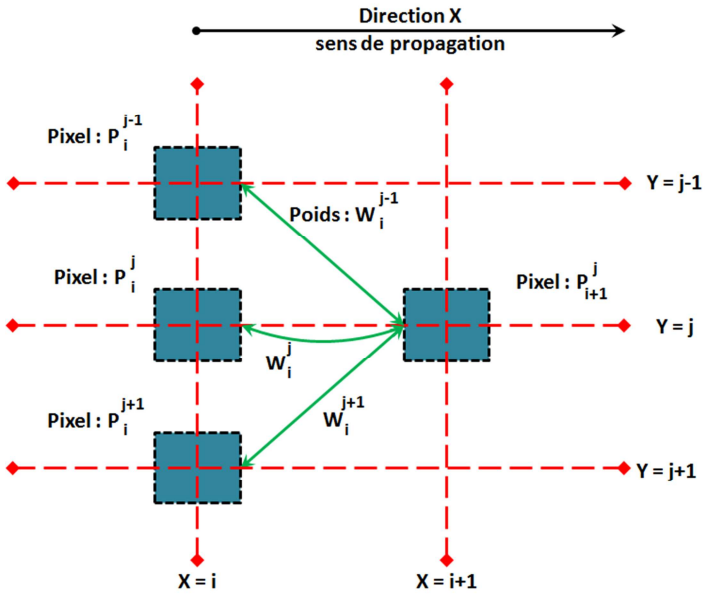


Figure 3.11 : Récapitulatif des nomenclatures des poids des couples de pixels.

Sachant que la fonction de répartition suit une loi exponentielle, on fait l'hypothèse que dans un intervalle entre pixels de moins de 4m, la répartition des écarts entre pixels suit la même loi exponentielle dans la direction X et Y. Cette base permet d'appuyer le lien entre deux pixels lorsque la conductivité apparente mesurée entre ces deux pixels est semblable. De plus, étant donné que le paramètre λ est lui-même fonction du maillage de la cartographie, cette approche permet d'y adapter directement le coefficient pondérateur. Pour chaque pixel P_{i+1}^{j} nous avons trois coefficients pondérateurs, associés chacun à l'un des 3 pixels voisins de P_{i+1}^{j}. La formulation de W_i^{j+e} est donnée par l'Équation 3.9. La formule détaillant le calcul de la résistivité est l'Équation 3.10.

Équation 3.9

$$\boldsymbol{W_i^{j+e} = exp.(-\lambda.\left|P_{i+1}^{j} - P_i^{j+e}\right|)}$$

avec : $e \in [-1 ; 1]$

2.1.3. Estimation de la structure géoélectrique au sein d'une colonne.

Considérons un pixel P_i^{j+1} avec les pixels voisins P_i^{j-1}, P_i^{j} et P_i^{j+1}, auxquels sont associées respectivement les colonnes C_i^{j-1}, C_i^{j} et C_i^{j+1} (Figure 3.12), dont les poids respectifs (W_i^{j-1}, W_i^{j} et W_i^{j+1}) permettent d'estimer la colonne C_{i+1}^{j} (Figure 3.12).

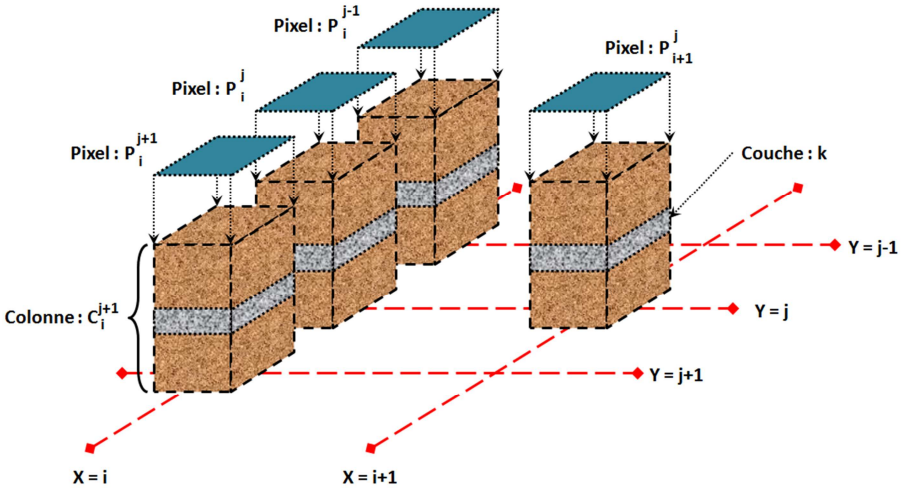


Figure 3.12 : Récapitulatif des nomenclatures et liens au sein du processus PeP, vue 3D des différents éléments.

L'ensemble des pixels considérés étant une réponse en surface de la structure géoélectrique sous-jacente, si P_i^j et P_{i+1}^j sont proches, leur structure géoélectrique l'est également. Donc si P_{i+1}^j est semblable à l'un des pixels P_i^{j-1}, P_i^j ou P_i^{j+1}, alors la colonne C_{i+1}^jest également semblable au moins à l'une des colonnes C_i^{j-1}, C_i^j ou C_i^{j+1}. Ainsi, la colonne C_{i+1}^j est abordée comme étant le résultat d'une combinaison des informations portées par les pixels P_i^{j-1}, P_i^j et P_i^{j+1}, pondérées par leur poids respectif W_i^{j-1}, W_i^j et W_i^{j+1}.

Comme toutes les colonnes composant le volume à l'étude sont discrétisées par le même nombre de couches *k*, il est possible de formuler le lien entre la résistivité ${\rho_k}_{i+1}^{\ j}$ à estimer au sein de la couche *k* de la colonne C_{i+1}^j et les résistivités (${\rho_k}_i^{\ j-1}$, ${\rho_k}_i^{\ j}$ et ${\rho_k}_i^{\ j+1}$) présentes au sein de la même couches *k* des colonnes C_i^{j-1}, C_i^j et C_i^{j+1} (Équation 3.10) :

Équation 3.10

$$\boldsymbol{{\rho_k}_{i+1}^{\ j} = \frac{\sum_{e=-1}^{e=1}\left({\rho_k}_i^{\ j+e}\right) \times \left[exp.\left(-\lambda.\left|P_i^{j+e} - P_{i+1}^{j}\right|\right)\right]}{\sum_{e=-1}^{e=1}\left[exp.\left(-\lambda.\left|P_i^{j+e} - P_{i+1}^{j}\right|\right)\right]}}$$

Ainsi, on obtient :

$$\boldsymbol{{\rho_k}_{i+1}^{\ j} = \frac{\sum_{e=-1}^{e=1}\left({\rho_k}_i^{\ j+e}\right)\times\left[W_i^{j+e}\right]}{\sum_{e=-1}^{e=1}\left[W_i^{j+e}\right]}}$$

avec : e = -1 ; 0 ; 1 — r : nombre de couches composant les colonnes

$k \in [1; r]$ — λ : paramètre pondérateur

2.2. Formulation de l'incertitude des résultats.

2.2.1. Formulation du critère de qualité.

Le fait d'estimer de proche en proche les résistivités à partir de chacune des deux TRE permet d'avoir pour toute coordonnée {x ; y ; z} deux estimations de la résistivité vraie (Figure 3.13). Quantifions maintenant la qualité des résistivités estimées, non seulement pour donner de la pertinence à la structure géoélectrique modélisée, mais également pour effectuer un choix raisonné de la résistivité la plus représentative de la couche *k*.

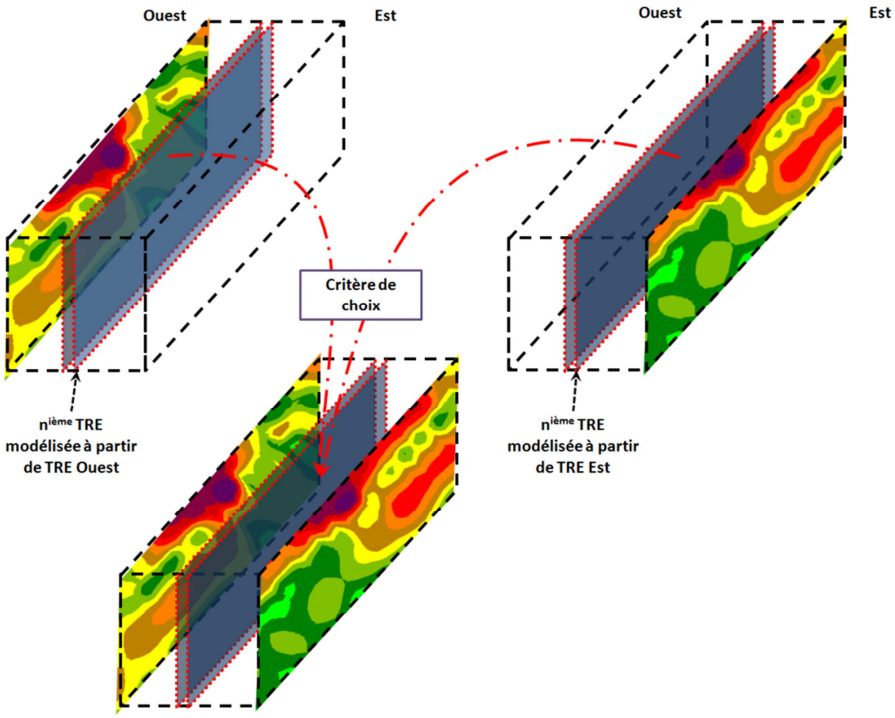


Figure 3.13 : Mise en évidence du critère de choix entre les TRE modélisées.

La quantification de la qualité des différentes colonnes C_{i+1}^{j} modélisées est ici appuyée par l'étude des données expérimentales précédemment décrites. Nous avons déjà montré que deux mesures EM-31 sont considérées comme différentes lorsqu'elles présentent une différence d'au moins 10% (§1.2.2.). On part du principe qu'à chaque pixel doit être rattaché un critère de qualité. Comme décrit dans les paragraphes précédents, la qualité de la modélisation de la colonne C_{i+1}^{j} dépend de l'écart minimal entre P_{i+1}^{j} et P_{i}^{j+e}. Ce pourcentage minimal de variation (Δ_{min}) de la conductivité apparente entre P_{i+1}^{j} et P_{i}^{j+e} est déterminé par l'Équation 3.11.

Équation 3.11

$$\Delta_{min} = \frac{Min_{e=-1}^{e=1}\left|P_{i}^{j+e} - P_{i+1}^{j}\right| * 100}{\left(P_{i+1}^{j}\right)}$$

Le paramètre Δ_{min} est calculé pour l'ensemble des pixels associés à une colonne modélisée (684 pixels), conduisant à déterminer la fonction de répartition des Δ_{min} (Figure 3.14a). Le critère de qualité retenu consiste à utiliser la répartition des Δ_{min} pour quantifier la qualité des colonnes modélisées. Dans le cas des données expérimentales, la fonction de répartition des Δ_{min} obéit (χ^2) à une loi exponentielle de paramètre λ=1,1 (Figure 3.14a). On fait donc l'hypothèse que la qualité des colonnes modélisées est directement liée aux valeurs du paramètre Δ_{min}. On peut ainsi définir la qualité Q (comprise entre 0 et 1) d'une colonne modélisée par l'Équation 3.12. Comme l'indique la Figure 3.14b, cette approche permet de confirmer qu'une variation supérieure à 10% de la conductivité apparente entre deux mesures EM conduit à considérer ces deux mesures comme indépendantes (qualité proche de 0 si de telles valeurs sont prises en compte pour la modélisation d'une colonne). Notons qu'avec les valeurs retenues, si le Δ_{min} est supérieur à 2%, la qualité associée à la colonne modélisée est en deçà de 0,1.

Équation 3.12

$$\boldsymbol{Q = \exp(-\lambda.\Delta_{min})}$$

avec : λ : paramètre descriptif de la fonction de répartition de Δ_{min}

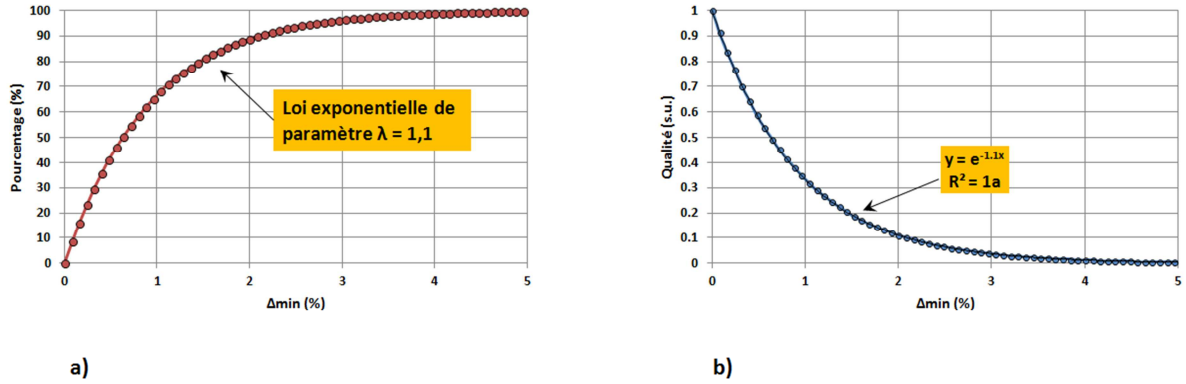


Figure 3.14 : Critère de choix de la qualité des colonnes modélisées, a) fonction de répartition de Δ_{min}, b) qualité en fonction du Δ_{min} retenu.

2.2.2. Interprétation des cartes de qualité.

On peut modéliser l'ensemble des résistivités vraies du volume du sous-sol en propageant indépendamment l'information à partir de TRE A ou de TRE B. On obtient ainsi deux cartographies de la qualité des colonnes modélisées (Figure 3.15a). Ces deux cartes de qualité permettent d'intégrer un critère quant au choix de la colonne C_{i+1}^{j} à conserver.

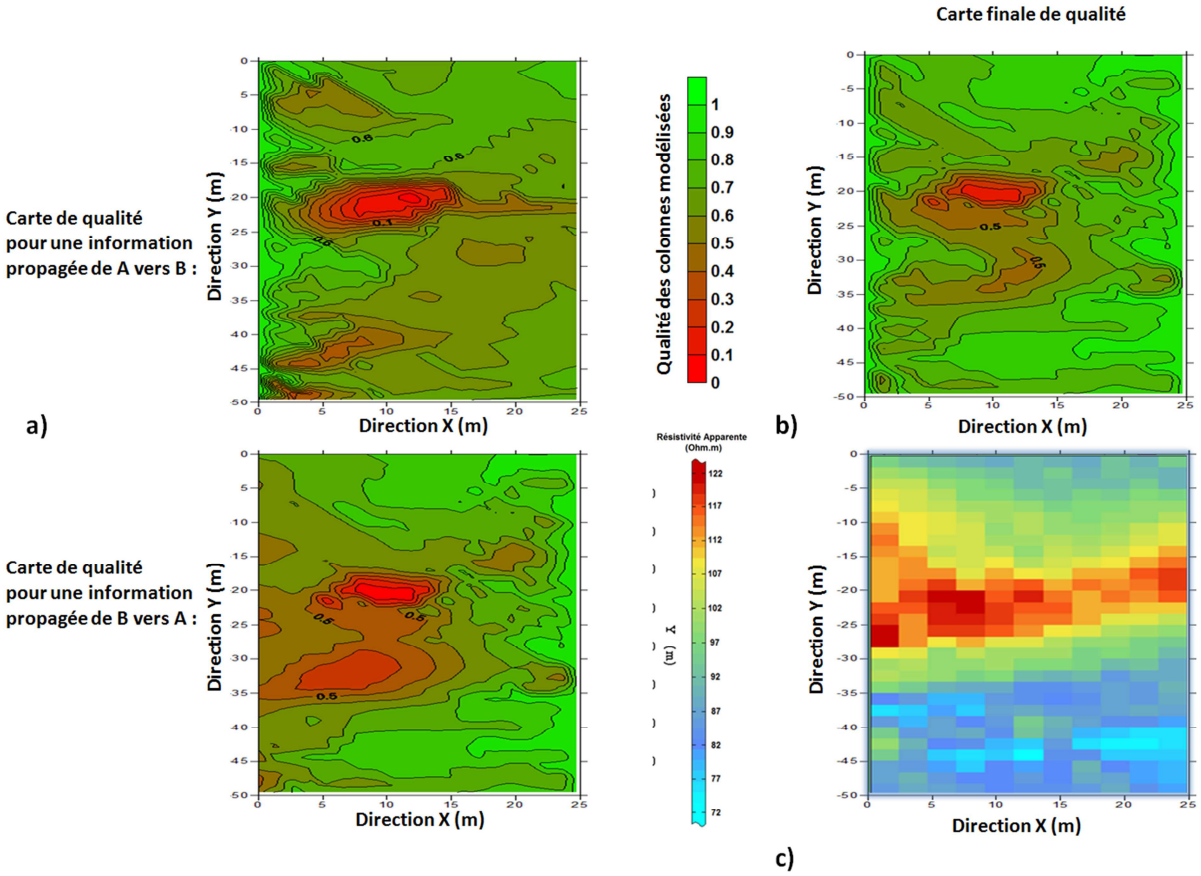


Figure 3.15 : Cartes de qualité des colonnes modélisées, a) avec une propagation de l'information de TRE A vers B et de TRE B vers A, b) carte de qualité du processus PeP, c) cartographie EM-31 de référence.

Le critère de choix consiste à conserver la colonne C_{i+1}^{j} pour laquelle la qualité est la plus élevée (Figure 3.15b). La détermination de la qualité finale ($Q_{Fin.}$) de la modélisation des résistivités du sous-sol est donnée par l'Équation 3.13.

Équation 3.13

$$\boldsymbol{Q_{Fin} = Max\{Q_{A\rightarrow B}; Q_{B\rightarrow A}\}}$$

Soulignons également que la qualité de l'ensemble des résistivités vraies modélisées composant les *k* couches de la colonne C_{i+1}^{j}, est égale à la qualité Q_{Fin} de C_{i+1}^{j}, indépendamment de la profondeur des différentes couches *k*.

La Figure 3.15b met en évidence la présence de zones d'ombre du point de vue de la qualité des colonnes modélisées (x=10m, y=20m). Cela est dû à la présence de valeurs de ρ_{app} ponctuellement dissociées des valeurs environnantes. Ces îlots de valeurs de ρ_{app} conduisent le processus PeP à ne pas modéliser convenablement les colonnes au droit de ces valeurs car l'écart de ρ_{app} entre les pixels de ces îlots et les pixels voisins (hors de ces îlots) est tel que la qualité associée à ces couples de pixels est nulle.

3. Illustration du processus PeP sur des données numériques synthétiques.

La méthode consiste à considérer un modèle numérique 3D des résistivités d'un sous-sol théorique, permettant de maîtriser la structure géoélectrique 3D. La structure géoélectrique 3D étant connue, il est possible de calculer la réponse EM en champ horizontal du sous-sol. On en extrait les deux TRE parallèles aux extrémités du volume, ainsi qu'une TRE située au centre du volume (TRE milieu), parallèle aux TRE sources. A partir de cette base de données, on peut comparer les TRE théoriques (issues du sous-sol synthétique) à celles reconstruites avec le processus PeP à partir des données synthétiques sources. La comparaison entre TRE milieu vraie et la TRE milieu reconstruite avec le processus PeP permet de vérifier la pertinence du processus PeP. Le milieu du volume étudié est jugé comme étant le plus pertinent pour évaluer la qualité des résistivités calculées vis-à-vis des résistivités du modèle de terrain car c'est le plus éloigné des données sources. L'ensemble des paramètres du sous-sol théorique (nombre de couches, épaisseurs, orientation, gamme de résistivité,…) étant connu, ce travail vise également à étudier les limites à l'utilisation du processus PeP.

3.1. Modélisation de structures homogènes continues.

Cette étude vise à analyser le potentiel du processus PeP à modéliser les structures géoélectriques et à prendre en compte leur variabilité géométrique latérale. Ce problème repose sur la modélisation d'une structure du sous-sol de 136x56m² et 5m d'épaisseur. La structure du sous-sol modélisé est composée d'un sol homogène de 150 Ω.m et d'un substratum de 30 Ω.m, partiellement représenté sur les couches 4 et 5. Les couches de surface 1 et 2 présentent une structure de 400 Ω.m, large de 4m au niveau de TRE ouest, et large de 24m au niveau de TRE est. Les variations horizontales de la structure de 400 Ω.m permettent d'étudier le potentiel du processus PeP à modéliser ces variations de géométrie horizontale, ainsi que la fidélité des résistivités vraies modélisées.

La structure géoélectrique numérisée est décomposée en cinq couches de 1m d'épaisseur et la cartographie EM-31 calculée à partir de cette structure du sous-sol est discrétisée en pixels de 4x4m², le volume total à l'étude est discrétisé en voxels de dimension $4x4x1m^3$. Le volume numérisé est discrétisé en 14 pixels dans la direction nord-sud, de 34 pixels dans la direction Ouest-est et de 5 pixels dans la direction Z, décrivant l'ensemble du volume par 2380 voxels (Figure 3.16).

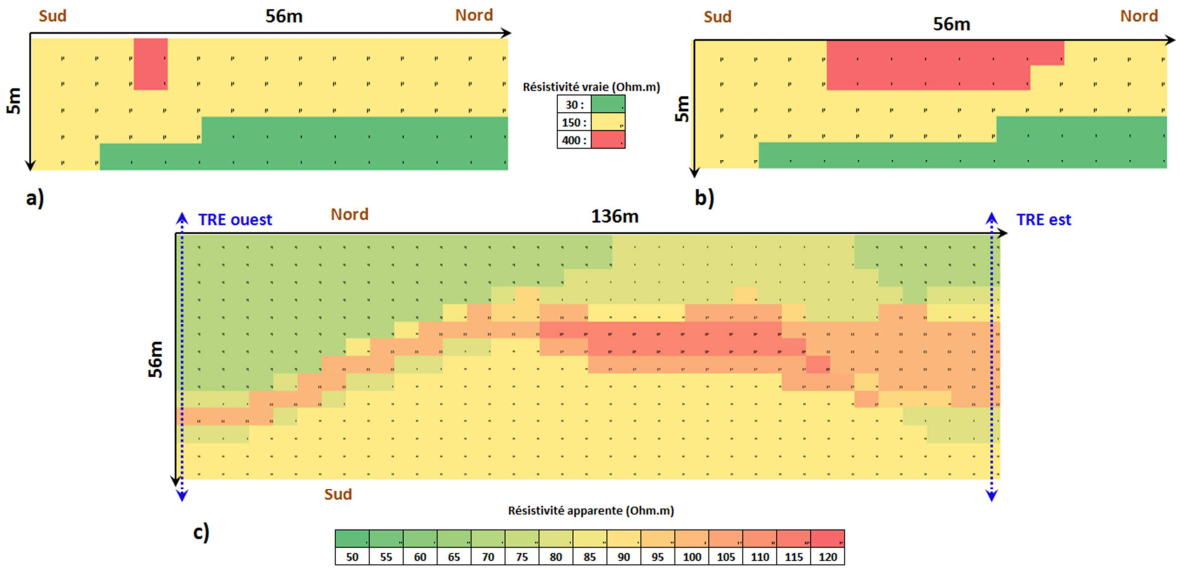


Figure 3.16 : Données sources pour la modélisation des structures homogènes continues, a) TRE ouest, b) TRE est, c) cartographie EM-31.

En application du §2, on détermine le paramètre λ de la loi exponentielle régissant la répartition des écarts entre les mesures de conductivité apparente (λ=1,5). La fonction de répartition de cet exemple est biaisée du fait que seules trois valeurs différentes de résistivité permettent de modéliser la conductivité apparente des sols (il y a donc possibilité que deux colonnes voisines soient exactement identiques). Par l'application du processus PeP, on calcule les 70 valeurs de résistivité vraie composant la TRE milieu par la TRE ouest et par la TRE est. Le choix des résistivités les plus représentatives est fait en fonction de la qualité des différentes TRE modélisées (protocole du §2.2.2), par propagation de l'information à partir de TRE ouest ou est, on ne retient que les colonnes ayant la meilleure qualité.

La Figure 3.17a représente le modèle 3D des résistivités vraies (ρ_v) utilisé pour cette étude. Le choix des colonnes vis-à-vis du côté de propagation de l'information sources (TRE ouest ou est) répond à la méthodologie développée au §2.2, et conduit à la carte de qualité illustrée par la Figure 3.17b. Les Figure 3.17c et Figure 3.17d permettent de comparer visuellement le zonage des résistivités vraies obtenues d'après le processus PeP vis-à-vis des résistivités vraies composant le modèle au droit de TRE milieu. On remarque que malgré la faible qualité associée aux résultats de la modélisation par PeP, le zonage effectif des trois valeurs de résistivités est cohérent. La comparaison entre les résistivités vraies du modèle 3D et celles obtenues par le processus PeP pour la couche entre 1 et 2m de profondeur est représentée par la Figure 3.17e. Notons que du fait que seulement trois valeurs de résistivité sont modélisées, les écarts entre les résistivités vraies modélisées par PeP et celles du modèle 3D sont conséquents. Le Tableau 3.4 permet d'analyser les gammes de résistivités vraies modélisées par processus PeP vis-à-vis des trois valeurs de résistivité constituant le modèle du sous-sol pour l'ensemble des voxels modélisés (2380 voxels), pour chaque voxel du modèle 3D, on compare la gamme de résistivité vraie obtenue avec le processus PeP. Cette analyse permet d'appuyer

qu'en moyenne, les résistivités vraies modélisées sont comparables aux résistivités vraies du modèle 3D. Cette analyse est complétée par la Figure 3.17f où plus de 50% des résistivités vraies obtenues par PeP représentent un écart de moins de 10% vis-à-vis des résistivités du modèle 3D. D'un point de vue de la modélisation de la propagation latérale des structures géoélectriques continues, le processus PeP présente des résultats concluants.

Valeurs des ρ_v du modèle 3D	**ρ_v obtenues avec le processus PeP (Ω.m)**		
	Moyenne des ρ_v	**Ecart-Type des ρ_v**	**Coefficient de variation**
30 Ω.m	32,5	11,0	0,34
150 Ω.m	153,8	45,9	0,30
400 Ω.m	374,2	30,9	0,08

Tableau 3.4 : Comparatif des résistivités du modèle et du processus PeP au droit de TRE milieu.

L'intérêt de cette première approche des résultats abordables avec le processus PeP est de mettre en lumière que ce processus conduit à modéliser de façon pertinente la structure 3D du sous-sol à partir de deux TRE et d'une cartographie EM-31. Une lecture complémentaire de ces résultats met également en lumière une zone de faible qualité au sein de la carte de qualité des colonnes modélisées. Cela apparait lorsque l'ensemble des valeurs de résistivité apparente n'est pas recoupé par au moins l'une des deux TRE sources : si un pixel est sensiblement différent de ses voisins (causé par un accident géologique, ou une lentille d'argile par exemple), la qualité de la colonne résultante est proche de 0.

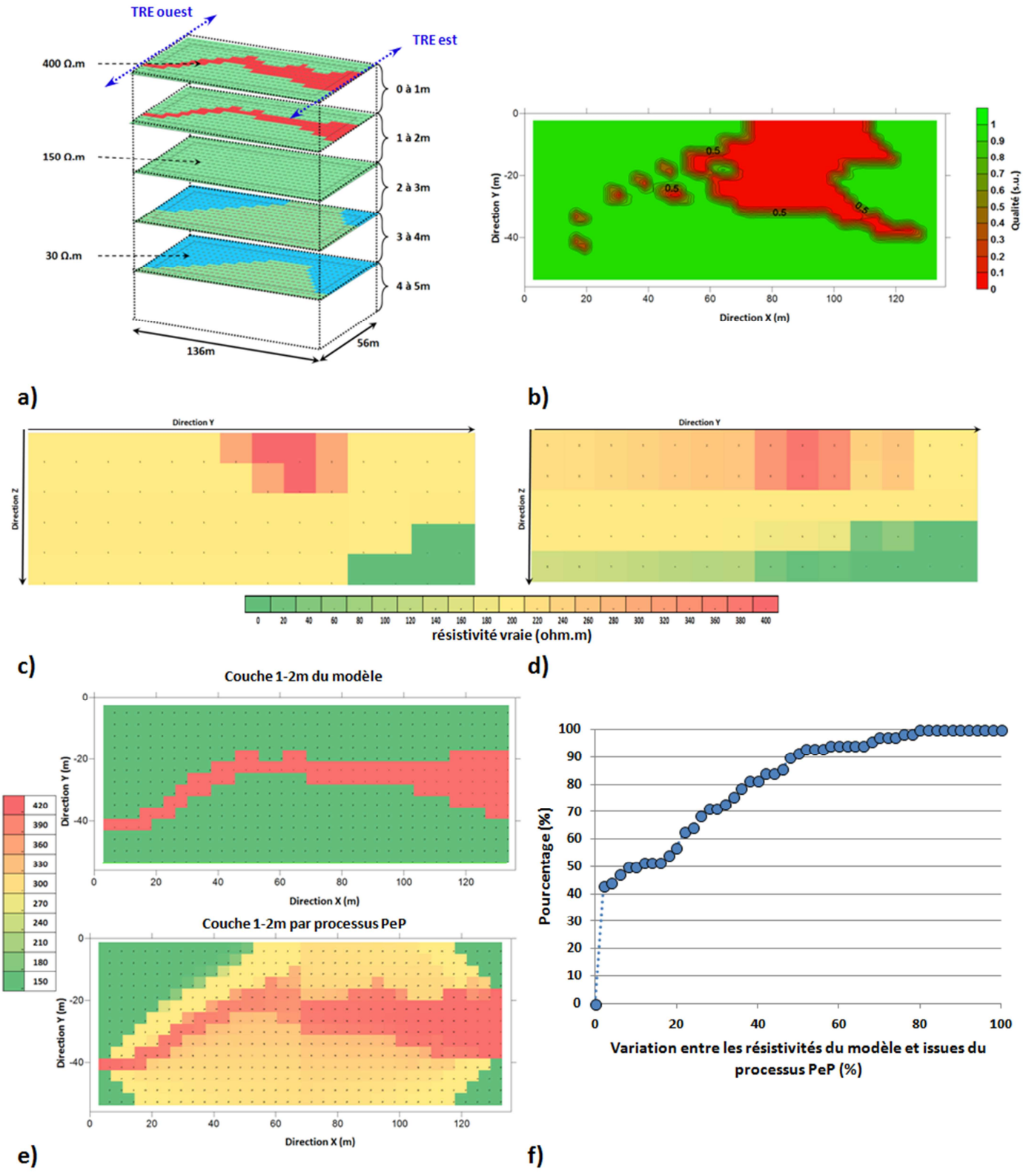


Figure 3.17 : Données récapitulatives de l'étude de modélisation de structures homogènes continues, a) structure géoélectrique du sous-sol, b) carte de qualité du processus PeP, c) TRE milieu issue du modèle, d) TRE milieu obtenue avec le processus PeP, e) comparaison des résistivités du processus PeP et avec celles du modèle, f) fonction de répartition des écarts entre données modélisées et données sources.

3.2. Modélisation d'une lentille d'argile.

Nous allons étudier comment la présence d'une lentille d'argile, au sein du volume d'investigation, peut influencer les résultats du processus PeP. Le modèle des résistivités du sous-sol à l'étude contient une lentille d'argile (ρ_v= 30 Ω.m) comprise entre 0 et 0,7m, située au-dessus d'un sol conducteur (ρ_v= 300 Ω.m) de 2m d'épaisseur. Ces deux structures de surface sont entourées par un sol homogène résistant (ρ_v= 750 Ω.m). La lentille d'argile est présente entre X=66m et X=80m sur une largeur de 5m à Y=20m. La couche de sol conducteur de 2m d'épaisseur au droit de la lentille d'argile est présente jusqu'à X=50m (Figure 3.18a). Le volume à l'étude est de 80x40x6m^3, discrétisé en voxels de 1x1x0,3m^3. Le processus PeP permet donc dans ce cas d'étude de modéliser 64 000 voxels de résistivité vraie. La carte de qualité du processus PeP (Figure 3.18b) met en évidence l'impact de la lentille d'argile sur les résultats du processus PeP, qui se cantonne au droit de la lentille d'argile. Les Figure 3.18c et Figure 3.18d mettent en évidence le zonage cohérent des résistivités vraies par le processus PeP vis-à-vis des résistivités vraies issues du modèle 3D. La Figure 3.18e appuie le fait que les résistivités vraies modélisées avec le processus PeP sont comparables aux résistivités vraies du modèle 3D. Cette observation est confirmée par l'analyse de la Figure 3.18f, pour laquelle on observe que plus de 90% des résistivités vraies modélisées par le processus PeP présentent un écart de moins de 10% avec les résistivités vraies du modèle 3D. Le Tableau 3.5 permet de résumer l'ensemble de ces observations en comparant la variabilité des résistivités vraies modélisées par le processus PeP vis-à-vis des valeurs de résistivité du modèle 3D au droit d'une coupe située à X=40m.

Valeurs des ρ_v du modèle 3D	**ρ_v obtenues avec le processus PeP (Ω.m)**		
	Moyenne des ρ_v	**Ecart-Type des ρ_v**	**Coefficient de variation**
300 Ω.m	327	5,72	0,02
750 Ω.m	724,1	13,14	0,02

Tableau 3.5 : Comparatif des résistivités du modèle et du processus PeP au droit de TRE milieu.

La modélisation par processus PeP d'une lentille d'argile ne peut être effective que si cette dernière est recoupée au-moins par l'un des deux TRE source. Cela justifie l'utilité d'effectuer la cartographie EM-31 en amont de la prospection TRE, permettant d'implanter judicieusement cette dernière. Dans le cas où les lentilles d'argile ne sont pas recoupées par au moins une TRE, des valeurs de résistivité apparente (pixels) ne peuvent être associées à une structure géoélectrique, donc une colonne. Dans ce cas, une zone de faible indice de qualité des résultats du processus PeP apparaît au sein de la carte de qualité.

Ces résultats montrent que le processus PeP met en évidence la variabilité spatiale d'une couche de faible résistivité sur une faible épaisseur sur une distance de 80m, avec un détail vertical de 0,3m et horizontal de 1m.

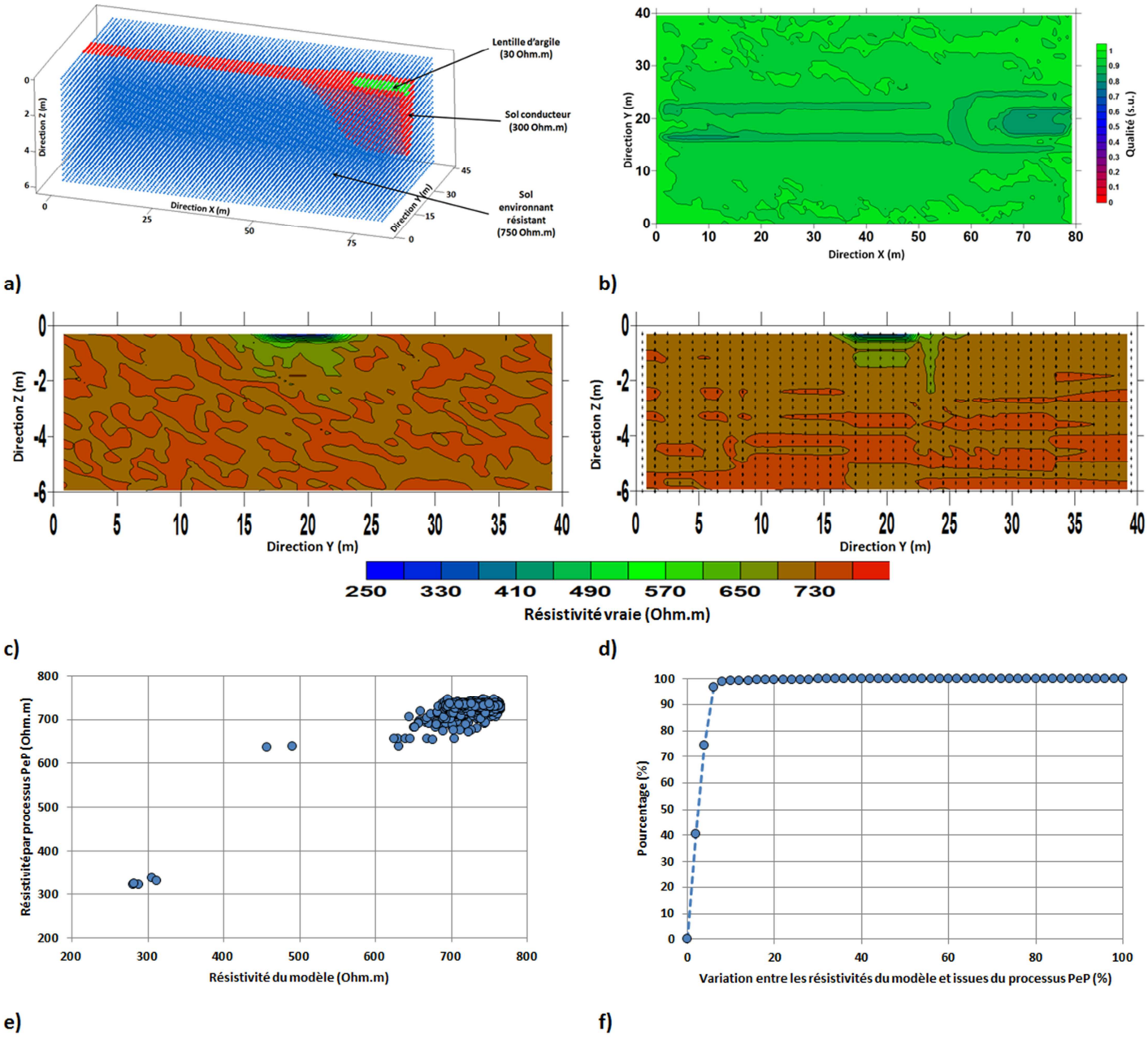


Figure 3.18 : Données récapitulatives de l'étude de modélisation d'une lentille d'argile, a) structure géoélectrique du sous-sol, b) carte de qualité du processus PeP, c) TRE milieu issue du modèle (X=40m), d) TRE milieu obtenue avec le processus PeP (X=40m), e) comparaison des résistivités du processus PeP et avec celles du modèle, f) fonction de répartition des écarts entre données modélisées et données sources.

3.3. Modélisation d'une discontinuité.

Un problème qui a été soulevé précédemment pour l'utilisation du processus PeP est de pouvoir associer l'ensemble des résistivités apparentes mesurées à une structure géoélectrique. Sans cela, des zones à faible indice de qualité apparaissent au sein de la carte de qualité des colonnes modélisées avec le processus PeP. Il ressort donc que l'implantation des données sources (la cartographie EM-31 ainsi que les deux TRE) est importante. Pour quantifier la marge d'erreur admissible au placement des données sources vis-à-vis de l'orientation d'une structure principale du sous-sol (donc de la structure géoélectrique du sous-sol), un sous-sol présentant une discontinuité est modélisé. Au nord de la discontinuité, les sols présentent une résistivité de 750 Ω.m et au sud de cette dernière les sols présentent une résistivité de 30 Ω.m. La discontinuité est représentée par un sol de transition sur une largeur de 5m (Figure 3.19a). Pour cette étude l'angle de la discontinuité (α) vis-à-vis des TRE sources est modifié de 0 à 80° pour analyser l'impact de l'orientation sur la qualité des résistivités vraies modélisées par le processus PeP. La carte de qualité déduite du processus PeP (Figure 3.19b) montre que la discontinuité affecte sensiblement la qualité de la modélisation des résistivités vraies.

Les Figure 3.19c et Figure 3.19d montrent les différences notables entre la TRE milieu issue du modèle de sous-sol et celle obtenue par le processus PeP pour un angle α=40°. On peut remarquer que l'angle α influence la qualité de la modélisation des résistivités vraies dans le voisinage proche de la faille. Les TRE milieu obtenues par le processus PeP et issues du modèle de sous-sol sont comparées en calculant le Root Mean Square Error (RMSE), selon l'Équation 3.14. Le RMSE met en lumière les séries de données ayant de fortes variations vis-à-vis des données de référence. Pour compléter cette analyse, le coefficient de corrélation entre les résistivités vraies issues du processus PeP et celles du modèle de sous-sol, est également calculé pour chaque angle α (Figure 3.19e).

Le processus PeP peut être ainsi mis en œuvre avec une orientation comprise entre 0 et 40° vis-à-vis de la direction principale d'anisotropie de la structure géoélectrique du sous-sol. Au-delà de 40°, la qualité des résultats obtenus décroit sensiblement. Ce résultat est appuyé par la Figure 3.19e qui montre que le RMSE n'est sensiblement affecté par l'angle de la discontinuité qu'au-delà de 40°. De même, le coefficient de corrélation entre les résistivités du modèle et celles obtenues par le processus PeP commence à décroitre qu'au-delà de 40°. La Figure 3.19f montre également qu'au-delà de 40°, les écarts entre les résistivités du modèle et celles obtenues par PeP présentent pour plus de 10% des points de mesure des écarts supérieurs à 100% des valeurs de résistivité du modèle.

Équation 3.14

$$\boldsymbol{RMSE = \sqrt{\frac{\sum_n (\rho_{PeP} - \rho_{modèle})^2}{n}}}$$

avec : n : nombre de mesures dans la série de donnée étudiée.

ρ_{PeP} : résistivité estimée avec le processus PeP. $\rho_{modèle}$: résistivité du modèle.

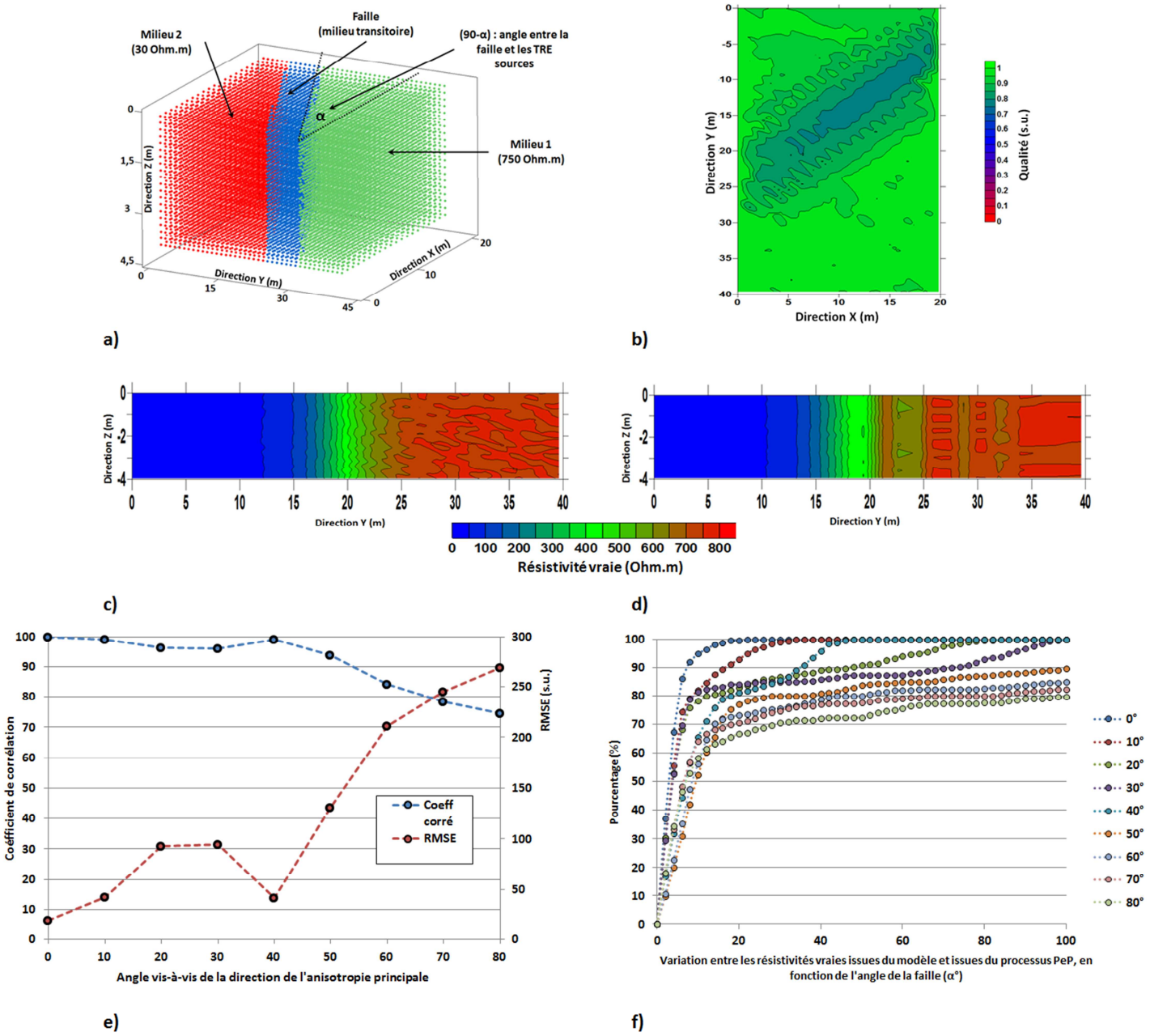


Figure 3.19 : Données récapitulatives de l'étude de modélisation d'une discontinuité, a) structure géoélectrique du sous-sol, b) carte de qualité du processus PeP, c) TRE milieu (X=10m) issue du modèle (α=40°), d) TRE milieu (X=10m) obtenue avec le processus PeP (α=40°), e) qualité des mesures en fonction de l'angle α, f) fonction de répartition des écarts entre données modélisées et données sources en fonction de l'angle α.

3.4. Bilan.

L'étude de la complémentarité de méthodes géophysiques dans la reconnaissance d'une parcelle, nous a conduit à combiner prospection EM-31 er TRE. La prospection EM-31 a permis de rendre compte de la variation latérale de la structure géologique, et les profils TRE de la définir en profondeur en deux profils délimitant la parcelle à modéliser. Dans la programmation d'une campagne de mesures, une prospection EM-31 doit être effectuée en amont des prospections TRE, et ainsi guider leur positionnement, les TRE sources devant impérativement recouper toutes les classes de résistivité.

L'utilisation du processus PeP permet de combiner cet ensemble d'informations et d'obtenir une reconnaissance optimisée de la parcelle à l'étude dans le sens où la combinaison de deux prospections géophysiques 2D (TRE et EM) conduit à reconstruire la structure géoélectrique 3D du sous-sol par un ensemble de voxels. Notons également que le processus PeP permet de rattacher à chaque colonne de résistivité vraie reconstruite, un critère de qualité non fonction de la distance aux TRE sources, mais aux évolutions de résistivité apparente au sein de la cartographie EM-31. Il est ainsi possible de reconstruire un modèle 3D de résistivité électrique d'un sol à partir d'une prospection géophysique rapide à mettre en place (EM-31) et d'une autre nécessitant plus de temps d'installation mais permettant d'obtenir un premier modèle de résistivité électrique des sols. Une des applications majeures du processus PeP est également de zoner la structure géoélectrique du sous-sol et de déterminer la variabilité spatiale des principales structures géoélectriques présentes au sein du volume investigué. L'ensemble de ces études conduit à dire que le processus PeP permet de proposer une distribution 3D des résistivités vraies en considérant la variabilité du terrain (mesurée avec la cartographie EM-31).

4. Application sur le site test.

Le processus PeP va maintenant être mis en œuvre sur des données de terrain, permettant ainsi que prendre en compte la variabilité naturelle du sous-sol et son impact dans la reconstruction des ρ_{vraies} par le processus PeP.

L'analyse géostatistique de la cartographie EM-31 délimitée par les TRE 01 et 03 (Chapitre II) nous fait remarquer que les TRE orientées N0° tandis que la structures géoélectrique majeure de cette parcelle est orientée N50°. Ceci indique que les TRE sont décalées d'un angle de 10° pour être dans des conditions optimales d'utilisation du processus PeP, ajoutant aux minimes défauts inhérents aux données de terrain. L'analyse de la cartographie EM-31 selon la méthodologie du §2.1 conduit à quantifier le paramètre pondérateur $\lambda = 0{,}6$. Au regard de la faible variation horizontale des mesures EM, on fait le choix de reconstruire 8 TRE parallèlement aux TRE 01 et 03. Suite au processus PeP, on obtient donc 10 TRE espacées de 2,5m permettant la reconnaissance d'un volume de sol de $25x50x4m^3$.

Pour juger de la pertinence des résultats, la TRE02 située au centre de la cartographie EM-31 et parallèlement à TRE01 et TRE03 permet de comparer les résistivités obtenues avec le processus PeP de celles mesurées sur le terrain. La Figure 3.20a permet de comparer la structure géoélectrique estimée et celle mesurée sur le terrain, et la Figure 3.20b permet de comparer le pourcentage de variation entre les résistivités vraies obtenues par processus PeP et celles mesurées sur le terrain. Ces données soulignent que le processus PeP effectue une propagation de l'information par couche car les fortes résistivités ne sont plus présentes en profondeur.

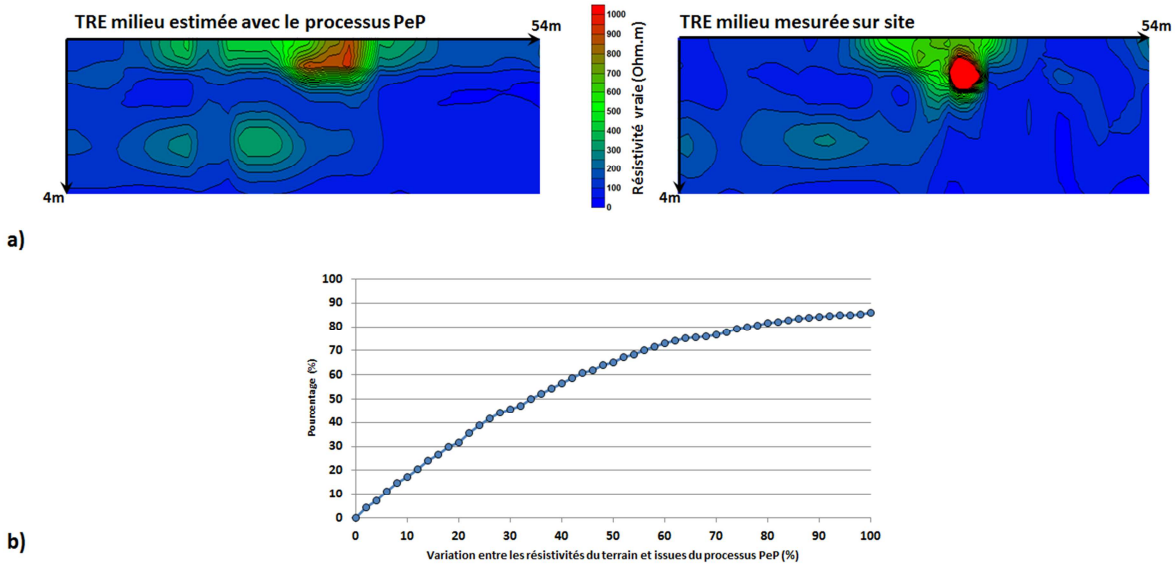


Figure 3.20 : Comparaison des résistivités estimées avec les résistivités mesurées, a) comparaison des profils, b) fonction de répartition des écarts entre données mesurées sur le terrain et données issues de PeP.

L'usage du processus PeP permet d'estimer la structure géoélectrique du sous-sol (zonage) et non de quantifier à une coordonnée {x ; y ; z} une valeur exacte de résistivité des sols. Cet usage des données issues du processus PeP est appuyé par une analyse par classification hiérarchique ascendante (CHA) des résistivités vraies reconstruites. Une analyse par CHA de l'ensemble des résistivités vraies reconstruites par processus PeP conduit à représenter les structures géoélectriques majeures et représentatives du sous-sol. Comme souligné dans le Chapitre II, le choix de trois clusters est pertinent pour avoir une bonne représentativité des principales gammes de résistivité présentes au sein du volume à l'étude. L'application d'une étude par CHA sur ces résultats du processus PeP conduit à localiser précisément, dans le volume investigué, la structure géoélectrique associée à la gamme de résistivité 500-3200 Ω.m. Cette localisation permet ainsi à un ingénieur d'implanter précisément les essais géotechniques pour quantifier le comportement mécanique de cette structure. Notons que cette structure géoélectrique (cluster 3) est associée à un volume de 400m^3, représentant 8% du volume total de sol modélisé, mais qui d'après les résultats du Chapitre II présente la plus forte hétérogénéité sur le plan des propriétés mécaniques. La Figure 3.21 rend compte de la distribution spatiale des trois structures géoélectrique principales du sous-sol, estimée par l'usage du processus PeP. L'aboutissement du processus PeP est donc l'obtention d'un volume de sol discrétisé en voxels

représentant la variabilité spatiale des principales structures géoélectriques présentes dans le volume de sol investigué. La représentation des résultats du processus PeP est donc une juxtaposition des différentes TRE (reconstruites et sources) auxquelles est associée la carte de qualité du processus PeP (Figure 3.21).

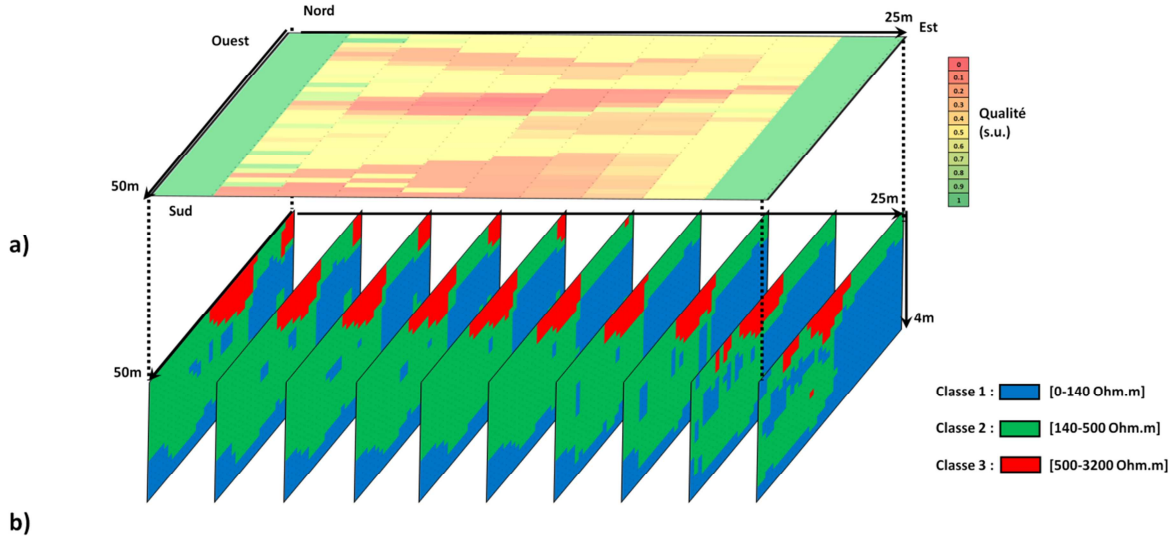


Figure 3.21 : Résultats du processus PeP, a) carte de qualité, b) structure géoélectrique du sous-sol selon les 3 clusters principaux de résistivité.

5. Conclusion.

La modélisation de la variabilité des propriétés physiques des sols est un domaine de la reconnaissance des sols qui a subi récemment des avancées notables dans la représentation 3D des structures du sous-sol. Les recherches sur le développement de méthodes de représentation 3D des structures géoélectriques visent à améliorer la représentativité des prospections effectuées dans l'optique de réduire les aléas pouvant être présents au sein du sous-sol à l'étude.

Ces travaux de thèse ont permis de développer un processus visant à modéliser la distribution spatiale des propriétés physiques des sols en basant l'étude sur un nombre limité de données sources. Le processus PeP se base sur le lien mis en avant entre la méthode de prospection électromagnétique (cartographie), et la tomographie de résistivité électrique (TRE). Ces deux informations de même nature sont obtenues selon des domaines différents et décrivent le sous-sol selon des dimensions différentes. Le principe du processus PeP est de propager l'information ''fine'' décrite par les TRE en conditionnant l'évolution latérale des résistivités vraies d'après les variations de résistivité apparentes mises en avant par la cartographie EM.

Le principe du processus PeP est donc de modéliser un ensemble de TRE parallèlement aux deux TRE sources. Le pas entre deux panneaux modélisés doit être équivalent au rayon du volume sphérique d'investigation des mesures EM-31. Pour le processus PeP, l'estimation de la structure géoélectrique du sous-sol sous-jacent à une mesure EM-31 est fonction de la variation de la conductivité apparente entre le point à estimer et trois points de mesure proches du panneau au pas précédent contenus dans la sphère d'influence de la mesure EM-31. De ce fait, de Proche-en-Proche, l'ensemble des structures du sous-sol sont modélisées. Soulignons ainsi que la qualité de la structure modélisée est directement dépendante de la qualité de la mesure précédente (la structure estimée la plus pertinente dépend de l'une ou l'autre des TRE sources). Du point de vue de l'implantation des données sources, nous avons vu que l'implantation des données sources doit répondre à quelques critères récapitulés dans la Figure 3.22.

En conclusion, l'usage du processus PeP est une approche pour répondre aux attentes du domaine de la reconnaissance des sols quant à la représentativité des mesures et la connaissance de la distribution des structures géoélectriques du sous-sol, ainsi que leurs limites géométriques. Sur le terrain, le processus PeP a permis de modéliser huit panneaux TRE, aboutissant à la représentativité d'un volume de $25x50x4m^3$ en se basant sur une cartographie EM-31 et deux TRE comme données sources, réduisant potentiellement le temps de la campagne de prospection de 6h (équivalent temps de 8 TRE en dipôle-dipôle 48 électrodes espacées de 1,5m), à 2h30 de prospection (2h pour les TRE et 30min pour la cartographie EM-31), soit approximativement une journée de prospection économisée. On soulignera également qu'à ce temps de mesure s'ajoute approximativement une demi-journée pour la modélisation du volume 3D des résistivités vraies du sous-sol.

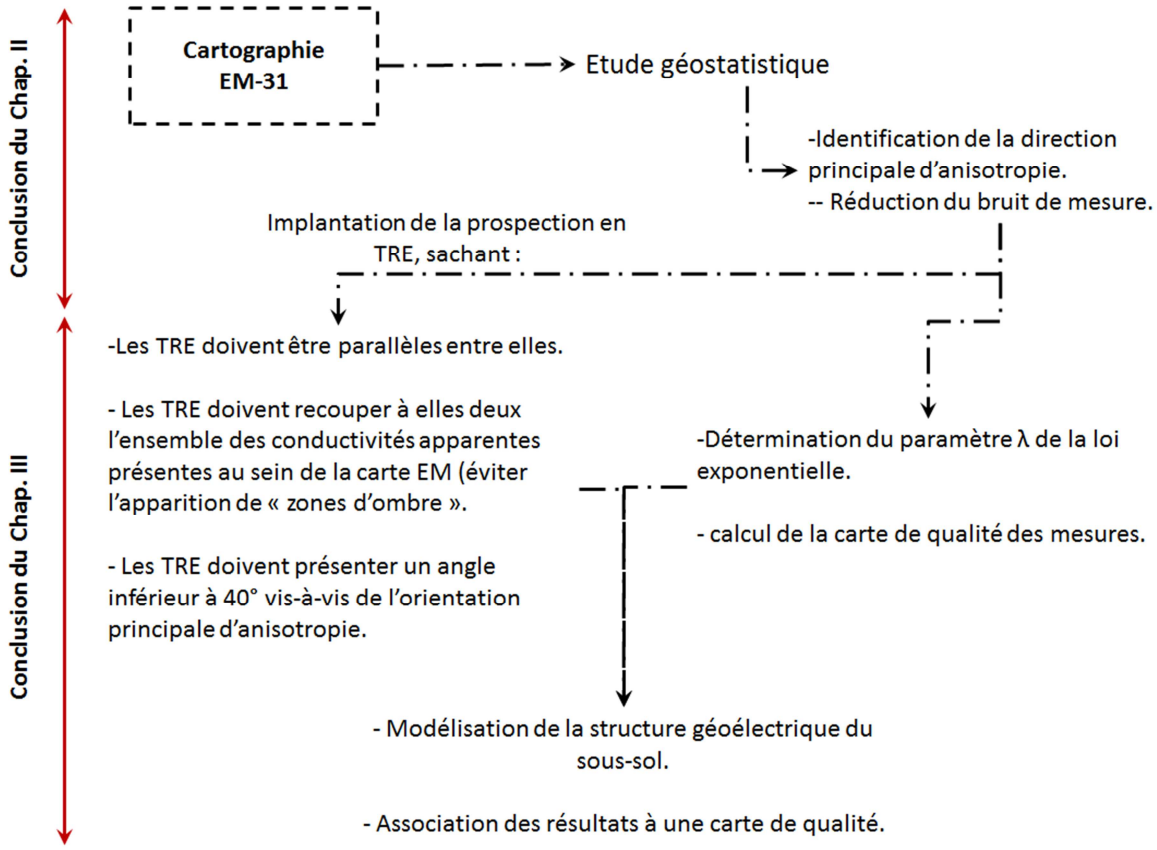


Figure 3.22 : Récapitulatif des étapes principales du processus PeP.

CHAPITRE IV

PROSPECTION À GRAND RENDEMENT

PROFILAGE CINÉMATIQUE

Dans le Chapitre III nous avons exposé l'utilité et l'ensemble des composantes d'un processus permettant de modéliser la structure géoélectrique du sous-sol en se basant sur la combinaison des informations contenues dans une cartographie Electromagnétique (EM-31) et de deux Tomographies de Résistivité Electrique (TRE). Nous avons souligné que l'utilisation du processus PeP se fait sous certaines conditions et nécessite une analyse préliminaire des données ainsi qu'une implantation particulière des prospections pour obtenir des résultats pertinents.

Actuellement, l'évolution des demandes de reconnaissance en géophysique ainsi que l'augmentation de la taille des surfaces et linéaires à prospecter (digues, barrages, parcelles agricoles et viticoles,…) engendre une évolution des méthodologies visant réduire le temps de prospection. Pour répondre à cette demande, les prospections à grand rendement ont commencé à voir le jour.

Le présent chapitre porte sur la recherche et le développement d'un système cinématique de mesure de résistivité électrique, pour pouvoir appliquer la reconnaissance en Tomographie de Résistivité Electrique (TRE) à la prospection en grand rendement. L'application de la TRE à une prospection cinématique est ici nommée Tomographie de Résistivité Electrique Cinématique (TREC). L'objectif principal de ce travail consiste à explorer les possibilités du dispositif de prospection.

1. Développement du matériel, caractérisation du dispositif de mesure.

Les impératifs des informations demandées, taille des structures étudiées et surtout le temps imparti aux prospections conduisent à développer des méthodes de prospection dites à grand rendement. Le grand rendement peut être considéré de deux manières vis-à-vis de l'état de l'art actuel. On peut identifier trois approches principales vis-à-vis d'une prospection permettant d'obtenir x points de mesure en un temps d (Guerrero et al 2012) :

- obtenir le même nombre de données en un temps réduit (Lund 1999), x points de mesure en un temps d-n.
- obtenir une quantité de données plus importante dans le même temps imparti actuellement pour les mesures (Blais 2004), $x+m$ points de mesure en un temps d.
- obtenir en un temps réduit une quantité de données plus importante que les prospections actuellement en usage (Christensen 2001), $x+m$ points de mesure en un temps d-n.

Un autre élément pour qualifier une prospection comme étant à grand rendement est la répartition spatiale des points de mesure, par rapport à une prospection de référence. Le grand rendement permet d'optimiser le placement de ces points de mesure ou d'en améliorer la répartition sur une surface à étudier (Van Groenigen 2000).

1.1. Etat d'avancement du dispositif TREC.

Pour répondre à ces différents objectifs, un premier développement fut effectué en 2005 à l'Université Bordeaux 1 par Benoit Durot. Le développement du dispositif a été complété par les travaux menés par Y. Bonaldi, F. Naessens et J.F. Lataste (Lataste 2007). C'est sur ces bases que la recherche et le développement du dispositif ont continué au cours des travaux de thèse. Fin 2007, le dispositif TREC se présentait comme illustré par la Figure 4.1. La prise de mesure était initialement programmée pour être continue, donc sans prendre en compte les variations de vitesse de prospection ou la mise à l'arrêt du véhicule de traction.

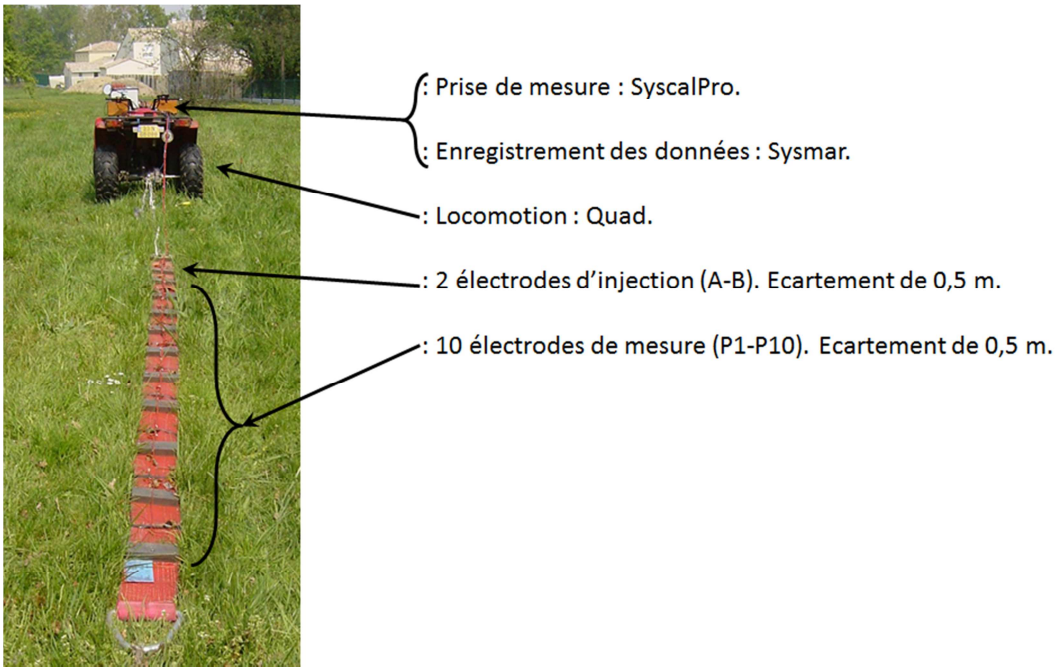


Figure 4.1 : Dispositif TREC suite aux travaux de 2005.

La disposition des électrodes répond à une prospection type Dipôle-Dipôle et la profondeur ainsi accessible dans l'absolu est de 1,1 à 1,4 mètres avec un écartement de 0,5 mètre. De par la composition du matériel (nombre d'électrodes de mesure de potentiel), seuls 9 niveaux peuvent être prospectés avec ce matériel, le système d'acquisition (SyscalPro) pouvant effectuer simultanément la mesure au maximum de 10 différences de potentiel.

Suite à ces premiers essais, certaines caractéristiques du dispositif ont été cernées :

- vitesse de progression : 5-7 km/h.
- profondeur d'investigation : 1,1 à 1,4 m.
- mesures effectuées en continu.

Au regard des essais effectués depuis 2007 et du matériel développé, les travaux de recherche menés ont eu pour but de préciser le type d'électrode d'injection du courant, le codage des distances parcourues, de rendre les mesures interprétables et de les analyser. Le dispositif actuel est composé

d’un ruban de tissu rigide sur lequel sont fixés 12 pavés métalliques permettant d’effectuer une mesure de résistivité apparente sur 9 niveaux de prospection.

1.2. Choix du dispositif de mesure de TREC.

Le choix de la disposition des électrodes pour la mesure de résistivité électrique est fait au regard des contraintes inhérentes au dispositif TREC. Ces contraintes sont que le nombre d’électrodes à disposition est limité (12) et elles sont réparties sur une ligne avec un espacement interélectrode constant.

Le Chapitre I §I.1.2.2 a souligné l’existence des principaux dispositifs permettant d’effectuer une TRE. Pour le choix du dispositif, on s’appuie également sur leur sensibilité aux variations de résistivité au sein du sous-sol. La fonction de sensibilité est exprimée mathématiquement par la dérivée de Frechet (Penz 2012). La fonction de sensibilité est dépendante du dispositif étudié (organisation des électrodes et espacement interélectrode), et permet de connaître l’impact que peut avoir une variation de résistivité dans un volume du sous-sol sur la mesure de différence de potentiel effectuée en surface. Plus la valeur de sensibilité est élevée, plus son influence sera grande. Loke (2004) a donné une solution 2D à la fonction de sensibilité pour étudier sur différents dispositifs, l’impact sur les mesures de résistivité au regard des variations verticales et horizontales des résistivités du sous-sol. On définit également la profondeur effective d’investigation comme étant celle à laquelle la portion de sol situé au-dessus de cette limite a la même influence que la portion de sol située en dessous. La Figure 4.2 représente les valeurs de la fonction de sensibilité pour différents dispositifs de mesure et pour un terrain homogène. L’analyse des valeurs prises par la fonction de sensibilité permet de déterminer à quel point les variations de la résistivité dans une partie du sous-sol influencent la mesure de la différence de potentiel.

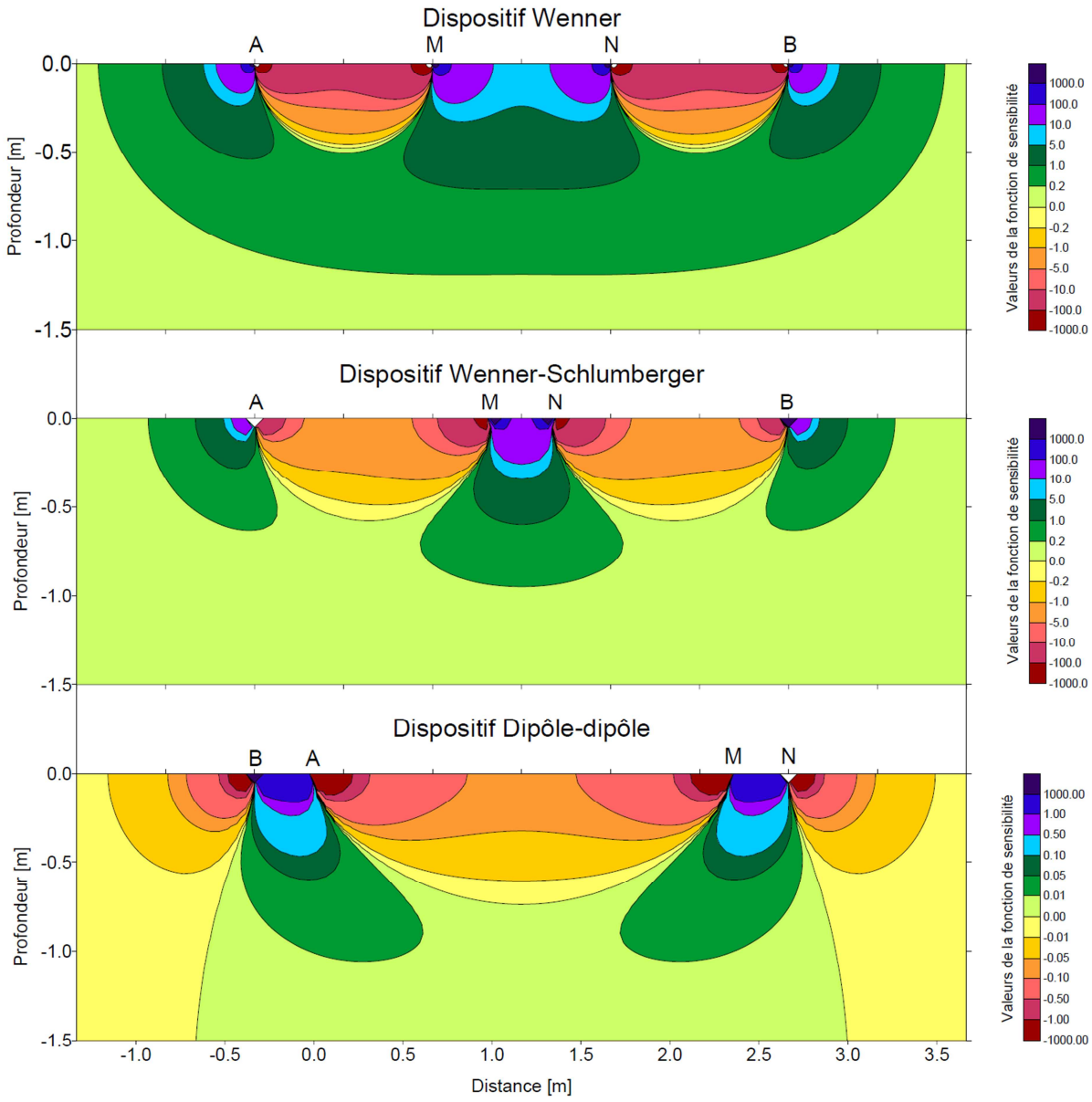


Figure 4.2 : Fonction de sensibilité des dispositifs principaux (Roy et al 1971, in Marescot 2008).

Le Tableau 4.1 synthétise les caractéristiques principales des dispositifs les plus usuels pouvant être mis en application pour la TREC. Cette comparaison prend en compte la profondeur d'investigation des différentes configurations (liée ici à l'écartement maximal entre les électrodes : *L*) pour laquelle les dispositifs Dipôle-dipôle et pôle-pôle présentent les meilleurs rendements. Concernant les propriétés des dispositifs, l'étude bibliographique menée par Bernard et al (2008) fait ressortir le dispositif dipôle-dipôle par la qualité de sa résolution, et le dispositif pôle-pôle par son temps de mise en place excédant nettement celui des autres dispositifs (positionnement des électrodes à l'infini).

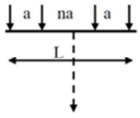
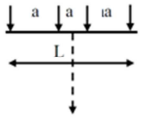
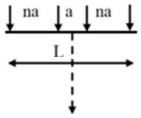
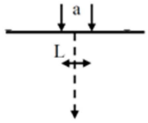
Critères	Dispositifs	Dipôle-Dipôle	Wenner	Schlumberger	Pôle-Pôle
Configurations des électrodes					
Profondeur d'investigation	Roy 1971	0,195 . L	0,110 . L	0,125 . L	0,350 . L
	Barker 1989	0,250 . L	0,170 . L	0,190 . L	-
	Loke 2013	0,224 . L	0,173 . L	0,191 . L	0,361 . L

Tableau 4.1 : Dispositifs et paramètres principaux (d'après : Chapellier 2001 et Bernard et al 2008).

Face aux contraintes techniques des dispositifs ayant une ou deux électrodes à l'infini, il ressort que l'on ne peut pas travailler avec les dispositifs pôle-pôle ou pôle-dipôle, car ces dispositifs sont incompatibles avec des mesures en cinématique. Pour un dispositif composé de 4 électrodes et un écartement, il n'y a qu'une profondeur d'investigation. C'est en modifiant l'espacement interélectrode que l'on peut changer la profondeur d'investigation. De ce fait, le nombre d'électrodes nécessaires et l'emprise au sol de tels dispositifs sont également incompatibles avec des mesures cinématiques.

Pour choisir l'organisation des 12 électrodes composant le dispositif TREC, on étudie l'ensemble des choix possibles avec un dispositif dipôle-dipôle. L'ensemble de ces choix est présenté dans le Tableau 4.2 au sein duquel les électrodes d'injection du courant sont nommées A et B. Les électrodes permettant la mesure des différences de potentiel vont de P1 à P10, pour l'orientation du dispositif on prend l'électrode 1 comme étant la plus proche du véhicule de traction du dispositif. Le dispositif Dipôle-Dipôle (DD) permettra de prospecter 9 niveaux (z = 0,375 – 0,5 – 0,625 … 1,375 m). D'après la Figure 4.2, la fonction de sensibilité du dispositif DD est sujette aux variations horizontales de résistivité. Sachant cela, et conjugué au fait que les prospections envisagées ont pour but de couvrir des profils relativement longs (plus de 200 mètres), le dispositif DD est adapté à la réalisation d'un zonage des variations horizontales des structures géoélectriques du sous-sol prospecté.

Concernant le dispositif DD, soulignons les trois principales organisations possibles des électrodes, à savoir :

- DD tête, où les électrodes d'injection sont placées proche du véhicule de traction.
- DD queue, où les électrodes d'injection sont placées à l'arrière du dispositif de mesure.
- DD centré, permettant d'obtenir deux points de mesure pour un même niveau de prospection.

Electrode n°:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DD tête	A	B	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
DD queue	P10	P9	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	B	A
DD centré	P5	P4	P3	P2	P1	A	B	P1	P2	P3	P4	P5

Tableau 4.2 : Organisation des électrodes selon différents dispositifs.

Il ressort que le dispositif dipôle-dipôle est le plus adapté pour effectuer des prospections avec le matériel de TREC. Des tests de mesures sur sites nous ont conduit à privilégier la première configuration, avec des électrodes d'injection en tête du dispositif de mesure car les caractéristiques techniques du dispositif font que les électrodes en tête du dispositif présentent un meilleur enfoncement dans le sol, et donc une meilleure qualité de contact. Le dispositif choisi vise donc à prospecter 9 niveaux répartis sur une épaisseur de sol de 1,4 m dans le cas où les 12 électrodes utilisées sont espacées de 50cm.

Le choix d'un pas de 50cm entre électrodes est un choix initial dicté par les résolutions visées. Ce paramètre pourrait évoluer pour notamment augmenter la profondeur d'investigation. Une approche intermédiaire (pour augmenter la profondeur d'investigation) consiste, tout en conservant 50 cm entre les électrodes, à « décaler » les électrodes de mesure (Figure 4.3). Toutefois, dans ce cas, la zone de prospection délaissée rend la méthode « aveugle » en surface, ce qui peut être pénalisant pour l'inversion des données.

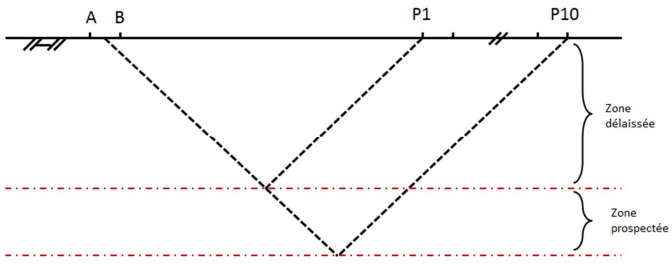


Figure 4.3 : Possibilité de prospection avec le dispositif TREC.

Au regard des contraintes techniques du dispositif TREC (raccordement au matériel de mesure, nombre d'électrodes, espacement,…), il ressort que le dispositif dipôle-dipôle est le plus pertinent pour effectuer une prospection de TRE en cinématique.

1.3. Choix des électrodes d'injection du courant du dispositif TREC.

La qualité des mesures de résistivité des sols tient en grande partie au fait que le matériel utilisé permet, au moyen d'électrodes, d'injecter un courant continu dont on mesure l'intensité et dont on étudie la répartition du potentiel dans le sous-sol. Dans le cas d'un matériel effectuant des mesures de résistivité en cinématique, le contact électrique est fait par différentes électrodes plantées. L'ensemble des électrodes est déplacé pour couvrir un linéaire, ceci impliquant que les contacts électriques des électrodes d'un dispositif en cinématique sont moins importants (profondeur d'enfoncement) qu'un

dispositif statique. Le problème majeur d'un dispositif cinématique est donc d'injecter un courant suffisamment fort pour limiter le bruit de mesure.

1.3.1. Le courant injecté pour des mesures TRE conventionnelles.

Pour un développement du dispositif TREC efficace, il faut que la capacité d'injection de courant des électrodes soit suffisamment élevée pour limiter le bruit de mesure. Sachant que la distribution du potentiel électrique dans un sol homogène, liée à l'injection en un point, répond à l'Équation 4.1, la répartition du courant est donc fonction de la résistivité du sol, de la distance et de la qualité du contact électrique entre les électrodes et le sol de surface. De plus, sachant que la résistivité des sols est liée à leur teneur en eau (Calamita et al 2012, Chrétien et al 2014), il convient d'étudier la quantité de courant injecté pour une mesure de TRE en DD en prenant en compte l'état hydrique des sols (Chapitre II §1.3.). Comme souligné dans le Chapitre II, plusieurs campagnes de prospection en TRE ont été effectuées sur le site expérimental à des périodes différentes (paramètres de mesure constants). Ces différentes prospections permettent d'étudier les gammes d'intensité de courant injecté dans le sous-sol lors des mesures de TRE selon que le contexte hydrique des sols est qualifié d'humide ou de sec (Tableau 4.3). Il ressort de cette étude que les électrodes du dispositif TREC doivent permettre d'injecter au moins un courant de 10 à 50 mA dans le cas d'un sol humide et au moins 100 mA dans le cas d'un sol sec.

Équation 4.1

$$\boldsymbol{V = \frac{I \times \rho}{2 \times \pi} \times \frac{1}{r}}$$

avec : V : potentiel du courant (V)

ρ : résistivité (Ω.m)

I : intensité du courant (A)

r : distance entre le point d'injection et le point de mesure

	Courant injecté			
	0-10mA	**10-50mA**	**50-100mA**	**100mA et plus**
Sols Secs	1%	1%	2%	96%
Sols Humides	20%	50%	27%	3%

Tableau 4.3 : Gammes d'intensité de courant injecté en fonction de l'état hydrique des sols prospectés.

1.3.2. Prototypes d'électrodes et potentiel d'injection du courant.

a) Prototypes expérimentaux.

Lors du développement du dispositif TREC nous avons conçu et testé trois types d'électrodes illustrés par la Figure 4.4 :

• des pavés positionnés sur une bande fixe (Figure 4.4a).

• des obus pour l'injection de courant, dont l'espacement peut être variable (Figure 4.4b).

• des chariots à roue dentée (Figure 4.4c).

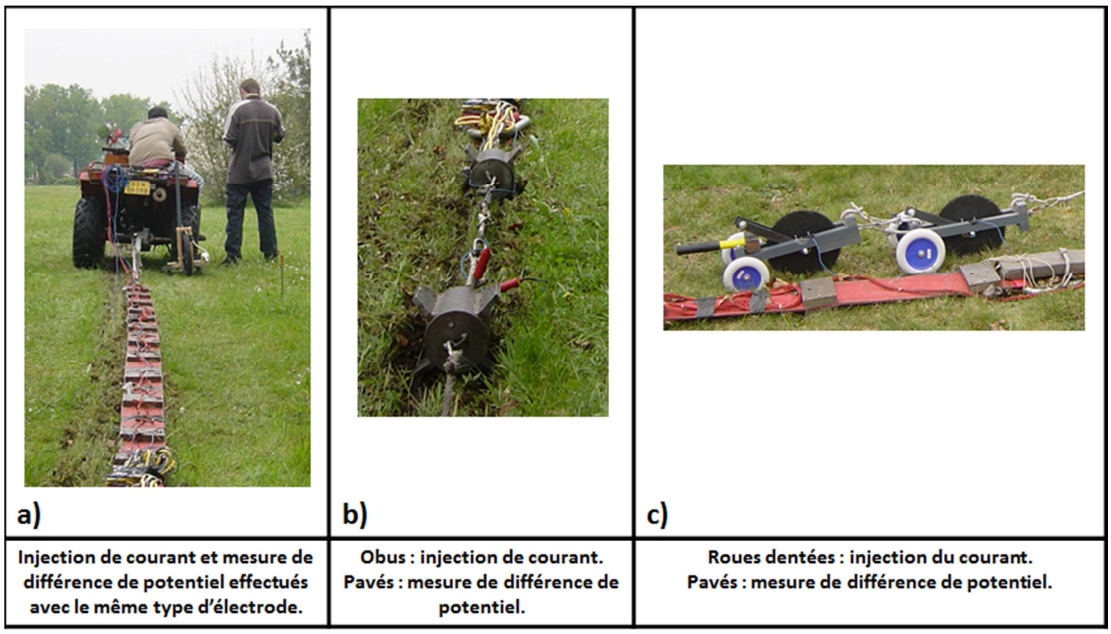


Figure 4.4 : Différents types d'électrodes développés.

Le Tableau 4.4 regroupe les différents potentiels d'injection de courant dans le sol des électrodes successivement développées. Pour chaque type de dispositif, nous avons comparé le courant injecté à celui injecté en utilisant des électrodes conventionnelles lors d'une prospection TRE de référence pour laquelle plus de 90% des points de mesure sont obtenus avec un courant injecté de plus de 100mA. Pour l'ensemble des dispositifs testés, le potentiel d'injection du courant reste inférieur à 10mA, soit dix fois plus faible qu'avec la configuration de référence.

	Gammes d'intensité de courant injecté					
	0-3mA	**3-5mA**	**5-10mA**	**10-50mA**	**50-100mA**	**100mA et plus**
Pavés tête	78%	22%	0%	0%	0%	0%
Pavés queue	28%	62%	10%	0%	0%	0%
Obus	24%	52%	24%	0%	0%	0%
Conventionnelles	0%	0%	1%	2%	6%	91%

Tableau 4.4 : Répartition de l'intensité de courant injecté vis-à-vis des électrodes conventionnelles de TRE.

La fonction de répartition du potentiel d'injection des électrodes expérimentales est présentée à la Figure 4.5. Ces résultats montrent que l'orientation du dispositif vis-à-vis du sens de traction du matériel affecte sa capacité à injecter du courant. De ce constat, le test d'injection de courant par les électrodes obus est effectué en queue du dispositif uniquement. L'utilisation des électrodes obus permet de doubler l'intensité du courant pouvant être injecté dans le sol, ce qui est sans doute lié au meilleur contact avec les obus qui, plus lourds, s'enfoncent plus dans le sol (conduisant à une plus grande surface de contact).

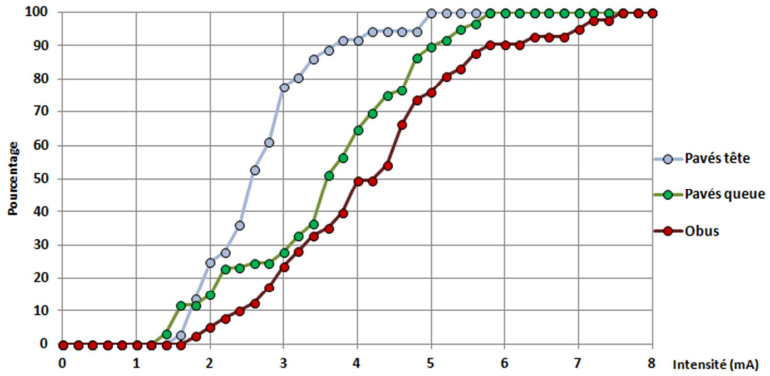


Figure 4.5 : Potentiel d'injection du courant des électrodes expérimentales.

b) Electrodes de TREC développées.

La succession des étapes de mise au point et des essais sur site a conduit à développer des électrodes sous la forme d'un chariot supportant une roue dentée composée de 4 disques de 18cm de diamètre regroupant 9 picots (Figure 4.6).

Une des différences majeures entre les électrodes à roues dentées utilisées et les électrodes de type standard des prospections TRE est le fait qu'elles permettent d'injecter le courant dans le sol par plusieurs points de contact. Lors de la mise en mouvement des électrodes, on peut faire l'hypothèse qu'à tout instant, au moins un point de contact lie l'électrode au sol, en fonction des débris présents en surface et de l'ensemble des éléments pouvant perturber le contact (cailloux, trous, couvert végétal,…). De par la géométrie des roues dentées utilisées, à une coordonnée x d'injection du courant, il y a toujours 6 points d'injection du courant, pour l'ensemble des 4 roues dentées (Figure 4.6). D'après des observations sur site, l'ensemble des picots peut s'enfoncer dans le sol de 2 à 5 cm en fonction de la nature de ce dernier, de ce fait, lors d'une prospection, l'ensemble des points d'injection est « renouvelé » tous les 3 à 5 cm lorsque le dispositif est déplacé.

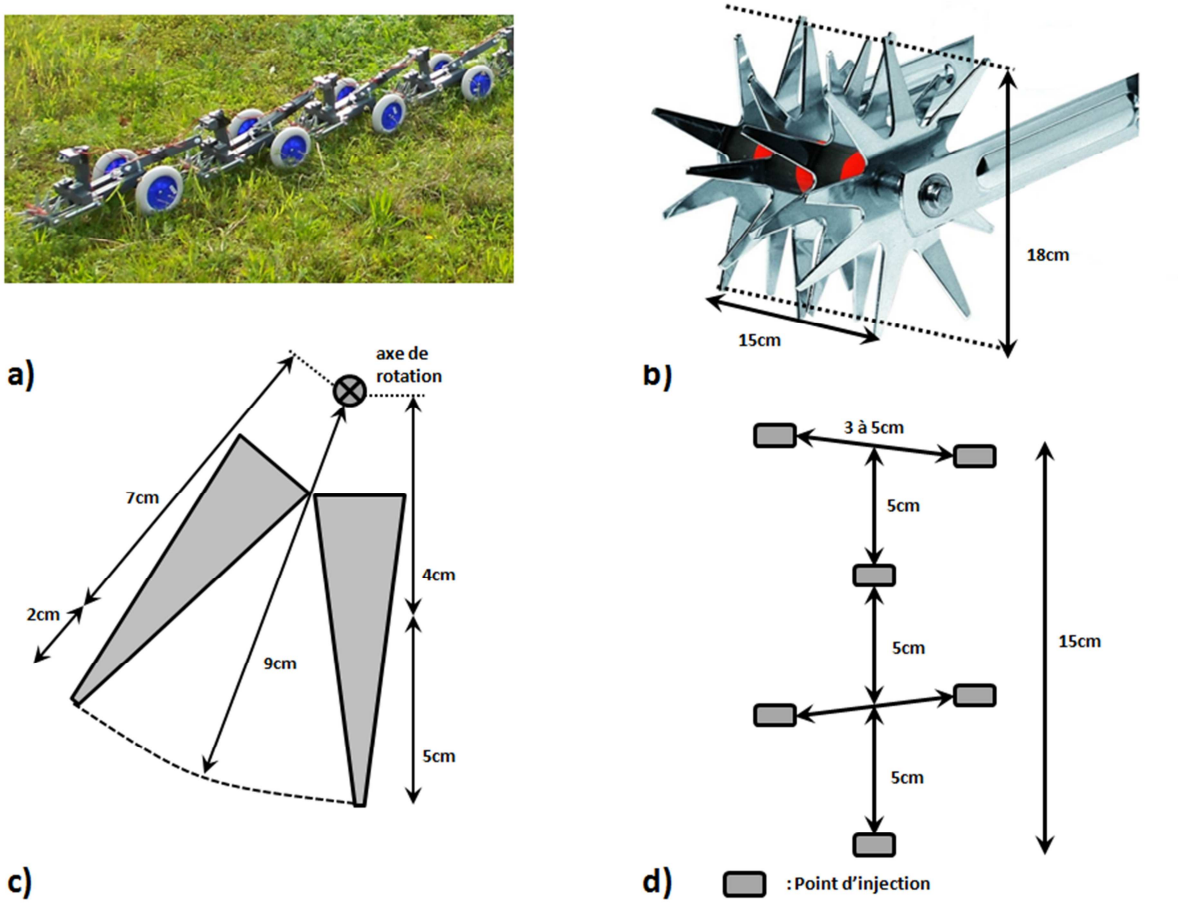


Figure 4.6 : Description des électrodes de type TREC, a) électrodes in-situ, b) roue dentée, c) géométrie des picots, d) géométrie des points d'injection vue de dessus.

Des essais sur deux sites distincts (présentés ultérieurement) ont permis de quantifier la quantité de courant que ce type d'électrode peut injecter (Tableau 4.5) pour différents états du sol, et donc leur capacité à être adaptées pour effectuer des mesures en TREC. Pour déterminer l'influence du mouvement du dispositif sur les mesures de résistivité vis-à-vis d'un dispositif standard (statique), une série de mesures a été faite à l'arrêt, ce qui permet de s'affranchir du phénomène transitoire de l'injection, et de mieux préciser les effets de la qualité du contact des « roues dentées ». En comparant les données du Tableau 4.4 et du tableau 4.5, on voit que dans le cas d'un sol humide, le dispositif TREC injecte une intensité de courant équivalente au dispositif TRE traditionnel.

	Gammes d'intensité de courant injecté dans le sol (mA)			
	0-10mA	**10-50mA**	**50-100mA**	**100mA et plus**
Sols Secs	2,1%	63%	32,6%	2,3%
Sols Humides	80%	20%	0%	0%
Sols Humides (mesures statiques)	4,7%	18,5%	64,2%	12,6%

Tableau 4.5 : Potentiel d'injection des électrodes de TREC selon l'état hydrique des sols.

1.3.3. Simulation numérique du champ de potentiel généré par les électrodes TREC.

On fait l'hypothèse que si le courant injecté à la position x est de 60mA, alors chaque point de contact injecte une intensité de 10mA. Pour étudier dans quelle mesure la géométrie des électrodes TREC influence la distribution du courant dans le sol, une modélisation est faite pour comparer la répartition du courant entre une électrode TREC et une électrode standard (sans profondeur) (Figure 4.7). La fonction de répartition du courant dans le sol est obtenue par l'Équation 4.1, pour laquelle l'intensité de courant injectée est de 50mA et la résistivité du sol de 300Ω.m. La différence entre le potentiel électrique mis en place par une électrode à points d'injection multiples et une électrode standard est inférieure à 10% à partir de 10cm de part et d'autre de l'électrode, dans le sens perpendiculaire au déplacement du dispositif (Figure 4.7c). De ce fait, le potentiel électrique mis en place dans le sol avec un couple d'électrodes AB composé d'électrodes de type TREC est équivalent à celui créé avec des électrodes standard avec un espacement interélectrode de 50cm.

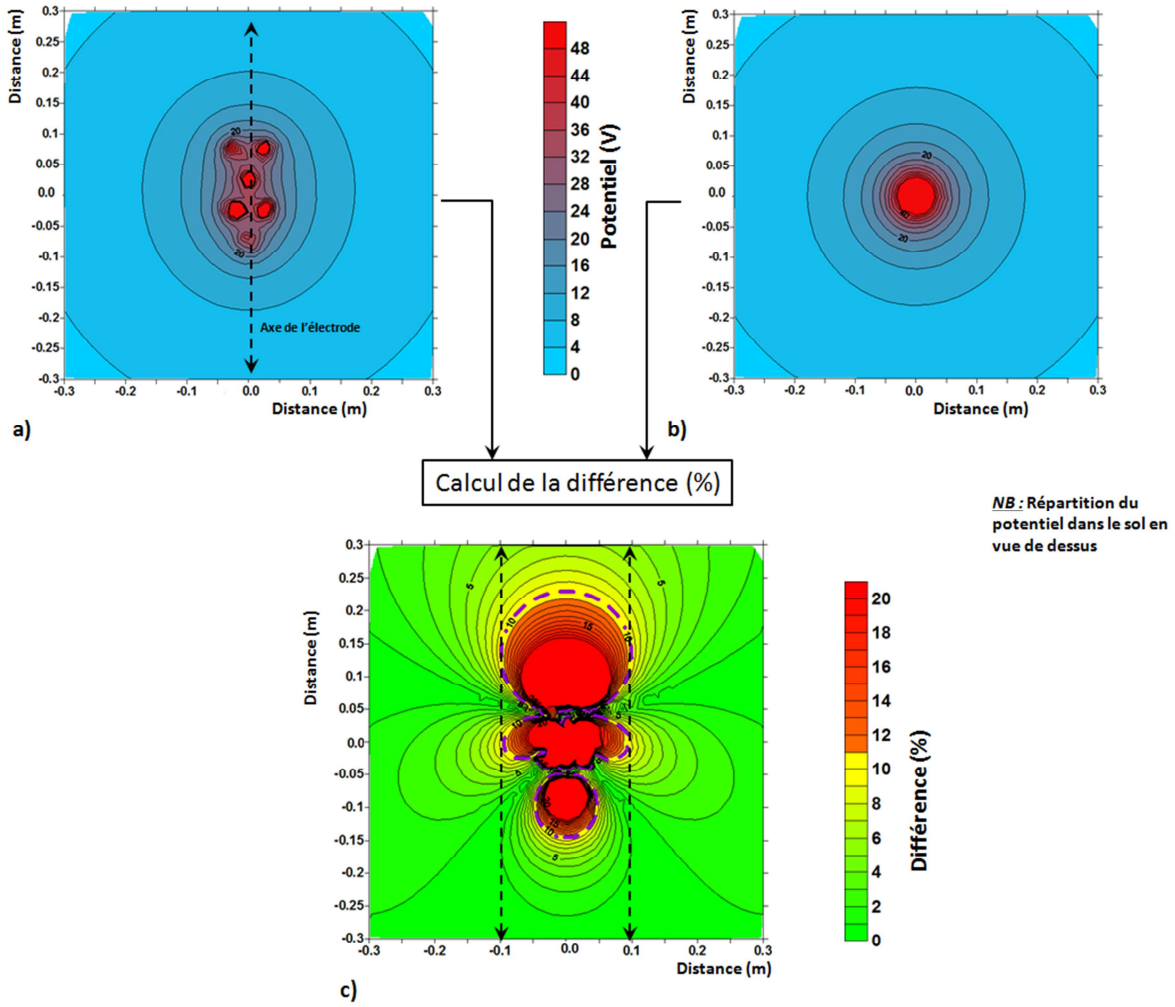


Figure 4.7 : Potentiel en tout point à la surface du sol, a) injection en plusieurs points par une électrode de type TREC, b) injection en un point, c) différence (en %) entre les deux types d'électrode.

L’ensemble de ces approches et études ont permis de mettre au point un dispositif de mesure de TRE en cinématique répondant au moins aux contraintes techniques d’un tel type de prospection. De telles électrodes permettent de répondre au mieux aux problèmes majeurs d’une prospection de TREC, à savoir :

• la qualité du contact des électrodes avec le sol est liée à la quantité de courant pouvant être injectée (limité par la résistance de contact),

• l’utilisation de 13 électrodes permet d’exploiter tout le potentiel de mesure du Syscal Pro en prospectant 10 niveaux du sol pour chaque phase d’injection du courant.

Outre l’aspect technique, les mesures de TREC subissent des biais liés au principe même des mesures comme illustré par les résultats du §1.3.3.a. Le fait de déplacer le dispositif de mesure provoque des variations dans la qualité des contacts entre les électrodes et le sol, et comme le lien entre chaque électrode n’est pas rigide, le dispositif n’est pas toujours parfaitement en ligne. Ce problème d’alignement des électrodes provoque une erreur de position des électrodes, ce qui peut affecter le calcul du facteur géométrique (*k*) et la distribution du potentiel électrique dans le sol.

1.4. Dispositif de mesure de TREC finalisé.

Le dispositif TREC finalisé est le suivant, illustré par la Figure 4.8 :

• un véhicule de traction supportant également le transport de la base opérationnelle regroupant l’ensemble des instruments de mesures (quad).

• des instruments de mesure : Syscal Pro, logiciel Sysmar, batterie.

• les 13 électrodes de type TREC pour la prospection de 10 niveaux.

Le déclenchement des mesures est effectué par une roue codant le déplacement de l’ensemble du dispositif. Cette roue permet de positionner chaque point de mesure, et également de simuler un signal GPS pour le Syscal Pro et ainsi déclencher l’injection du courant et les mesures de différence de potentiel (ΔU) selon un pas fixe. Le logiciel Sysmar construit, au fur et à mesure que la prospection est effectuée, la totalité de la pseudo-section de résistivité apparente en temps réel.

On a observé lors des campagnes d’essai que le dispositif TREC est instable (renversement des électrodes) lorsque l’espacement inter-électrodes est constant. Pour compenser ce défaut, il a été décidé, suite à des essais in-situ, de retenir un espacement de 1m (2a) entre les électrodes B et P1. Il en résulte que la profondeur d’investigation est augmentée : le premier niveau de prospection est supprimé et la TREC est « aveugle » sur les 30 premiers centimètres, couche de sol qui correspond généralement au couvert végétal. L’adaptabilité du dispositif permet tout de même de remettre en place la mesure de la résistivité apparente sur ce premier niveau si le cas d’étude le nécessite (parcelle agricole, zone d’infiltration de polluants,…).

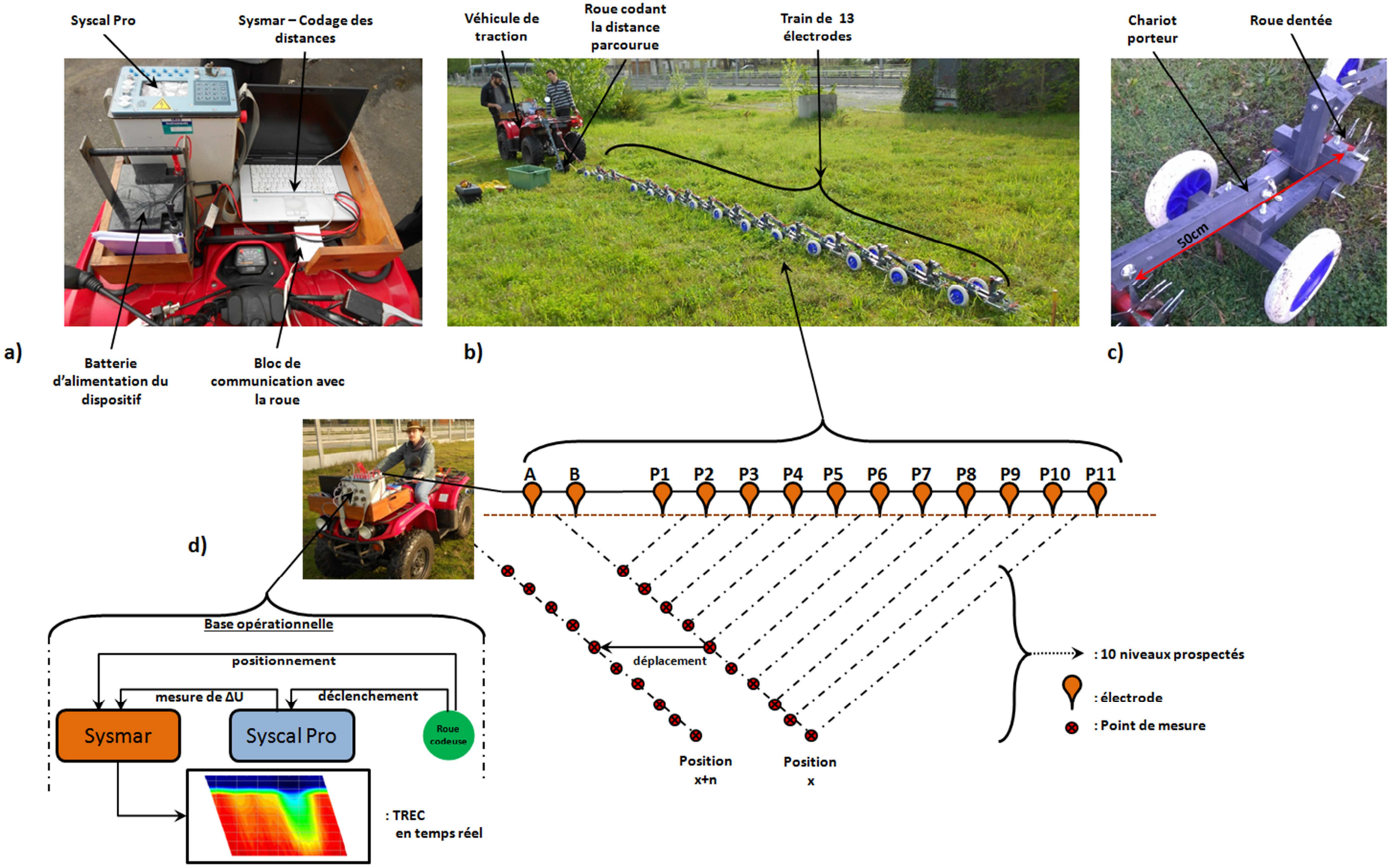


Figure 4.8 : Schéma du dispositif TREC, a) base opérationnelle, b) dispositif in-situ, c) électrode individuelle, d) liens entre les différents éléments.

2. Traitement du bruit des mesures en TREC.

L'ensemble des campagnes de mesures expérimentales visant à développer et analyser les premiers résultats du dispositif TREC a été effectué sur le site de Pessac présenté dans le Chapitre II. Comme souligné dans les chapitres précédents, au regard des mesures de TRE effectuées sur le terrain expérimental de Pessac, ce site est à considérer pour les mesures TREC comme un terrain aux sols dans un contexte hydrique sec, nécessitant donc une injection de courant d'au moins 50 à 100mA.

2.1. Mise en évidence du bruit de mesure.

Les mesures réalisées sont exploitées, de manière classique pour une TRE, avec le logiciel Res2dInv. Dans cette optique chaque prospection TREC est accompagnée d'une prospection TRE pour comparaison, afin de vérifier la validité des prospections TREC.

Comme souligné dans le §1, le dispositif TREC est constitué de 13 électrodes espacées de 0,5m (sauf 1m entre les électrodes B et P1). La TRE de référence est également un dispositif dipôle-dipôle dont l'espacement interélectrode est de 0,5m, mais étant constitué de 48 électrodes, la profondeur d'investigation atteignable est plus importante (espacement 2a). La Figure 4.9 présente le résultat d'une inversion des données brutes d'une campagne TREC vis-à-vis de la TRE de référence effectuée aux mêmes coordonnées. Il ressort que les gammes de ρ_{vraie} mises en évidence par ces deux prospections ne sont pas comparables. Notons qu'à l'image de la TRE de référence, la TREC présente des variations latérales de gamme de résistivités, avec des valeurs fortes entre 0 et 30m et des valeurs plus faibles entre 30 et55m. L'étude des données TREC met en lumière la dispersion inhérente aux mesures de ρ_{app} dans le profil TREC. La grande variation de ρ_{app} pour deux mesures voisines (2 blocs voisins) ne permet également pas de faire ressortir les géométries des hétérogénéités.

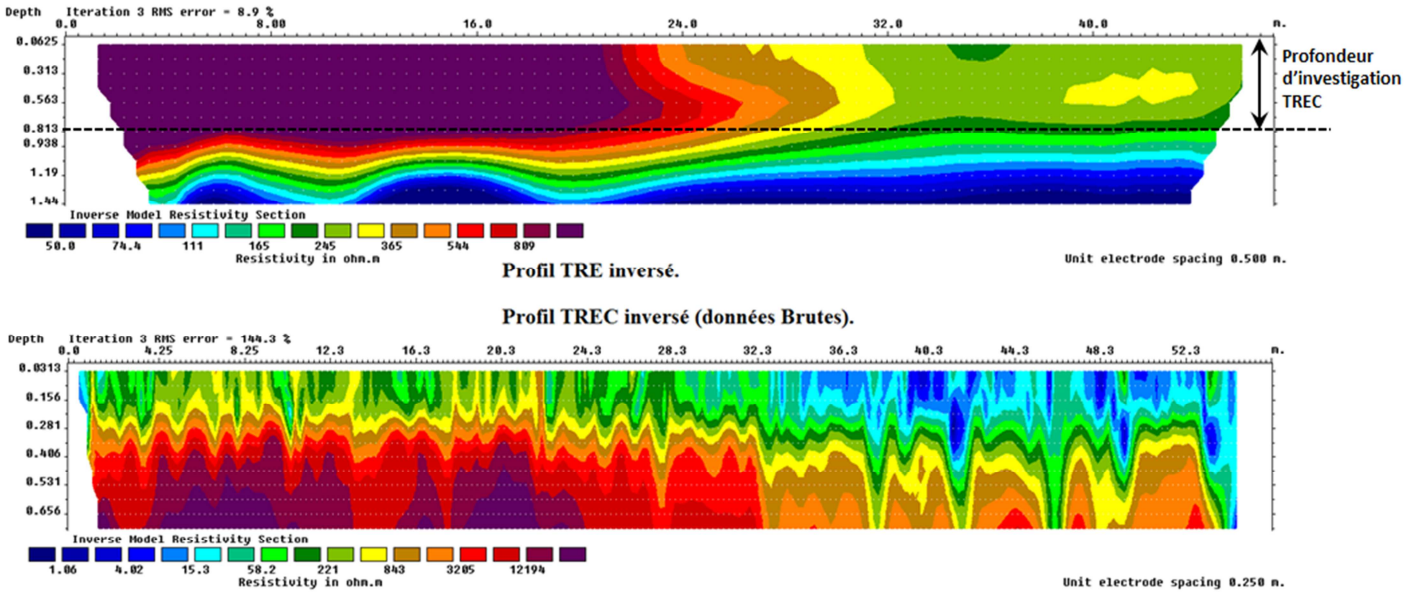


Figure 4.9 : Comparaison des résistivités vraies obtenues suite à l'inversion des données de TRE et TREC.

Cette lecture des premières données résultant d'une prospection TREC souligne que les données recueillies ne peuvent être directement interprétables par le biais des outils traditionnellement utilisés pour ce type de mesure (Res2dinv). Une phase préalable de traitement des données est nécessaire pour identifier les sources d'erreur et faciliter l'interprétation des données. Dans un premier temps, nous allons travailler sur les données brutes, et traiter les bruits de mesure générés par la nature des contacts électriques sol-électrode.

2.2. Revue des moyens de filtrage et traitement de données bruitées.

Le traitement de données bruitées vise principalement à rendre interprétable une série de mesures présentant un caractère aléatoire trop important ou des variations chaotiques ne pouvant être rattachées à aucune gamme des propriétés étudiées. Le traitement de données bruitées est un problème pouvant être abordé par plusieurs voies. La première est l'approche statistique. Si la moyenne et la variance permettent de faire ressortir les tendances principales des mesures, on peut mettre en œuvre un filtrage des valeurs aberrantes par des seuils au-delà desquels (valeurs maximales et minimales) les mesures sont filtrées (Macnae et al 1984, Ferahtia et al 2012). Un filtrage peut également être effectué sur des variations de propriété trop importantes en rejetant des extrema d'amplitude (Strack et al 1989).

Les approches temporelles ou spatiales des séries de données constituent une seconde voie. Elles permettent de mettre en évidence des zones (espace) ou des durées (temps) au sein desquelles la variable étudiée présente des variations qualifiées de régulières. Le traitement des données bruitées est abordé comme étant un moyen de régulariser (Fullana 2002) une série présentant des variations trop importantes pour la propriété étudiée. Les premières études sur le traitement de données géophysiques bruitées ont été effectuées sur des données temporelles telles que les mesures électromagnétiques temporelles (Reninger 2012). Les méthodes de traitement de données les plus usuelles pour l'étude de séries de données bruitées s'intéressent à discrétiser les séries de données en fréquences propres (Köhler et al 2005). Pour ces études la Transformée de Fourier Rapide (FFT), ainsi que l'analyse par ondelette permettent de filtrer des données ponctuelles aberrantes, mais également les variations de propriété jugées non interprétables vis-à-vis de l'échelle de la prospection.

Des études des méthodes de filtrage et de traitement des séries de données bruitées, que ce soit dans le domaine temporel ou dans l'espace, ont été réalisées par Doucet et al (2010), ainsi que Bellanger et al (2006). Il ressort de ces études qu'une analyse par FFT ou ondelette permet de prendre en compte la dimension des structures recherchées, tandis qu'un traitement par moyenne pondérée mobile permet uniquement de lisser les séries de données en focalisant le filtrage et le traitement sur les données ponctuelles aberrantes. Les filtrages et analyses de donnée par FFT permettent d'effectuer une étude d'une part sur les valeurs aberrantes, d'autre part sur les variations correspondant à des structures de taille trop réduite vis-à-vis de l'échelle de la campagne de reconnaissance d'autre part.

Dans ce qui suit, nous développerons les deux méthodes de traitement des données brutes et en comparerons les mérites.

2.3. Le lissage des données TREC par moyenne mobile pondérée.

Notons que préalablement au traitement de l'ensemble de la base de données des mesures de TREC, il est possible d'avoir une lecture critique des résultats et d'étudier « individuellement » des groupes de données présentant des variations trop importantes. Cette phase de consolidation des données s'appuie sur l'utilisation de l'un des critères suivants et en application de l'Équation 4.1:

• la variation d'un facteur 100 voire 1000 des résistivités entre deux points de mesure voisins.

• l'ensemble d'une diagonale de résistivité nulle du fait d'une erreur d'injection de courant.

(si $\Delta U = 0$, alors : $\rho_{app} = 0$)

• une résistivité infinie du fait d'un manque de couplage entre une électrode et le sol.

(si I = 0, alors : $\lim_{I \to 0} \rho_{app} = 0$)

A l'image de l'étude menée par Ferahtia et al (2012), il est possible d'automatiser ce filtrage des données considérées comme erronées et également non traitable en raison de leur variation trop importante vis-à-vis des gammes de variation des propriétés physiques mesurées.

La base du procédé visant à effectuer un lissage des données TREC repose sur un lissage itératif par moyenne mobile pondérée. La moyenne pondérée prend en compte 3 points lors de la première itération ; à la deuxième itération, ce sont également 3 points qui sont considérés avec les mêmes coefficients pondérateurs, mais les points de mesures prennent en compte le résultat de la première itération (Figure 4.10).

2.3.1. Principe du lissage par itération de moyenne mobile pondérée.

Selon Gavin (1993), l'utilisation d'une Moyenne Mobile Pondérée (MMP) est envisageable pour traiter des données bruitées. Le processus de MMP est effectué individuellement sur chaque niveau composant une TREC (10 au total). Ce processus de MMP vise à obtenir des résultats comparables au processus de lissage (Kafadar et al 2002, Dujardin et al 1997) ; le lissage simple affecte un poids identique à tous les points considérés.

Le principe du lissage des mesures TREC repose sur une moyenne mobile pondérée à plusieurs itérations. En cela, le premier avantage de cette approche est qu'elle prend en compte *n* points de part et d'autre de la mesure à débruiter. Le second avantage est que le poids des points voisins considérés est pondéré par un coefficient dépendant de leur distance au point à débruiter, selon le principe du lissage exponentiel (dont l'Équation 4.2 ne permet de calculer les coefficients que dans une direction). On appelle filtre exponentiel de la série x_t la série y_t définie par l'Équation 4.2.

Équation 4.2

$$y_t = \beta . \sum_{k=0}^{\infty} (1-\beta)^k . x_{t-k}$$

avec : $\beta \in]0\,;1[$

Le lissage par filtre exponentiel est une combinaison linéaire infinie de toutes les observations passées avec la pondération $\alpha_t = \beta(1-\beta)^k$. Cette suite de coefficients est une suite géométrique de premier terme β ; de raison 1-β, décroissant très rapidement vers 0 et tel que : $\sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k = 1$. Plus β est proche de 1, moins les valeurs voisines comptent au regard des valeurs lointaines et, au contraire, plus β est proche de 1, plus elles comptent.

Soit un profil à un niveau de prospection donné, chaque point formant ce profil est placé en une coordonnée x connue. De plus, tous les points de mesure sont séparés par le même intervalle correspondant au pas de mesure. La Figure 4.10 illustre l'ensemble des relations entre les points auxquels est appliqué le procédé de lissage.

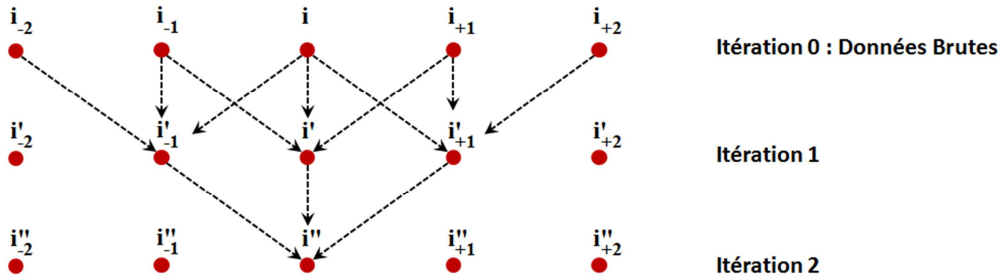


Figure 4.10 : Liens entre les points de mesure en fonction des itérations de moyenne mobile pondérée.

Admettons un point à la position i. A la première itération, le point i' sera le résultat d'une moyenne pondérée de trois points (i_{-1}, i et i_{+1}), avec les coefficients suivants (pour β = 0.5) :

- point central (i) : coefficient de 0.5 = 50 %.
- points voisins (i_{-1} et i_{+1}) : coefficients de 0.25 = 25 %.

D'où la formule générale : $\boldsymbol{i' = 0.25 * i_{-1} + 0.5 * i + 0.25 * i_{+1}}$

La procédure est répétée à la deuxième itération pour obtenir i'' à partir des points i'_{-1} ; i' ; i'_{+1}.

2.3.2. Détermination du nombre d'itérations nécessaires et des coefficients pondérateurs.

Le nombre d'itérations réalisables pour le procédé de lissage des données TREC est dans l'absolu infini ; ainsi un point ayant une mesure très bruitée sera lissé relativement à ses points voisins. Ce « voisinage » est plus ou moins étendu en fonction du nombre d'itérations. Ce nombre d'itérations doit être défini afin d'obtenir un compromis entre l'abaissement du niveau de bruit et les variations de résistivité du sol autour de ce point. Les valeurs obtenues après lissage des mesures TREC peuvent être comparées aux valeurs issues de la TRE.

Le facteur RMSE (Root Mean Square Error) est calculé pour chaque niveau d'un profil donné en fonction des itérations de moyenne pondérée qui y seront effectuées. Dans le but d'obtenir un nombre convenable de points de mesures comparables et sur une distance permettant de recouper plusieurs structures géoélectriques notables, les mesures TRE statiques sont effectuées avec un dispositif DD d'espacement interélectrode de 1m, tandis que le dispositif TREC en dipôle-dipôle a un écartement interélectrode de 0,5m. De ce fait, seuls 5 niveaux sont comparables entre ces deux prospections (Figure 4.11).

Pour obtenir une variation ΔRMSE(%) inférieure à 1 %, les premiers niveaux nécessitent seulement 5 à 6 itérations (niveau 1, 2 et 3). Cela reflète que même si le nombre d'itérations augmente (10 et plus), l'écart résiduel entre les mesures TRE et TREC ne sera que peu réduit. Mais aussi que la perte d'information contenue dans les données TREC (gradients des variations de ρ_{app}) n'en sera que peu affectée.

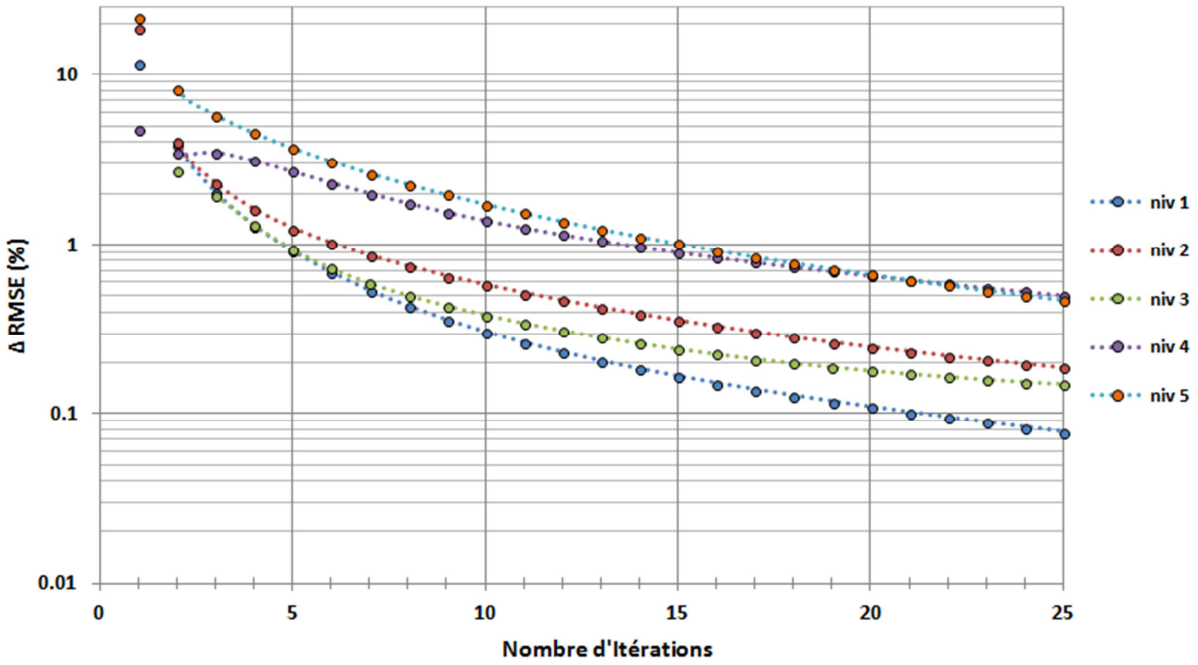


Figure 4.11 : Variation (%) du RMSE en fonction du nombre d'itérations.

Pour l'ensemble des niveaux, on admet un seuil pour ΔRMSE(%) inférieur à 2%. D'après ce seuil, on remarque qu'un total de 10 itérations suffit pour l'ensemble des niveaux d'une TREC pour lisser suffisamment les données bruitées.

Le Tableau 4.6 regroupe l'ensemble des coefficients pondérateurs appliqués aux 21 points pris en compte pour une moyenne pondérée à 10 itérations. À partir du 6^{ième} point voisin de la mesure à lisser, le coefficient pondérateur est inférieur à 1%. Sur le terrain, en supposant un pas de mesure de 50cm, les valeurs de résistivité lissées résultent d'au moins 1% des gammes de résistivité apparente incluses dans une zone de 2,5m de part et d'autre de la mesure considérée. En comparaison avec les

coefficients pondérateurs obtenus avec l'Équation 4.2, pour un lissage par MMP, la répartition des coefficients pondérateurs de part et d'autre du point i est équivalente à celle d'un lissage exponentiel de paramètre β=0,5. Dans le cas du lissage exponentiel, la pondération des points i-1, i et i+1 doit être réduite respectivement à 16, 17,6 et 16% pour que la somme de l'ensemble des coefficients pondérateurs soit égale à 1.

				<10%			**<1%**				
Positions	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Coefficients pondérateurs (%)	17,62	16,02	12,01	7,39	3,7	1,48	0,46	0,11	0,02	2E-3	1E-4

Tableau 4.6 : Coefficients pondérateurs des points à la droite de la mesure considérée.

Le lissage des données TREC par MMP supprime les variations de ρ_{app} sur plusieurs ordres de grandeur entre deux points voisins de manière aléatoire. Soulignons que le fait d'effectuer trop d'itérations ne peut compromettre la représentativité des données TREC, étant donné que le taux de variation des données est nettement réduit à partir de 10 itérations.

2.4. Lissage des données TREC par analyse de Fourier (FFT).

Une série d'études permet d'aborder le traitement de données bruitées par une analyse par Transformée de Fourier (Angelini et al 2000, Amato et al 2000, De Canditiis et al 2006). Dans cette optique, on peut considérer chaque niveau composant une TREC comme étant une série de données pouvant être représentée par un spectre fréquentiel. Le fait d'appliquer un traitement par FFT (Fast Fourier Transform) sur un profil TREC permet d'obtenir un spectre fréquentiel. Ainsi l'unité des fréquences n'est pas en Hertz (Hz) mais en m^{-1} car les différents points ne sont pas séparés par un temps d'échantillonnage constant, mais par une distance (pas de mesure (α)) constante. De ce fait, tous les points composant un profil étant séparés par une même distance de mesure (le pas α), il est possible d'associer α à un Δt constant et l'amplitude du signal à une résistivité apparente. Une TREC est une tomographie composée de 10 niveaux pouvant être décrits chacun par une fonction représentant une amplitude de signal en tout point de mesure. Une approche par traitement en FFT permet de décrire le signal d'un niveau par une analyse fréquentielle des variations de ρ_{app} en fonction du linéaire parcouru. La FFT décompose alors un signal en différentes fréquences caractéristiques (ici en m^{-1}). L'utilisation d'une FFT dans le traitement d'une TREC concerne l'identification du niveau de bruit présent dans le signal (Figure 4.12). De plus, comme illustré par la Figure 4.12, les fréquences représentées dans le spectre (pour un niveau de TREC) sont décrites par :

(i), les basses fréquences correspondent au signal TREC selon les différentes échelles abordées,

(ii), les hautes fréquences correspondent au bruit de mesure.

L'utilisation de ces différentes gammes du spectre dans le processus inverse d'une FFT est présentée dans la Figure 4.12. La nomenclature des gammes ainsi que les échelles des anomalies auxquelles elles correspondent sont illustrées dans la Figure 4.13.

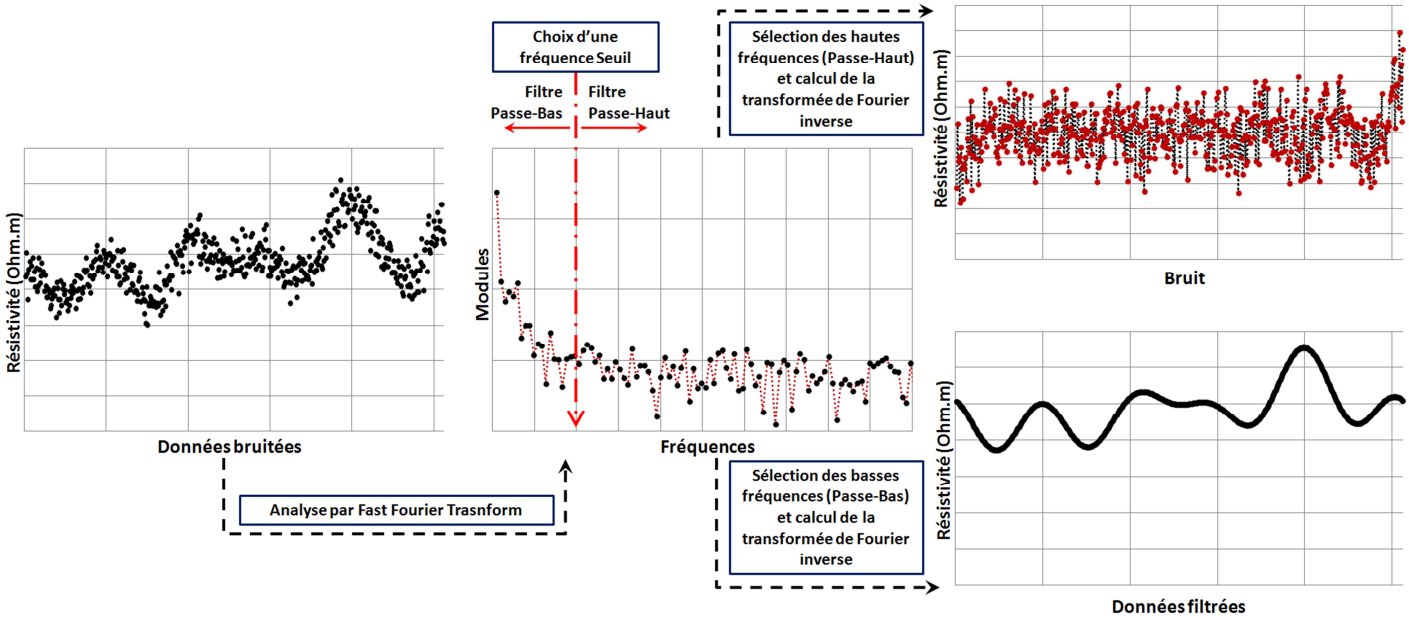


Figure 4.12 : Principe du processus de traitement des données TREC par FFT.

La détermination des fréquences filtrées dépend du pas de mesure retenue pour les mesures TREC, mais aussi de la taille des hétérogénéités à repérer. Les hautes fréquences étant rattachées aux bruits des mesures, un filtre passe-bas permet d'obtenir des données ''débruitées''. Par cette approche tout niveau composant une TREC peut être représenté par un spectre fréquentiel unique (Figure 4.13).

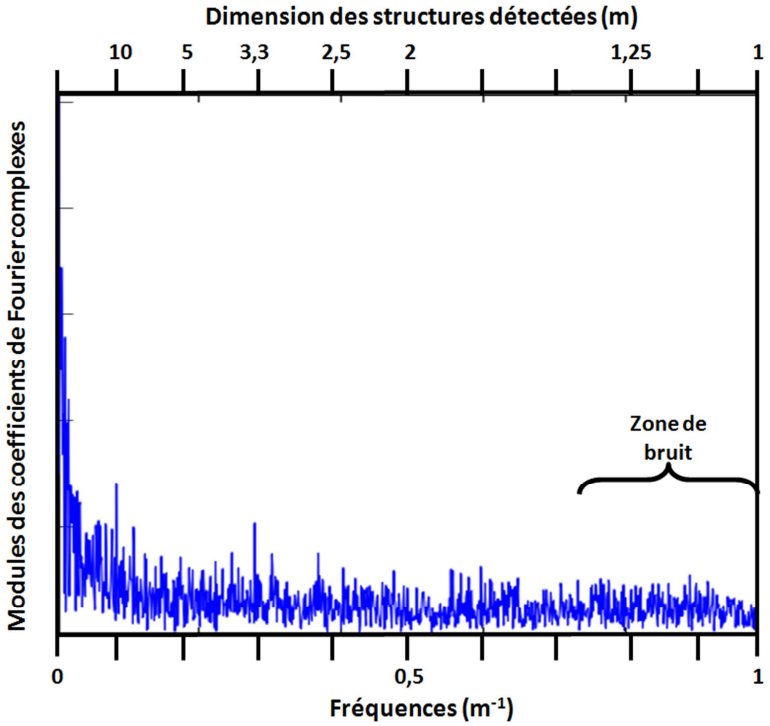


Figure 4.13 : Description des dimensions des structures géoélectriques en fonction des fréquences pour un pas de mesure de 50cm.

Le choix de la fréquence seuil détermine la dimension minimale des structures géoélectriques qui peuvent être mise en évidence par une TREC lissée par filtre passe-bas. La Figure 4.13 illustre l'ordre de grandeur des structures selon les fréquences seuil choisies. Dans le cadre de mesures de TREC, principalement effectuées sur de grands linéaires (plusieurs centaines de mètres), on admet qu'une fréquence seuil de 0,25m^{-1} (structure minimale de 4m) permet de mettre en évidence les structures principales prospectées.

Le choix de la fréquence seuil peut également être dicté par la taille des structures que l'on souhaite étudier : pour une prospection de digue, des anomalies conductrices d'ordre métrique (effet Renard et infiltration) sont les principales structures recherchées ; inversement, la prospection sur une parcelle agricole vise principalement à zoner les structures géoélectriques d'un ordre de grandeur de plusieurs centaines de mètres.

En approche complémentaire, à partir d'un panneau statique en dipôle-dipôle avec un espacement interélectrode de 1m, on filtre par un filtre passe-bas les résistivités apparentes mesurées pour le niveau 1. Ce procédé est effectué en commençant par un filtre passe-bas prenant en compte toutes des fréquences définies par l'analyse par FFT (dans ce cas f_{max}=0,5m^{-1}), jusqu'au lissage par filtre passe-bas avec une fréquence seuil de 0,05m^{-1} (Figure 4.14). On détermine alors le pourcentage de variation entre les résistivités apparentes d'origine et les résistivités apparentes lissées en fonction des fréquences seuil. On estime une fréquence critique en deçà de laquelle un filtre passe-bas provoque une perte d'information. Cette perte d'information est mise en évidence par une variation entre les données lissées et les données d'origine supérieure à 10% (cette valeur est le seuil au-dessus duquel deux structures géoélectriques peuvent être distinguées (Buvat et al 2012)). Les fréquences supérieures à cette fréquence critique peuvent être définies comme du bruit de mesure (pour ce cas d'étude). En cela, un lissage avec un filtre passe-bas comprenant les fréquences supérieures à 0,2m^{-1} ne provoque que des variations de résistivité apparente inférieures à 10% vis-à-vis des ρ_{app} d'origine.

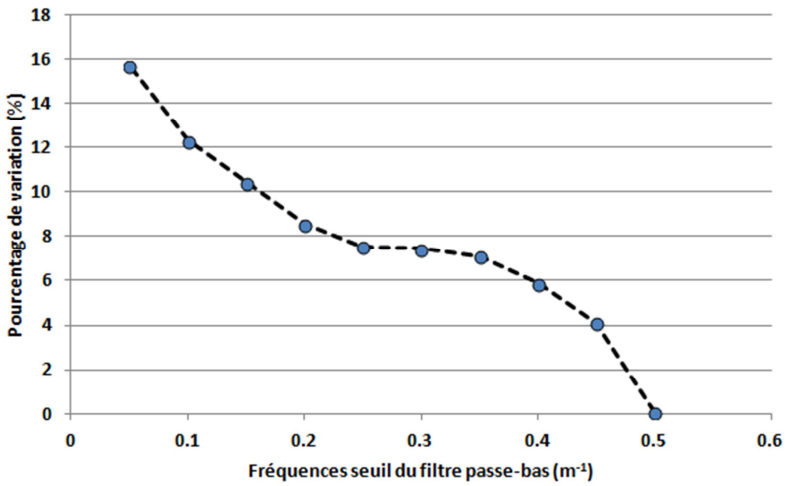


Figure 4.14 : Perte d'information suite au lissage par filtre passe-bas.

2.5. Impacts sur les mesures de TREC du lissage des données.

La Figure 4.15 est relative aux données du premier niveau d'une TREC. Elle compare les résultats d'une TRE et ceux d'une TREC et rend compte de l'impact du lissage par les deux méthodes : lissage avec 10 itérations de moyenne mobile pondérée (MMP), lissage des données par le principe du filtre passe-bas avec trois fréquences seuil égales à 0,35 , 0,2 et 0,1m^{-1}. Le pas de mesure des données TREC et TRE est identique et égal à 1m. Les résultats confirment que les variations effectives des résistivités au sein du massif sont, du fait du bruit, « noyées » parmi les mesures de TREC, mais sont visibles après traitement et conformes à celles obtenues avec la TRE. Cette analyse montre également que les différentes fréquences des filtres passe-bas utilisés permettent de mettre en évidence des variations à différentes échelles. Par exemple la variation de résistivité apparente rencontrée entre x=13m et x=18m (extension de 5m), est repérée dès lors que les fréquences seuil du filtre passe-bas sont égales à 1/5=0,2m^{-1}.

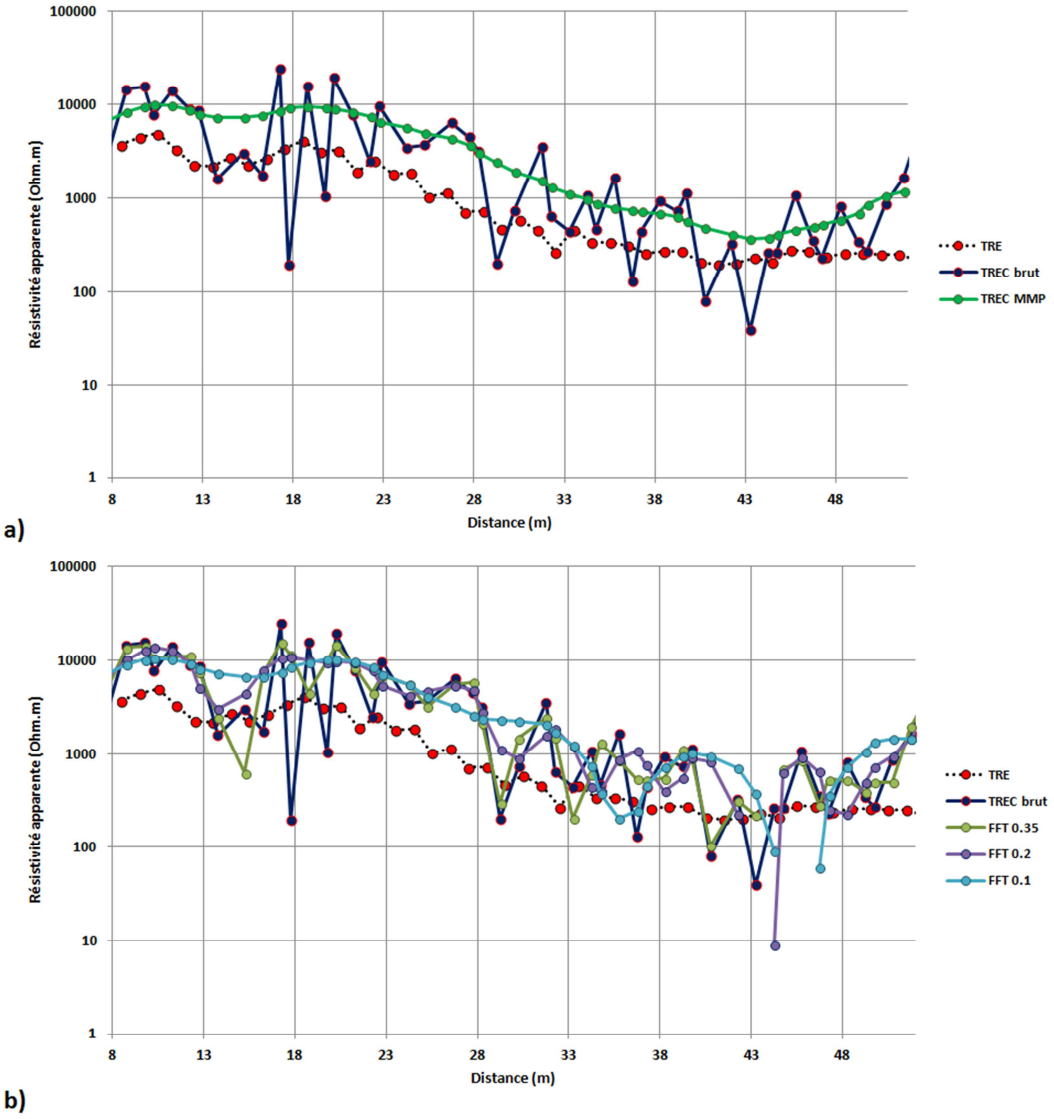


Figure 4.15 : Impact des processus de lissage sur les données du niveau 1 d'un profil TREC, a) lissage par MMP, b) lissage par filtre passe-bas à différentes fréquences seuil.

Le Tableau 4.7 représente l'évolution du coefficient de corrélation entre les données TRE et les données TREC à différentes étapes de lissage (brutes, MMP et FFT). La Figure 4.15 illustre le fait que les gammes de ρ_{app} des données TREC lissées ne sont pas identiques à celles des ρ_{app} d'une TRE, pour un volume d'investigation équivalent. Le calcul des coefficients de corrélation entre les données TRE et TREC lissées montre que les variations principales des ρ_{app} de la TRE sont mises en avant au sein du profil TREC une fois les ρ_{app} lissées. Il en résulte que le lissage des données TREC (MMP et FFT), rend ces données analysables car présentant les mêmes variations de ρ_{app}, mais pas dans les mêmes gammes de valeur.

Lissages	**Données Brutes**	**MMP**	**FFT : fréquences seuil du filtre passe-bas (m^{-1})**			
			0,35	**0,2**	**0,1**	**0,05**
Coefficient de corrélation	0,658	0,931	0,843	0,920	0,922	0,887

Tableau 4.7 : Corrélation entre les données TRE et les données TREC selon les différents niveaux de lissage.

L'ensemble des mesures, au sein d'un niveau de prospection, présente un décalage relativement constant entre les mesures attendues et les mesures effectives. Ces traitements des mesures TREC mettent bien en évidence le potentiel de la prospection à obtenir des résultats comparables aux mesures TRE statiques.

Le lissage des données n'est cependant pas suffisant pour pourvoir interpréter convenablement les données issues des prospections TREC : il faut aussi identifier les sources de l'écart observé entre les mesures TRE et TREC.

2.6. Discussion sur le lissage par MMP et FFT.

Nous venons de démontrer l'utilité d'un lissage des données TREC par MMP ou FFT. Le choix entre les deux méthodes doit tenir compte :

• du contexte de l'étude : campagne de mesure visant à effectuer un profilage ou une tomographie.

• de l'échelle de la campagne de mesure : mesures effectuées sur 50m ou sur plusieurs centaines de mètres.

• de l'exploitation envisagée des données : analyse des résistivités apparentes ou des résistivités vraies.

On note l'avantage qu'a le lissage FFT sur de grands linéaires pour mettre en avant les différentes tailles des structures géoélectriques en fonction des fréquences seuil des filtres passe-bas choisis. Le lissage par MMP est plus adapté aux profils d'un faible linéaire ne représentant généralement qu'une à deux structures géoélectriques ou une transition entre deux structures.

Notre choix sera d'employer le lissage par MMP aux TREC constituées de moins d'une centaine de points de mesure ou prospectant moins d'une centaine de mètres, et le lissage par FFT à des TREC de plus d'une centaine de mètres ou constitués de plus d'une centaine de points de mesure.

Pour appuyer ce choix, ces méthodes de lissage seront conjointement appliquées à des données recueillies sur des sites expérimentaux, permettant d'étudier l'impact des lissages sur des profils de moins d'une centaine de mètres et une prospection à grand rendement (§4).

3. Développement d'un processus de traitement des données TREC.

Les campagnes de mesures visant à mettre au point le processus de traitement des données TREC pour les rendre interprétables se sont toutes déroulées sur un site expérimental situé sur la commune de Pessac. Les coordonnées du site expérimental sont 44°47'53.7''N et 0°36'33.4''O. Les bases de données du BRGM nous indiquent que les sols de surface sont composés de sables argileux et de graviers du Quaternaire (Figure 4.16).

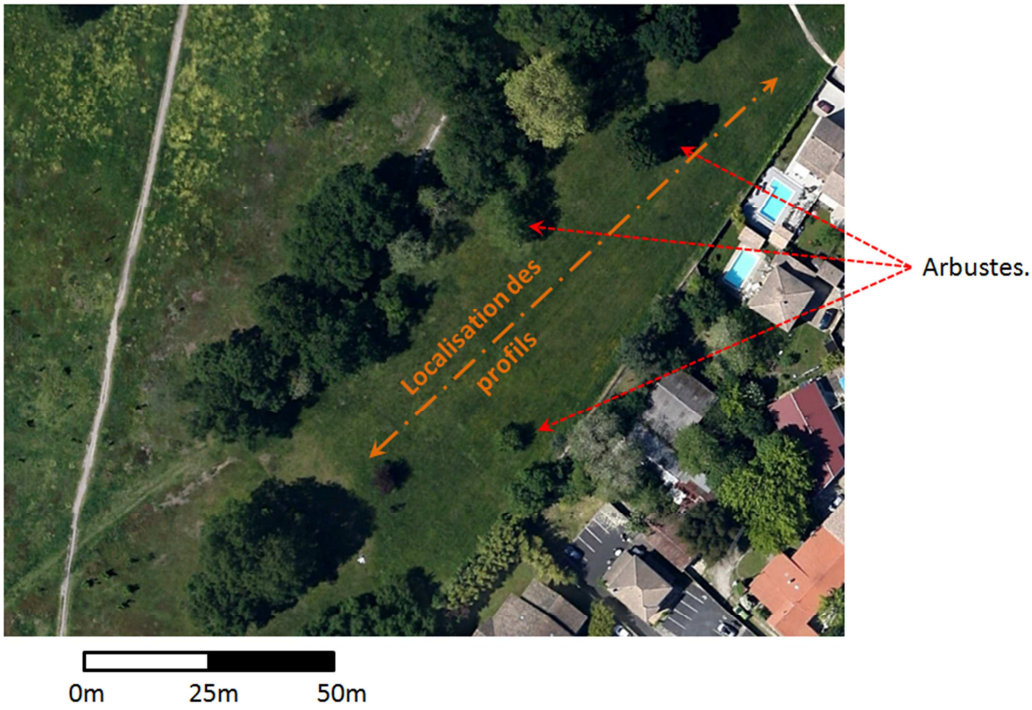


Figure 4.16 : Site expérimental pour le développement du traitement des données TREC.

Des observations sur site nous ont permis de relever la présence d'arbres et arbustes. La présence sporadique de ces végétaux au sein de la parcelle étudiée nous a amené à localiser et à prospecter les différentes gammes de résistivité causées par les réseaux racinaires ainsi que les variations latérales des propriétés physiques des sols, causées par la répartition inégale de remblais.

3.1. Correction des gammes de résistivités apparentes mesurées.

3.1.1. Principe de la correction.

Au regard des résultats des traitements des données TREC par lissage MMP et FFT, il convient d'analyser les moyens de corriger les mesures TREC lissées pour que ces dernières présentent les mêmes gammes de résistivité apparente que les mesures TRE effectuées en des positions identiques. La Figure 4.15 met en évidence un écart relativement constant entre les mesures de résistivité

apparente de TREC lissées et de TRE. Dans le but de quantifier cet écart, un rapport moyen par niveau de prospection (nommé par la suite X_c : facteur d'écart). Le facteur X_c est calculé entre les données TREC lissées (MMP ou FFT) et TRE pour chaque niveau composant une TREC et pouvant être comparé avec un niveau TRE ayant une profondeur d'investigation équivalente. Le facteur X_c est déterminé d'après l'Équation 4.3. La source principale causant cet écart est analysée dans le §3.2.

Équation 4.3

$$\boldsymbol{X_c = \frac{1}{n} * \sum_{1}^{n} \frac{log.(\rho_{TREC})}{log.(\rho_{TRE})}}$$

ainsi, on a pour un niveau d'étude :

$$\boldsymbol{\rho_{TREC} = \rho_{TRE}^{X_c}}$$

avec : n : nombre de points de mesure comparables au sein du niveau i.

ρ_{TREC} : résistivité apparente à la position x, au sein du niveau i d'une TREC.

ρ_{TRE} : résistivité apparente à la position x, au sein du niveau i d'une TRE.

3.1.2. Exploitation des résultats.

La Figure 4.17a illustre le niveau de bruit dans les mesures de TREC, et les Figure 4.17b et Figure 4.17c illustrent la régularisation des résistivités mesurées par l'application des procédés de lissage par MMP et FFT avec une fréquence seuil du filtre passe-bas fixée à 0,2m^{-1}. Le facteur X_c est quantifié dans le Tableau 4.8, soulignant que les données TREC présentent un taux de corrélation significatif pour les premiers niveaux de prospection. Cette différence dans le taux de corrélation en fonction des niveaux d'investigation souligne que le dispositif TREC est sujet aux bruits de mesure propres aux prospections en cinématique, ainsi qu'aux limites d'investigation propres au dispositif dipôle-dipôle sur lequel il est fondé. Comme souligné dans le §1.2, la profondeur d'investigation est fonction de l'écartement interélectrode du dipôle d'injection (a) et de la taille maximale du dispositif dipôle-dipôle (L). Selon Marescot (2008), l'inconvénient majeur du dispositif dipôle-dipôle tient au fait que les électrodes de mesure de potentiel (P_nP_{n+1}) sont disposées en dehors du dipôle d'injection du courant (AB), l'intensité du signal mesuré par le dernier couple ($P_{10}P_{11}$) est alors très faible. Il est alors convenu qu'au-delà du dixième niveau d'un dispositif dipôle-dipôle, l'intensité du signal n'est plus suffisante pour distinguer l'information du bruit de mesure. L'analyse de la Figure 4.17 montre que les données de TREC s'agencent en 5 classes, correspondant chacune à un niveau du profil comparé, et sont décrites en moyenne pour chaque niveau par un rapport : $\boldsymbol{\rho_{TREC} = \rho_{TRE}^{X_c}}$, les valeurs du facteur X_c augmentent avec la profondeur d'investigation.

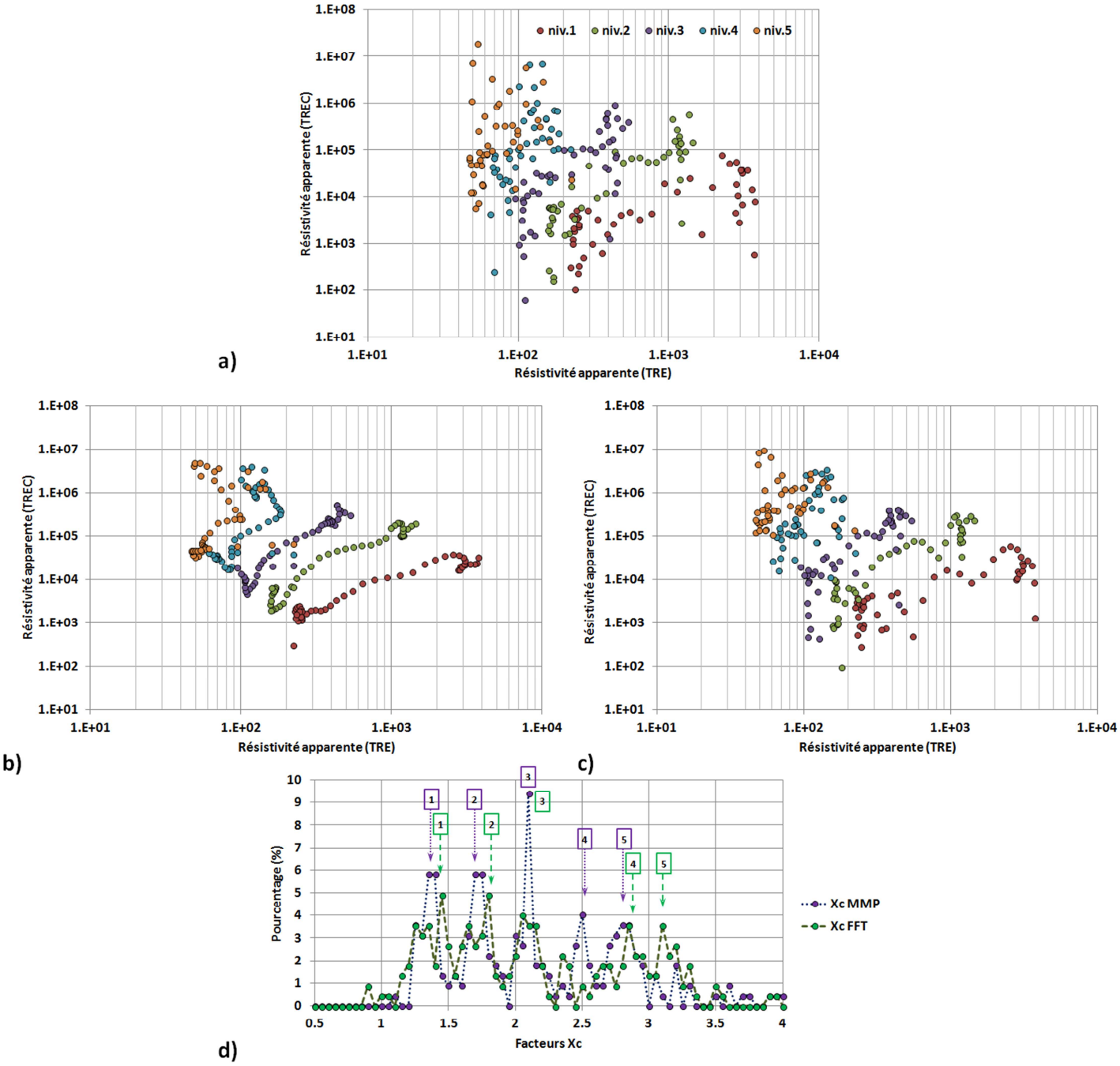


Figure 4.17 : Relations entre les résistivités issues de TREC et de TRE, a) comparaison sans lissage, b) comparaison avec lissage par MMP, c) comparaison avec lissage par FFT (passe-bas = 0,2m^{-1}), d) répartition des Xc pour l'ensemble des niveaux étudiés.

Niveaux	Lissage par MMP Facteurs Xc			Lissage par FFT (passe-bas : 0,2m^{-1}) Facteurs Xc		
	Moyenne	**Ecart-type**	**Coeff. Vari.**	**Moyenne**	**Ecart-type**	**Coeff. Vari.**
Niveau 1	**1,32**	**0,07**	**0,05**	**1,29**	**0,14**	**0,11**
Niveau 2	**1,67**	**0,08**	**0,05**	**1,63**	**0,18**	**0,11**
Niveau 3	**2,03**	**0,09**	**0,05**	**1,95**	**0,23**	**0,12**
Niveau 4	**2,59**	**0,29**	**0,11**	**2,65**	**0,29**	**0,11**
Niveau 5	**2,94**	**0,42**	**0,11**	**3,14**	**0,35**	**0,11**

Tableau 4.8 : Détermination des facteurs Xc en fonction des niveaux de prospection TREC et du procédé de lissage des données.

On remarque que les facteurs X_c déterminés suite à un lissage par MMP ou par FFT sont relativement équivalents. Notons également que l'impact du procédé de lissage des données par FFT provoque une dispersion significative des données au sein des niveaux de surface et atteint une dispersion équivalente à celle du lissage par MMP à partir du niveau 4.

3.2. Part de la Résistance de contact Rc.

3.2.1. Notions concernées.

L'existence d'une résistance de contact (Rc) est inhérente à toute mesure de résistivité apparente. Cette résistance de contact est intrinsèque au dispositif de mesure (flute d'électrodes, connectiques au matériel de mesure, électrodes, longueur de câble,…). Cherchons à identifier et quantifier la part de la résistance de contact causée par les roues dentées du dispositif TREC et par le mouvement du dispositif lors des mesures. Cette résistance de contact additionnelle liée au TREC (Rcad) est supposée s'ajouter à la résistance du dispositif TRE (Rc) du fait d'une faible surface de contact des électrodes TREC et de ce que le dispositif est en mouvement. L'Équation 4.4 illustre ces notions et l'Équation 4.5 ainsi que son développement permet de quantifier Rcad vis-à-vis des résistivités apparentes mesurées en TRE et du facteur X_c associé au niveau étudié.

Équation 4.4

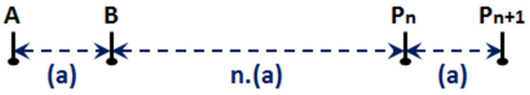
$$\boldsymbol{TRE}: \ \boldsymbol{\rho_{TRE} = k.\left(\frac{U}{I} + \ R_c\right)} \qquad \boldsymbol{TREC}: \ \boldsymbol{\rho_{TREC} = k.\left(\frac{U}{I} + R_c + R_{cad}\right)}$$

avec : k : facteur géométrique

I : intensité de courant injecté dans le sol.

U : différence de potentiel.

Le facteur k fait intervenir la géométrie du dispositif et varie avec la profondeur. La Figure 4.18 présente un schéma de dispositif dipôle-dipôle avec la formule de calcul du facteur géométrique k, adaptée à ce dispositif. On peut ainsi exprimer le facteur X_c en fonction de la résistivité de contact :



n = niveau d'investigation

$$k = \pi . n . (n + 1) . (n + 2) . (a)$$

Figure 4.18 : Formule de calcul du facteur géométrique k pour un dispositif dipôle-dipôle.

Équation 4.5

$$\boldsymbol{TRE}: \ \boldsymbol{\rho_{TRE} = k . \left(\frac{U}{I} + R_c\right)} \quad ; \quad \boldsymbol{TREC}: \ \boldsymbol{\rho_{TREC} = k . \left(\frac{U}{I} + R_C + R_{cad}\right) = \rho_{TRE} + k . R_{cad}}$$

$$\boldsymbol{X_C = \frac{ln(\rho_{TREC})}{ln(\rho_{TRE})} = \frac{ln(\rho_{TRE} + kR_{cad})}{ln(\rho_{TRE})}}$$

$$\boldsymbol{X_C . ln(\rho_{TRE}) = ln(\rho_{TRE} + k . R_{cad})}$$

$$\boldsymbol{(\rho_{TRE})^{X_c} = \rho_{TRE} + k . R_{cad}}$$

De ce fait :

$$\boldsymbol{R_{cad} = \frac{\rho_{TRE} \cdot \left[(\rho_{TRE})^{X_c - 1} - 1\right]}{k}}$$

Ainsi, dans le cas où les roues dentées du dispositif TREC se prêtent de façon optimale à la prospection d'un site, les résistivités apparentes mesurées en TREC sont équivalentes à celles mesurées en TRE, ce qui conduit à un $X_c = 1$, et de ce fait, à une résistance de contact additionnelle Rcad nulle.

3.2.2. Exploitation des résultats.

D'après l'Équation 4.5 et les X_c déduits précédemment, on calcule la Rcad moyenne pour l'ensemble des niveaux prospectés en TREC. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 4.9. On note que l'ensemble des Rcad calculées sont équivalentes et ne dépendent pas du niveau prospecté. La Rcad est donc bien imputable aux roues et aux caractéristiques techniques du dispositif TREC. L'étude de ces relations sur un profil donné permet de déterminer une Rcad moyenne pour chaque niveau de prospection. Une Rcad moyenne de l'ordre de 750 Ω peut être rattachée au dispositif utilisé. Il faut tout de même noter que pour toute prospection électrique en géophysique, une résistance de contact est toujours présente mais n'influence pas les mesures de manière excessive. Cependant, dans le cas d'une prospection de TREC, l'influence de Rcad est bien plus notable et dommageable pour l'ensemble des données récoltées. La résistance de contact possède une influence sur les mesures tout aussi importante que les mesures elles-mêmes. On remarque également que le dernier niveau de prospection est très sujet aux bruits des mesures ; la Rcad conditionnant ces mesures souligne cet aspect.

Niveaux	k (facteur géométrique)	MMP		FFT ($0,2m^{-1}$)	
		X_C	R_{cad} (Ω)	X_C	R_{cad} (Ω)
Niveau 1	19	1,32	767	1,29	593
Niveau 2	75	1,67	748	1,63	566
Niveau 3	188	2,03	560	1,95	349
Niveau 4	377	2,59	726	2,65	978
Niveau 5	659	2,94	950	3,14	2519

Tableau 4.9 : Calcul de la résistance de contact Rcad en fonction des procédés de lissage.

3.3. Correction de la résistance de contact.

Pour améliorer les corrélations entre TREC et TRE un processus permettant de calibrer les données TREC est nécessaire. Ce processus est envisageable suite à un lissage par MMP ou FFT.

Le facteur X_c résultant des résistances de contact est calculé pour chacun des niveaux TREC comparables à une TRE, ce qui impose que des données TREC et TRE sont faites au même endroit. De ce fait, au stade actuel du développement du dispositif de mesure, des données TRE doivent encore être effectuées pour étalonner le TREC. Chaque niveau est décrit par un facteur X_c moyen unique.

Dans l'ensemble des calculs suivants, les X_c utilisés sont réduits à seulement deux chiffres significatifs. Pour chaque niveau considéré, la résistivité apparente mesurée en chaque point (ρ_{app}), obtenue après lissage des données par MMP ou FFT, est traitée selon l'Équation 4.6 pour obtenir une résistivité apparente calibrée (C-MMP ou C-FFT) (ρ'_{app}).

Équation 4.6

$$\rho'_{app} = \rho_{app}^{(1/Xc)}$$

La valeur de résistivité apparente ρ'_{app} est dite calibrée.

3.4. Impact des traitements sur le bruit des mesures.

L'étude de l'évolution de la corrélation entre les données TRE et TREC, en fonction des différents traitements effectués, est complétée par l'analyse du facteur RMSE sur l'ensemble des données (Équation 4.7). La comparaison relative des RMSE permet de qualifier la proportion d'écart entre les données obtenues suite aux différents traitements en considérant la TRE comme la référence (Tableau 4.10). Le choix de cet indicateur repose sur le fait que le RMSE met en exergue les grands écarts entre les données. Pour déterminer le bruit inhérent aux mesures TRE de référence, deux séries de mesure ont été acquises en laissant le dispositif en place (électrodes plantées) entre les deux séquences de mesure. Comme souligné dans le §3.1.2, le dispositif dipôle-dipôle est, de par la disposition des électrodes, sujet aux bruits de mesure. Dans le Tableau 4.10, la colonne Référence (TRE) représente le calcul du RMSE entre les deux séquences de la TRE de référence, la colonne Brutes représente le calcul du RMSE entre les données TREC et la TRE de référence effectuée au droit de de la TREC. Les colonnes MMP, FFT, C-MMP et C-FFT représente respectivement le calcul du RMSE entre la TRE de

référence et la TREC suite au lissage des données par MMP, par FFT (fréquence seuil : 0,2m^{-1}), calibrées suite au lissage MMP et calibrées suite au lissage par FFT (fréquence seuil : 0,2m^{-1}).

Équation 4.7

$$RMSE = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (\rho_{TRE} - \rho_{TREC})^2}$$

où N est le nombre de points avec les mêmes coordonnées (x ; y ; z) au sein des tomographies comparées, ρ_{TRE} est la résistivité de référence et ρ_{TREC} est la résistivité mesurée avec le dispositif TREC et comparée à la référence.

Type de données	Référence (TRE)	Brutes	MMP	FFT (0,2m^{-1})	C-MMP	C-FFT
RMSE (Ω.m)	0,02	10,7.10^4	6,4.10^4	8,1.10^4	19	33

Tableau 4.10 : Evolution du bruit des mesures en fonction des traitements apportés aux mesures TREC.

L'analyse du tableau permet de faire ressortir l'évolution du bruit inhérent aux données selon le traitement subi. Deux types de traitements ont été apportés aux données :

- le lissage (FFT ou MMP) est mené à chaque niveau. Il n'influence pas significativement l'homogénéisation des résultats comparés à une TRE,
- la calibration permet de comparer les ρ_{app} de TREC à de vraies valeurs, lithologiquement interprétables et comparables aux données TRE de référence.

A ce stade de l'avancée des travaux il est possible de déterminer divers niveaux de bruit correspondants à différentes sources :

(i), propriétés aléatoires du terrain.

(ii), résistance de contact élevée.

(iii), problème lié à l'enfoncement des picots des roues dentées.

(iiii), erreurs de mesure (combinaison d'erreurs), et prise en compte de la résistance de contact.

Au regard des RMSE atteints face au bruit des mesures brutes, il ressort que l'ensemble du processus de traitement des mesures TREC permet d'obtenir des résultats satisfaisant et de ce fait analysables par le logiciel Res2dinv. Notons aussi que suite au traitement des mesures TREC, ces dernières sont interprétables autant sur le plan des profils de ρ_{app}, que sur le plan des tomographies obtenues après inversion des données traitées.

La mise en œuvre des processus de traitement des données TREC (lissages et calibration), a permis de rendre les données TREC brutes exploitables (Figure 4.19), où l'on peut distinguer le zonage du terrain en ensemble de valeurs de même amplitude. Sur la base des données corrigées, on peut passer à la phase d'inversion pour estimer les résistivités vraies, en utilisant par exemple le logiciel Res2Dinv.

Le recours à des mesures TRE demeure indispensable dans l'état actuel de développement de la procédure de calibration. L'un des objectifs principaux à atteindre dans l'avenir sera d'améliorer ou de mieux cerner les différentes variables techniques inhérentes au dispositif TREC, sources de bruit, pour traiter directement les données TREC en fonction de leurs caractéristiques et évolutions propres ou intégrer seulement quelques mesures complémentaires rapidement obtenues sur le terrain.

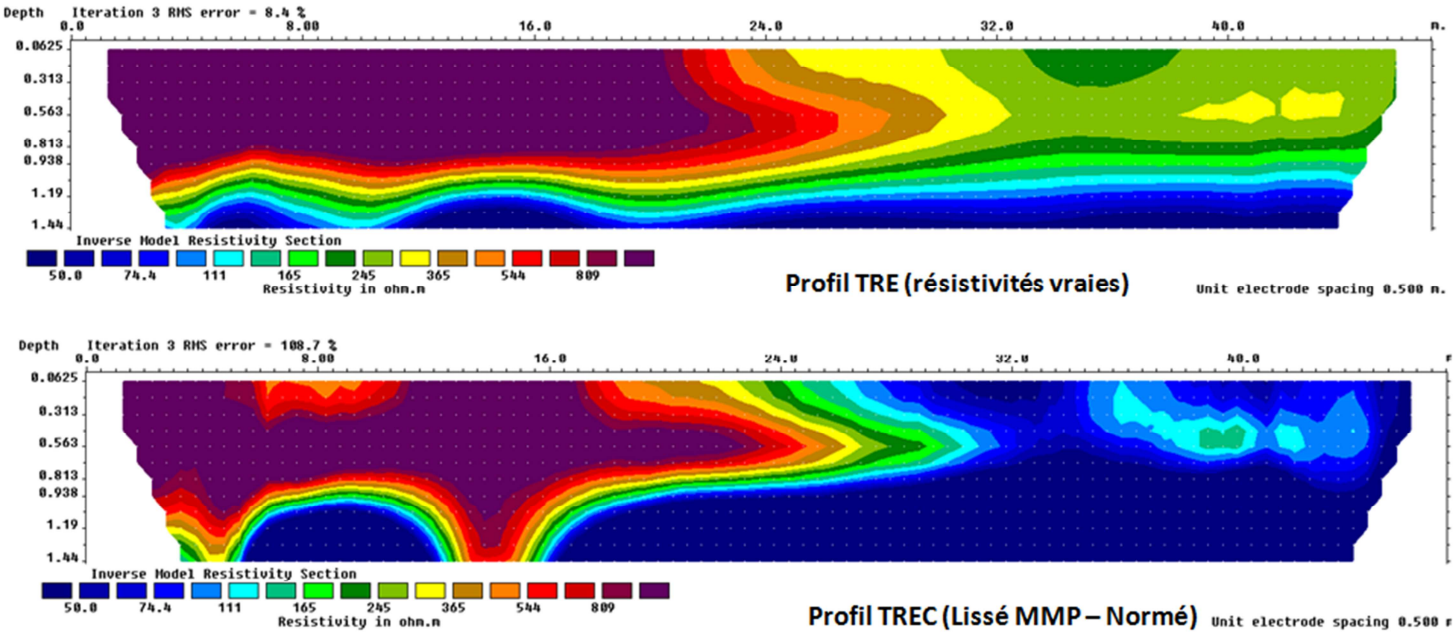


Figure 4.19 : Résultats de la méthodologie de traitement des mesures TREC après traitement et inversion des mesures.

4. Prospections sur sites expérimentaux, traitement du bruit de mesure.

4.1. Site de Pessac, prospections de faible linéaire.

L'ensemble des procédures de consolidation (filtrage et calibration) sera maintenant mis en œuvre dans le cadre d'une prospection test effectuée sur le site expérimental de Pessac (Chapitre II). Ce site expérimental présente l'intérêt d'avoir des variations verticales et horizontales des structures géoélectriques du sous-sol. Dans le but de valider les mesures TREC effectuées sur site, une prospection TRE statique est également effectuée avec un dispositif DD à l'écartement interélectrode de 1m.

4.1.1. Analyse primaire.

La première étape consiste à quantifier la part de bruit inhérente aux mesures TREC. Cette part de bruit est déterminée par le calcul des facteurs X_c, associés à chaque niveau d'étude, et de ce fait, l'estimation de la Rcad du dispositif TREC sur ce site d'étude. L'analyse primaire consiste donc à comparer les mesures TRE (Figure 4.20a), avec des mesures TREC (Figure 4.20b) effectuées aux mêmes coordonnées. La Figure 4.20c compare les valeurs de résistivité apparente mesurées pour des coordonnées et des profondeurs d'investigation équivalentes. Ici, le dispositif TREC en dipôle-dipôle

est composé de 13 électrodes espacées de 0,5m (10 niveaux prospectés), et le dispositif TRE en dipôle-dipôle possède un espacement interélectrode de 1,5m (10 niveaux prospectés). Seuls 2 niveaux peuvent être comparés (profondeurs d'investigation équivalentes) entre les profils TRE et TREC.

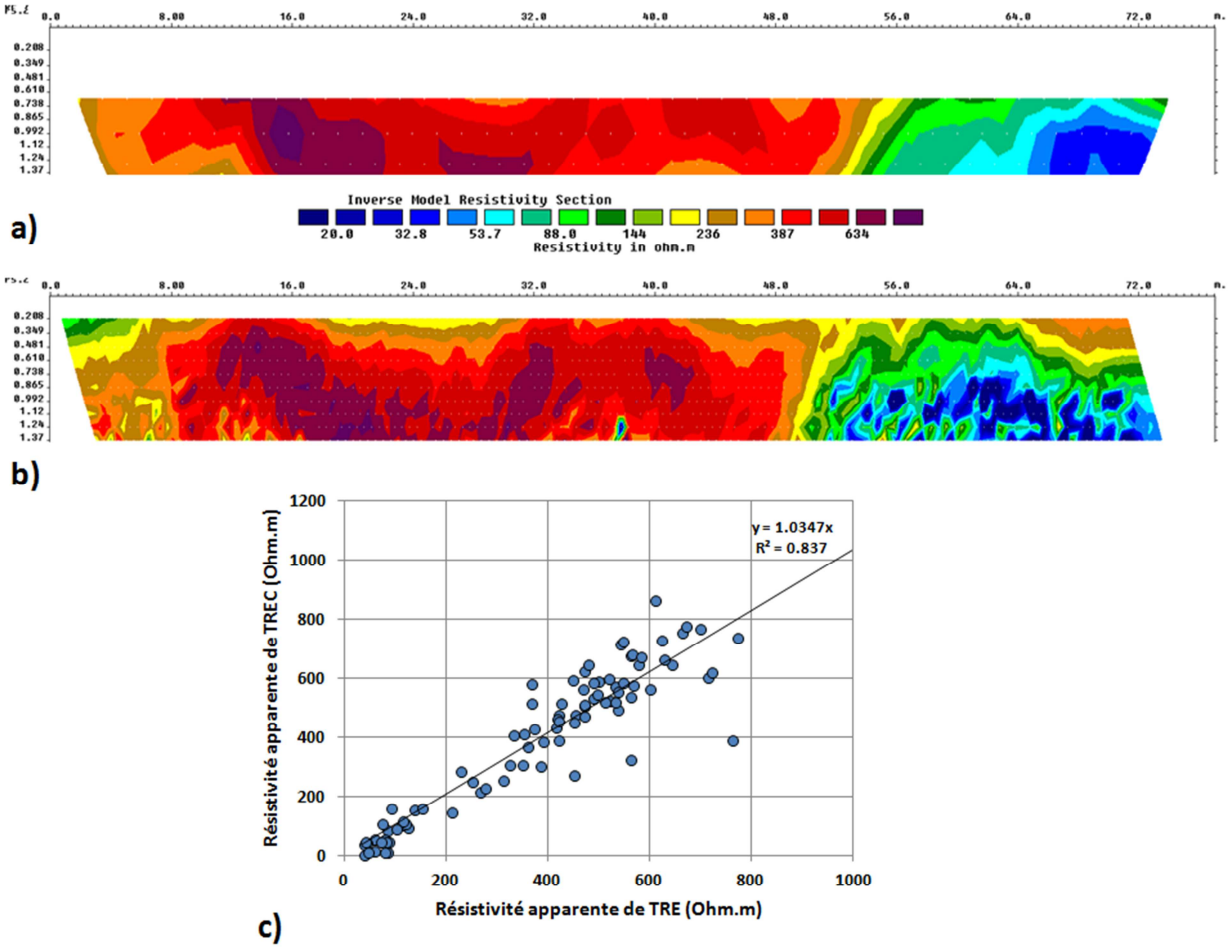


Figure 4.20 : Prospection TREC brute et TRE, a) pseudo-sections TRE, b) pseudo-section TREC sans traitement, c) comparaison des valeurs de résistivité apparente aux points communs.

4.1.2. Procédés de lissage des mesures.

Le lissage des données par MMP ou FFT (fréquence seuil passe-bas : 0,2m^{-1}) permet de régulariser les variations majeures des résistivités apparentes mesurées. Après lissage, on calcule les facteurs X_c pour chaque niveau de prospection comparable, et estimer la Rcad imputable au dispositif TREC dans les conditions du site.

Le Tableau 4.11 montre qu'avec un lissage par FFT sur un linéaire composé de plus d'une centaine de points de mesure par niveau de prospection (linéaire de 70m avec un pas d'échantillonnage de 0,5m), l'impact sur le lissage des mesures par MMP ou FFT est équivalent. De plus, les facteurs X_c calculés soulignent que la Rcad imputable au dispositif TREC est négligeable pour cette campagne de mesure, ce que l'on pouvait supposer puisque, comme le montre la Figure 4.20c, les résistivités apparentes de TRE et de TREC sont du même ordre. Dans ce cas la phase de calibration des données est superflue pour cette série de données.

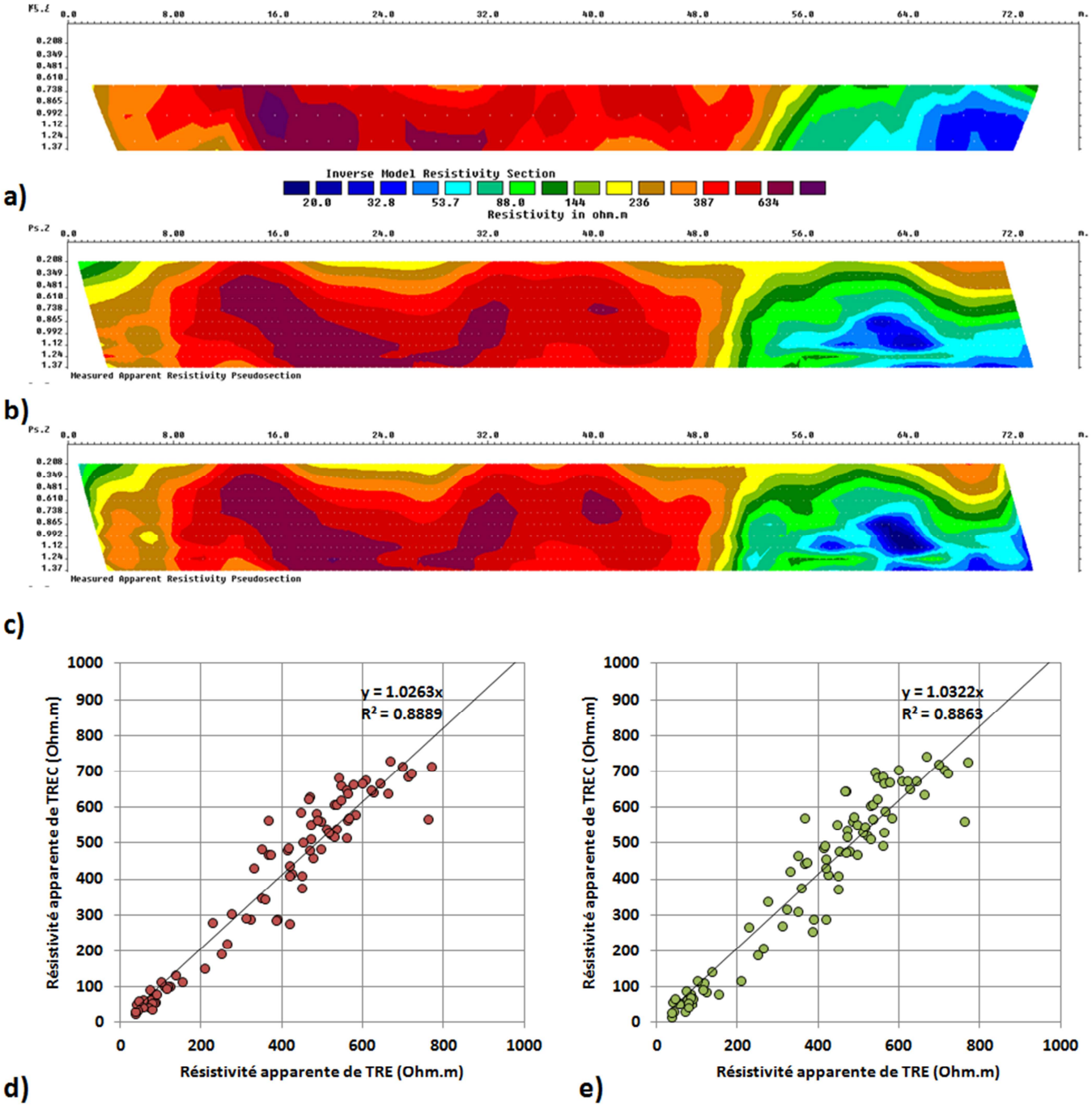


Figure 4.21 : Prospection TREC lissée et TRE, a) pseudo-sections mesurées, b) pseudo-section lissée MMP, c) pseudo-section lissée FFT (passe-bas : 0,2m^{-1}), d) comparaison des valeurs de ρ_{app} après lissage par MMP, e) comparaison des valeurs de ρ_{app} après lissage par FFT.

Niveaux	Facteurs X_c suite à MMP			Facteurs X_c suite à FFT (0,2m^{-1})		
	Moy.	E.T.	C.V.	Moy.	E.T.	C.V.
Niveau 1	1,01	0,03	0,03	1,01	0,04	0,04
Niveau 2	0,98	0,05	0,05	0,98	0,06	0,06

Tableau 4.11 : Statistiques des facteurs X_c en fonction des procédés de lissage.

4.2. Site de Cestas, prospection à grand rendement sur un grand linéaire.

Les mesures sont effectuées sur un site situé sur la commune de Cestas (latitude : 44,745239°N longitude : 0,693154°O). La zone d'étude est un chemin forestier d'une longueur de 450m présentant une légère déclivité du Nord vers le Sud. Le ruisseau de l'Eau Bourde est perpendiculaire au chemin prospecté et se situe au Sud de ce dernier (Figure 4.22). La géologie du sol affleurant correspond à la formation de Dépée (Pratviel et al 1978), constituée de sables plus ou moins grossiers argileux feldspathique. La profondeur d'investigation du dispositif ne permet pas d'atteindre la formation de calcaire gréseux du Burdigalien observée aux abords de l'Eau Bourde.

L'intérêt de ce site est qu'il présente un sol de surface homogène sur plusieurs mètres d'épaisseur, n'ayant pas de multiples variations horizontale des structures. Une prospection EM-31 en champ horizontal, préalable aux mesures TREC, a permis de repérer l'existence d'une zone, de type cuvette topographique, présentant des résistivités faibles (rattachées à une zone de rétention des eaux de pluie). La localisation de cette transition des structures géoélectriques est choisie pour implanter deux TRE de 72 électrodes (dispositif DD, espacement interélectrode : 1m). La combinaison de ces deux TRE permet de constituer une TRE représentant de manière continue 120m de profil sur 3.5m de profondeur. Un compromis a donc été choisi entre le nombre de niveaux comparables et la longueur des structures géoélectriques prospectées.

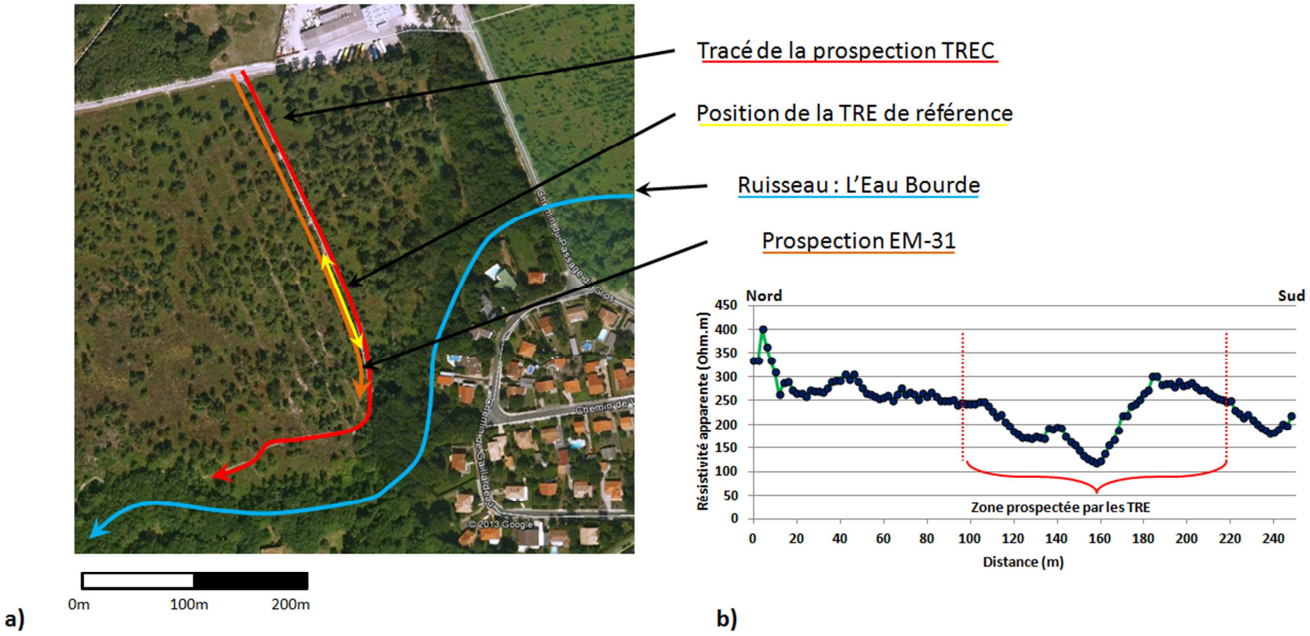


Figure 4.22 : Zone d'étude, a) plan d'implantation des mesures, b) prospection EM-31.

4.2.1. Analyse primaire des mesures.

La comparaison entre les mesures TREC sans traitement et TRE de référence montre que les gammes de ρ_{app} mesurées ne sont pas comparables. Au regard de la géologie du terrain, les ρ_{app} du profil TREC ne sont associables à aucune structure géoélectrique. De plus, les variations principales de ρ_{app} ne reprennent ni l'évolution verticale, ni horizontale des ρ_{app} mises en évidence par le profil TRE (Figure 4.23). Cette disparité des mesures est appuyée par la comparaison des valeurs de ρ_{app} mesurées pour les mêmes coordonnées et profondeurs d'investigations équivalentes, où aucune corrélation n'est manifeste (Figure 4.23c).

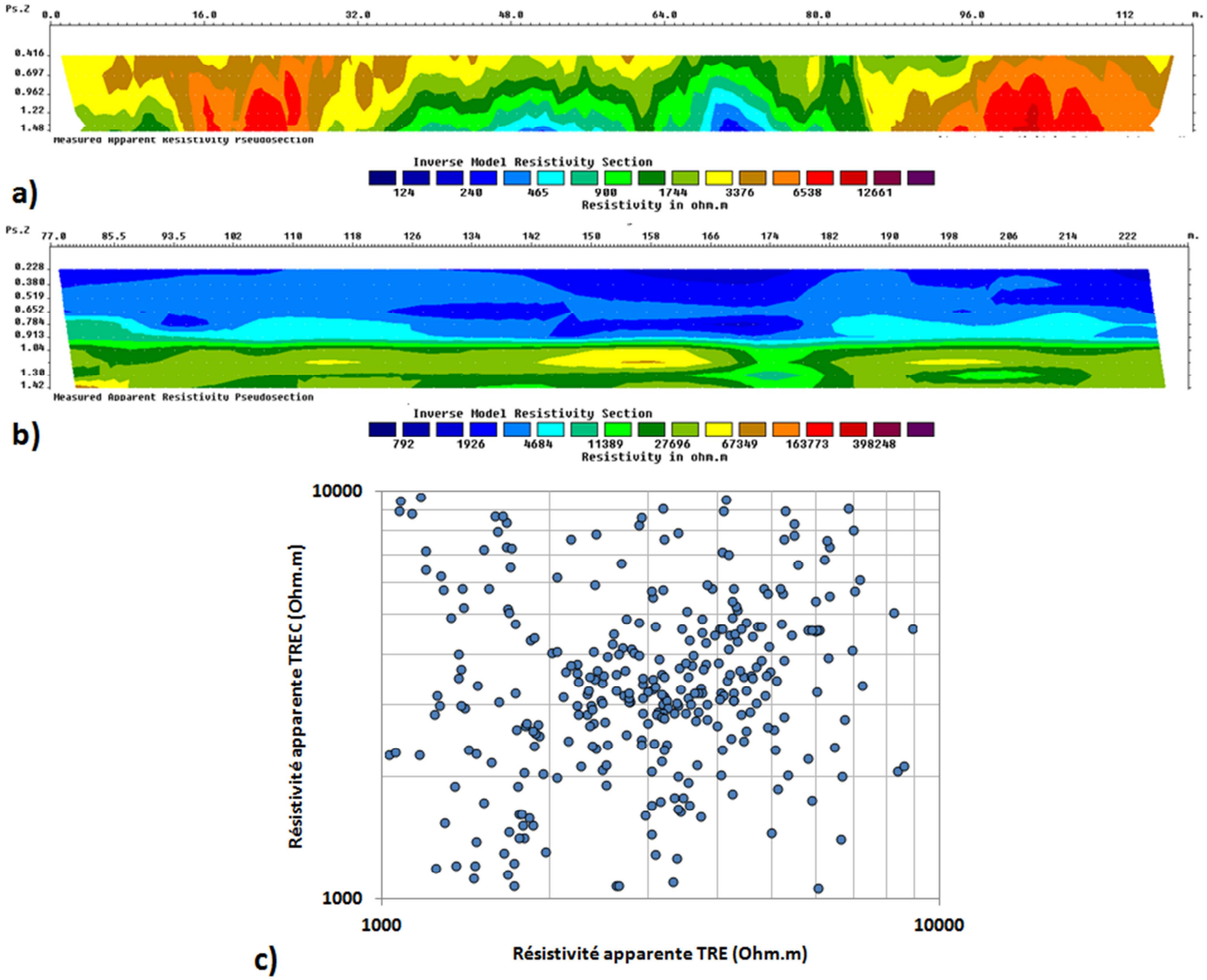


Figure 4.23 : Résistivités apparentes mesurées par TRE et TREC, a) pseudo-section TRE au droit de TREC, b) pseudo-section TREC sans traitement, c) comparaison des valeurs de résistivité apparente.

4.2.2. Procédé de lissage des mesures.

L'analyse des résistivités apparentes mesurées en TRE et en TREC ne peut être faite que sur 5 niveaux communs du fait de la configuration des deux dispositifs de mesure (1TRE-2TREC, 2TRE-4TREC,…). Pour exploiter au mieux l'ensemble de l'information acquise au sein de la prospection TREC (plus de 400m prospectés), on procède à l'analyse fréquentielle des ρ_{app} mesurées en prenant en compte l'ensemble du profil, avec des fréquences seuils passe-bas de $0{,}2m^{-1}$ et de $0{,}1m^{-1}$. Le choix de la seconde fréquence permet de faire ressortir uniquement des structures géoélectriques d'une taille supérieure à 20m.

Sur la Figure 4.24, on remarque que le lissage des données, réduisant fortement le bruit, conduit à mettre en évidence les principales structures géoélectriques détectées avec le profil en TRE. Dans le cas d'un profil de plusieurs centaines de mètres, le lissage par FFT permet une analyse plus pertinente, révélant mieux les différentes tailles de structure qui sont prospectées.

Au regard des Rcad déduites suite aux procédés de lissage (Tableau 4.12), on remarque que le bruit des mesures (dispersion des données) est principalement lié à des problèmes de contact et des biais propres au matériel de mesure car les Rcad déduits pour les niveaux de surface sont négligeables.

Concernant les Rcad déduites, nous notons que les Rcad calculées pour les niveaux 8 à 10 de TREC sont sensiblement différentes de celles calculées pour les niveaux 1 à 5. Ceci indique une erreur dans les mesures qui ne peut être prise en compte ni dans les traitements, ni dans l'amélioration des données, ni dans la prise de mesure en elle-même. Cependant, étant donné qu'un facteur X_c peut être calculé pour ces différents niveaux prospectés (et que ces valeurs sont représentatives de chaque niveau considéré avec un C.V. < 0,2), il est également possible de traiter ces données en les calibrant vis-à-vis des gammes de résistivités apparentes mesurées au sein de la TRE de référence.

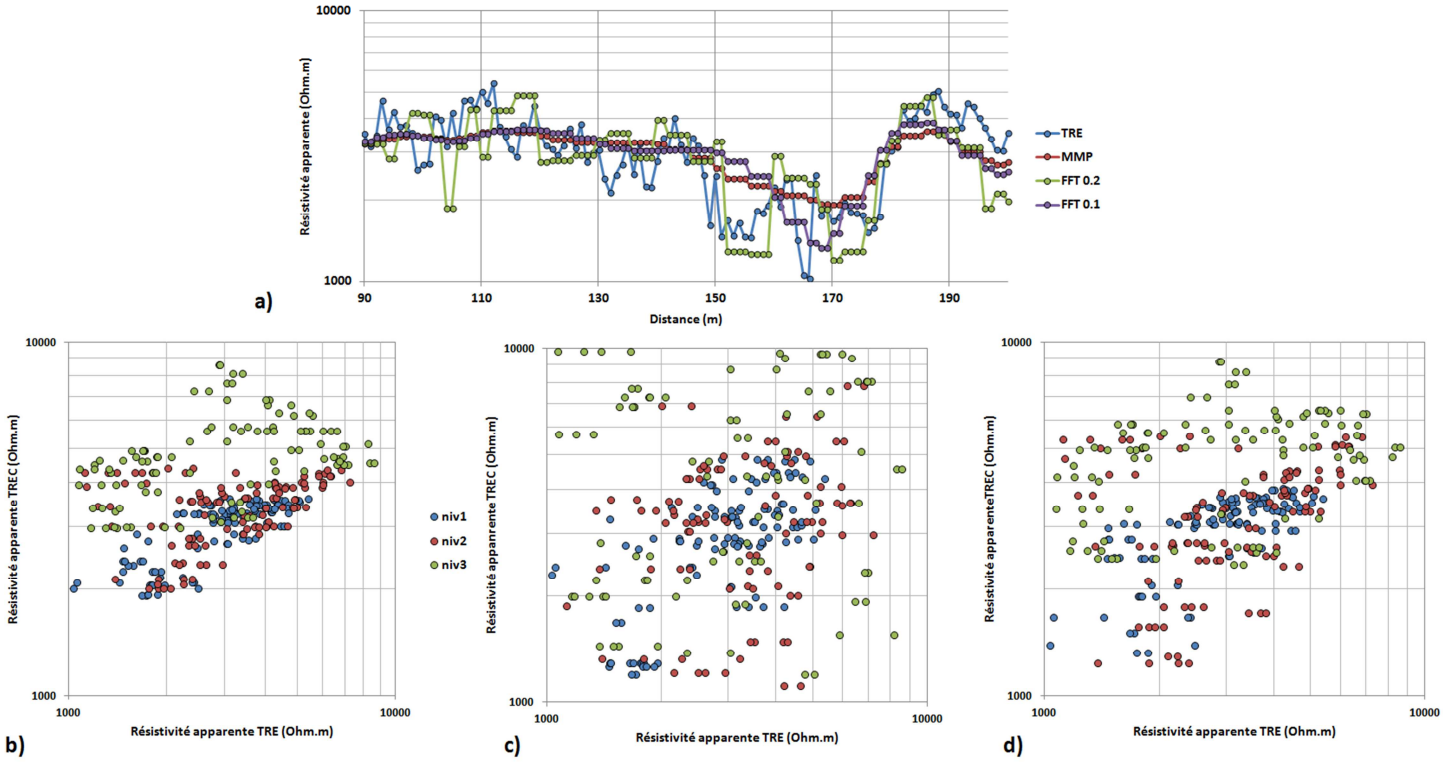


Figure 4.24 : Effets des procédés de lissage sur les données TREC, a) profil au droit de la TRE avec différents effets de lissage, b) comparaison des ρ_{app} suite à une MMP, c) comparaison des ρ_{app} suite à une FFT (passe-bas : 0,2m^{-1}), d) comparaison des ρ_{app} suite à une FFT (passe-bas : 0,1m^{-1}).

Niveaux	Facteurs X_c suite à MMP				Facteurs X_c suite à FFT (0,2m^{-1})				Facteurs X_c suite à FFT (0,1m^{-1})			
	Moy.	E.T.	C.V.	Rcad (Ω)	Moy.	E.T.	C.V.	Rcad (Ω)	Moy.	E.T.	C.V.	Rcad (Ω)
niv.1	1,01	0,03	0,03	7	1,00	0,04	0,04	2	1,00	0,03	0,03	6
niv.2	1,02	0,06	0,06	8	0,98	0,14	0,14	6	1,01	0,08	0,07	5
niv.3	1,08	0,09	0,08	16	1,06	0,13	0,13	12	1,08	0,09	0,08	15
niv.4	1,38	0,19	0,13	212	1,34	0,23	0,17	148	1,37	0,21	0,15	184
niv.5	1,37	0,19	0,14	105	1,35	0,23	0,17	86	1,35	0,21	0,15	87

Tableau 4.12 : Statistiques des facteurs X_c en fonction des procédés de lissage et calcul de Rcad.

4.2.3. Généralisation du traitement à l'ensemble du profil à grand rendement.

D'après le Tableau 4.12, les facteurs X_c déterminés pour les différents niveaux de prospection TREC sont homogènes au sein de chaque niveau car les coefficients de variation sont tous inférieurs à 0,2. On admet donc que les facteurs X_c définis au droit de la TRE peuvent être généralisés, pour leur niveau, à l'ensemble des ρ_{app} composant le profil de 400m. La Figure 4.25 représente le résultat de l'inversion sur des données lissées par le procédé de FFT (fréquence passe-bas : 0,1m-1), suivi d'un calibrage des ρ_{app} aux gammes de ρ_{app} mesurées par la TRE de référence.

En étudiant les différentes structures géoélectriques mises en avant par ce profil vis-à-vis de l'implantation des mesures (Figure 4.22) et des observations de terrain, on remarque que différentes zones de faible résistivité (interprétées comme des zones d'infiltration) sont relevées à x = 64 ; 160 ; 290 et 350m. La prospection TREC à grand rendement couplée à un traitement des données par une analyse par FFT révèle donc les structures géoélectriques principales du sous-sol, et par un choix pertinent des fréquences passe-bas, elle permet de centrer l'analyse du profil sur les contrastes majeurs de ρ_{vraie}.

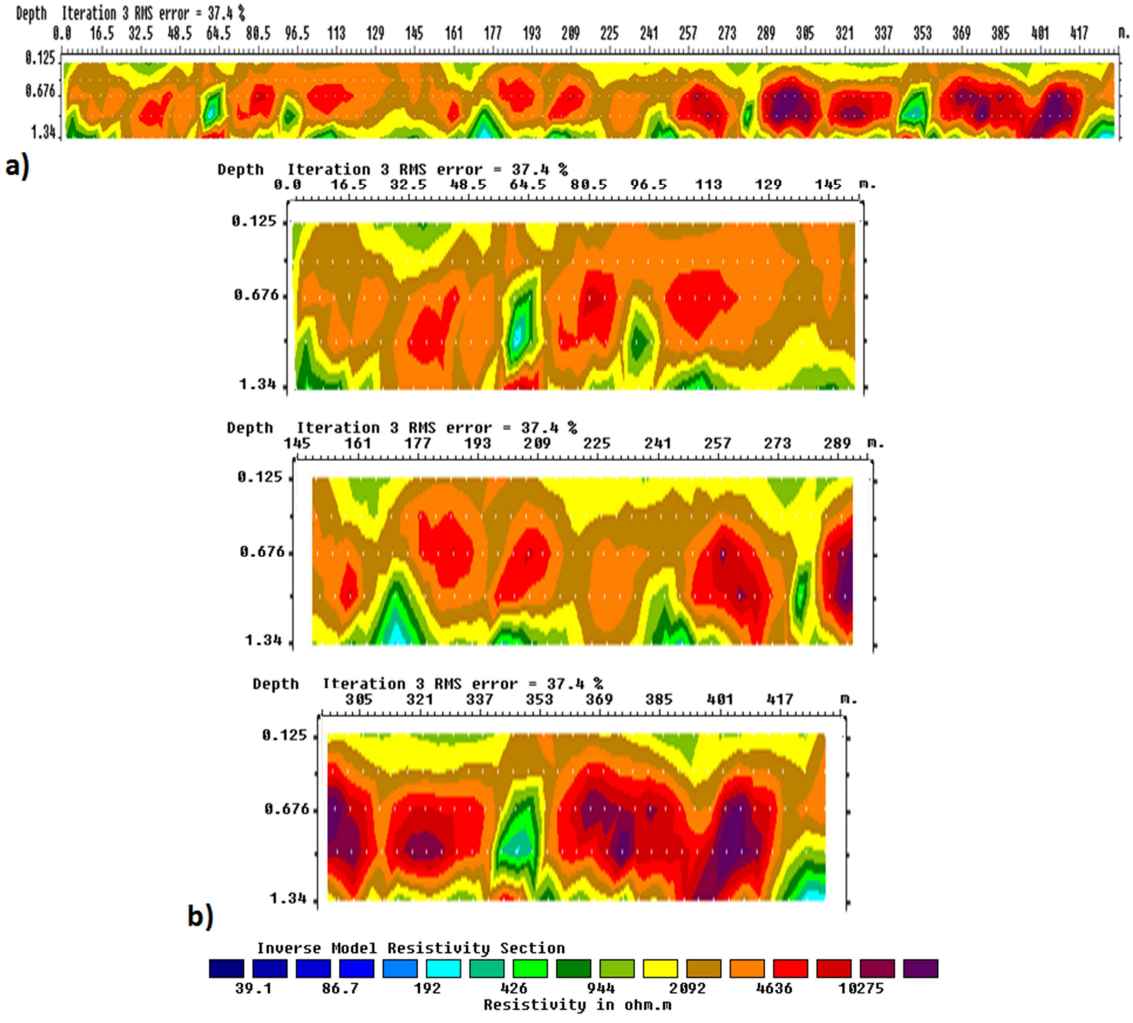


Figure 4.25 : Résultats du lissage par FFT (passe-bas : 0,1m-1) et du calibrage des résistivités apparentes sur l'ensemble du profil TREC, a) totalité du profil inversé, b) détails du profil découpé en trois zones.

4.2.4. Comparaison du profil TREC avec un profil EM-31.

Pour compléter l'étude des résultats du dispositif TREC, on compare les valeurs de ρ_{app} mesurées en TREC aux valeurs obtenues avec un profil EM-31 en champ horizontal pour des volumes d'investigation comparables. Le profil à l'étude est celui présenté dans le §4.2. La comparaison du profil TREC en ρ_{app} avec les mesures effectuées par l'EM-31 en champ horizontal permet de comparer les réponses du sous-sol pour deux types de prospection à grand rendement. Notons également que cette étude permet de préciser ce que les traitements sur les mesures TREC apportent à la détection des structures géoélectriques dans le cadre de mesures à grand rendement sur un grand linéaire.

Au regard des profondeurs d'investigation du dispositif TREC, seul le profil obtenu avec le niveau 3TREC, qui correspond à une profondeur estimée de 0,6 mètres, est comparé au profil des résistivités apparentes obtenu avec les mesures EM-31 en champ horizontal (Chapitre II). Rappelons que les mesures EM-31 sont plus sensibles aux résistivités faibles et les mesures du dispositif TREC aux valeurs résistantes (Chapitre I). Rappelons aussi (Chapitre II §2.2.2.) que la profondeur d'investigation d'une prospection EM-31 en champ horizontal effectuée à 1m du sol est de 1,75m.

Ainsi pour comparer les mesures de ρ_{app} de la TRE de référence, du dispositif TREC et du profil EM-31, nous soulignerons que le niveau 5 de la TRE (5TRE), le niveau 10 de la TREC (10TREC) et le profil EM-31 en champ horizontal possèdent la même profondeur d'investigation, estimée à environ 1m de profondeur (Chapitre II §3.2.2.). Les différents profils de résistivité électriques sur la Figure 4.26 peuvent donc être comparés en admettant qu'ils sont représentatifs d'une profondeur d'investigation équivalente, mais que la nature même des dispositifs (électromagnétique et électrique) fait que la mesure de ρ_{app} n'est pas issue du même volume d'investigation.

La Figure 4.26 montre que la gamme des résistivités apparentes mesurées à l'EM-31 est d'environ 280-300Ω.m sur l'ensemble du profil, sauf entre 130m et 184m où deux structures à faible résistivité apparaissent. Ces principales structures sont également détectées via le profil TRE avec des contrastes variant entre 300 et 8000Ω.m. Ces contrastes de résistivité apparente sont également mis en évidence les profils lissés et calibrés par MMP et FFT (passe-bas : $0{,}1m^{-1}$). Au regard des contrastes mesurés en TRE, il ressort que c'est le traitement par FFT qui conduit au résultat le plus significatif dans la localisation de la structure à faible résistivité (contrastes plus marqués). Les variations de résistivité entre ces différentes zones (successions résistantes et conductrices entre x=120m et x=200m) sont supérieures à 10% (Chapitre III §1.2.2.), et peuvent être ainsi identifiables.

Ces comparaisons confirment que la prospection en TREC est pertinente et permet un profilage des résistivités électriques du sous-sol sur un linéaire conséquent (450m), en une durée relativement courte (20min). Soulignons également la pertinence du lissage par FFT dans le cadre d'une prospection TREC effectuée sur un long linéaire.

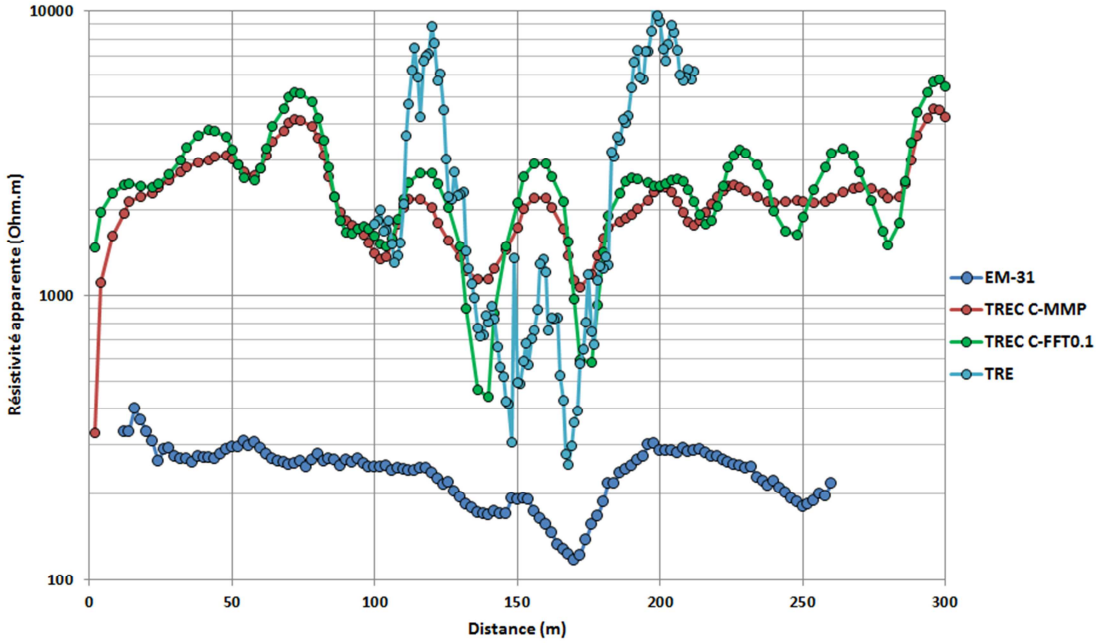


Figure 4.26 : Profilage des structures géoélectriques.

4.3. Discussion sur les résultats accessibles par le processus TREC.

Après ces diverses campagnes de mesures, le développement des processus de consolidation et de traitement des données et la comparaison des informations obtenues via différents dispositifs, nous disposons d'un matériel performant et les mesures obtenues sont pertinentes et interprétables. On peut maintenant déduire quelques conséquences pratiques à caractère général.

Le Tableau 4.13 regroupe les caractéristiques principales du dispositif TREC, comparé aux dispositifs et matériels plus usuels. L'avantage du dispositif TREC est l'obtention de deux types de prospection par ce matériel, à savoir :

• le profilage sur des distances importantes des variations des structures géoélectriques du sous-sol,

• une tomographie du sous-sol sur une distance importante, discrétisée en 10 couches sur une épaisseur de 1,4m (pour un espacement interélectrode de 0,5m).

Ce dispositif s'intègre de façon pertinente dans le champ des mesures à grand rendement. Le dispositif TREC a un rendement plus de 7 fois plus important que le EM-31 en termes de nombre de mesures effectuées, et plus de 5 fois plus important qu'un dispositif TRE équivalent. De ce fait, pour la prospection d'une TRE, le dispositif TREC permettra d'obtenir plus de points de mesures en un temps réduit vis-à-vis d'une TRE conventionnelle (des améliorations du dispositif pouvant encore être réalisées).

Sur le plan des profils prospectés, le dispositif TREC permet d'obtenir une description des structures géoélectriques principales du sous-sol équivalente à celle obtenue avec un profil EM-31 en champ horizontal.

	EM-31	Dispositif TREC	TRE
Opérateurs	1	1-2	2-3
Profondeur d'investigation	Champ horizontal : 3,7m Champ vertical : 5,5m	En dispositif DD, 13 électrodes ze ≈ 1,2 - 1,3m pour a = 0,5 m et ze ≈ 2,4m pour a = 1 m	En dispositif DD, 48 électrodes : ze ≈ 4,8m pour a = 0,5 m
Inversion des mesures (obtention d'un log.)	Sondage en parallèle nécessaire pour caler les mesures.	Logiciel d'inversion : Res2dInv	Logiciel d'inversion : Res2dInv
Temps d'installation	10 min pour branchement et essai du matériel	20 min pour mise en place et connexion de l'ensemble des éléments	45 min pour implantation de 48 électrodes et connexion de la flute au Syscal Pro
Vitesse de prospection	Vitesse pédestre et temps d'effectuer les mesures : 1-2 km/h	Prospection en continu, déclenchement des mesures programmé : 2-3 km/h	15 min de temps de mesure pour un dispositif DD de 48 électrodes prospectant 10 niveaux, soit une longueur de 24 m avec a = 0,5 m
Taux d'échantillonnage	1 mesure/s (limite du matériel)	10 niveaux de mesure 10 mesures/50cm 450 mesures/min	1240 mesures/15min 82 mesures/min

Tableau 4.13 : Comparatif des caractéristiques du dispositif TREC.

5. Conclusion.

Le développement d'une méthode de tomographie géophysique à grand rendement a consisté en la mise au point d'un matériel permettant d'effectuer des mesures de Tomographie de Résistivité Electrique en Cinématique (TREC). Des phases de recherches et d'essais ont permis de développer un prototype constitué de 13 électrodes espacées de 0,5m (2 électrodes pour l'injection du courant et 10 couples d'électrodes pour la mesure de différence de potentiel). Ce prototype effectue une mesure de ρ_{app} simultanément sur 10 niveaux de prospection durant le déplacement du dispositif. Le pas de mesure atteint est de 0,5m et la profondeur d'investigation de 1,4m.

L'ensemble des analyses menées pour identifier le potentiel de ce prototype a permis d'identifier les différentes sources de bruit sur les mesures TREC, telles que des variations aléatoires de mesure de ρ_{app}, ou la mise en évidence d'une résistance de contact additionnelle. Pour filtrer ces sources de bruit, on a développé un procédé de traitement des mesures TREC. Ce procédé est composé d'une phase de lissage par Moyenne Pondérée Mobile (MMP) ou par Analyse de Fourier (FFT), puis d'une calibration des ρ_{app} pour les ramener à des gammes de valeurs comparables à celles mesurées par une TRE de référence. L'organigramme des décisions relatives aux différentes phases de traitement des données TREC est présenté par la Figure 4.27.

Nous noterons que si le contact entre le sol et les électrodes est de bonne qualité la valeur de Xc est voisine de l'unité pour les 10 niveaux d'une TREC. Dans ce cas, la calibration des données est superflue. Une TRE d'étalonnage reste obligatoire pour quantifier la qualité de contact des électrodes (résistance de contact). Le fait de calibrer les données TREC a pour but de rendre les données exploitables pour le logiciel Res2Dinv, et ainsi obtenir des tomographies inversées avec des résistivités et des profondeurs vraies décrivant les différentes lithologies rencontrées.

Le matériel et le protocole d'analyse mis au point permettent d'obtenir en un temps réduit une prospection comparable à une TRE, inscrivant désormais la prospection électrique dans le champ des prospections géophysiques à grand rendement. Le problème des bruits de mesure inhérents aux données du grand rendement a été abordé et nous y avons en grande partie répondu en combinant différentes étapes de traitement de données. Les résultats sont exploitables et lithologiquement interprétables.

Selon le traitement choisi et l'interprétation que l'on souhaite faire des résultats, deux approches vis-à-vis des tomographies brutes sont possibles. La première approche (avec lissage MMP) permet d'obtenir des ρ_{app} au plus proche de la lithologie prospectée, dans le but de décrire le sol prospecté d'une façon comparable à une prospection TRE. La seconde approche (avec lissage FFT) permet d'avoir une approche de la description du milieu en zonant ce dernier, afin de déterminer des mailles à caractéristiques homogènes pour décrire le massif à l'étude et d'adapter la fréquence seuil du filtre passe-bas aux structures géoélectriques recherchées.

Cette description par mailles homogènes permet également de compléter la reconnaissance du milieu en recoupant, pour une même maille, un ensemble de prospections avec d'autres méthodes, qu'elles soient géophysiques (EM-31, sismique,…) ou géotechnique (CPT, Panda,…).

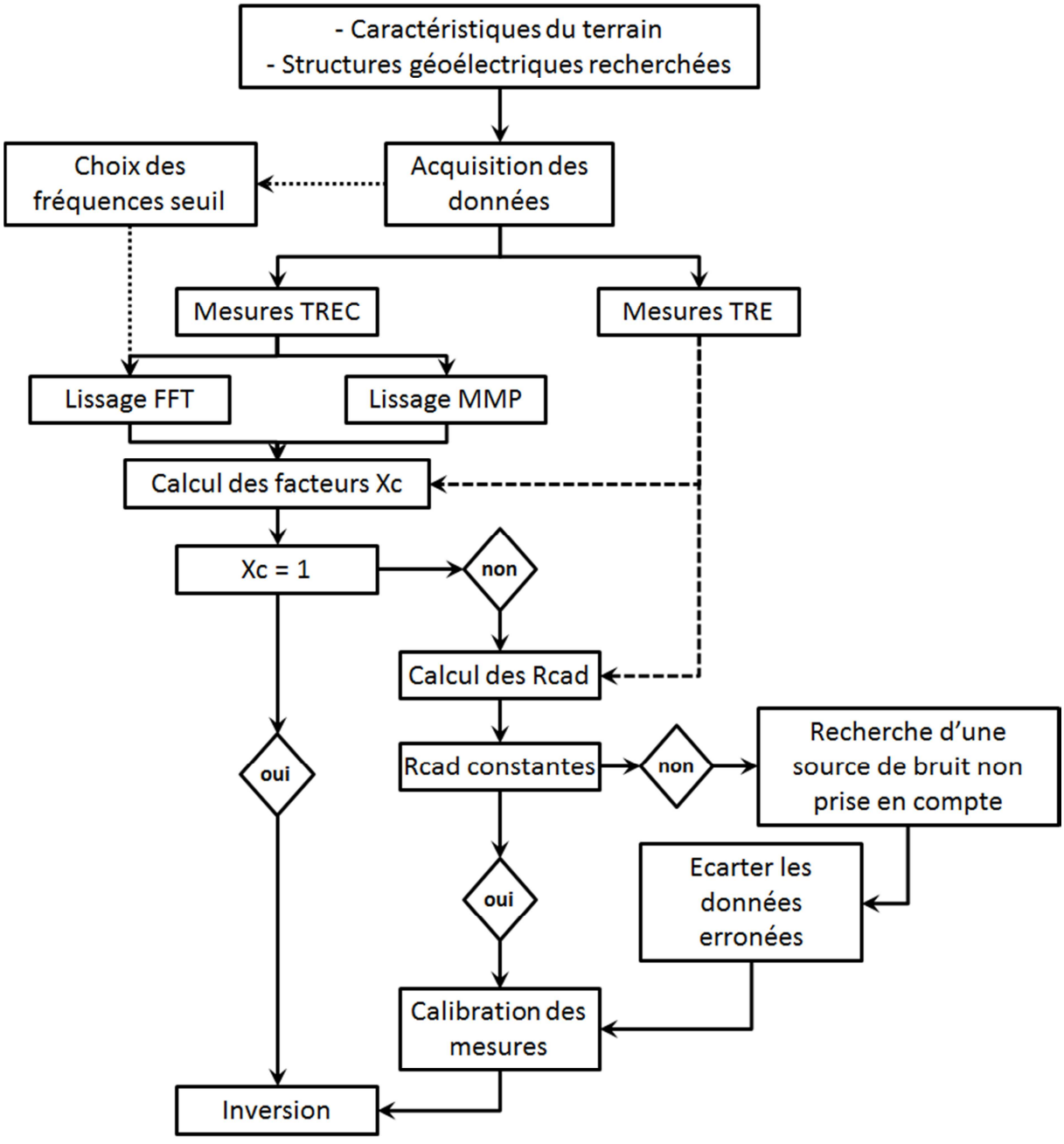


Figure 4.27 : Organigramme des procédés de traitement des mesures TREC.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La problématique autour de la reconnaissance du sous-sol dans les projets d'aménagement conduit à développer des approches nouvelles. Les études menées dans cette thèse ont eu pour objectif de développer des approches innovantes visant à intégrer la reconnaissance géophysique dans le processus de reconnaissance du sous-sol, pour apporter des informations supplémentaires aux techniques (prospections géotechniques) déjà utilisées.

Approche bibliographique du problème, contexte d'étude et état de l'art dans la reconnaissance des sols.

L'étude du contexte dans lequel s'intègrent ces travaux de recherche a permis de définir les différentes natures et échelles des hétérogénéités du sous-sol. Cette hétérogénéité conduit à une incertitude sur les différents paramètres et propriétés que l'on cherche à mesurer. De cette incertitude découle la notion de risque géotechnique qui demande à tout ingénieur d'effectuer une cartographie de l'aléa pour pouvoir dimensionner le projet en fonction des limites et caractéristiques du site à l'étude. Cette étude de contexte a également permis de souligner le potentiel qu'ont les prospections géophysiques à grand rendement et traditionnelles pour répondre à cette problématique de la reconnaissance de la variabilité spatiale du sous-sol. L'analyse de l'état de l'art dans la reconnaissance du sous-sol a mis en avant que le dimensionnement des projets est basé sur des données géotechniques, directement intégrables aux codes de calcul. Nous avons également souligné la faiblesse de cette approche unique pour l'estimation de la variabilité spatiale des propriétés des sols, du fait que les essais géotechniques sont des mesures ponctuelles et en nombre limité au sein d'un projet. La voie que nous proposons est d'intégrer les prospections géophysiques dans la reconnaissance des sols pour compléter les informations issues des prospections géotechniques et aider à la généralisation des données géotechniques ponctuelles à l'ensemble des sols de surface (0-5m) d'une parcelle.

Campagne de mesure et développement de la comparaison des différentes sources d'information.

La combinaison de l'ensemble des données montre l'intérêt de la géophysique dans la reconnaissance d'une parcelle. Les mesures effectuées avec l'ARP, l'OhmMapper et l'EM-31 permettent de cartographier la distribution spatiale de la résistivité des sols pour différentes profondeurs d'investigation (fixes par dispositif). La parcelle peut ainsi être zonée en fonction des structures géoélectriques majeures constituant le sous-sol. La première approche développée concerne une étude statistique des différentes sources d'information, permettant de décrire la parcelle à l'étude en différentes couches géoélectriques, dont le critère de différenciation repose sur l'hétérogénéité (coefficient de variation) des propriétés mesurées. Cette approche permet uniquement de mettre en évidence une structure géoélectrique par tranche de sol. L'exploitation des données de Tomographie de Résistivité Electrique (TRE) avec une cartographie électromagnétique (EM) a conduit à créer un zonage des différentes structures géoélectriques présentes au sein d'une couche de sol de 2m d'épaisseur. La deuxième approche a été de comparer le potentiel de plusieurs méthodes géophysiques

à grand rendement (EM-31, OhmMapper, ARP) à zoner une parcelle en différentes structures géoélectriques. Il ressort que si l'ARP permet de prospecter de grandes surfaces, la profondeur d'investigation verticale n'est pas suffisante pour des projets d'aménagement. Le choix a donc été fait de retenir l'EM-31 pour la reconnaissance de la variabilité en surface (0-3m et 0-5m) des propriétés physiques du sous-sol. Par contre, la combinaison de cette prospection à grand rendement avec les TRE (coupe verticale fine et en profondeur) ne permet pas encore de généraliser le zonage déduit des TRE à l'ensemble du volume d'une parcelle.

Développement d'un processus de modélisation 3D de Proche-en-Proche (PeP) des résistivités vraies du sous-sol.

L'aspect innovant du processus de modélisation de Proche-en-Proche (PeP) repose sur le principe d'une propagation de l'information fine contenue dans les TRE en basant l'évolution latérale des résistivités vraies d'après les variations de résistivité apparente mises en avant par la cartographie EM. Une étude géostatistique basée sur la cartographie EM permet de déterminer l'orientation optimale que doivent avoir les TRE sources vis-à-vis des principales anisotropies de la parcelle (angle inférieur à 40°). Les paramètres régissant l'exploitation des données sources sont adaptables à ces dernières, principalement dans la détermination du paramètre pondérateur λ qui guide la propagation latérale de l'information contenue dans les TRE sources. Les résultats du processus PeP sont d'une part la modélisation de l'ensemble des résistivités du sous-sol au sein d'un volume délimité par les TRE source et discrétisé en voxels, et d'autre part une cartographie illustrant la qualité avec laquelle les résistivités sont estimées au sein de chaque voxel (critère d'incertitude du modèle). Il ressort que l'interprétation des résultats du processus PeP doit être faite avec une analyse par classification hiérarchique ascendante (CHA) des résistivités modélisées pour mettre en avant les structures géoélectriques majeures et leur variabilité spatiale. Suite au développement de ce processus de reconnaissance du sous-sol, on a pu modéliser huit panneaux TRE, aboutissant à la représentativité d'un volume de $25x50x4m^3$ à partir d'une cartographie EM-31 et de deux TRE comme données sources, réduisant potentiellement le temps de la campagne de mesure de 6h (équivalent temps de 8 TRE en dipôle-dipôle 48 électrodes espacées de 1,5m) à 2h30 de prospection (2h pour les TRE et 30min pour la cartographie EM-31), soit approximativement une journée de prospection économisée.

Développement d'un dispositif de mesure de Tomographie de Résistivité Electrique en Cinématique (TREC).

La dernière partie de ces travaux de recherche a été consacrée au développement d'un dispositif de Tomographie de Résistivité Electrique en Cinématique (TREC) pour effectuer des mesures en grand rendement. Des phases de recherche et d'essais ont conduit à développer un prototype constitué d'un dispositif dipôle-dipôle composé de 13 électrodes espacées de 0,5m (2 électrodes pour l'injection du courant et 10 couples d'électrodes pour la mesure de différence de potentiel). Ce prototype effectue

une mesure de ρ_{app} simultanément sur 10 niveaux de prospection durant le déplacement du dispositif, permettant d'effectuer une TREC sur plus de 400m en moins de 10min. Le pas de mesure atteint est de 0,5m et la profondeur d'investigation est de 1,4m. L'analyse des sources de bruits inhérents au dispositif de mesure en lui-même a mis en évidence une résistance de contact additionnelle (Rcad). Un procédé de traitement des mesures TREC visant à filtrer les sources de bruits a été développé, il est composé d'une phase de lissage par Moyenne Mobile Pondérée (MMP) ou par Analyse de Fourier (FFT), puis d'une phase de calibration des ρ_{app} pour les ramener à des gammes de valeurs comparables à celles mesurées par une TRE de référence. La méthode par MMP vise à lisser les données TREC par une moyenne des variations majeures de ρ_{app} au sein d'une fenêtre de 21 points de mesure pondérés. Cette méthode permet d'obtenir des ρ_{app} au plus proche de celles mesurées par la TRE de référence. La méthode de lissage par MMP est cependant aveugle vis-à-vis de la taille et du degré de bruit des mesures, et la taille de la fenêtre de lissage dépend du pas de mesure. La méthode par FFT permet d'adapter le lissage en fonction de la dimension des structures géoélectriques recherchées en fixant la fréquence seuil du filtre passe-bas. Il ressort que la fréquence la plus pertinente pour le lissage par FFT est de $0,2m^{-1}$, permettant de mettre en avant des structures géoélectriques de 5 mètres minimum. A ce stade du développement, une TRE de référence (statique) demeure nécessaire. Cette TRE de référence permet de quantifier le facteur de calibration nommé Xc pour chaque niveau de prospection d'une TREC, ce facteur étant défini empiriquement comme la valeur moyenne du rapport entre le log des ρ_{app} de référence (TRE) et le log des ρ_{app} de TREC pour chaque niveau de prospection.

Perspectives.

La combinaison de l'ensemble des approches ici développées ouvre la voie à de nouvelles approches pour la reconnaissance des sols, à la fois sur le champ de la reconnaissance 3D du sous-sol, mais également sur le champ de la prospection à grand rendement en géophysique avec une détermination précise des différents horizons prospectés (ρ_{vraie}, profondeurs vraies). La TREC ouvre le champ de la cartographie automatique (donc rapide) des sols, et à la description très détaillée de la variabilité latérale du sous-sol. Le processus PeP donne accès à la possibilité de généraliser à l'échelle d'une parcelle des mesures géotechniques ponctuelles sous réserve de quantifier un lien entre propriétés mécaniques et structures géoélectriques. La validation de l'ensemble des processus et dispositifs développés doit passer par des mises en situation sur des cas d'études différents, tels des milieux présentant des structures géologiques particulières (dolines, pendage,…) ou différentes échelles d'anomalie.

A court terme, la perspective première est de mener une campagne de validation et de développement du dispositif TREC dans le but de réduire au maximum les sources de bruit inhérents au dispositif de mesure, mais également d'augmenter l'espacement interélectrode (1 ou 2m) pour atteindre des profondeurs d'investigation plus pertinentes pour des projets d'aménagement. Il serait également bon d'envisager l'application du processus PeP avec comme données sources une cartographie EM-31 en

champ vertical (données non pertinentes pour les parcelles à l'étude), avec plus de couches géoélectriques présentes selon une verticale.

A plus long terme, il serait intéressant d'envisager plus de cas d'études pour le processus PeP, avec entre autres la prospection concrète des structures particulières modélisées dans le Chapitre III. Le calcul en 2D de la réponse EM serait un paramètre à intégrer dans la qualification de la qualité du processus de modélisation 3D des résistivités du sous-sol par la mise au point d'un processus supplémentaire itératif pour faire converger la solution vers un résultat optimal. Ce processus itératif pourrait être un calcul de la réponse EM modélisée par processus PeP qui serait comparée à la cartographie EM source. Une modification des différentes couches géoélectriques (résistivité et épaisseur) permettrait par un processus itératif de se rapprocher des valeurs sources.

BIBLIOGRAPHIE

[A]

Abdul Baki, A., (1992), Analyse probabiliste du comportement de deux remblais sur versant instables. Mémoire de thèse, Institut National des Sciences Appliquées – Lyon, 290 p.

Achache, J., Debeglia, N., Grandjean, G., Guillen, A., Le Bel, L., Ledru, P., Renaud, X., Autran, A., Bonijoly, D., Calcagno, P., Pluchery, E., Guennoc, P., Truffert, C., Rossi, P., Vairon, J., Avouac, J.P., Poli, E., Sénéchal, G., Brun, J.P., Galdeano, A., Diament, M., Tarits, P., Mercier, J., Paul, A., Poupinet, G., Marquis, G., Bayer, R., Chautru, J.M., (1997), GéoFrance 3D : l'imagerie géologique et géophysique 3D du sous-sol de la France, Mémoires de la Société Géologique de France, 172, pp. 53-71

Ali, H., (2010), Caractérisation améliorée des sols par l'essai de chargement de pointe au piézocône – Application au calcul des fondations profondes, Mémoire de thèse, Université Blaise Pascal – Clermont II, 323p.

Allaby, M., (2008), A dictionary of Earth Sicences, Thrid edition, Oxford University press, 654p.

Amato, U., De Feis, I., (2000), Smoothing data with correlated noise via Fourier transform, Mathematics and computers in simulation, 52, pp. 175-196

André, F., Van Leeuwen, C., Saussez, S., Van Durmen, R., Bogaert, P., Moghadas, D., De Rességuier, L., Delvaux, B., Vereecken, H., Lambot, S., (2011), High-resolution imaging of vineyard in south of France using ground-penetrating radar, electromagnetic induction and electrical resistivity tomography, Journal of Applied Geophysics, 78, pp. 113-122

Andrenelli, M.C., Magini, S., Pellegrini, S., Perria, R., Vignozzi, N., Costantini, E.A.C., (2013), The use of the ARP© system to reduce the costs of soil survey for precision viticulture, Journal of Applied Geophysics, 99, pp. 24-34

André, F., Van Leeuwen, C., Saussez, S., Van Durmen, R., Bogaert, P., Moghadas, D., De Rességuier, L., Delvaux, B., Vereecken, H., Lambot, S., (2011), High-resolution imaging of vineyard in south of France using ground-penetrating radar, electromagnetic induction and electrical resistivity tomography, Journal of Applied Geophysics, 78, pp. 113-122

Angelini, C., De Canditiis, D., (2000), Fourier frequency adaptive regularization for smoothing data, Journal of computational and applied mathematics, 115, pp. 35-50

Argote-Espino, D., Tejero-Andrade, A., Cifuentes-Nava, G., Iriarte, L., Farias, S., Chavez, R.E., Lopez, F., (2013), 3D electrical prospection in the archeological site of El Pahñu, Hidalgo State, Central Mexico, Journal of Archeological Science, 40, pp. 1213-1323

[B]

Barker R.D. (1981), The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable, Geophysical Prospecting, 29, pp. 128-143.

Barker, R.D., (1989), Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays, Geophysics, soc. of Expl. Geophys, 54, pp. 1031-1037

Barker R.D. (1992), A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. First Break, 10(2), pp. 53-62.

Basarir, H., Kumral, M., Karpuz, C., Tutluoglu, L., (2010), Geostatistical modeling of spatial variability of SPT data for a borax stockpile site, Engineering Geology, 114, 3-4, pp. 154-163

Bellanger, M., Aigrain, P., (2006), Traitement numérique du signal – Théorie et pratique, 8ème édition, Dunod éd., 465p.

Benz Navarrete, M.A., (2009), Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre PANDA 2, Mémoire de thèse, Université Blaise Pascal – Clermont II, 229 p.

Bergström, G., (1913), Försök med elektrisk malmletring, Sveriges Geologiska Undersöknings Arsbok Stockholm 7, 6, pp. 1-10

Bernard, J., Leite, O., Vermeersch, F., (2008), Multi-electrode resistivity imaging for environnemental and mining applications, Iris Instrument, 6p.

Bernard, M., Dudoignon, P., Pons, Y., Chevallier, C., Boulay, L., (2007), Structural characterization of clay-dominated soils of a marsh and palaeosol in a crossed diagram, European Journal of Soil Science, 58, pp. 1115-1126

Bernard, M., Dudoignon, P., (2007), Corrélation profils de résistance à la pointe – profils de teneur en eau dans les sols argileux : Marais de Rochefort, 25ème rencontres de l'AUGC, 8p.

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, Thèse, Université d'Orléans. 216p.

Blais, J.P., (2004), Méthodologie mise en œuvre par EDF pour la détection de fuites dans les ouvrages en remblais par méthodes non destructives, EDF-SGG, Symposcience communication, 18p.

Boissier, D., Bacconnet C., Alhajjar, J., (2005), Autour du hasard et dans le sol, Revue Française de géotechnique, 112, pp. 11-20

Breysse, D., Kastner, R., dir (2003), Sols urbains, Lavoisier, 462p.

Breysse, D., Kastner, R., (2003), Le sol urbain : spécificités du milieu et ses enjeux, in : BREYSSE, KASTNER dir., pp. 19-36

Brossard, J.P., (1994), Mécanique Générale – Chapitre 10 – Théorie des chocs, GMCS081C, cours en ligne, INSA de Lyon, 96p.

Burrough, P.A., Bouma, J., Yates, S.R., (1994), The state of the art in pedometrics, Geoderma, 62, pp. 311-326

Buvat, S., (2012), Caractérisation de l'organisation spatiale de la couverture pédologique par mesure de la résistivité électrique – Application à la cartographie des sols en contexte agricole, Mémoire de thèse, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), 186p.

[C]

C.C.M. – Commission Centrale des Marchés, (2009), Guide à l'attention des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre, Journal official de la République Française, Editions des journaux officiels, 184p.

C.R.R. – Centre de Recherche Routière, (1978a), Code de bonne pratique pour la reconnaissance géotechnique des tracés de routes, Fascicule I : Généralités – Problèmes routiers et reconnaissance géotechnique, éd. Centre de Recherche Routière, 71p.

C.R.R. – Centre de Recherche Routière, (1978b), Code de bonne pratique pour la reconnaissance géotechnique des tracés de routes, Fascicule V : Organisation de la reconnaissance et exploitation des résultats, éd. Centre de Recherche Routière, 71p.

Calamita, G., Brocca, L ;, Penone, A., Piscitalli, S., Lapenna, V., Melone, F., Moramarco, T., (2012), Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites, Journal of Hydrology, 454-455, pp. 101-112

Calinski, T., Harabasz, J., (1974), A dendrite method for cluster analysis, Communications in statistics, 3, pp. 1-27.

Carpentier, F.G., (2007), Introduction aux analyses multidimensionnelles, ECPSR83B, cours en ligne, Université de Brest, 22p.

Carpentier, F.G., (2012), Analyses multidimensionnelles et applications informatiques, Classification Ascendante Hiérarchique, PSY83A, cours en ligne, Université de Brest, 16p.

Chapellier D. (2000), Prospection électrique de surface, cours de géophysique en ligne, Université de Lausanne, Institut Français du Pétrole, 102 p.

Chapellier, D., (2001), Cours en ligne, http://www-ig.unil.ch/cours/pdf/ (Janvier 2014)

Chaplot, V., Lorentz, S., Podwojewski, P., Jewitt, G., (2010), Digital mapping of A-horizon thickness using the correlation between various soil properties and soil apparent electrical resistivity, Geoderma, 157, pp. 154-164

Cheng, Q., Sun, Y., Lin, J., Damerow, L., Schulze Lammers, P., Hueging, H., (2012), Applying two-dimensional Fourier Transform to investigate soil surface porosity by laser-scanned data, Soil & Tillage Research, 124, pp. 183-189

Cherubini, C., (1993), The variability of geotechnical parameters. Probabilities and materials. Tests, models and applications edited by Breysse D. NATO ASI Series. Serie E : applied Sciences, 269, pp. 69-80

Chouteau, M., (2006), Géophysique appliquée II, GLQ3202, Méthodes électriques, cours en ligne, Ecole Polytechnique de Montréal, 81p.

Chrétien, M., (2010), Compréhension des mécanismes de retrait-gonflement des sols argileux : approche sur site expérimental et analyse de sinistres sur constructions individuelles, Mémoire de thèse, Université Bordeaux 1 – Bordeaux, 371 p.

Chrétien, M., Lataste, J.F., Fabre, R., (2013), Electrical resistivity tomography (ERT) on site for survey of natural clayey soil water content, Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, pp. 1409-1407.

Chrétien, M., Lataste, J.F., Fabre, R., Denis, A., (2014), Electrical resistivity tomography to understand clay behavior during seasonal water content variation, Engineering Geology, 169, pp. 112-123

Christensen N.B., Sorensen K. (2001), Pulled array continuous electrical sounding with an additional inductive source : an experimental design stydy. Geophysical Prospecting 49 : 241-254 (in Besson, 2007)

Colmont G. (2008), Michel Martinaud (1946-2008), ArchéoSciences, 32.

Comte J.C. (2008), Apport de la ERT à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers, Université d'Avignon. 200p.

Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Cui, Y.J., Tabbagh, A., Charlery, Y., (2006), Correlation between geotecnical and electrical data : A case study at Garchy in France, Journal of Applied Geophysics, 60, pp. 165-178

Craul, P.J., (1985), Urban Soil, SUNY-College of Environmental Science & Forestry Syracuse, New York 13210, 17 p.

Crutzen, P.J., (2006), The ''Anthropocene'', Earth System Science in the Anthropocene, pp. 13-18

[D]

Dahlin T. (1989), The development of a cable system for vertical electrical sounding and a comparison of the Schlumberger and Offset Wenner methods, Licentiate Thesis, Lund University, Sweden, 77p.

Dahlin T., Bernstrone, C. (1997), A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays, Proceedings SAGEEP'97, Reno, Nevada, Vol. 2 March 23-26 1997, 927-935.

Dahlin T. (2001), The development of DC resistivity imaging technique, Computers & Geosciences, 27(9), pp. 1019-1029.

Davidovic, N., Prolovic, V., Stojic, D., (2010), Modeling of soil parameters spatial uncertainty by geostatistics, Architecture and Civil Engineering, 8, pp. 111-118

Dawson, K.M., Baise, L.G., (2005), Three-dimensional liquefaction potential analysis using geostatistical interpolation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, 5, pp. 369-381

De Benedetto, D., Castrignano, A., Sollitto, D., Modugno, F., Buttafuoco, G., Lo Papa, G., (2011), Integrating geophysical and geostatistical techniques to map the spatial variation of clay, Geoderma, 171-172, pp. 53-63

De Wener, P., (2012), Temps de la Terre, temps de l'Homme, Ed. Albin Michel, p240.

De Canditiis, D., De Feis, I., (2006), Pointwise convergence of Fourier regularisation for smoothing data, Journal of computational and applied mathematics, 196, pp. 540-552

Demolon, A., (1932), La dynamique du sol, Volume 1 de Principes d'agronomie, Dunod, 347p.

Denis, A., Martinaud, M., (2003), Reconnaissance géotechnique et géophysique du sol urbain, in BREYSSE, KASTNER dir. 2003, pp. 97-121.

Dey A., Morrison H.F. (1979), Resistivity modeling for arbitrary shaped three-dimensional structures, Geophysics, 44, 753-780.

Doucet, A., Johansen, A.M., (2010), A tutorial on particle filtering and smoothing: Fifteen years later, In Handbook of Nonlinear Filtering, eds. D. Crisan & B. Rozovsky; Cambridge University Press, 39p.

Dubost, J, (2009), Variabilité et incertitude en géotechnique : de leur estimation à leur prise en compte, Mémoire de these, Université Bordeaux I – Bordeaux, 356p.

Dujardin, F.H., Ertaud, J.Y., Aucouturier, T., Nguen, J., Thomine, J.M., (1997), Smoothing technique using Fourier transforms applied to stereometric data obtained from optoelectronic recordings of human gait, Human Movement Science, 16, pp. 275-282

[E]

Ek, C., Jaspar, A., Michel, R., (1999), La cartographie des contraintes karstiques en région wallonne (Belgique), Bulletin de la scociété géographique de Liège, 36, pp. 53-64

Ekinci, Y.L., Kaya, M.A., (2007), 3D resistivity imaging of buried tombs at the Parion necropolis (NW Turkey), Journal of the Balkan Geophysical Society, 10, pp. 1-8

Elkateb, T., Chalaturnyk, R., Robertson, P.K., (2003), An overview of soil heterogeneity: quantification and implication on geotechnical field problems, Canadian Geotechnical Journal, 40, pp. 1-15

Eurocode 7, Magnan, J.P., (1997), Technique de l'ingénieur Eurocode 7 : calcul géotechniques, 7p.

[F]

Fabre, R., Chrétien, M., Andrieux, C., Denis, A., (2012), Caractérisation des facteurs d'hétérogénéité du sous-sol de Pessac (Gironde, France) : aspects géologiques et géotechniques, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2012, pp. 59-66.

Faisanteau, D., (2010), Enquête sur la sinistralité des géotechniciens – Période : 1998-2007, Syntec Ingénierie-USG, Centre d'Etudes d'Assurances, 39p.

Fauchard C., Mériaux P. (2004), Les méthodes de reconnaissance à grand rendement adaptées aux digues de protection contre les inondations, LRPC Rouen Cemagref, Symposcience communication.

Favre, J.L., (1998), Errors in geotechnics and their impact on safety, Computers and Structures, 67, pp. 37-45

Favre, J.L., (2000), Les différents types d'erreurs et leur prise en compte dans les calculs géotechniques, Revue Française de Géotechnique, 4, pp. 11-20

Ferahtia, J., Djarfour, N., Baddari, K., Kheldoun, A., (2012), A fuzzy logic-based filter for the removal of spike noise from 2D electrical resistivity data, Journal of Applied Geophysics, 87, pp. 19-27

Fenton, G.A., Griffiths, D.V., (2003), Bearing capacity prediction of spatially random c-φ Soils, Canadian Geotechnical Journal, 40, pp. 54-65

Fourvel A., Liegard S. (2004), Etude de deux digues d'étangs ''en terre'' recoupées par le tracé de la RCEA à Pierrefitte-sur-Loire et Coulanges (Allier), Revue archéologique du centre de la France, 43, p209-222.

Frazer, H.B., (1971), Formulas de Hinca Dinamica, Revista de obras publicas de España, Diciembre, pp. 977-990

Friedel, S., Thielen, A., Springman, S.M., (2006), Investigation of a slope endangered by rainfall-induced landslides using 3D resistivity tomography and geotechnical testing, Journal of Applied Geophysics, 60, pp. 100-114

Fullana, J.M., (2002), Une technique de lissage de données basée sur la théorie de la régularisation, Comptes Rendus Mécanique, 330, pp. 647-652

[G]

Galinié, H., (2003), Lire les archives du sol en villes, in : BREYSSE, KASTNER 2003 dir., pp. 447-455

Gavin, J., Haberman, S., Verrall, R., (1993), Moving weighted average graduation using kernel estimation, Insurance : Mathematics and Economics, 12, pp. 113-126

Genelle, F., (2012), Les méthodes géophysiques pour la caractérisation des couvertures d'installation de stockage de déchets, Mémoire de thèse, Université Bordeaux I – Bordeaux, 366 p.

Ghosh D.P. (1971), The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements, Geophysical Prospecting, 19, 192-127. (in Sombo, 1978).

Gish O.H. et Rooney W.J. (1925), Measurement of resistivity of large masses of undisturbed earth, Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity, 30(4), 161-188. (in Sombo, 1978).

Giroux, B., (2005), Techniques géophysiques de haute résolution, GML6201A, Méthodes électromagnétiques, cours en ligne, Ecole Polytechnique de Montréal, 56p.

Goovaert, P., (1999), Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, Journal of Hydrology, 228, pp. 113-129.

Gourvès, R., (1991), Le PANDA – pénétromètre dynamique léger à énergie variable pour la reconnaissance des sols, LERMES CUST, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, 12p.

Grammont, L., (2003), Cours de statistiques inférentielles, Licence d'économie et de gestion, Université de Saint Etienne, 65p.

Grandin, J.F., (2006), Fusion de données – Théorie et méthodes, Dossier Technique de l'ingénieur s7224, Automatique avancée, 24p.

Grandjean, G., Malet, J.P., Bitri, A., Méric, O., (2007), Geophysical data fusion by fuzzy logic imaging the mechanical behaviour of mudslides, Bulletin de la Société Géologique Française, 178, pp. 127-136

Griffith, A., Robinson, L.A., Wilett, P., (1984), Hierarchic agglomerative clustering methods for automatic document classification, Journal of Documentation, 40, pp. 175-205

Griffiths, D.H., Turnbull, J., Olayinka, A.I., (1990), Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array, First Break, 8(4), 121-129.

Griffiths, D.H., Barker, R.D., (1993), Two-dimensional resistivity imaging and modeling in area of complex geology, Journal of Applied Geophysics, 29, pp. 211-226

Grossmann, A., Morlet, J., (1984), Decomposition of hardy function into square integrable wavelet of constant shape, Society for Industrial and Applied Mathematics, 15, pp. 723-736

Guekie Simo, A.T., (2012), Effets de la variation spatiale et temporelle des propriétés des terrains sur les défaillances des réseaux enterrés, Mémoire de thèse, Université Bordeaux I – Bordeaux, 266 p.

Guerrero O. (2009), Les Méthodes de Prospections Géophysiques. Application au Grand Rendement, mémoire de Master en génie géologique, génie civil et environnement, Université de Bordeaux, 43p.

Guerrero O. (2010), Recherche et développement d'une Méthode de Prospection en Tomographie de Résistivité Electrique Cinématique (TREC), mémoire de Master en génie géologique, génie civil et environnement , Université de Bordeaux, 63p.

Guerrero O., Lataste J.F., Marache A., (2012), High yield electrical prospection for characterization of soil, Fourth International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brésil, 18-21 Septembre, Vol. 1, pp. 587-595

[H]

Hardy, A., (1996), On the number of clusters, Computational Statistics & Data Analysis, 23, pp. 83-96

Hartemink, A.E., (2009), The depiction of soil profiles since the date 1700s, Catena, 79, pp. 113-127

Hesse A., Jolivet A., Tabbagh A. (1986), New prospects in shallow depth electrical surveying for archeological and pedological applications, Geophysics, 51, pp. 585-594

Heuvelink, G.B.M., Webster, R., (2001), Modeling soil variation : past, present, and future, Geoderma, 100, pp. 269-301

Hibert, C., Grandjean, G., Bitri, A., Travelletti, J., Malet, J.P., (2012), Characterizing landslides through geophysical data fusion: Example of the La Valette landslide (France), Engineering Geology, 128, pp. 23-29

Ho, T.L., (2009), 3-D inversion of borehole-to-surface electrical data using a back-propagation neural network, Journal of Applied Geophysics, 68, pp. 489-499

Hosseini, M., (2013), Etude Géotechnique et reconnaissance des sols et des rocs, cours en ligne, Carrefour Perfectionnement Polytechnique Montréal.

[I]

Imanzadeh, S., (2013), Effects of uncertainties and spatial variation of soil and structure properties on geotechnical design. Case of continuous spread footing and buried pipes, Mémoire de thèse, Université Bordeaux I – Bordeaux, 279p.

Indira, V., Vasanthakumari, R., Sugumaran, V., (2010), Minimum sample size determination of vibration signals in machine learning approach to fault diagnosis using power analysis, Expert Systems with Applications, 37, pp. 8650-8658

[J]

Jamshidi Chenari, R., Ollomi Dadaran, R., (2010), New Method for estimation of the scale of fluctuation of geotechnical properties in natural deposits, Computational Methods in Civil Engineering, 1, pp. 55-64

Johansen H.K. (1977), a man computer interpretation system for resistivity sounding over a horizontal stratified earth, Geophysical Prospecting, 25(4), 667-691. (in Sombo, 1978).

Jung, Y.J., Sinha, S.K., (2005), Damage prevention best practice for buried utilities, North American Society for Trenchless Technology (NASTT), p. 10

[K]

Kafadar, K., Morris, M.D., (2002), Nonlinear smoothers in two dimensions for environmental data, Chemometrics an Intelligent Laboratory SystemsI, 60, pp. 113-125

Kang, S., Seol, S.J., Chung, Y., Kwon, H.S., (2013), Pitfalls of 1D inversion of small-loop electromagnetic data for detecting man-made objects, Journal of Applied Geophysics, 90, pp. 96-109

Kinal, J., Stoneman, G.L., Williams, M.R., (2006), Calibrating and using an EM31 electromagnetic induction meter to estimate and map soil salinity in the jarrah and karri forests of south-western Australia, Forest Ecology and Management, 233, pp. 78-84.

Köhler, T., Lorenz, D., (2005), A comparison of denoising methods for one directional time series, Technical Report, Deutsche Forschungsgemeinschaft, DGF SSP Priority Programme 1114, 15p.

Kubiëna, W.L., (1950), Bestimmungsbuch and Systematik der Böden Europas, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart

Kumar, P., Foufala-Georgiou, E., (1997), Wavelet analysis for geophysical applications, Reviews of Geophysics, 35, pp. 385-412

Kunetz, G., (1966), Principles of Direct Current Resistivity Prospecting, Gebrüder Borntraeger, Berlin, 103 p.

[L]

Lacasse, S., Nadim, F., (1998), Risk and reliability in geotechnical engineering, Fourth International Conference on Case Hisories in Geotechnical Engineering, pp. 1172-1192

Lacasse, S., Nadim, F., (2007), Statistical description of characteristic soil properties, Offshore Technology conference, Houston, Texas, 8p.

Lagabrielle, R., (2007), Géophysique appliqué au génie civil, Techniques de l'ingénieur, C224v2, Editions T.I., 24p.

Lane, R., Green, A., Golding, C., Owers, M., Pik, P., Plunkett, C., Sattel, D., Thorn, B., (2000), An example of 3D conductivity mapping using the TEMPEST airborne electromagnetic system, Exploration Geophysics, 31, pp. 162-172

Lark, R.M., Kaffka, S.R., Corwin, D.L., (2003), Multiresolution analysis of data on electrical conductivity of soil using wavelets, Journal of Hydrology, 272, pp. 276-290

Lataste J.F. (2007), Rapport de mesure terrain : Tomographie de résistivité électrique en mode cinématique, Laboratoire GHYMAC – Université Bordeaux 1, 13p.

Laurent, A., (2007), Evaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain, Mémoire de thèse, Université François Rabelais – Tours, 393 p.

Le Roux, O., Schmutz, M., Respaud, C., Flouest, N., Camus, A., (2012), Caractérisation géologique d'une doline à partir de prospection géophysique de sub-surface, Journée Nationales de géotechnique et de Géologie de l'ingénieur JNGG2012, pp. 223-230

Lenz, J.A., Baise, L.G., (2007), Spatial variability of liquefaction potential in regional mapping using CPT and SPT data, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27, 7, pp. 690-702

Lepetit, L., (2002), Etude d'une méthode de diagnostic de digues avec prise en compte du risqué de liquefaction, Mémoire de thèse, Université Blaise Pascal – Clermont II, 287p.

Lew, J.J., (1997), Subsurface Utility Engineering : An Initial Step in Project Developpement, Journal of Construction Education, 2, pp. 109-118

Li Y. (1992c), Inversion of three-dimensional direct current resistivity data, Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, 165 p.

Li., W.C., Lee, L.M., Cai, H., Li, H.J., Dai, F.C., Wang, M.L., (2013a), Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope, Engineering Geology, 153, pp. 105-113

Li, J., He, Z., Liu, Q.H., (2013b), Higher-order statistics correlation stacking for DC electrical data in the wavelet domain, Journal of Applied Geophysics, 99, pp. 51-59

Li, H.Y., Shi, Z., Webster, R., Triantafilis, J., (2013), Mapping the three-dimentional variation of soil salinity in a rice-paddy soil, Geoderma, 195-196, pp. 31-41

Loke M.H., Barker R.D. (1995), Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections, Geophysics, 60, 1682-1690.

Loke M.H., Barker R.D. (1996a), Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, Geophysical Prospecting, 44(1), 131-152.

Loke M.H., Barker R.D. (1996b), Practical technique for 3-D resistivity survey and data inversion, Geophysical Prospecting, 44, 499-523.

Loke, M.H., (2004), Tutorial : 2-d and 3-d electrical imaging surveys, 136p.

Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kunas, O., Wilkinson, P.B., (2013), Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method, Journal of Applied geophysics, 95, pp. 135-156

Lowery, L.L, Hirscj, T.J., (1968), A comparison of dynamic pile driving formulas with the wave equation, Texas Transport Institute, Research Report 33-12, 21p.

Lueck, E., Ruehlmann, J., (2013), Resistivity mapping with GEOPHILUS ELECTRICUS – Information about lateral and vertical soil heterogeneity, Geoderma, 199, pp. 2-11

Lund, E.D., Christy, C.D., Drummond, P.E., (1999), Practical applications of soil electrical conductivity mapping, Veris Technologies, Proceeding of the 2nd European Conference on Precision Agriculture, 9p.

Lundström, K., Larsson, R., Dahlin, T., (2009), Mapping of quick clay formations using geotechnical and geophysical methods, Landslides, 6, pp. 1-15

[M]

Mabille, G., Fettweis, X., Erpicum, M., Nicolay, S., (2012), Etude fréquentielle de données via la transformée en ondelette : application aux cycles climatiques, Bulletin de la Société Geophysique de Liège, 58, pp. 5-15

Macnae, J.C., Lamontagne, Y., West, G.F., (1984), Noise processing techniques for time-domain EM systems, Geophysics, 49, pp. 934-948

Magnan, J.P., Bru, J.P., Peignaud, M., (1980), Quelques règles pour la reconnaissance géotechnique des sites compressibles, Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées, 108, pp. 5-12

Magnan, J.M., (1996), Les applications des statistiques et probabilités en géotechnique au LCPC. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°202 mars-avril, pp. 25-35

Maïolino, S., Faure, R.M., (2002), Utilisation des ensembles flous pour les calculs en géotechnique, Actes des Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG 2002), Nancy, 16p.

Marache, A., Breysse, D., Piette, C., Thierry, P., (2009), Geotechnical modeling at the city scale using statistical and geostatistical tools: The Pessac case (France), Engineering Geology, 107, 3-4, pp. 67-76

Marescot, L., (2008), Imagerie Electrique pour Géologues, Tomoquest édition, 73p.

Marinoni, O., (2003), Improving geological models using a combined ordinary - indicator kriging approach, Engineering Geology, 69, pp. 37-45

Martin, P., (1976), Essai sur la géotechnique, Masson, Paris, 187p.

Martin, P., (2010), Géotechnique appliquée au BTP, ed. EYROLLES, 397p.

Mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris ed., 212p.

Matheron, G., (1970), La théorie des variables régionalisées, et ses applications, Les cahiers du centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5, 220p.

McDonough, P.V., Noonan, J.P., Hall, G.R., (1995), A new chaos detector, Computers Elect. Engng 6, 21, pp. 417-431

McGraw-Hill, (2003), Dictionary of Earth Science, Second edition, McGraw-Hill companies, 468p.

McNeill J.D. (1980), Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical note TN-6, Geonics Limited, Mississauga, Ontario, 13p.

Mermoud, A., (2006), Propriétés de base du sol et de la phase liquid, cours de Physique du sol, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, 29p.

Morel, J.L., Schwartz, C., Florentin, L., (2005), Urban Soils, Encyclopedia of soils in the environment, 4, pp.202-208

Mousavi, S.M., Omidvar, B., Ghazban, F., Feyri, R., (2011), Quantitative risk anbalysis for earthquake-induced landslides – Emanzadeh Ali, Iran, Engineering Geology, 122, 191-203

Moussouteguy, N., (2002), Utilisation combinée des essais pressiomètriques et diagraphies instantanées pour mieux évaluer la risque géotechnique en reconnaissance des sols, Mémoire de thèse, Université Bordeaux I – Bordeaux, 417 p.

[N]

Niwas, S., Celik, M., (2012), Equation estimation of porosity and hydraulic conductivity of Ruhrtal aquifer in Germany using near surface geophysics, Journal of Applied Geophysics, 84, pp. 77-85

Norme Française NF EN 933-9, P 18-622-9, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie 9 : Qualification des fines – Essai au bleu de méthylène, 20p.

Norme Française NF P 11-300, Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, 21p.

Norme Française NF P 94-078, Indice CBR après immersion – Indice CBR immédiat – Indice Portant Immédiat, Mai 1997, 12p.

Norme Française NF P94-110-1, Sols : reconnaissance et essais – Essais pressiométrique Ménard, 43p.

Norme Française NF P94-114, Reconnaissance et essai, Essai de pénétration dynamique type A

Norme Française NF P94-115, Reconnaissance et essai, Essai de pénétration dynamique type B

Norme Française NF P94-500, Missions géotechniques, classification et spécifications, Juin 2000, 37p.

[O]

Oldenburg D.W., Li Y. (1994), Inversion of induced polarization data, Geophysics, 59, 1327-1341.

Oriola, E.O., Adesina, F.A., (1998), Homogeneity in soils of areas belonging to the same facet : an example from south west Nigeria, Malaysian Journal of Tropical Geography, 17, pp. 42-51

[P]

Panissod C., Lajarthe M., Tabbagh A. (1997), Potential focusing : a new multielectrode array concept, simulation study, and field tests in archeological prospecting. Journal of Applied Geophysics, 38, pp. 1-23

Panissod, C., Dabas, M., Jolivet, A., Tabbagh, A., (1997b), A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3m) geoelectrical investigation: The "vol-de-canards" array, Geophysical Prospecting, 45, pp. 983-1002

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, pp. 1512-1550

Park, I., Amarchinta, H.K., Grandhi, R.V., (2010), A Bayesian approach for quantification of model uncertainty, reliability Engineering and System Safety, 95, pp. 777-785

Pellicer, X.M., Zarroca, M., Gibson, P., (2012), Time-lapse resistivity analysis of Quaternary sediments in the Midland of Ireland, Journal of Applied Geophysics, 82, pp. 46-58

Perez-Muñoz, T., Velasco-Hernandez, J., Hernandez-Martinez, E., (2013), Wavalet transform analysis for lithological characteristics identification in siliciclastic oil field, Journal of Applied Geophysics, 98, pp. 298-308

Peterson, W., (1907), Om malmsökande medelst elektricitet, Jern-Kontorets Annaler, 2-3, pp. 153-171

Peter-Borie, M., Sirieix, C., Riss, J., Naudet, V., (2007), Etude de la répétabilité des mesures de tomographie de résistivité électrique au cours d'une journée, 6ème Colloque GEOFCAN.

Petit, M., (2003), Développement durable à l'échelle de la planète et gestion des ressources en eau et en sols, Comptes Rendus Géosciences, 335, pp. 643-656

Petitjean, M., Gohier, J.F., Régis, F., Roul, A., Sabanowski, I., Baillat, V., Turrel, C., (2010), Sujétions imprévues, Rapport de la FNTP, 38 p.

Penz, S., (2012), Modélisation et inversion de données électriques en cournat continu : vers une prise en compte efficace de la topographie, Mémoire de thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 180p.

Philipponnat, G., Hubert, B., (2002), Fondations et ouvrages en terre, Eyrolles, 548p.

Phoon, K.K., Kulhawy, F.H., Grigoriu, M.D., (1995), Reliability-Based Design of Foundations for transmission Line Structures, Electric Power Research Institute, Cornell University, 384p.

Phoon, K.K., Kulhawy, F.H., (1999a), Characterization of geotechnical variability, Canadian Geotechnical Journal, 36, pp. 612-624

Phoon, K.K., Kulhawy, F.H., (1999b), Evaluation of geotechnical property variability, Canadian Geotechnical Journal, 36, pp. 625-639

Phoon, K.K., Kulhawy, F.H., Grigoriu, M.D., (2000), Reliability-Based design for transmission line structure foundations, Computers and Geotechnics, 26, pp. 169-185

Pissart, A., Closson, D., (1998), L'aménagement du territoire et les contraintes du milieu physique, Bulletin de la société géographique de Liège, 34, pp. 29-43

Pratviel, L., Duvergé, J., Dubreuilh, J., Wilbert, J., Alvinerie, J., Astié, H., Gayet, J., Duphil, J., (1978), Carte géologique de la France à 1/50 000, Pessac (n°827), Notice d'explication, Ministère de l'industrie du commerce et de l'artisanat, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Service Géologique National, Orléans, 37p.

Price, S.J., Ford, J.R., Cooper A.H., Neal, C., (2011), Humans as major géological and geomorphological agents in the Anthropocene : the significance of artificial ground in Great Britain, Philosophical Transactions of The Royal Society A, 369, pp. 1056-1084

[Q]

Qasim, S., Harahap, I., (2012), Geotechnical Uncertainties and Reliability Theory Applications, International Journal of Engineering Research & Technology, 1, 6, 8p.

[R]

Reninger, P.A., (2012), Méthodologie d'analyse de levés électromagnétiques aéroportés en domaine temporel pour la caractérisation géologique et hydrologique, Mémoire de thèse, Université d'Orléans, 190p.

Rentier C. (2002), Méthode stochastique de délimitation des zones de protection autour des captages d'eau, mémoire de thèse, Université de Liège, 215p.

Rey, E., (2005), Caractérisation de sols hétérogènes par des méthodes géophysiques, Mémoire de thèse, Université Joseph Fourier – Grenoble I, 254p.

Reynolds, J.M., (2011), An introduction to Applied and Environmental Geophysics, Second Edition, Wiley-Blackwell, Chichester, 696p.

Rödder, A., Tezkan, B., (2013), A 3D resistivity model derived from the transient electromagnetic data observed on the Araba fault, Jordan, Journal of Applied Geophysics, 88, pp. 42-51

Rosat, S., (2004), Variations temporelles de la gravité en relation avec la dynamique interne de la Terre – Apport des gravimètres supraconducteurs, Mémoire de thèse, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 251p.

Rouchouze, C., (1994), Fusion de données : exemples Défense et axes de recherche, Traitement du signal, 11, pp. 459-464

Roy, A., Apparo, A., (1971), Depth of investigation in direct current methods, Geophysics, 36, pp. 943-959

[S]

Saglam, M., Oztork, H.S., Ersahin, S., Ozkan, A.I., (2011), Spatial variation of soil physical properties in adjacent alluvial and colluvial soil under Ustic moisture regime, Hydrology and Earth Sciences Discussions, 8, pp. 4261-4280

Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., (2005), Electrical resistivity survey in soil science : a revew, Soil & Tillage Research, 83, pp. 173-193

Sandor, J., Burras, C.L., Thompson M., (2005), Factor of soil Formation / Human impacts, Encyclopedia of soils in the environment, 1, pp. 520-532

Sasaki, Y., (2001), Full 3-D inversion of electromagnetic data on PC, Journal of Applied Geophysics, 46, pp. 45-54

Schlumberger C. (1920), Etude sur la Prospection Electrique du Sous-sol, Gaultier-Villars et Cie., Paris, 94 p. (in Sombo, 1978).

Schmutz, M., Guérin, R., Andrieux, P., Maquaire, O., (2009), Determination of the 3D structure of an earthflow by geophysical methods: The case of Super Sauze, in the French southern Alps, Journal of Applied Geophysics, 68, pp. 500-507

SETRA – LCPC, (1992a), Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule I : Principes généraux, Guide Technique SETRA-LCPC, 98p.

SETRA – LCPC, (1992b), Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule II : Annexes techniques, Guide Technique SETRA-LCPC, 98p.

SETRA/LCPC, (2000a), Guide Technique Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule I : principes généraux, 98p.

SETRA/LCPC, (2000b), Guide Technique Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule II : annexes techniques, 102p.

Sheriff, R.E., (2002), Encyclopedic dictionary of exploration geophysics, Fourth Edition, Geophysical Series, 13, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 429p.

Shima, H., Sakashita, S., Kobayashi, T., (1996), Developments of non-contact data acquisition techniques in electrical and electromagnetical exploration, Journal of Applied Geophysics, 35, pp. 167-173

Shirzaditabar, F., Bastani, M., Oskooi, B., (2011), Imaging a 3D geological structure from HEM airborne magnetic structure and ground ERT data in Kalat-e-Reshm area, Iran, Journal of Applied Geophysics, 75, pp. 513-522

Sivakumar, B., (2004), Chaos theory in geophysics: past, present and future, Chaos, Solutions and Fractals, 19, pp. 441-462

Slichter, L.B., (1933), The interpretation of the resistivity prospecting method for horizontal structures, Physics, 4, 307-322. (in Sombo, 1978).

Smith, H.F., (1938), An empirical law describing heterogeneity in the yield of agricultural corps, The Journal of Agricultural Science, 28, pp. 1-23

Smith, I., (2013), Systèmes de mesure, informatique et mécanique appliquée à la construction, document d'enseignement, école polytechnique Fédérale de Lausanne. imac.epfl.ch/page-61523-fr.html

Solberg, I.L., Hansen, L., Ronning, J.S., Haugen, E.D., Dalsegg, E., Tonnesen, J.F., (2012), Combined geophysical and geotechnical approach to ground investigations and hazard zonation of a quick clay area, mid Norway, Bulletin Engineering Geology and Environment, 71, pp. 119-133

Sombo, B., (1978), Etude sismique de subsurface avec essai d'obtention des ondes S, Mémoire de thèse, Université Bordeaux I – Bordeaux, 126p.

Starck, K.M., Hanstein, T.H., Eilenz, H.N., (1989), LOTEM data processing for areas with high cultural noise levels, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 53, pp. 261-269

Stefanescu S., Schlumberger C., Schlumberger, M. (1930), Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales, homogènes et isotropes, Journal de Physique et du Radium, 1(4), 132-140.

Stinchcomb, G.E., Michael StewartTimothy, R., MessnerLee, C., NordtSteven, C., DriesePeter, G., Allen, M., (2013), Using event stratigraphy to map the Anthropocene – An example from the historic coal mining region in eastern Pennsylvania, USA, Anthropocene, available online, 40p.

[T]

Tabarovsky, L.A., Goldman, M.M., Rabinovich, M.B., Starck, K.M., (1996), 2.5-D Modeling in electromagnetic methods of geophysics, Journal of Applied Geophysics, 35, pp. 261-284.

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, pp. 215–230

Tabbagh, A., Dabas, M., Hesse, A., Panissod, C., (2000), Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation, Geoderma, 97, pp. 393–404

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., (1990), Applied Geophysics, Second Edition, Cambridge University press, Cambridge, 744p.

Thierry, P., Breysse, D., Vanoudheusden, E., Marache, A., Dominique, S., Rodière, B., Bourgine, B., Regaldo-Saint Blancard, P., Piette, C., Rivet, F., Fabre, R., (2006), Projet RIVIERA : Risques en Ville : Equipements, Réseaux, Archéologie, Rapport Final, BRGM/RP-55085, 247 p.

Tsourlos P. (1995), Modeling, interpretation and inversion of multi-electrode resistivity survey data, Ph.D. dissertation, Dept. of Electronics, University of York, York, U.K., 315 p.

[U]

Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S., Kaynia, A.M., (2008), A conceptual fremawork for quantitative estimation of physical vulnerability of landslides, Engineering Geology, 102, pp. 251-256

[V]

Valois, R., Camerlynck, C., Dhemaied, A., Guerin, R., Hovhannissian, G., Plagnes, V., Rejiba, F., Robain, H., (2011), Assessment of doline geometry using geophysics on the Quercy plateau karst (South France), Earth Surface Process and Landforms, 36, pp. 1183-1192

Varnes, D.J., (1984), Landslide hazard zonation : a review of principles and practice, UNESCO, 60p.

Van Groenigen, J.W., (2000), The influence of variogram parameters on optimal sampling schemes for mapping by kriging, Geoderma, 97, pp. 223-236

Vanmarcke, E., (1983), Random Fields : analysis and synthesis. The MIT Press, 382p.

Vincent, M., Cojean R., Fleureau, J.-M., Cui, Y. J., Jacquard, C., Kazmierczak, J.-B., Masrouri, F., Tessier, D., Alimi-Ichola, I., Magnan, J.-P., Blanchard, M., Fabre, D., Pantet, A., Audiguier, M., Plat, E., Souli, H., Taibi, S., Tang, A.-M., Morlock, C., Maison, T., Mrad, M., Bréda, N., Djeran-Maigre, I., Duc, M., Soubeyroux, J.-M., Denis, A., Proust, D., Geremew, Z., Le Roy, S., Dumont, M., Hemmati, S., Nowamooz, H., Coquet, Y., Pothier, C., Makki, L., Chrétien, M., Fontaine, C. (2009) – Rapport de synthèse final du projet ARGIC (Analyse du retraitgonflement et de ses Incidences sur les Constructions) – Projet ANR-05-PRGCU-005. Rapport BRGM/RP- 57011-FR en partenariat entre le Centre de Géosciences, le BRGM, le LMSSMat, le CERMES, Fondasol, l'INERIS, le LAEGO, l'INRA, le LGCIE, le LCPC, Météo-France, le GHYMAC et l'Université de Poitiers, 92 p.

[W]

Wait, J.R., (1962), A note on the electromagnetic response of a stratified earth, Geophysics, 27, pp. 382-385

Waschkowski, E., (1983), Le pénétromètre dynamique, Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, 125, pp. 95-103

Webster, R., (2000), Is soil variation random ?, Geoderma, 97, pp. 149-163

Webster, R., (1994), The development of pedometrics, Geoderma, 62, pp.1-15

Westphalen, O., Rice, J., (1992), Drum detection : EM vs Mag. Some revealing tests, Proceedings of the 6th National Outdoor Action Conference, pp. 665-688

Wilks, D.S., (2001), Chap 15 – Clusters Analysis, international Geophysics, 100, pp. 603-616

Wickremesinghe, D., Campanella, R.G., (1993), Scale of fluctuation as a descriptor of soil variability, Probabilistic Methods in Geotechnical Engeneering, Li & Co (eds), pp. 233-239

[Y]

Yan, M., (2005), Methods of determining the number of clusters in a data set and a clustering criterion, Mémoire de thèse, Blackburg, Virginia, 120p.

Young, I.M., Crawford, J.W., Rappoldt, C., (2001), New methods and models for characterizing structural heterogeneity of soil, Soil & Tillage research, 61, pp. 33-45

[Z]

Zadeh, L.A., (1978), Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, Fuzzy Sets and Systems, 1, pp. 3-28

Zhang J., Mackie R.L., Madden T.R. (1995), 3D resistivity forward modeling and inversion using conjugate gradients, Geophysics, 60(5), 1313-1325.

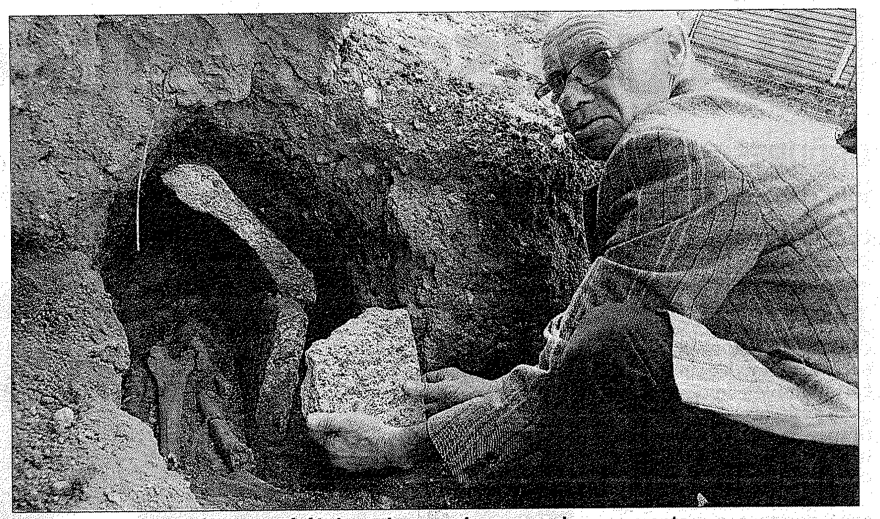
Zirnea, S., Lazar, I., Foudjo, B.U.S., Vasilache, T., Lazar, G., (2013), Cluster analysis based of geochemical properties of phosphogypsum dump located near Bacau city in Romanie, APCBEE Procedia, 5, pp. 317-322

ANNEXES

PESSAC

Sarcophage découvert

CENTRE-VILLE Alors que l'historien Jacques Clémens s'étonnait samedi dans nos colonnes que l'on ne fasse pas de fouilles avec les travaux, Daniel Daucourt découvrait aussitôt un sarcophage !



Daniel Daucourt a aisément repéré le bout de sarcophage avec des ossements. PHOTO W. D.

WILLY DALLAY
w.dallay@sudouest.fr

Comme dans un bon film de Spielberg, l'archéologie est sujette à rebondissements et suspense. Au centre-ville de Pessac, les épisodes se succèdent. À peine, l'historien Jacques Clémens était-il sorti du trou de travaux où il laissait entendre que l'on pourrait trouver des choses intéressantes si on se donnait la peine de chercher que quelqu'un d'autre allait y regarder de plus près. Bingo. Le jour de la parution de l'article (« Sud Ouest » de samedi), Daniel Daucourt, président de l'Association des amis du beau et vieux Pessac, découvrait un sarcophage.

« Une découverte de premier plan », se félicite Jacques Clémens, spécialiste du Moyen Âge. À la différence de celui qu'il avait découvert avec Raphaël Saint-Orens, à l'intérieur de l'église Saint-Martin, en 1978, ici, il y a toujours le couvercle. « C'est étonnant, car il semble avoir été réemployé. » Comme dans la chanson de Brassens (« Supplique pour être enterré à la plage de Sète »), on faisait « place aux jeunes » en poussant les vieux ossements au fond du sarcophage…

« Il faut fouiller dessous »

Lors de ces travaux, ou de précédents, il a été partiellement amputé par un engin de terrassement, révélant sa cavité. Un petit effondrement en plus et Daniel Daucourt a pu le repérer sans peine. « Je voudrais le récupérer et le mettre dans le musée de l'association, l'Historial de Camponac », précise-t-il.

En ce week-end de 14 juillet, Jacques Clémens a aussitôt alerté par courriel le directeur régional du service d'archéologie d'Aquitaine, ainsi que l'adjoint au maire chargé des travaux, Michel Dazat, pour isoler le site du reste du chantier, par des barrières. À l'heure où l'on veut densifier l'agglomération, il a aussi envoyé un courrier au président de la CUB lui demandant de mettre en place des « sentinelles archéologique » bénévoles.

« Il faut procéder à des relevés, dégager, puis sortir le sarcophage et fouiller dessous. Peut-être y a-t-il des choses plus anciennes, car il n'a pas dû être déplacé depuis le Moyen Âge », estime Jacques Clémens.

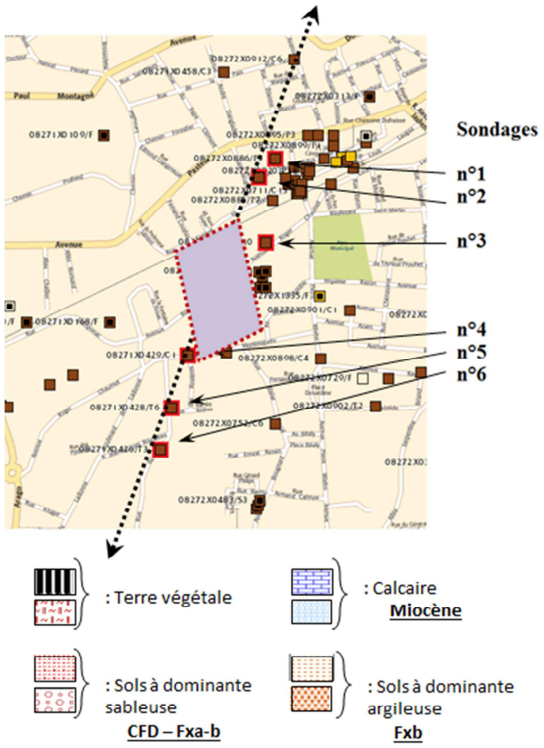
Lui qui avait trouvé un morceau de mosaïque juste à côté, ne désespère pas que l'on découvre un jour des vestiges de la villa gallo-romaine de Peccius. Une mosaïque avait été exhumée au XIXe siècle dans le secteur, puis portée disparue. Détruite, comme on l'a dit ? Daniel Daucourt n'y croit pas trop : « Cela se revendait beaucoup à de riches Anglais ou Américains. »

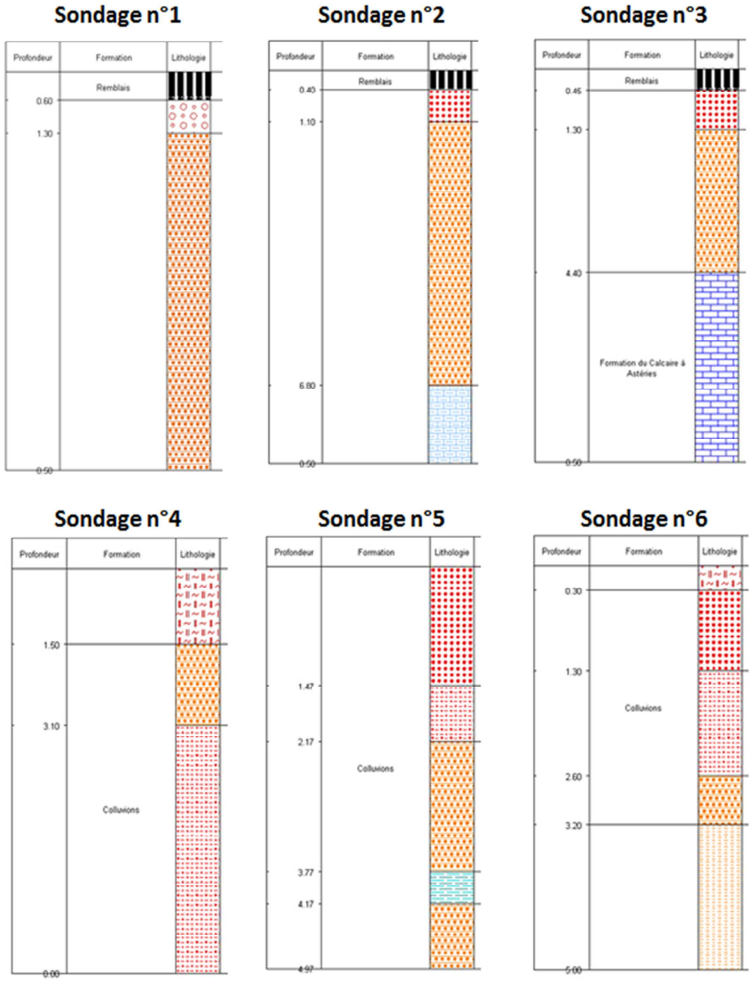
Murs fantômes

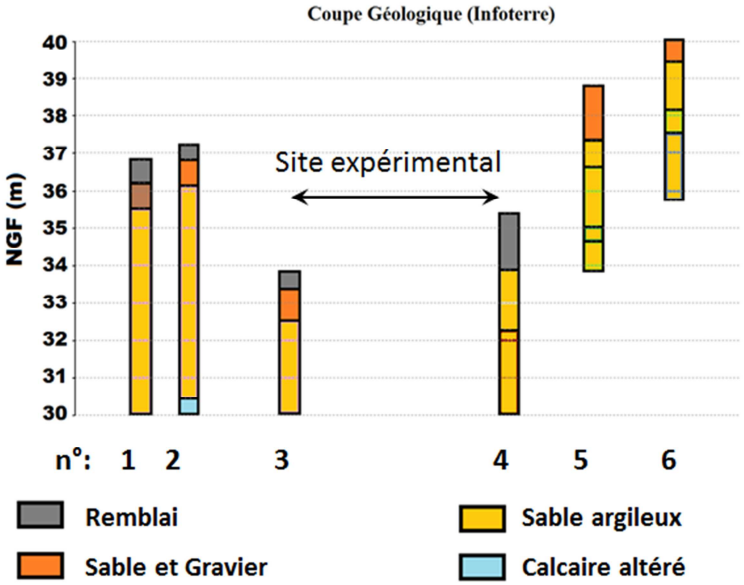
C'est donc le 2e sarcophage découvert au centre-ville, le premier avec un couvercle, même s'il n'est pas entier : « Le fait qu'il soit à l'extérieur de l'église, prouve la richesse de l'ancien cimetière », souligne Jacques Clémens. « Il fallait avoir les moyens pour se payer un sarcophage. Il y en a peut-être d'autres. Car si le cimetière a été déménagé au Poujeau, seuls les monuments funéraires ont été déplacés, ainsi que les ossements des familles qui l'ont souhaité. Tout le reste n'a pas été touché. »

Le passé de Pessac est très ancien, son toponyme renvoie à une origine celte, ou plus sûrement romaine : Peccius. Des chemins celtes et une importante voie romaine passaient à proximité. Souvent les églises furent bâties sur des temples païens qui n'ont peut-être pas encore dit leur dernier mot, surtout par la bouche de Jacques Clémens : « En 1978, on avait trouvé trace de murs fantômes : des tranchées remblayées après récupération des pierres. S'agissait-il d'un vieux mur de l'église ou d'un mur gallo-romain ? » La suite au prochain épisode.

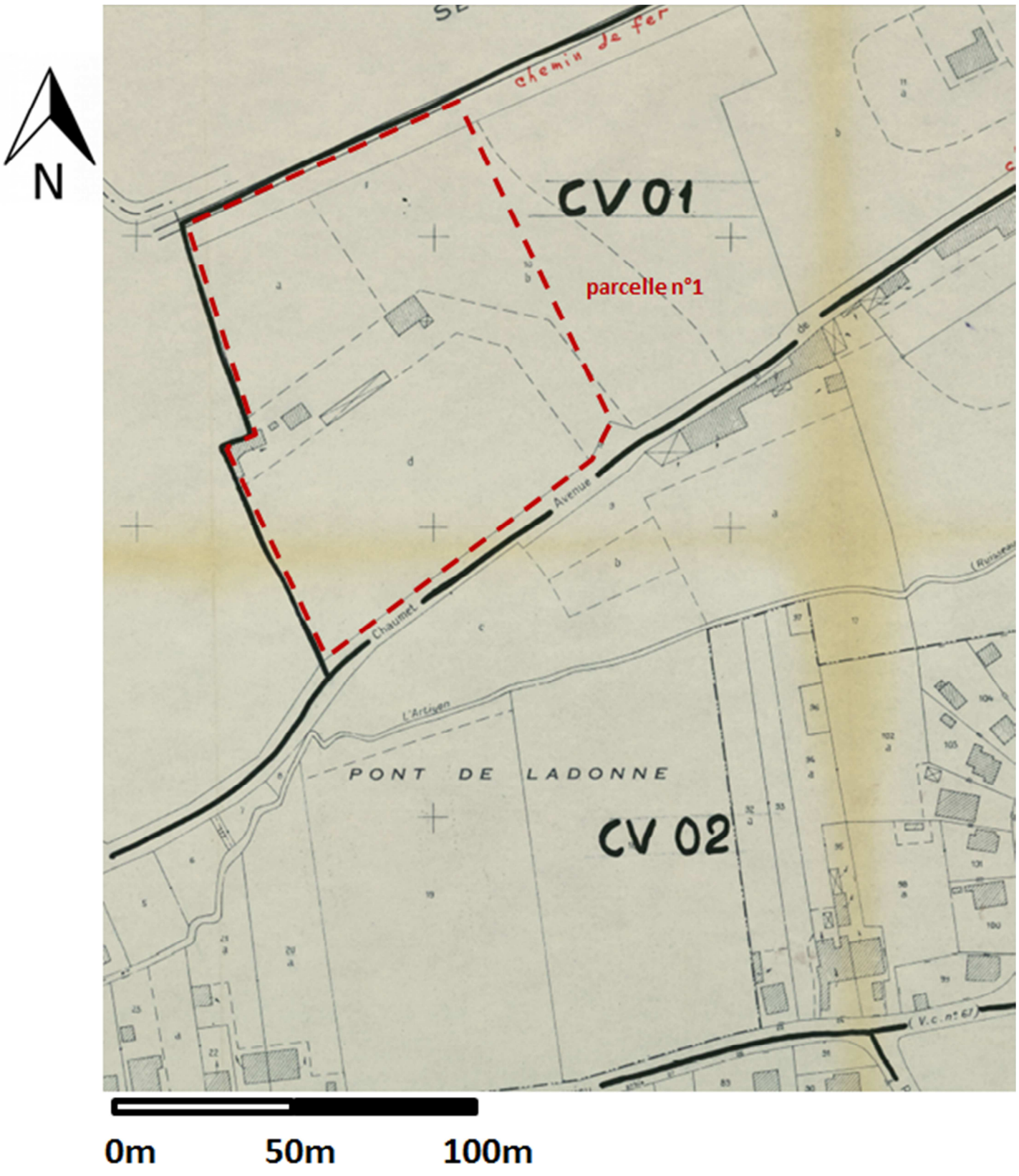
Annexe 2.2 : Implantations des forages et logs géologiques numérisés (source : Infoterre).



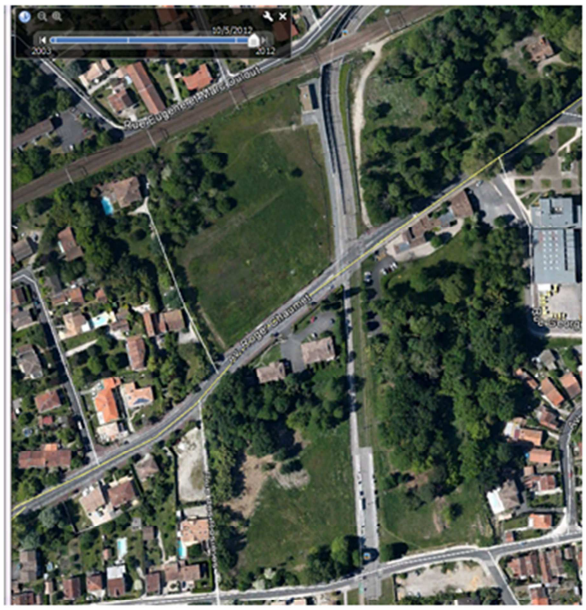




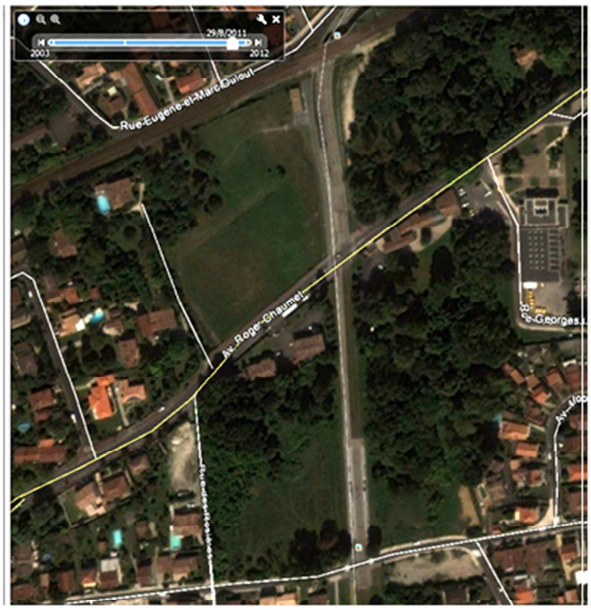
Annexe 2.3 : Parcelle n°1, Feuille Cadastrale de 1968, Archives Municipales de Pessac (FRAAC033318_4Fi74).



Annexe 2.4 : Images d'archives Google Earth.



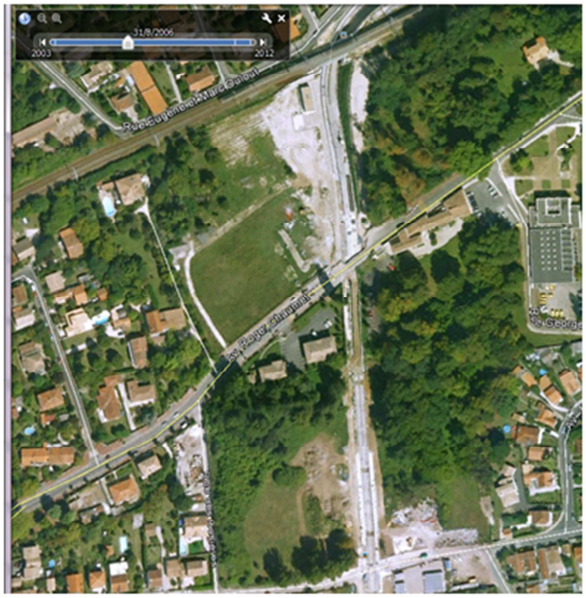
Mai 2012



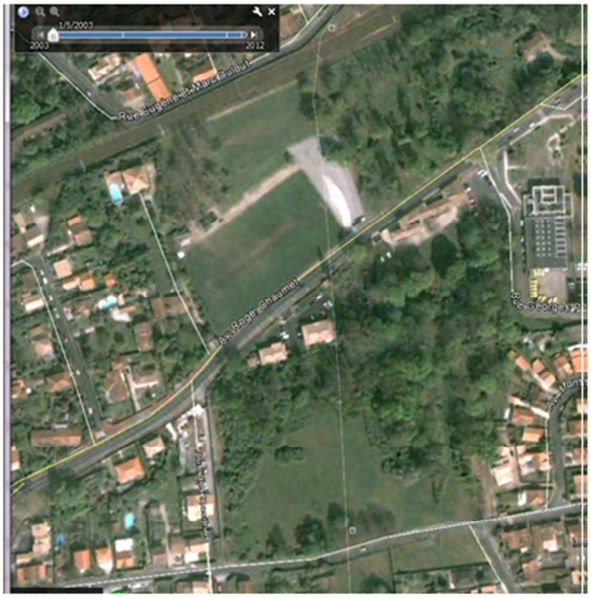
Août 2011

50m 100m

Août 2006



Mai 2003



Annexe 2.5 : Paramètres d'inversion des Tomographies de Résistivité Electrique.

Initial damping factor : 0.1000
Minimum damping factor : 0.0050
Line search option : 2=Always
Convergence limit for relative change in RMS error in percent : 5.0000
Minimum change in RMS error for line search in percent : 0.5000
Number of iterations : 7
Vertical to horizontal flatness filter ratio : 1.0000
Model for increase in thickness of layers : 2=user defined
Number of nodes between adjacent electrodes : 4
Flatness filter type, Include smoothing of model resistivity :1=directly on model
Type of Jacobian matrix calculation : 1=Gauss-Newton
Increase of damping factor with depth : 1.1000
Robust data constrain? : 0=No
Cutoff factor for data constrain : 0.0500
Robust model constrain? : 0=No
Cutoff factor for model constrain : 0.0050
Allow number of model parameters to exceed datum points? : 1=Yes
Type of mesh : 0=Normal
Optimise damping factor? : 1=Yes
Thickness of first layer : 0.1550
Factor to increase thickness layer with depth : 1.0000
USE FINITE ELEMENT METHOD : 1=YES
WIDTH OF BLOCKS : 1=NORMAL WIDTH
MAKE SURE BLOCKS HAVE THE SAME WIDTH : 1=YES
RMS CONVERGENCE LIMIT (IN PERCENT): 0.050
USE LOGARITHM OF APPARENT RESISTIVITY : 0=USE LOG OF APPARENT RESISTIVITY
TYPE OF IP INVERSION METHOD : 0=CONCURRENT
IP DAMPING FACTOR : 0.100
Model refinement : 1.0=Normal
Type of optimisation method : 0=Gauss-Newton
Type of finite-element method : 1=Trapezoidal elements
Factor to increase model depth range : 1.000
Lower damping factor limit for active constraints : 0.4000
RES2DINV ver. 3.59.76 - ID. No. : K2-731D04AE-03A1

Annexe 2.6 : Tableau récapitulatif des lithologies rencontrées et typologie des sols.

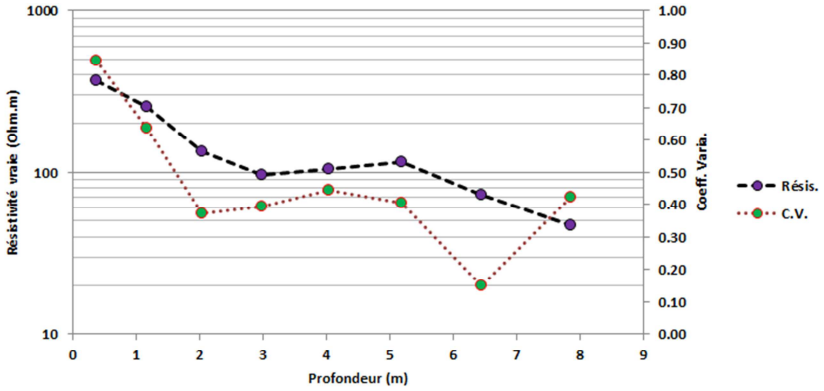
Tarière n°2			Tarière n°3			Tarière n°4		
(m)	Description	Type	(m)	Description	Type	(m)	Description	Type
0-0.2	Terre argileuse marron	TV	0-0.2	Terre Végétale	TV	0-0.3	T.V.	TV
0.2-0.6	Sable gris fin	Sb	0.2-0.4	T.V + grave	TV Gr	0.3-0.65	T.V. + grave	TV Gr
0.6-0.85	Sable argileux + grave	SbA Gr	0.4-0.7	Sable argileux + grave	SbA Gr	0.65-0.9	Sable argileux	SbA
0.85-1.15	Argile verte	Ar	0.7-1.1	Sable argileux	SbA	0.9-1.8	Sable argileux + grave homogène	SbA Gr
1.15-1.7	Sable blanc	Sb	1.1-1.3	Argile verte	Ar	1.8-2.2	Sable argileux	SbA
1.7-2.4	Sable gris vert	SbA	1.3-1.65	Sable blanc	Sb	2.2-2.6	Argile sableuse ocre	ArS
2.4-2.7	Sable argileux ocre	SbA	1.65-2.0	Argile sableuse	ArS	2.6-3.0	Argile verte	Ar
2.7-3.2	Sable argileux crème	SbA	2.0-2.3	Sable argileux ocre	SbA			
			2.3-2.9	Sable blanc argileux	SbA			
			2.9-3.4	Sable argileux crème	SbA			

Typologie des sols :

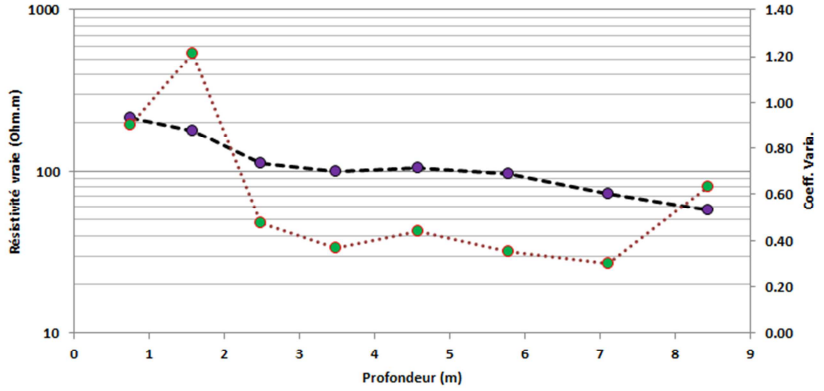
Sable :	**Sb**	**Argile :**	**Ar**
Sable argileux :	**SbA**	**Argile sableuse :**	**ArS**
+ Grave :	**Gr**	**Terre Végétale :**	**TV**

Annexe 2.7 : Paramètres statistiques par niveau des TRE de la parcelle n°1.

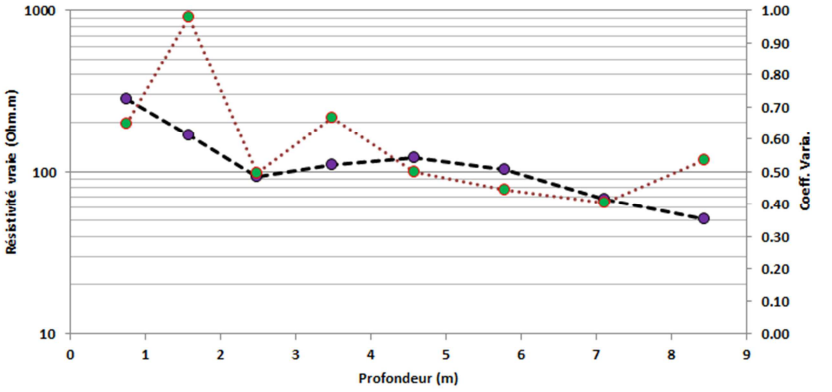
TRE01	Profondeur (m)	Moyenne	Ecart-type	C.V.
niveau 1	0,375	370	313	0,84
niveau 2	1,16	255	163	0,64
niveau 3	2,03	135	50	0,37
niveau 4	2,98	96	38	0,39
niveau 5	4,03	105	47	0,44
niveau 6	5,18	115	47	0,4
niveau 7	6,45	73	11	0,15
niveau 8	7,85	47	20	0,42



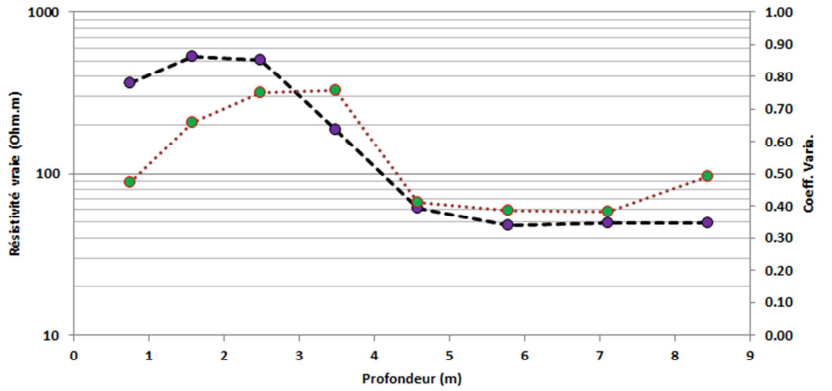
TRE02	Profondeur (m)	Moyenne	Ecart-type	C.V.
niveau 1	0,375	215	194	0.9
niveau 2	1,16	178	216	1.21
niveau 3	2,03	112	53	0.47
niveau 4	2,98	99	36	0.37
niveau 5	4,03	104	46	0.44
niveau 6	5,18	96	34	0.35
niveau 7	6,45	73	22	0.3
niveau 8	7,85	58	37	0.63



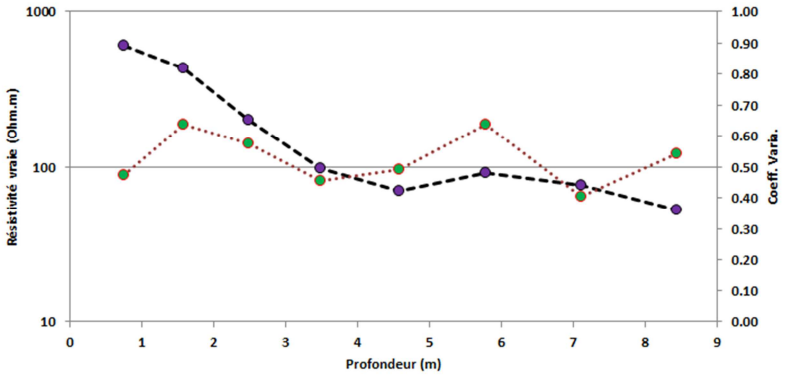
TRE03	Profondeur (m)	Moyenne	Ecart-type	C.V.
niveau 1	0,375	283	184	0.65
niveau 2	1,16	167	163	0.98
niveau 3	2,03	94	46	0.5
niveau 4	2,98	110	73	0.67
niveau 5	4,03	122	61	0.5
niveau 6	5,18	103	46	0.45
niveau 7	6,45	67	27	0.4
niveau 8	7,85	51	27	0.54



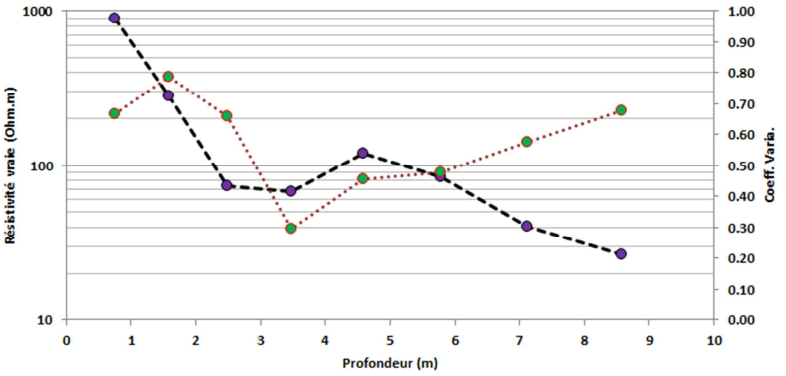
TRE04	Profondeur (m)	Moyenne	Ecart-type	C.V.
niveau 1	0,375	364	173	0.48
niveau 2	1,16	530	349	0.66
niveau 3	2,03	503	377	0.75
niveau 4	2,98	189	143	0.76
niveau 5	4,03	61	25	0.41
niveau 6	5,18	48	18	0.39
4niveau 7	6,45	50	19	0.38
n0iveau 8	7,85	50	24	0.49



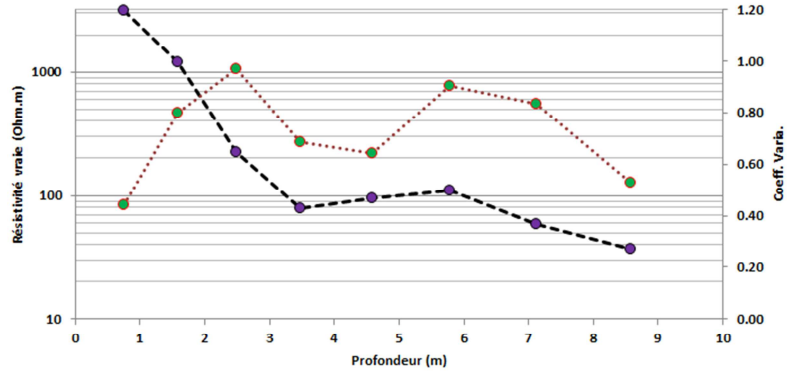
TRE05	Profondeur (m)	Moyenne	Ecart-type	C.V.
niveau 1	0,375	606	287	0.47
niveau 2	1,16	438	279	0.64
niveau 3	2,03	202	116	0.58
niveau 4	2,98	98	45	0.46
niveau 5	4,03	70	34	0.49
niveau 6	5,18	92	59	0.64
niveau 7	6,45	76	31	0.4
niveau 8	7,85	52	28	0.54



TRE06	Profondeur (m)	Moyenne	Ecart-type	C.V.
niveau 1	0,375	887	591	0.67
niveau 2	1,16	282	222	0.79
niveau 3	2,03	73	48	0.66
niveau 4	2,98	68	20	0.29
niveau 5	4,03	120	55	0.46
niveau 6	5,18	84	40	0.48
niveau 7	6,45	40	23	0.58
niveau 8	7,85	27	18	0.68



TRE07	Profondeur (m)	Moyenne	Ecart-type	C.V.
niveau 1	0,375	3128	1377	0.44
niveau 2	1,16	1209	965	0.8
niveau 3	2,03	224	217	0.97
niveau 4	2,98	78	54	0.69
niveau 5	4,03	96	62	0.64
niveau 6	5,18	111	100	0.91
niveau 7	6,45	59	49	0.83
niveau 8	7,85	37	19	0.53



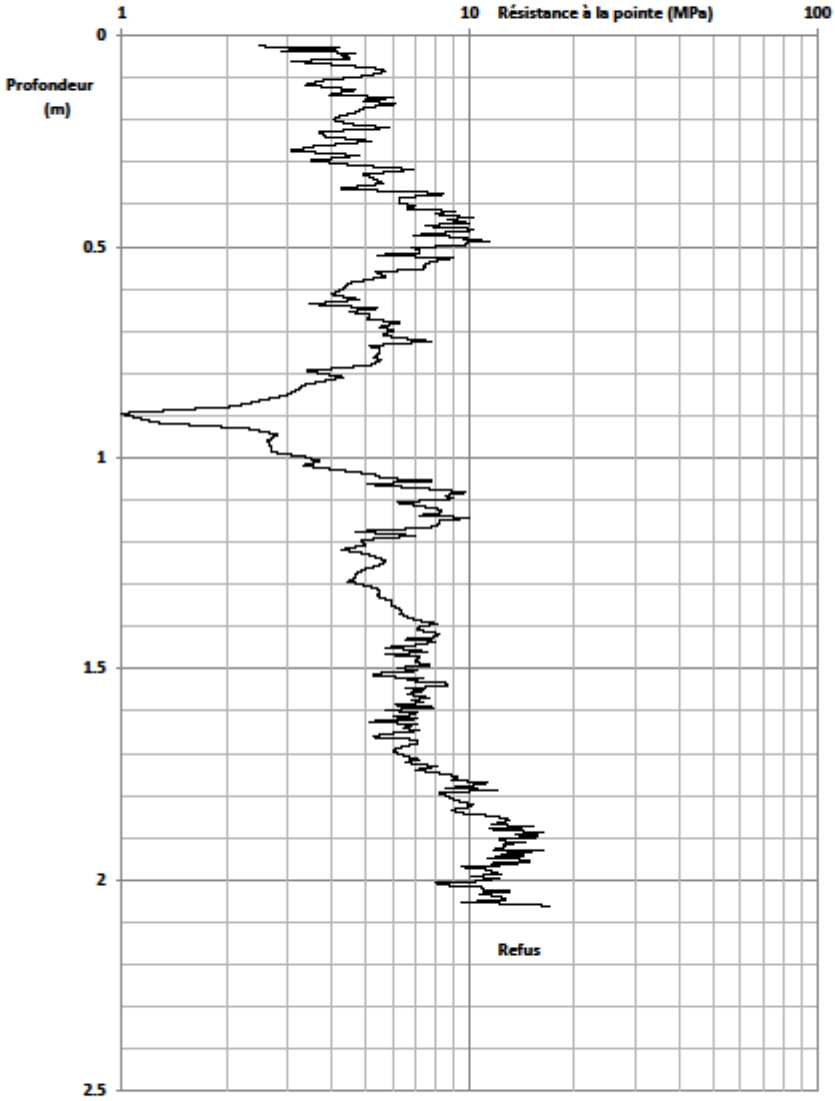
Annexe 2.8 : Pénétrogrammes SP1 à SP21 (parcelle n°1).

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP1 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412551.731 **Y :** 6418104.96



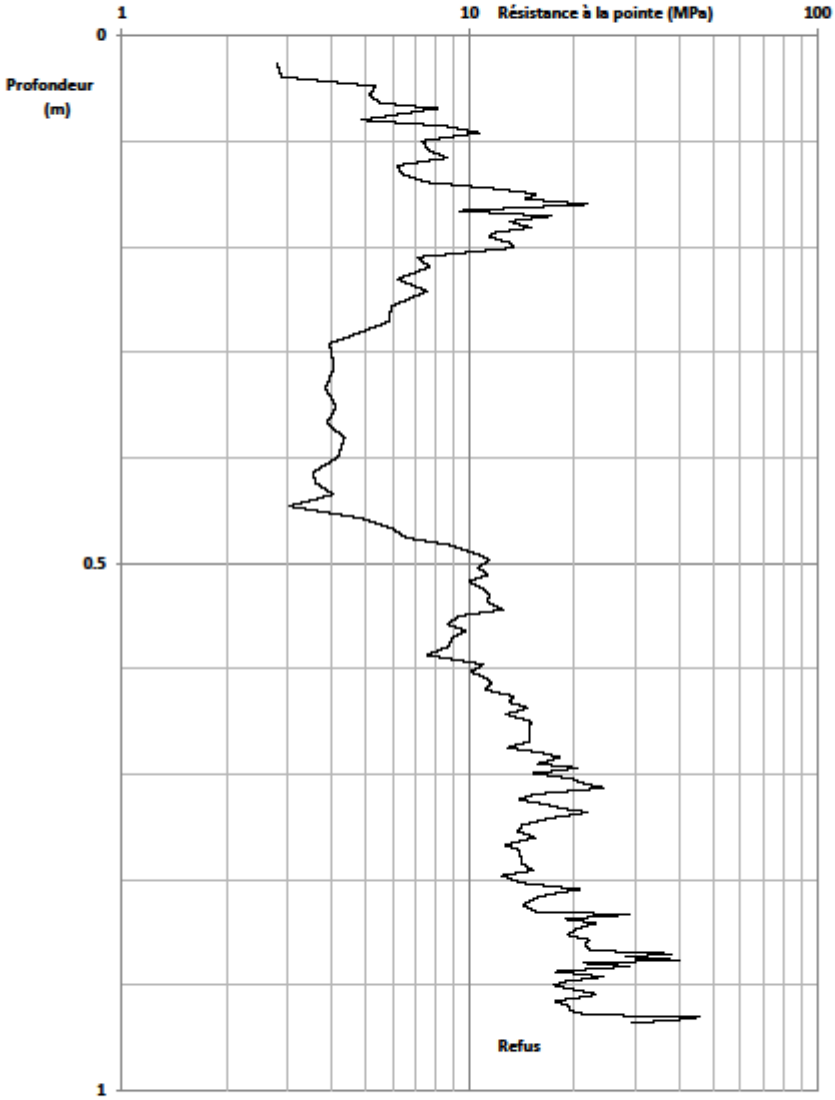
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP2 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412555.407 **Y :** 6418095.71



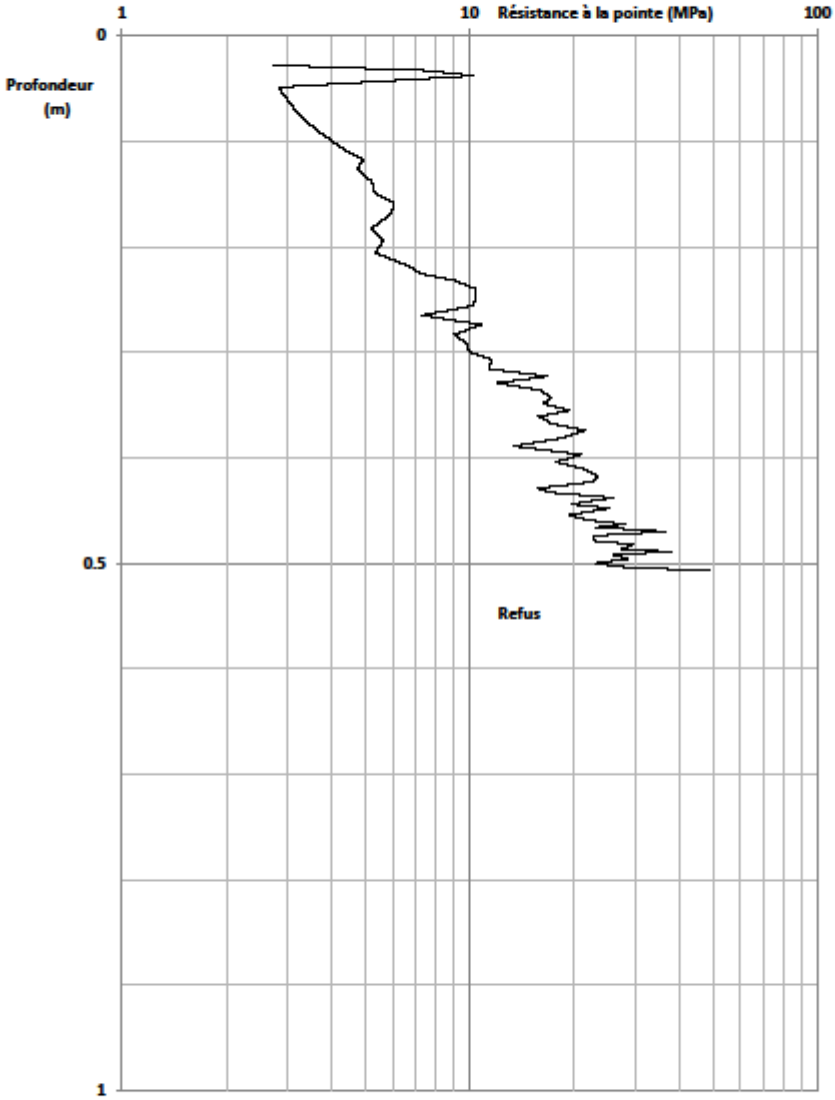
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP3 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412559.083 **Y :** 6418086.47



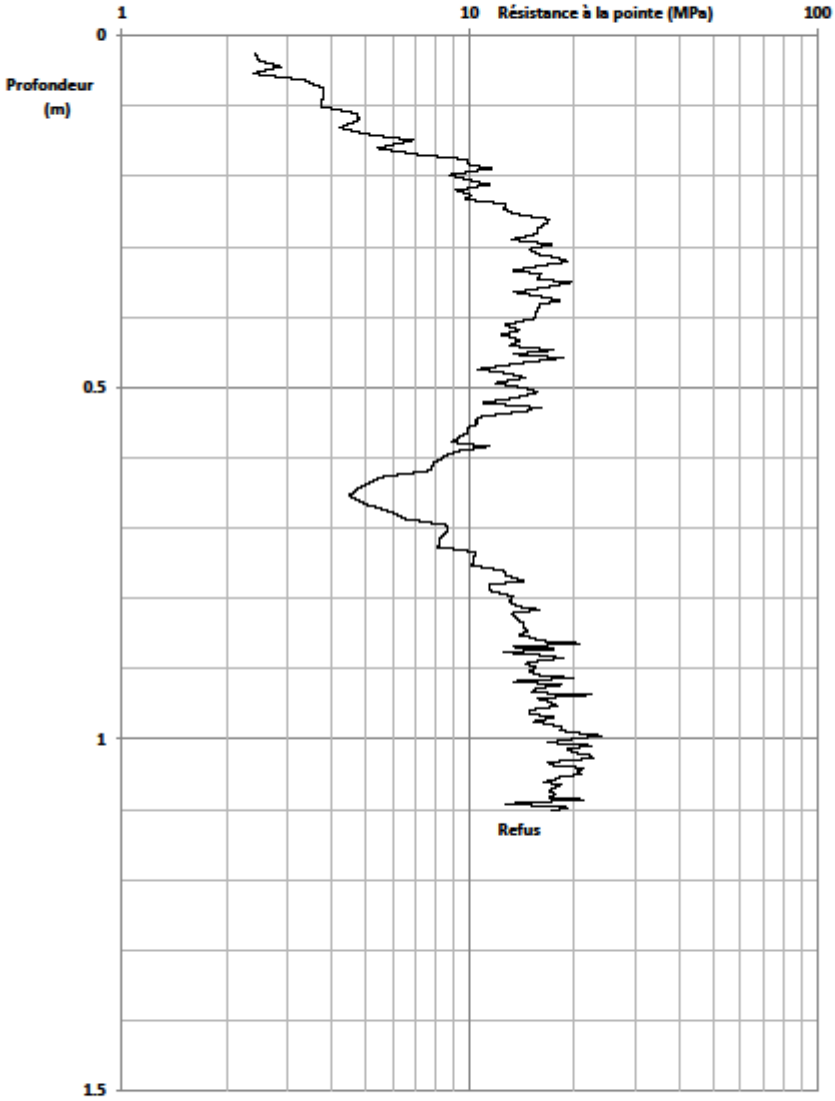
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP4 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412562.759 **Y :** 6418077.22



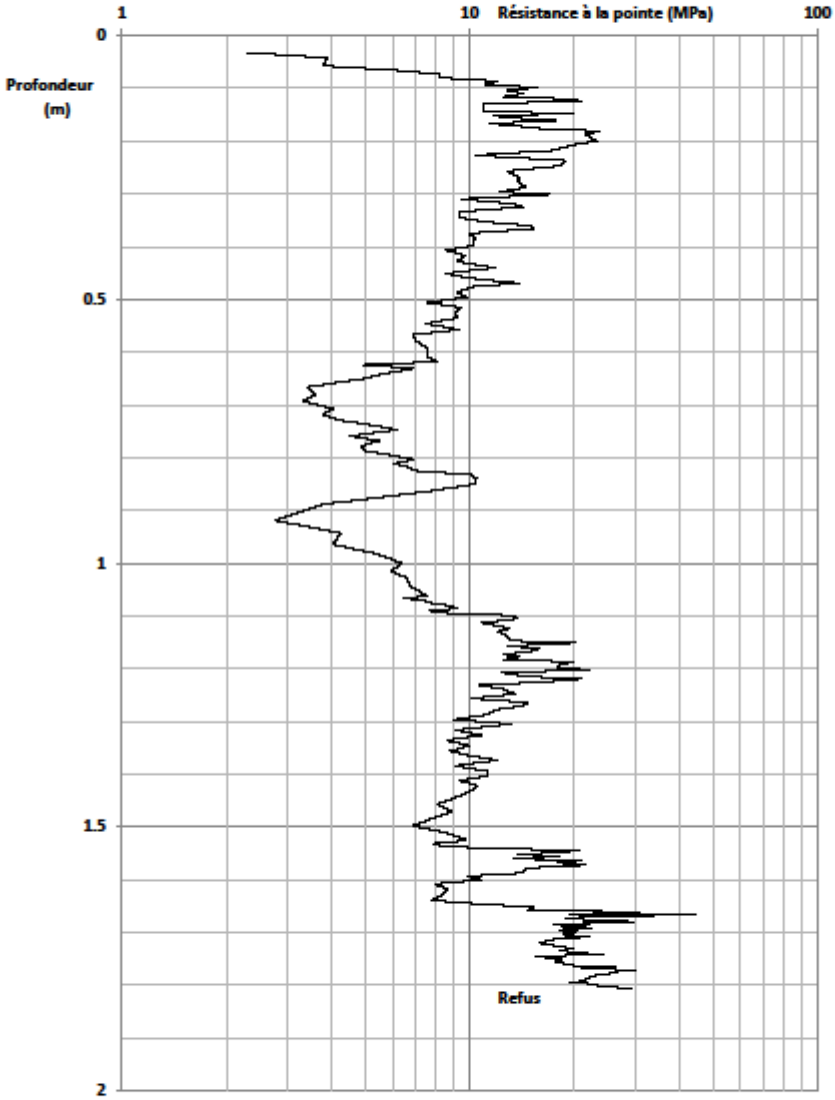
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP5 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412566.436 **Y :** 6418067.98



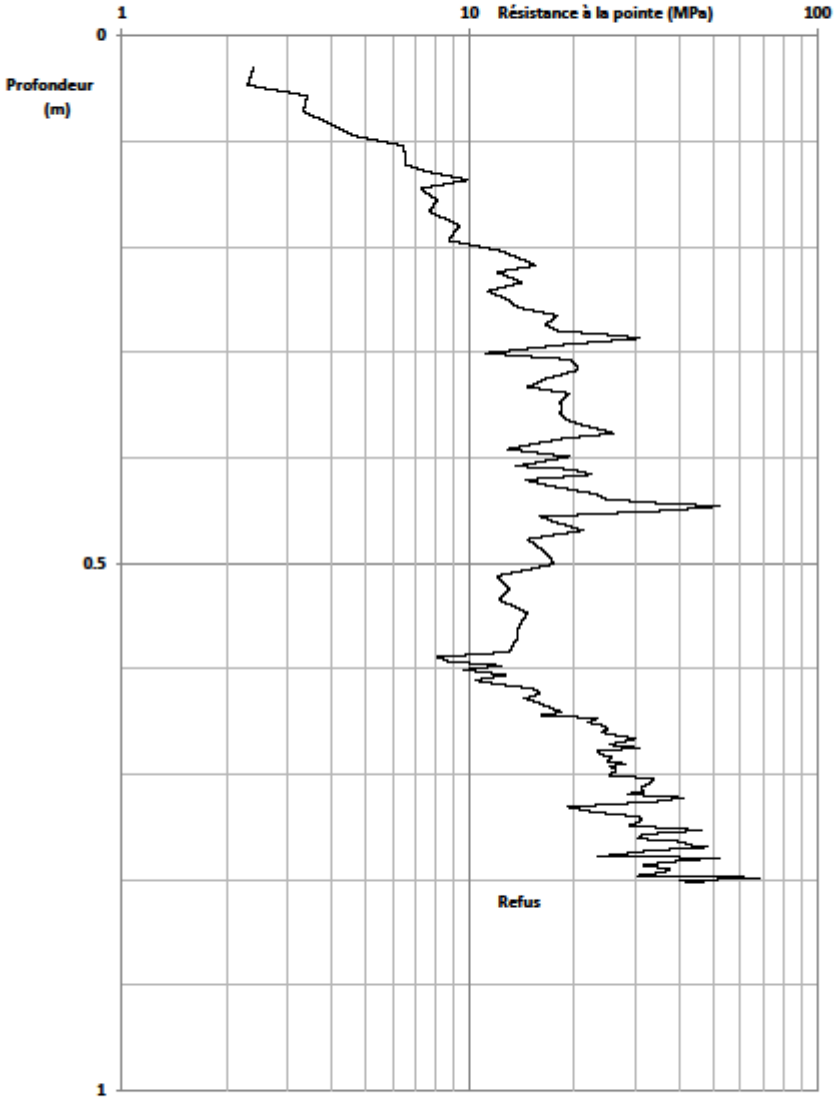
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP6 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412570.112 **Y :** 6418058.73



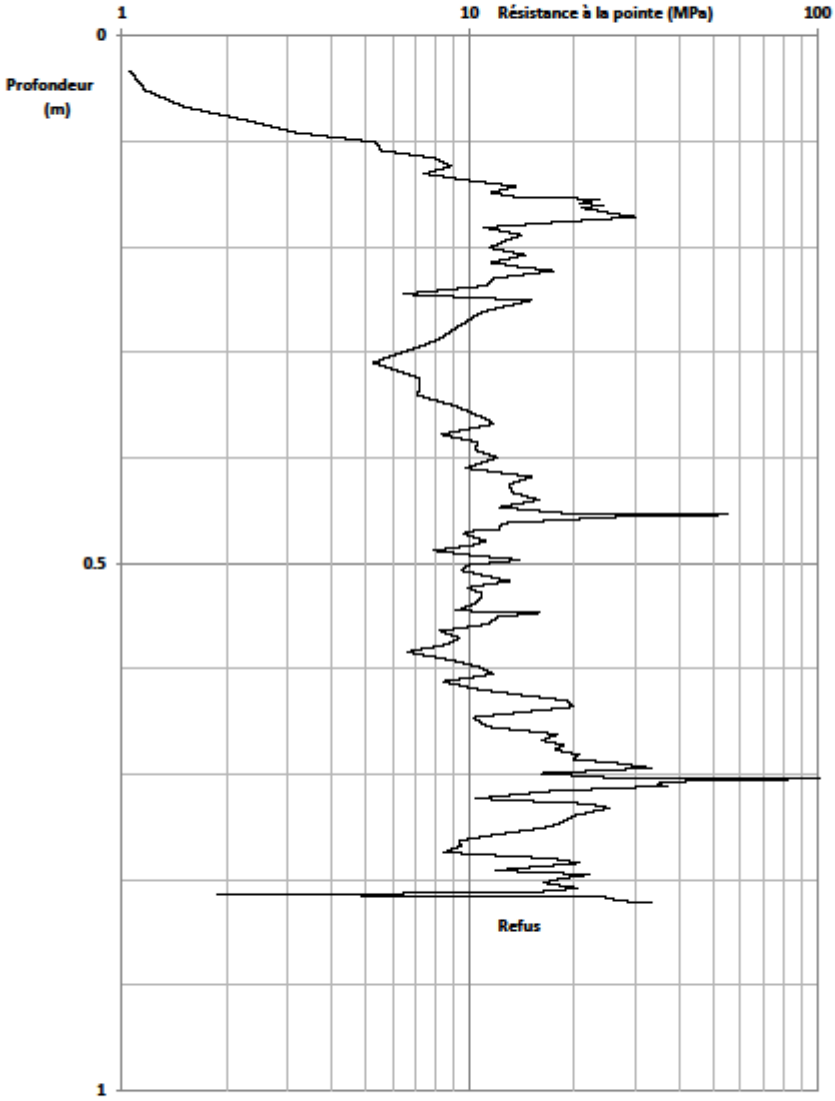
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP7 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412573.788 **Y :** 6418049.49



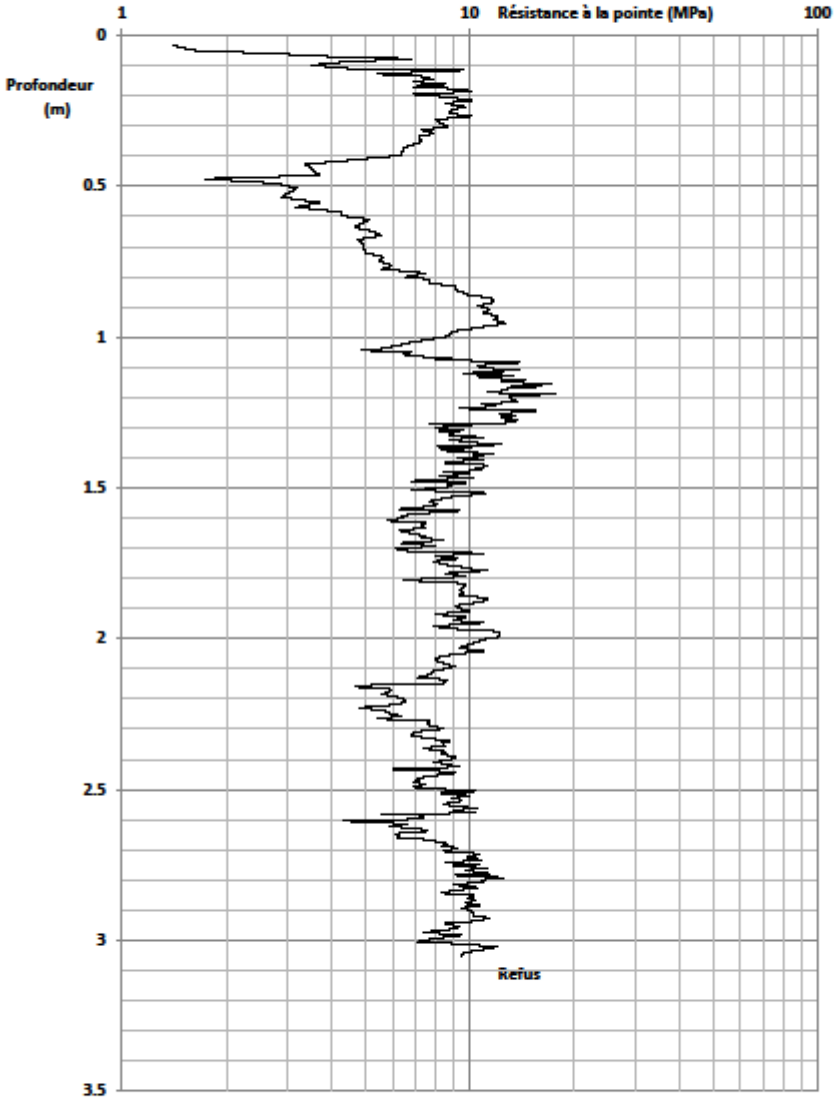
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP8 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412577.464 **Y :** 6418040.24



Essai réalisé selon la norme NF P-500

ENREGISTREMENT EN CONTINU Résistance à la pointe

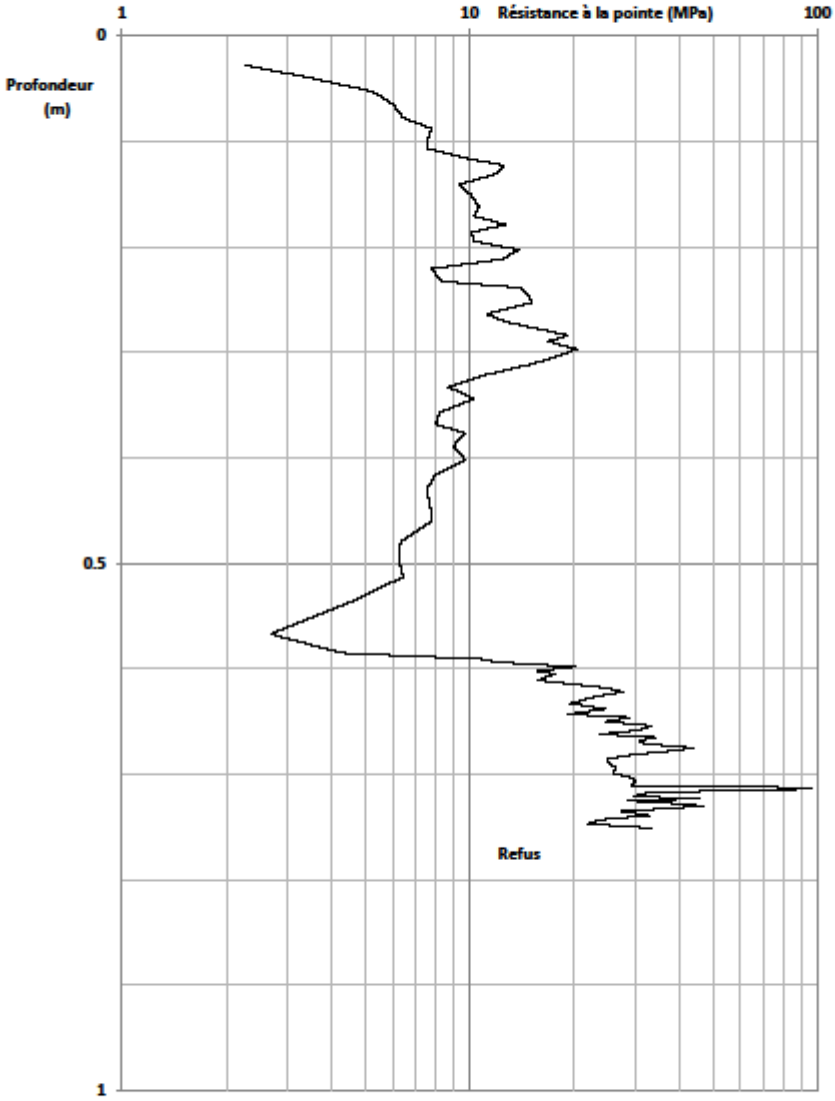
Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP9 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412567.085 **Y :** 6418100.98



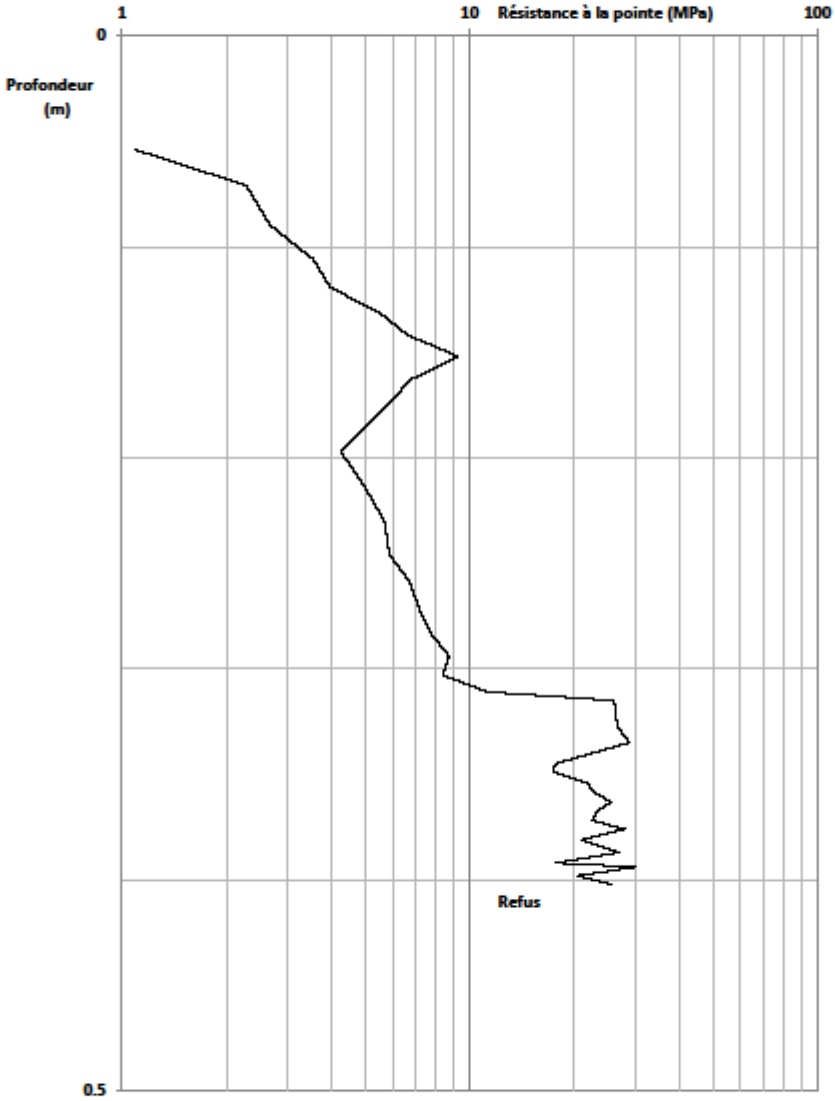
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP10 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412570.761 **Y :** 6418091.73



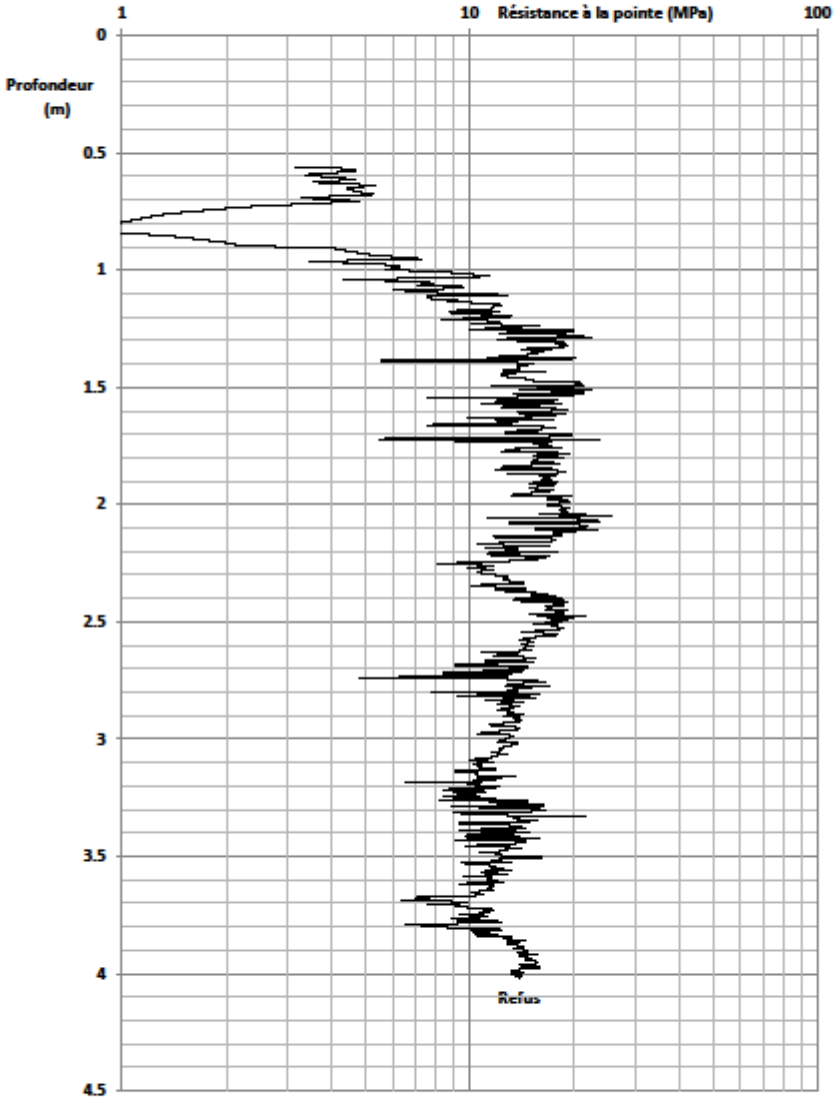
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP11 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412573.702 **Y :** 6418084.34



Essai réalisé selon la norme NF P-500

ENREGISTREMENT EN CONTINU Résistance à la pointe

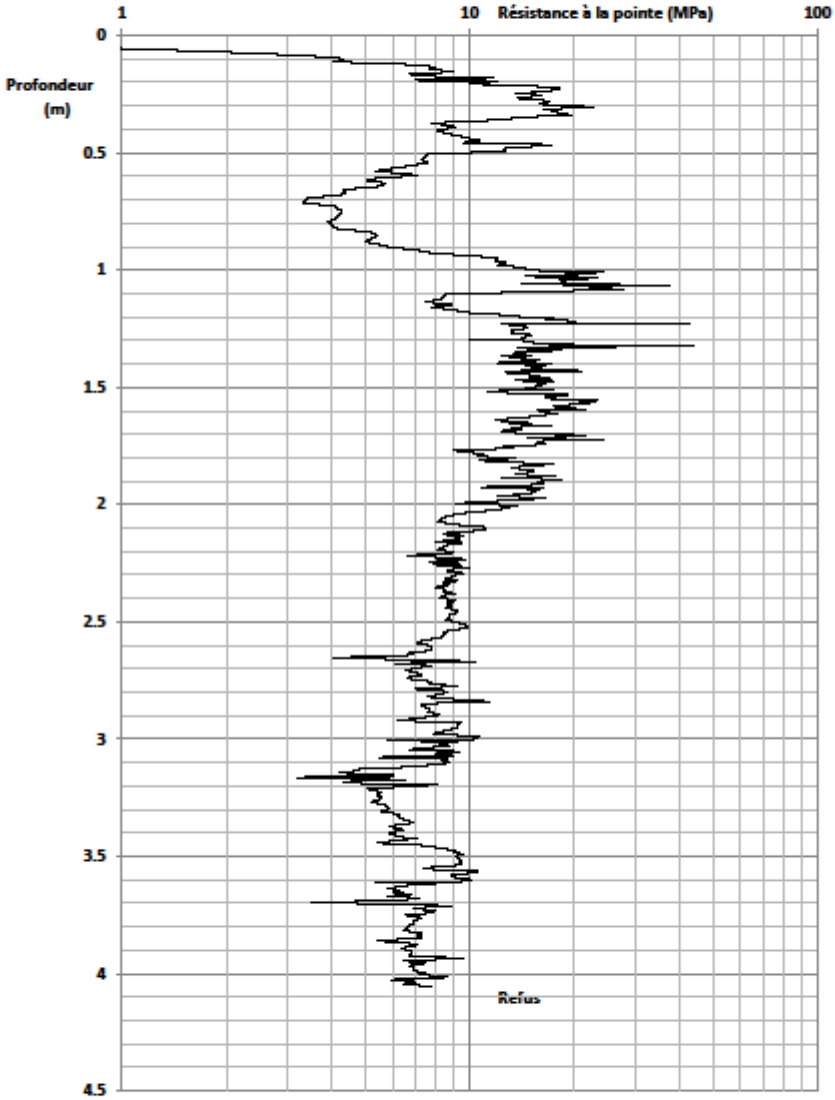
Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP12 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412574.438 **Y :** 6418082.49



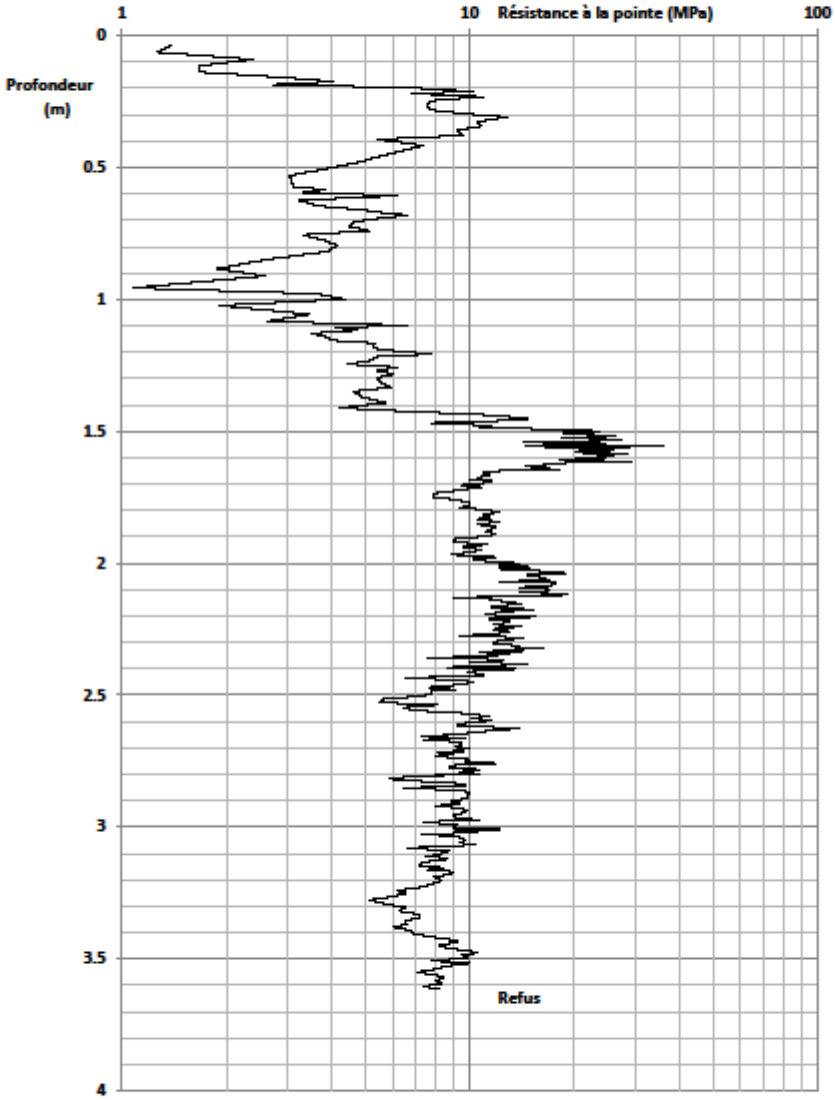
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP13 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412578.114 **Y :** 6418073.24



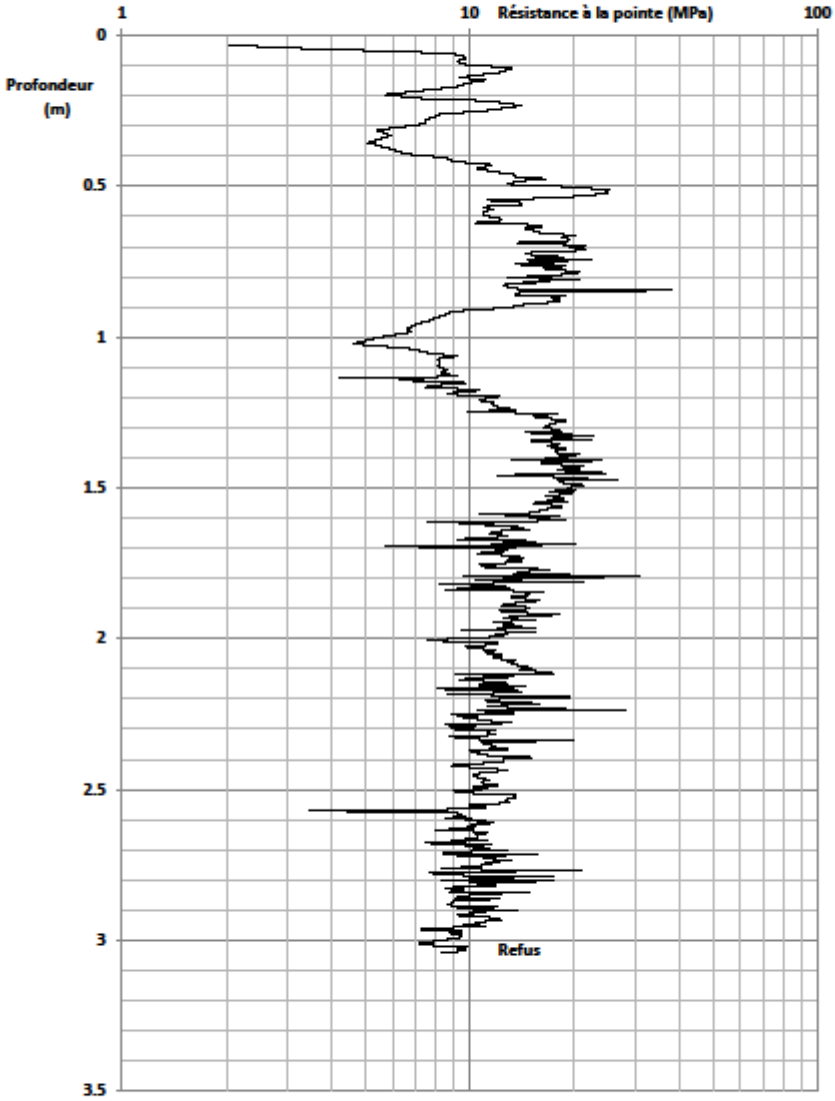
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP14 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412581.79 **Y :** 6418064



Essai réalisé selon la norme NF P-500

ENREGISTREMENT EN CONTINU Résistance à la pointe

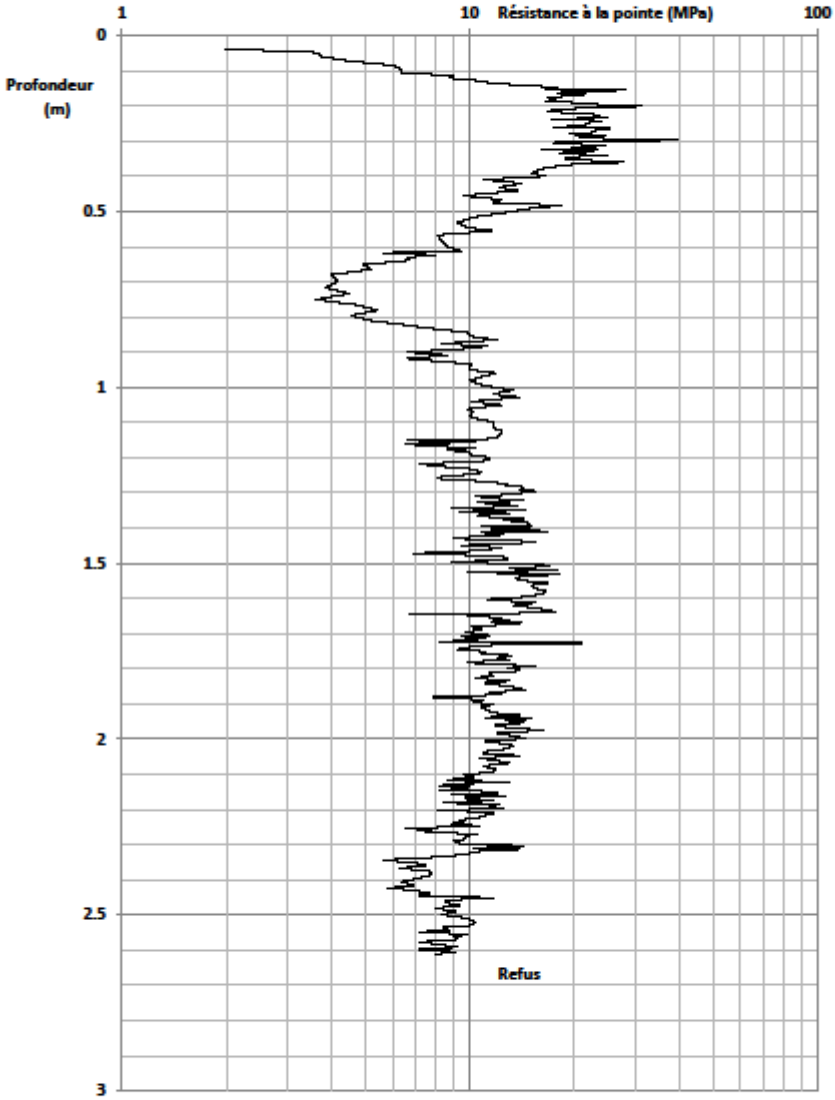
Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP15 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412585.466 **Y :** 6418054.75



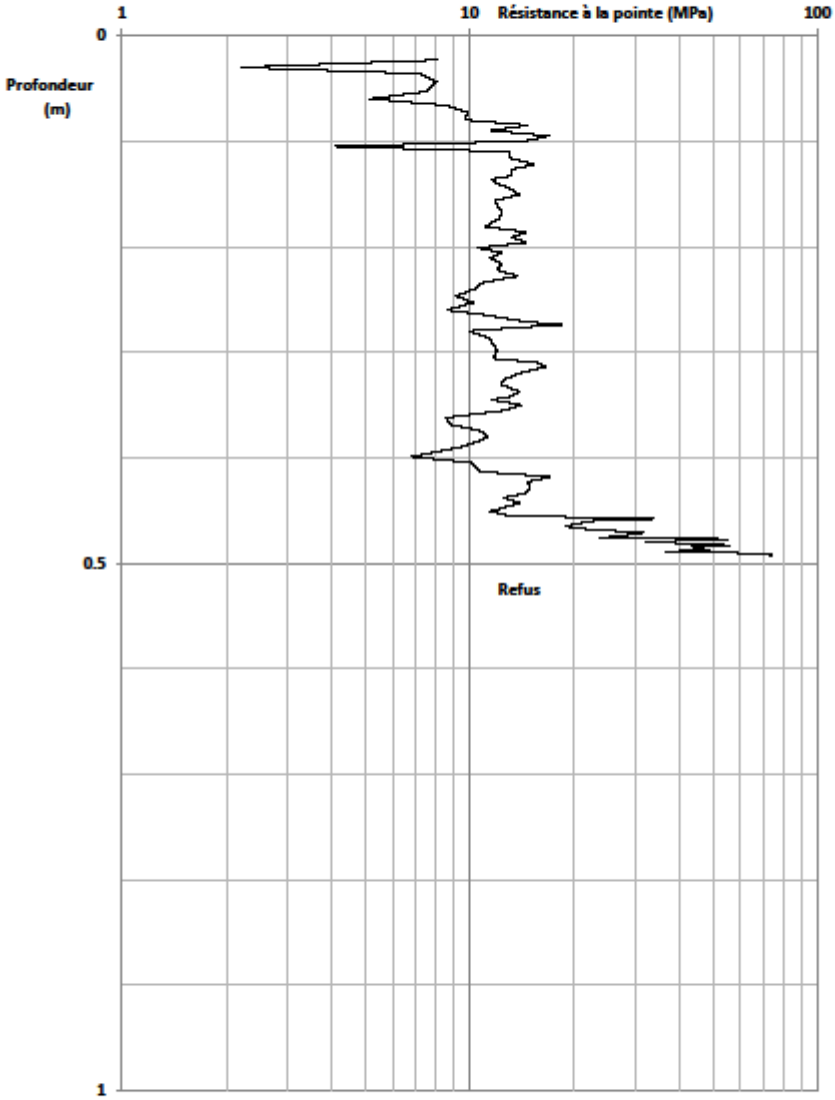
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP16 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412578.763 **Y :** 6418106.25



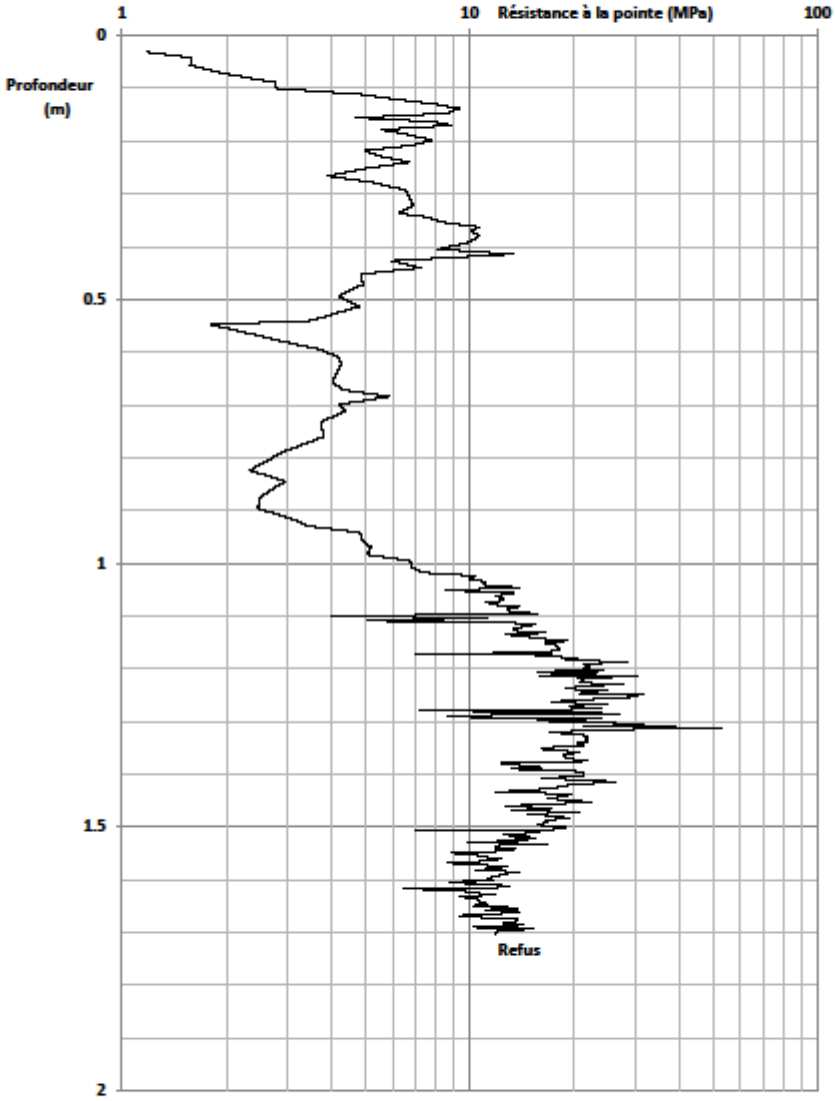
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP17 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412582.439 **Y :** 6418097



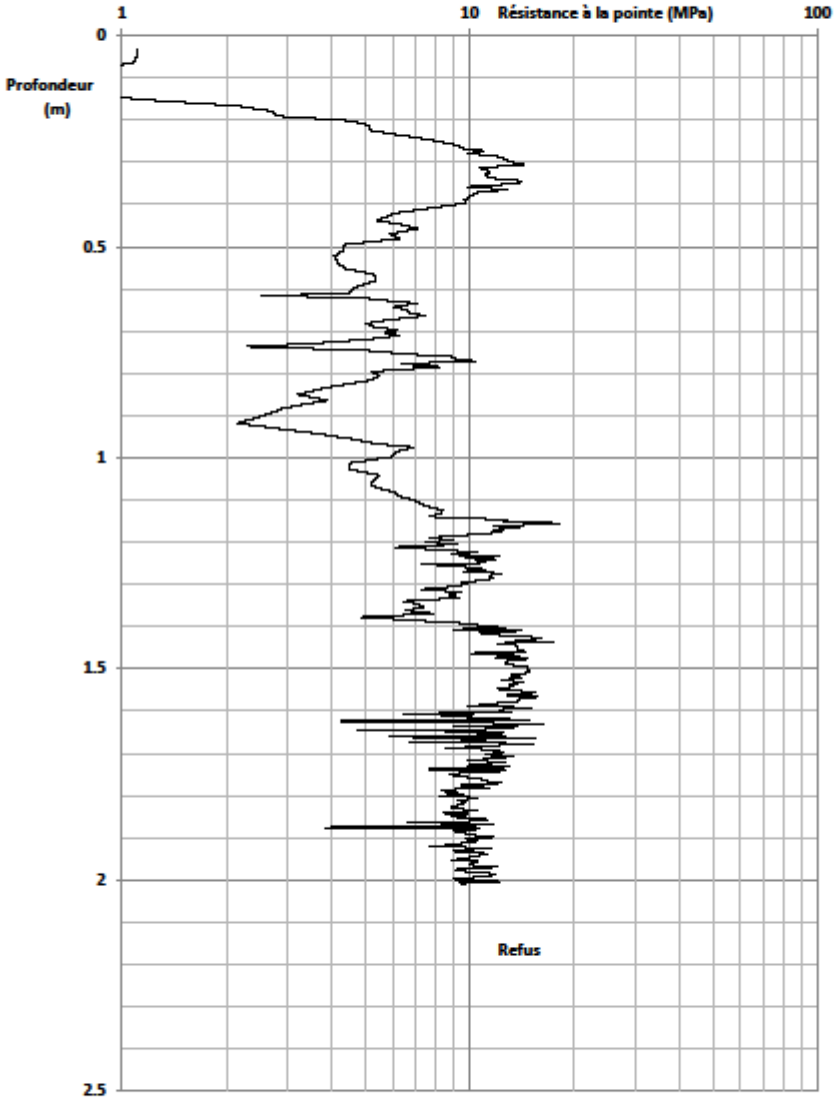
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP18 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412586.116 **Y :** 6418087.76



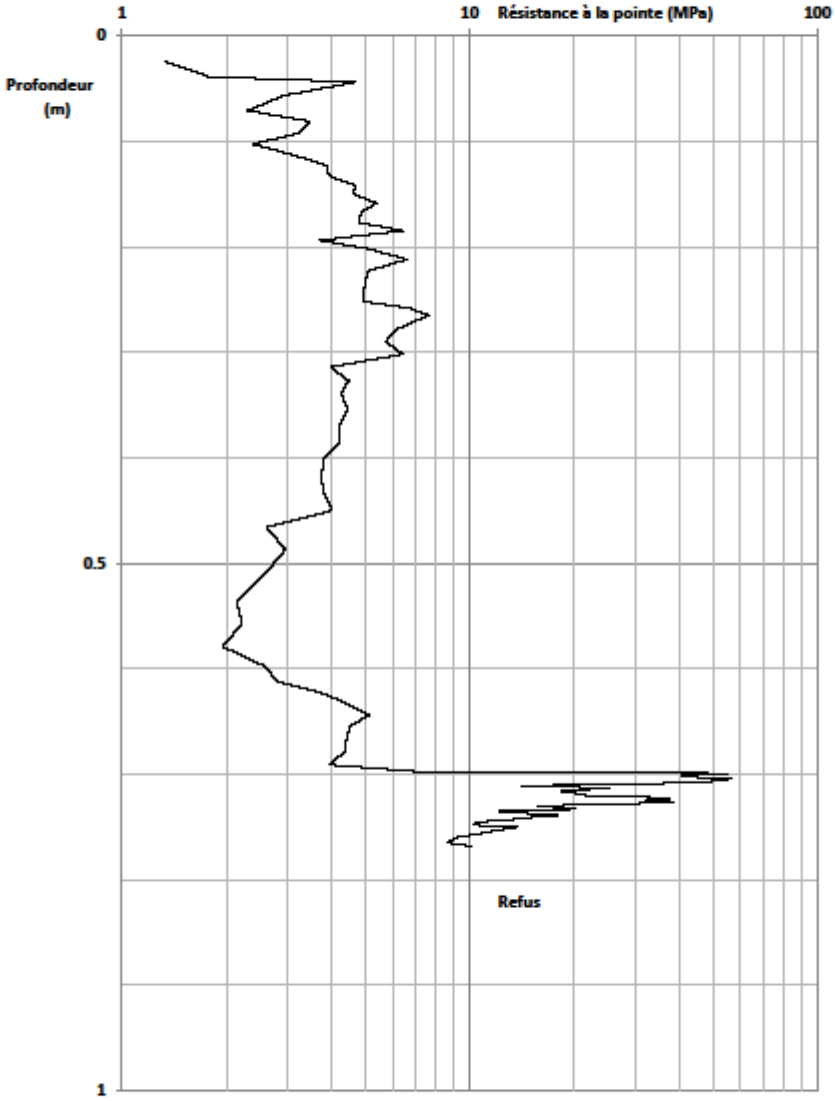
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP19 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412589.792 **Y :** 6418078.51



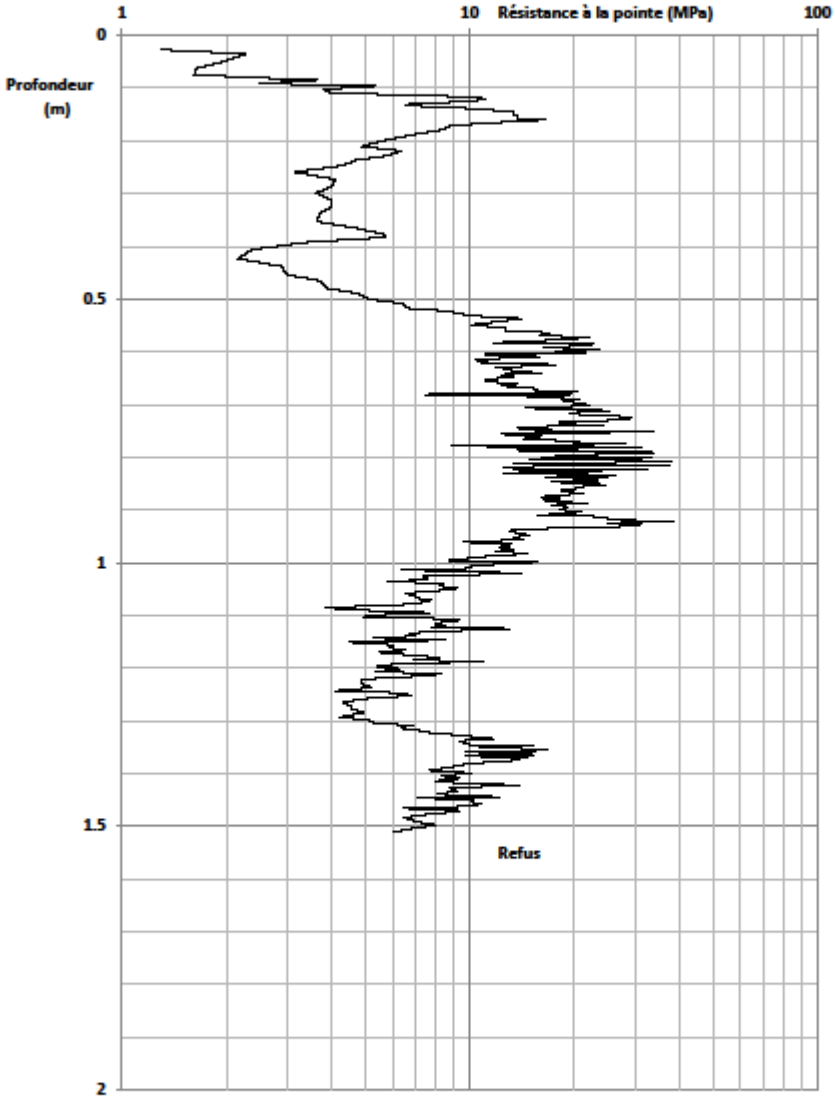
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP20 **Date :** 17/01/2013

Coordonnées (Lambert93):

X : 412593.468 **Y :** 6418069.27



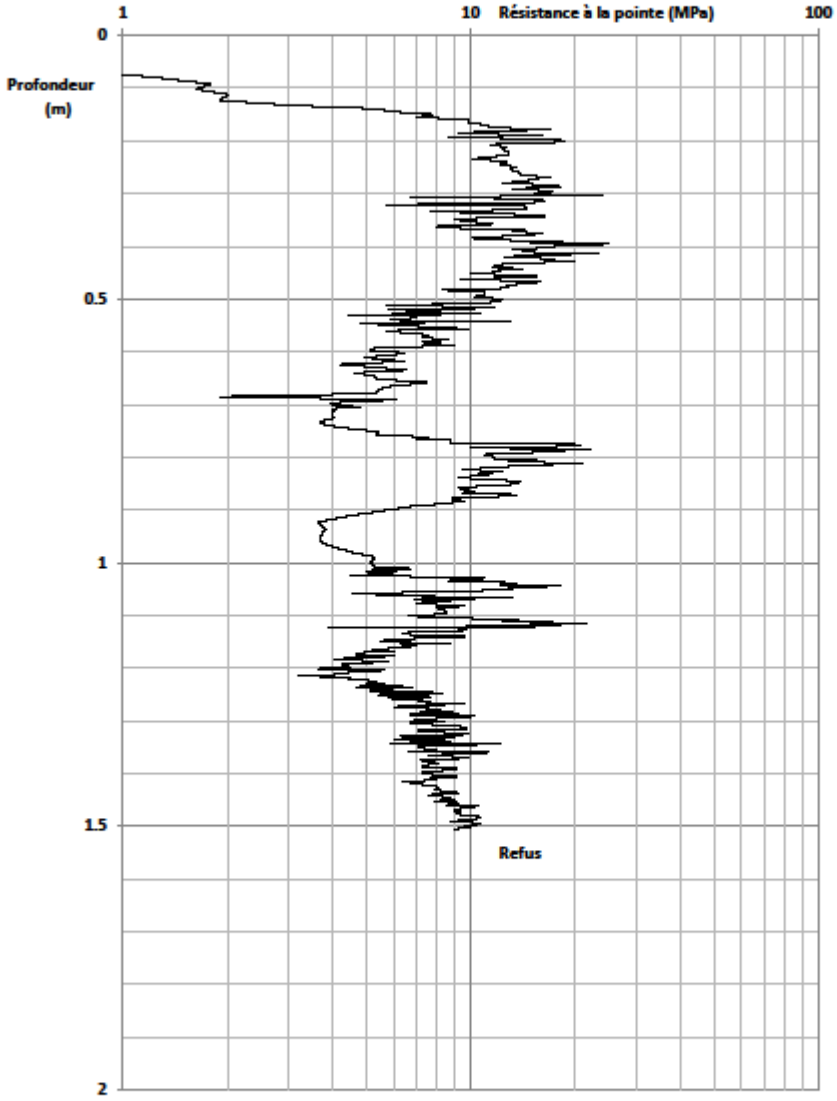
Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER A ENERGIE VARIABLE - PANDA

Sondage : SP21 **Date :** 17/01/2013

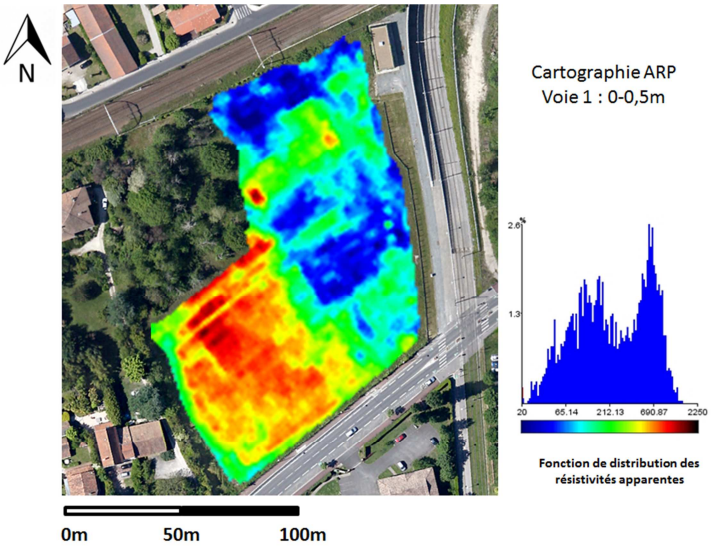
Coordonnées (Lambert93):

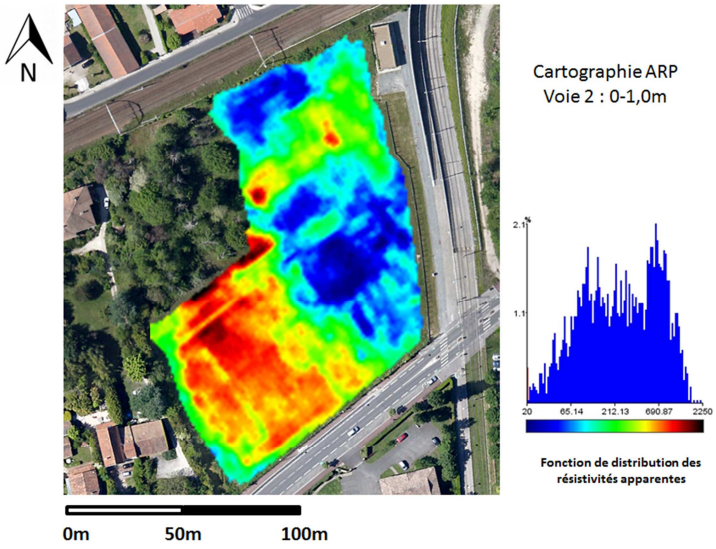
X : 412597.144 **Y :** 6418060.02

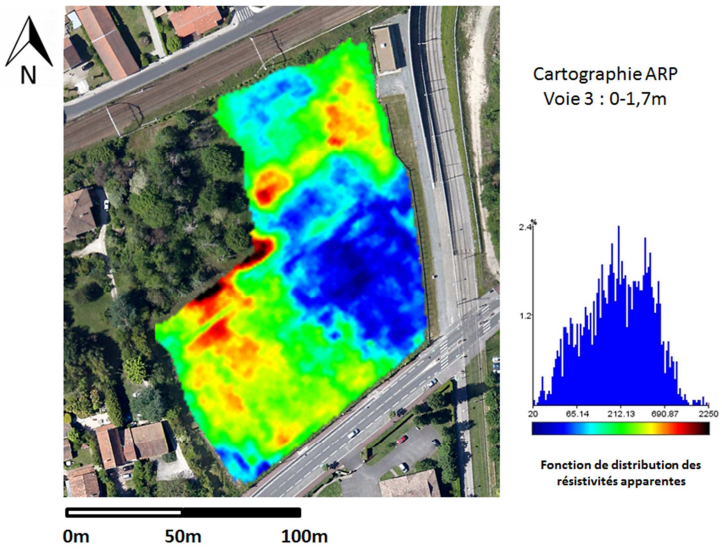


Essai réalisé selon la norme	NF P-500
ENREGISTREMENT EN CONTINU	Résistance à la pointe
	Section de pointe (cm^2) : 2

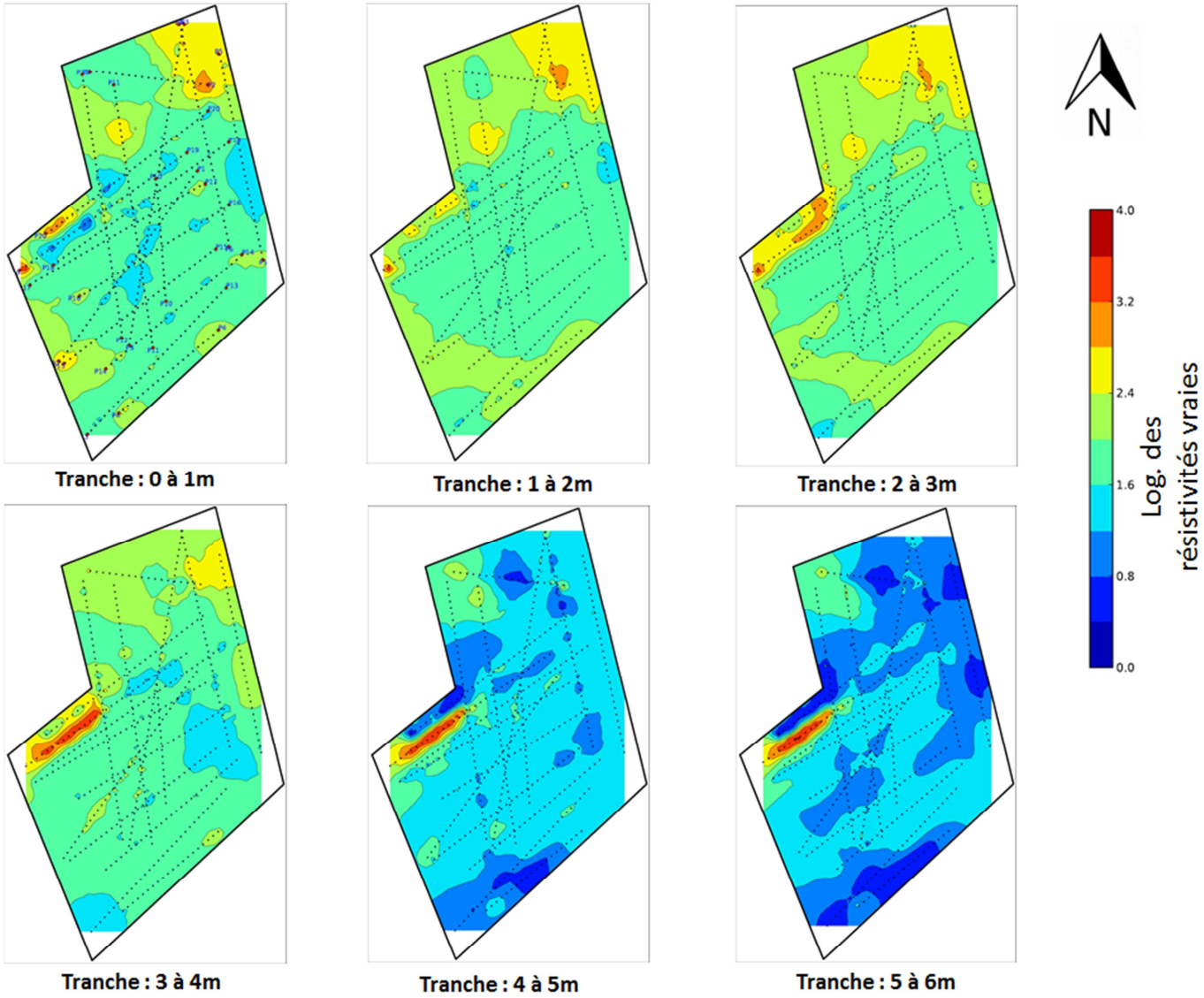
Annexe 2.9 : Cartographie ARP de la parcelle n°1, résistivité apparente (GEOCARTA©).





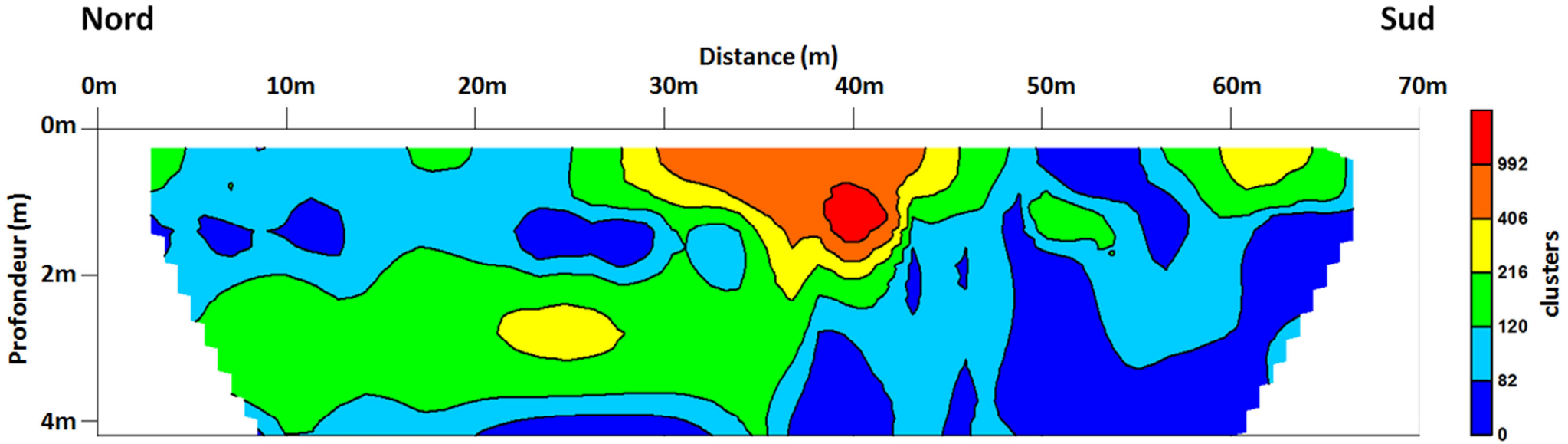


Annexe 2.10 : Cartographie OhmMapper de la parcelle n°1, résistivité vraie (BRGM©).

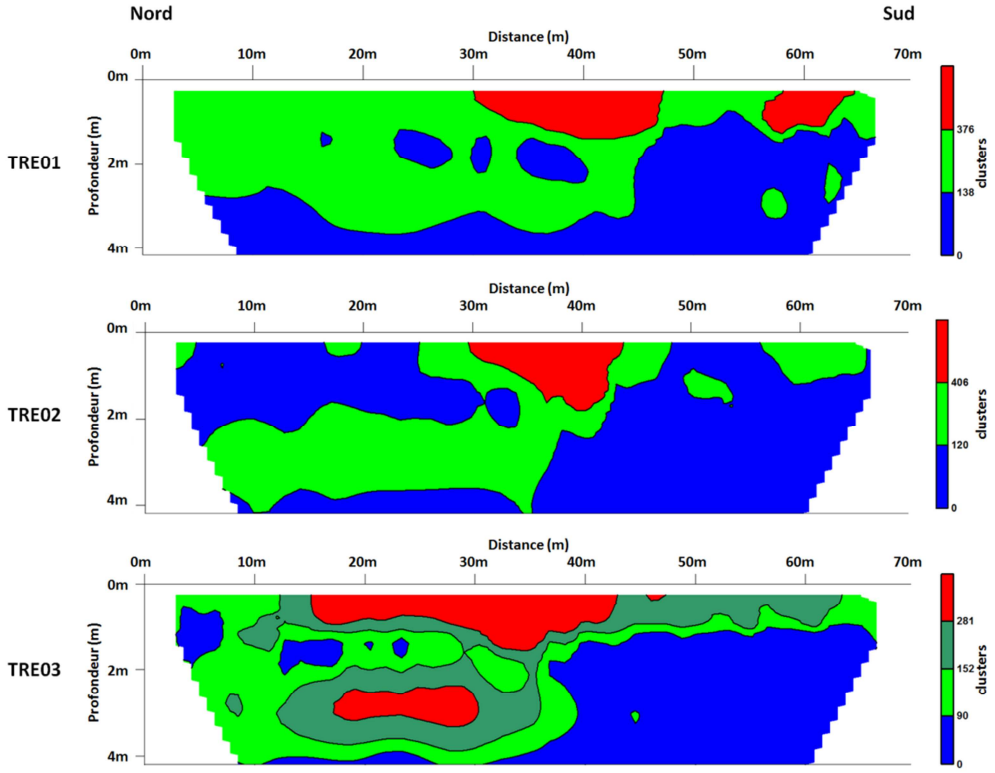


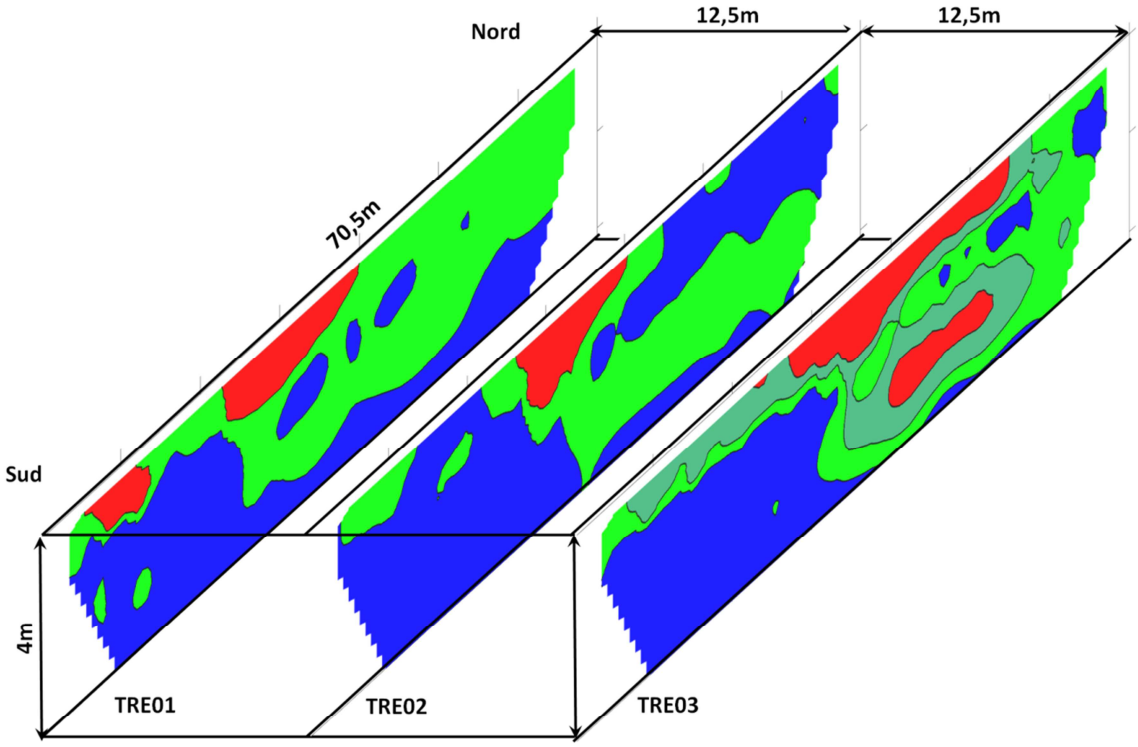
Annexe 2.11 : Descriptif de TRE02 en 6 clusters et localisation des clusters dans TRE02.

	Clusters	Résistivité vraie					
		Minimale	Maximale	Moyenne	Ecart-type	Coefficient de variation	Pourcentage de la population
TRE02	1	18	82	65	13	0,28	27%
	2	83	120	99	11	0,83	33%
	3	121	216	158	26	0,17	29%
	4	221	406	287	59	0,77	5%
	5	440	992	627	120	0,7	5%
	6	1481	3108	1980	659	0,75	1%



Annexe 2.12 : TRE01-02 et 03 suite à une analyse par CHA et représentation 3D.





Annexe 2.13 : Organisation d'une prospection basée sur une analyse par statistique inférentielle.

Le nombre n de points de mesure nécessaires pour quantifier à plus ou moins 5%, la valeur moyenne de la résistance à la pointe des sols associés au cluster 3 (écart-type de 6,3 MPa), avec un seuil de confiance 1-α de 95%, est déduit de l'équation suivante (Chapitre I, §I.5.2.) :

$$\boldsymbol{n = t^2 \times \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2}}$$

avec : σ : écart-type,

ε : marge d'erreur acceptée,

t : variable centrée réduite.

Pour α = 5%, on a (d'après abaques) : t = 1,96 et ε = 0,975

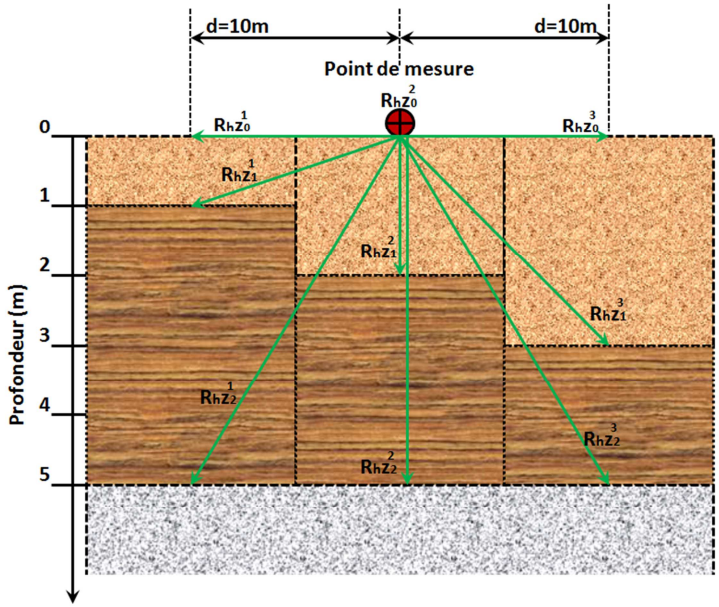
Ainsi, on a n = 160 points de mesure.

Au regard des pratiques traditionnelles d'exécution des sondages PANDA, les mesures sont lissées tous les 5cm. De ce fait, le nombre de point de mesure au sein d'une couche de sol est limité par l'épaisseur de cette dernière.

A la parcelle n°1, l'épaisseur de la couche géomécanique du cluster 3 ne dépasse pas 1,5m de profondeur. Ainsi, pour un forage correctement positionné (cluster présent de façon discontinu au sein de la parcelle), le nombre de point de mesure atteignable au maximum est de 30.

Ce qui nécessite de prévoir l'exécution d'au moins 6 forages pour pouvoir quantifier, selon les seuils fixés, la valeur moyenne de résistance à la pointe de cette couche de sol.

Annexe 3.1 : Exemple de calcul de la conductivité apparente avec une approche 2D.



$$\sigma_{app} = \frac{\sum_{j=1}^{c}\sum_{i=1}^{n}\left(\sigma_i^j . k_i^j\right)}{\sum_{j=1;i=1}^{c;n}\left(k_i^j\right)}$$

avec : $k_i^j = R_h z_{i-1}^j - R_h z_i^j$; $R_h z_n = 0$; $R_h z = (4.e^2+1)^{\frac{1}{2}} - 2.e$;

$$e = \frac{\sqrt{(d^2+p^2)}}{s}$$

Couches	Résistivité (Ω.m)	Conductivité (mS/m)
Couche 1 : σ_1	300	3,33
Couche 2 : σ_2	200	5
Couche 3 : σ_3	100	10

Ainsi on a :

$$\sigma_{app} = \frac{\sigma_1^1.(R_hz_0^1 - R_hz_1^1) + \sigma_2^1.(R_hz_1^1 - R_hz_2^1) + \sigma_3^1.(R_hz_2^1 - R_hz_3^1) + \sigma_1^2.(R_hz_0^2 - R_hz_1^2) + \sigma_2^2.(R_hz_1^2 - R_hz_2^2) + \sigma_3^2.(R_hz_2^2 - R_hz_3^2) + \sigma_1^3.(R_hz_0^3 - R_hz_1^3) + \sigma_2^3.(R_hz_1^3 - R_hz_2^3) + \sigma_3^3.(R_hz_2^3 - R_hz_3^3)}{(R_hz_0^1 - R_hz_1^1) + (R_hz_1^1 - R_hz_2^1) + (R_hz_2^1 - R_hz_3^1) + (R_hz_0^2 - R_hz_1^2) + (R_hz_1^2 - R_hz_2^2) + (R_hz_2^2 - R_hz_3^2) + (R_hz_0^3 - R_hz_1^3) + (R_hz_1^3 - R_hz_2^3) + (R_hz_2^3 - R_hz_3^3)}$$

Soit :

$$\sigma_{app} = \frac{3,33.(0,0907-0,0903) + 5.(0,0903-0,0813) + 10.(0,0813) + 3,33.(1-0,3885) + 5.(0,3885-0,1773) + 10.(0,1773) + 3,33.(0,0907-0,0870) + 5.(0,0870-0,0813) + 10.(0,0813)}{(0,0907-0,0903) + (0,0903-0,0813) + (0,0813) + (1-0,3885) + (0,3885-0,1773) + (0,1773) + (0,0907-0,0870) + (0,0870-0,0813) + (0,0813)}$$

Donc :

$$\sigma_{app} = \frac{6,5781}{1,1814} = 5,568\, mS/m = 179,6\ \Omega.m$$

Pour information, pour le même calcul avec une approche 1D, on a : σ_{app} = 4,865 mS/m = 205,54 Ω.m