

N° d'ordre : 4030

# THESE EN COTUTELLE

Présentée à

**L'UNIVERSITE MOULAY ISMAIL**

UFR : Géologie de surface et Environnement

**ET**

**L'UNIVERSITE BORDEAUX 1**

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

**Par Ouassima HARMOUZI**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR**

**Reconnaissance détaillée de la partie nord-est du Bassin de Saïss  
(MAROC): interprétation de sondages électriques verticaux par  
combinaison des méthodes statistique, géostatistique et d'inversion.**

SPECIALITE : GEOSCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

Soutenue le 26 mai 2010

Devant la commission d'examen formée de:

<b>Mr. Hassane SAHBI</b>	Professeur, Université Moulay Ismail	<b>Président</b>
<b>Mme J. RISS</b>	Professeur, Université de Bordeaux 1	<b>Directeur de thèse</b>
<b>Mr. A. ESSAHLAOUI</b>	Professeur, Université Moulay Ismail	<b>Directeur de thèse</b>
<b>Mme. C. SIRIEIX</b>	Maître de Conférences, Université Bordeaux 1	<b>Examinatrice</b>
<b>Mr Abdelhadi EL OUALI</b>	Professeur, Université Moulay Ismail	<b>Examineur</b>
<b>Mr. K. MEHDI</b>	Professeur, UCD FS El Jadida	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr. Th. LEBOURG</b>	Maître de conférences (HDR) UMR Géoazur – VALBONNE	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr Ph MALAURENT</b>	Ingénieur, Université Bordeaux 1	<b>Invité</b>



## REMERCIEMENTS

---

---

Ce travail de thèse ne peut pas avoir vu le jour et abouti à des résultats sans la collaboration et les efforts conjugués des personnels des deux laboratoires : le laboratoire d'ingénierie géologique (Géophysique, Hydrogéologie et géologie de surface) de la faculté des Sciences de Meknès, de l'Université Moulay Ismaïl (MAROC) et le Laboratoire Géosciences, Hydrosiences, Matériaux Construction (GHYMAC) de l'Université Bordeaux 1 (France), que je tiens à remercier vivement. Durant mes déplacements entre les deux Universités j'ai découvert et acquis plusieurs techniques et j'ai confronté plusieurs traditions; ce qui ne s'est pas traduit que par des résultats scientifiques, mais aussi par de très bons souvenirs gravés dans ma mémoire.

Mes remerciements vont tout d'abord à mes deux directeurs de thèse Madame le Professeur Joëlle Riss et Monsieur le Professeur Ali ESSAHLAOUI. Je vous remercie pour tout ce que vous avez fait pour la réussite de ce travail. Le soutien que vous m'avez accordé m'a permis de réaliser ce travail dans de très bonnes conditions.

En arrivant à GHYMAC (ancien CDGA), j'ai rencontré avec joie mon directeur de thèse Madame le Professeur Joëlle Riss. Je lui ai extrêmement reconnaissante d'avoir dirigé ce travail et qui m'a transmis ses connaissances scientifiques. J'ai tout particulièrement apprécié, ses encouragements, ses conseils et son entière disponibilité. Merci de m'avoir fait découvrir le monde des statistiques et des géostatistiques. Je n'oublierai jamais les meilleurs souvenirs et les bons moments que j'ai passés au cours de mes séjours à Bordeaux et vous trouvez ici ma gratitude et ma reconnaissance.

Je remercie, Monsieur le Professeur Ali ESSAHLAOUI, qui a encadré ce travail de thèse et aussi mon mémoire de DESA. Ses conseils et ses encouragements étaient pour moi un fil conducteur tout au long de mes recherches scientifiques. Il a su encadrer ce travail de thèse, en y apportant son expérience scientifique. J'ai beaucoup apprécié sa disponibilité et ses qualités humaines et professionnelles, ainsi que la confiance qu'il a voulue m'accorder.

Je tiens à remercier particulièrement madame le Professeur Colette SIRIEIX du Laboratoire GHYMAC de l'Université Bordeaux I (France), pour l'intérêt qu'elle a témoigné envers ce travail, pour ses analyses et commentaires constructifs, ainsi que pour avoir accepté d'examiner cette thèse et d'être membre du jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur le Professeur Khalid MEHDI de l'Université Chouaib Doukkali (Maroc) et Monsieur Thomas LEBOURG, Maître de conférences UMR Géoazur, Valbonne,

France qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail comme rapporteurs. Qu'ils soient assurés de ma profonde reconnaissance.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance aux autres membres de jury qui ont accepté de siéger et d'évaluer ce travail, Monsieur le Pr Hassane SAHBI et Monsieur le Pr. Abdelhadi El OUALI de la Faculté des Sciences de l'Université Moulay Ismail de Meknès (Maroc) et à Mr Philippe MALAURENT du Laboratoire GHYMAC de l'Université de Bordeaux I (France) d'avoir commenter avec intérêt mon travail.

Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur Juan Luis Fernández Martínez, et Monsieur José Paulino Fernández Álvarez de l'Université d'Oviedo (Espagne), je n'oublierai jamais les bons moments que j'ai passé en Espagne avec vous et vos familles, je vous remercie une deuxième fois pour l'aide scientifique.

Il m'est agréable d'exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Antoine MARACHE du Laboratoire GHYMAC de l'Université de Bordeaux I (France) pour son aide dans le traitement géostatistique des données géophysiques. Ma profonde reconnaissance et gratitude s'adresseront aussi à Mme Charlotte Lavennier, pour sa sympathie et sa gentillesse que pour son soutien moral et son aide lors de toutes mes missions en France.

Je dois mon parcours scientifique à monsieur Abdelkader MAHMOUDI, de la Faculté des Sciences, de l'Université Moulay Ismail de Meknès (Maroc) qui m'a soutenue depuis le début de mes études, son aide scientifique et ses encouragements chaleureux ont été vivement constructifs qu'il trouve ici ma reconnaissance.

Ce travail n'aurait pas pu avoir lieu sans l'aide du personnel de l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou (ABHS), de tous les membres du département de géologie de la Faculté des sciences de Meknès et tous les membres de GHYMAC, à qui je tiens à exprimer mes vifs remerciements.

Ma gratitude va également à l'ensemble des étudiants de département de géologie de Meknès qui m'ont aidée sur le terrain, et ceux du laboratoire GHYMAC pour les bons moments.

Je remercie mes parents, qui m'ont toujours soutenue dans mes études. Mes pensées vont également vers mes sœurs Naoual, Asmaa et Hasnaa, mon frère Soufiane et mon mari. Je dédie cette thèse à Reda, mon fils.

Finalement je dis merci à mes meilleurs ami(e)s qui m'ont toujours soutenues Zhor, Nadia, Hanane, Abdellah et Ahmed

# RESUME

---

---

## **Reconnaissance détaillée de la partie nord-est du bassin de Saïss (Maroc) : interprétation de sondages électriques verticaux par combinaison des méthodes statistique, géostatistique et d'inversion**

La prospection géoélectrique est largement utilisée au Maroc pour des reconnaissances hydrogéologique. Le but de ce travail est de proposer de nouvelles techniques d'interprétation des sondages électriques verticaux en un temps réduit, et aussi de bien exploiter une base de données de sondages électriques, par l'établissement entre autre des images 2D horizontales et verticales de l'estimation de la distribution des résistivités électriques apparentes (modélisation géostatistique, inversion, etc.).

Dans le but de caractériser électriquement le secteur d'étude (nord-est du Bassin de Saïss), une analyse statistique des résistivités apparentes de sondages électriques verticaux a été réalisée. Cette simple analyse descriptive est suivie par une étude statistique multidirectionnelle : analyse en composantes principales (ACP) et par une classification hiérarchique ascendante (CHA).

L'analyse de l'indice de niveau issu de la CHA a montré que pour un nombre de six classes, l'inertie interclasse est la plus faible. L'étude des propriétés des sondages appartenant à chaque classe a été faite par l'analyse des pseudo-sondages moyens calculés ainsi que le sondage paragon pour chaque classe. La répartition spatiale de ces classes a été faite et les six sous-zones définies sont bien représentées électriquement par leur sondage moyen. Cette délimitation n'est pas due au hasard, elle est naturellement liée aux caractéristiques géologiques de chaque sous-zone. Dans le secteur d'étude et, suite à cette analyse statistique, ont été redéfinis les trois grands ensembles verticalement superposés, globalement connus géologiquement à travers les données de forages mécaniques effectués dans la zone.

L'analyse géostatistique a permis de déterminer, par le calcul des variogrammes des logarithmes décimaux des résistivités apparentes leurs distances de corrélation (portée). En effet, les méthodes de la géostatistique qui se basent sur la théorie des variables régionalisées ont permis de caractériser les fluctuations du paramètre résistivité apparente.

Les résultats des analyses statistiques et géostatistiques complétés par les inversions des sondages moyens par classe, ont mis en évidence la fiabilité de ces techniques pour l'interprétation d'un nombre important de sondages électriques au lieu de la méthode ordinaire qui se base sur l'inversion des sondages un par un et les corréler ultérieurement pour construire la structure globale du domaine étudié. Avec les techniques utilisées, dans le cadre de ce travail, des résultats très satisfaisants en un temps plus réduit sont obtenus.

Les profils étudiés et inversés à l'aide du logiciel RES2Dinv montrent tous les trois grandes structures définies auparavant (Résistant-Conductrice-Résistant), par contre on note des variations intra-

formations. De plus, l'organisation spatiale des formations permet de confirmer l'existence de failles cohérentes avec la structure en horst et graben du bassin.

**Mots clés :** Sondages électriques, Statistiques, Géostatistiques, Inversion, ACP, CHA, tomographie électrique, bassin de Saïss, Maroc

# ABSTRACT

---

---

## **Detailed Recognition of the north-eastern part of the Saïss Basin (Morocco): Interpretation of vertical electric soundings by combining methods statistical, geostatistical and inversion.**

The Geoelectric prospection is usually used in Morocco for hydrogeological recognition. The purpose of this work is to propose new techniques for interpreting vertical electric soundings in a reduced time, and also to fully exploit a database of stored electrical soundings by the establishment, amongst other things, of the horizontal and vertical 2D images, estimating the distribution of apparent electrical resistivity (geostatistic modeling, inversion, etc.).

In order to characterize electrically the study area (north-east of the Saïss Basin), a statistical analysis of apparent resistivity of vertical electric soundings was performed. This simple descriptive analysis is followed by a statistical analysis (principal component analysis PCA and ascending hierarchical classification HAC.)

The analysis of the index level from HAC showed that, for a total of six classes, the interclass inertia is lowest. The study of properties belonging to each class was conducted by the analysis of the calculated average pseudo-soundings and the paragon soundings for each class. The spatial distribution of these classes was made and the six sub-areas defined are well represented electrically by using their average electric sounding. This restriction is not due to chance, it is naturally related to geological characteristics of each sub-area. In the study area, following the statistical analysis, have been redefining the three major vertically stacked generally known geologically through mechanical drilling data performed in the area.

The geostatistical analysis allowed to determine, by the calculation of variograms of the decimal logarithms of apparent resistivities, their correlation distances (range). Indeed, the geostatistical methods, which are based on the theory of regionalized variables, were used to characterize the fluctuations of the apparent resistivity parameter.

The results of statistical analysis and geostatistical supplemented by inversion of the average electric sounding per class, highlighted the reliability of these techniques to the interpretation of a large number of electrical soundings instead of the usual method which is based on the inversion of the electrical sounding one by one and correlate them later, to build the global structure of the area studied. With the techniques used in this work, very satisfactory results in a more reduced time, for interpreting vertical electric soundings, are obtained.

The studied profiles and inverted using the software RES2Dinv show all three structures defined previously (Resistant – Conductive - resistant), on the other hand, there are variations within the same formation. In addition, the spatial organization of the formation makes it possible to confirm the existence of faults coherent with the structure in horst and graben basin.

**Keywords:** electrical sounding, Statistics, Geostatistics, principal component analysis, Inversion, ascending hierarchical classification, electrical tomography, Saiss Basin, Morocco



# SOMMAIRE

---

---

Remerciements .....	I
Résumé .....	III
Abstract .....	V
Sommaire .....	VII
Liste des figures .....	XI
Liste des tableaux .....	XVII
INTRODUCTION GENERALE.....	4
Chapitre I : Géologie de la zone.....	- 8 -
Introduction.....	- 8 -
I) Contexte générale de la zone.....	- 8 -
I-1) Situation Géographique et géographie humaine .....	- 8 -
I-1-1) Cadre géographique.....	- 8 -
I-1-2) Géographie humaine.....	11
I-2) Cadre géomorphologique.....	11
II) Cadre Géologique, Hydro-climatologique, et Hydrogéologique .....	14
II-1) Cadre géologique.....	14
II-1-1) Géologie régionale .....	15
II-1-1-1) Les rides prérfaines.....	15
II-1-1-2) le Bassin de Saïss.....	15
II-1-2) Géologie locale .....	16
II-1-2-1) Lithostratigraphie.....	16
II-1-2-2) Evolution paléogéographique du bassin de Saïss au cours du Néogène.....	27
II-1-2-3) Aspect structural .....	28
II-2) Cadre Hydroclimatologique.....	31
II-2-1) Précipitation .....	31
II-2-2) Température .....	31

II-2-3) Réseau hydrographique.....	31
II-2-4) Les Sources .....	32
II-3) Cadre Hydrogéologique.....	33
II-3-1) Nappe phréatique .....	33
II-3-2) Nappe profonde.....	34
III) Conclusion .....	35
Chapitre II : Présentation et analyse de l'ensemble des sondages électriques .....	40
Introduction.....	40
I) Statistique descriptive.....	42
Introduction.....	42
I-1) Analyse globale de la répartition des données .....	42
I-2) Les paramètres de position.....	44
I-3) Les paramètres de dispersion .....	45
II) Analyse en composantes principales des SEV avec 22 variables .....	49
II-1) Analyse en composantes principales des 219 sondages électriques et 22 variables .....	49
II-2) Présentation graphique des valeurs propres et les nouveaux axes factoriels .....	55
II-3) Représentation graphique des données dans le plan factoriel F1 (39%)-F2 (24%) .....	56
II-4) Représentation graphique des données dans le plan factoriel F1 (39 %) et F3 (15%) .....	57
III) Analyse en composantes principales des SEV avec 15 variables (les formations de subsurface) ..	60
III-1) Statistiques descriptives .....	60
III-2) Analyse des valeurs propres des nouveaux axes factoriels .....	61
III-3) Représentation graphiques des données dans le plan factoriel F1 (54 %) et F2 (26 %).....	63
III-4) Représentation graphique des données dans le plan factoriel F1 (54%) et F3 (11%) .....	64
IV) Classification ascendante hiérarchique avec la méthode de Ward et distance euclidienne .....	67
V) Conclusion générale.....	75
Chapitre III : analyse Géostatistique limité au bassin de Saïss au sens strict.....	78
Introduction.....	78
I) Problématique et objectifs .....	78

II) Analyse statistique des 164 sondages électriques .....	79
II-1) Description quantitative des SEV .....	80
II-2) Classification des SEV : typologie des SEV du bassin de Saïss.....	86
III) Analyse géostatistique des données .....	101
III-1) Cartographie par Krigeage des résistivités apparentes par pseudo-profondeur.....	101
III-1-1) La méthode .....	101
III-1-2) Les cartes krigées.....	114
III-1-3) Relations entre cartes issues du krigeage et classes de sondage.....	122
III-2) Cartographie par krigeage des résistivités apparentes par profil.....	123
III-2-1) La méthode .....	123
III-2-2) Les cartes krigées des profils.....	134
IV) Structuration du bassin de Saïss.....	136
Conclusion .....	145
Inversion des lignes des sondages électriques verticaux par tomographie 2D.....	148
Chapitre IV : Inversion des lignes des sondages électriques verticaux par tomographie 2D.....	150
Introduction.....	150
I) Principe de la méthode proposée.....	150
I-1) le dispositif Schlumberger des sondages électriques verticaux .....	151
I-2) La configuration Wenner-Schlumberger des pseudo-sections pour des inversions 2D.....	151
I-2) La méthodologie.....	154
I-2-1) Sélection des données destinées à établir un fichier prêt pour l'inversion.....	155
I-2-2) INVERSION DES PSEUDO-SECTIONS ESTIMEES .....	156
II) Résultats : Les images 2D des inversions des profils dans le bassin de saïss. ....	158
II-1) Les images 2D du profil A .....	159
II-2) Les images 2D du profil B .....	164
II-3) Les images 2D du profil C .....	165
II-4) Les images 2D du profil D .....	169
II-5) Les images 2D du profil E.....	172

II-6) Les images 2D du profil F .....	176
II-7) Les images 2D du profil G .....	178
II-8) Les images 2D du profil H .....	179
II-9) Les images 2D du profil I.....	182
II-10) Les images 2D du profil J.....	184
III) Corrélation des résultats de la classification des résistivités apparentes et les modèles des résistivités issues des inversions .....	186
Conclusion .....	188
Conclusion Générale .....	192
Conclusion générale .....	194
Bibliographie .....	199
Bibliographie.....	201
Annexe I : géologie de la zone .....	209
Annexe II : Statistiques .....	213
Généralité sur la statistique .....	215
Annexe III: Géostatistique.....	221
Validation croisées des cartes horizontales.....	242
Annexe IV : Géophysique .....	275
Modèles d'inversion de la partie de la totalité des profils .....	282
Modèles d'inversion de la partie subsurface des profils.....	292
Description des forages.....	302

## LISTE DES FIGURES

---

---

Figure 1: Carte de situation géographique de la zone d'étude (Taltasse, 1953) .....	10
Figure 2: Flexure d'Ain Taoujdate : talus de flexure retouché par l'érosion (Fassi, 1999).....	11
Figure 3: Modèle topographique du Bassin de Saïss (a : Amraoui, 2005, b détail du secteur étudié)..	12
Figure 4: Vue panoramique du bassin de Saïss au pied de Jbel Aicha Mougouttaya .....	13
Figure 5: Carte topographique simplifiée en courbes de niveau (Amraoui, 2005) ; le secteur étudié est identifié par le cadre .....	13
Figure 6: Situation géographique et géologique de la zone d'étude (d'après Cirac, 1987, Essahlaoui, 2000).....	14
Figure 7: Carte de situation des coupes lithologiques du bassin de Saïss (Amraoui, 2005) .....	17
Figure 8: Coupes lithologiques longitudinales traversant le bassin de Saïss situation sur la Figure 7..	19
Figure 9: Coupes lithologiques transversales traversant le bassin de Saïss situation sur Figure 7 (Amraoui, 2005).....	20
Figure 10: Coupe C1 (Figure 7) montrant le passage latéral de faciès (calcaires lacustres-conglomérats) dans la série pliocène (Taltasse, 1953) .....	21
Figure 11: Colonne lithostratigraphique synthétique du bassin de Saïss (Essahlaoui, 2000) .....	23
Figure 12: Vue panoramique des formations néogènes de la zone .....	24
Figure 13: Les formations gréseuses du Néogène du Saïss de Fès .....	24
Figure 14: Affleurement des formations triasiques au nord du secteur d'étude près de barrage Sidi Chahed.....	26
Figure 15: Affleurement des marnes du Miocène surmontées par les formations Plio-quaternaires à l'est de Meknès dans la vallée d'Oued Mahdouma .....	26
Figure 16: L'affleurement des marnes du Miocène au nord de la zone .....	26
Figure 17: Profondeurs des toits des marnes miocènes ou épaisseur du Plio-Quaternaire (Amraoui, 2005).....	27
Figure 18: Carte de la répartition des différentes flexures du Bassin de Saïss (Fassi, 1999).....	29
Figure 19: Carte du réseau hydrographique du bassin de Saïss (in Amraoui, 2005).....	32
Figure 20: Carte de l'épaisseur de la nappe phréatique du Plio-Quaternaire (in Amraoui, 2005).....	34

Figure 21: Carte de situation des lignes des sondages électriques .....	42
Figure 22: Fonction de répartition des résistivités apparentes pour des AB/2 différents .....	43
Figure 23: Représentation graphique des paramètres de position en fonction d'AB/2 .....	44
Figure 24: Représentation graphique des paramètres de dispersion en fonction d'AB/2.....	46
Figure 25: Représentation graphique du coefficient de variation.....	47
Figure 26: Distance à l'origine G des sondages électriques verticaux.....	50
Figure 27: Paramètres de position pour 201 SEV .....	51
Figure 28: Paramètres de dispersions pour 201 SEV .....	51
Figure 29: Coefficient de variation pour 201 SEV.....	52
Figure 30: Représentation graphique des pourcentages et pourcentages cumulés de la variance absorbée par les valeurs propres.....	55
Figure 31 : Cercle des corrélations et carte des variables des SEV sur le premier plan factoriel des 22 variables .....	58
Figure 32: Cartes de projection du nuage des sondages électriques sur le premier plan factoriel .....	58
Figure 33: Cercle des corrélations et la carte des variables des SEV dans le deuxième plan factoriel des 22 variables et 201 SEV .....	59
Figure 34: cartes de projection du nuage des sondages électriques (201SEV) dans le deuxième plan factoriel.....	59
Figure 35: représentation graphique des pourcentages et des pourcentages cumulés des valeurs propres (15 variables et 201 SEV) .....	63
Figure 36: Cercle des corrélations et la carte des variables des SEV sur le premier plan factoriel des 15 variables (201 SEV) .....	65
Figure 37: Cartes de projection du nuage des sondages électriques sur le premier plan factoriel (201 SEV).....	65
Figure 38: Cercle des corrélations et la carte des variables des SEV sur le deuxième plan factoriel des 15 variables (201 SEV) .....	66
Figure 39: Carte de projection du nuage des sondages électriques sur le deuxième plan factoriel (201 SEV).....	66
Figure 40: Représentation graphique de la variation des indices de niveau en fonction de l'agrégation des classes pour 22 variables (201 SEV).....	68

Figure 41: Carte des classes des individus et leurs centres (Cas de 22 variables) selon le premier plan factoriels (201 SEV).....	69
Figure 42: Carte des classes des individus et leurs centres (Cas de 22 variables) selon le deuxième plan factoriels (201 SEV).....	69
Figure 43: Situation géographique des classes des sondages électriques avec 22 variables et 201 SEV .....	71
Figure 44: Pseudo-sondages moyens par classe des sondages électriques avec 22 variables et 201 SEV .....	71
Figure 45: Carte des classes des individus et leurs centres de gravité (Cas de 15 variables et 201 SEV) selon les deux premiers axes factoriels .....	73
Figure 46: Carte des classes des individus et leurs centres de gravité (Cas de 15 variables et 201 SEV) selon le deuxième et le troisième axe factoriels .....	73
Figure 47: Situation géographique des classes des sondages électriques avec 15 variables et 201 SEV .....	74
Figure 48: Pseudo-sondages moyens par classe des sondages électriques avec 15 variables et 201 SEV .....	74
Figure 49: Emplacement des 164 sondages sur une carte en relief de la zone avec emplacement de quelques forages réalisés sur le site.....	79
Figure 50: Pseudo-SEV moyen, médian et quartiles (a) et (b) valeurs de l'étendue, de l'écart type et du coefficient de variation (échelle de droite) des résistivités en fonction des valeurs des demi-écartements AB/2 (164 SEV).....	85
Figure 51: Cartographie des coefficients de corrélation des résistivités apparentes par couple de pseudo-profondeurs (les symboles +,- et 0 représentent une corrélation positive, négative ou une absence de corrélation) (164 SEV).....	88
Figure 52: Cercle des corrélations F1-F2 et projection des SEV sur le plan factoriel F1-F2 (les lettres G marquent les centres de gravité par classe) .....	92
Figure 53: Cercle des corrélations F1-F3 et projection des SEV sur le plan factoriel F1-F3 (les lettres G marquent les centre de gravité par classe).....	97
Figure 54: Localisation géographique des 164 sondages .....	100
Figure 55: Pseudo-sondages moyens des cinq classes (164 SEV).....	101
Figure 56: Cartes variographiques pour les 22 pseudo-profondeurs $z_c$ (15 pas de 650 m) .....	106
Figure 57: Variogrammes des logarithmes des résistivités apparentes .....	111

Figure 58: Graphe des portées (Gauche) et des variances (à droite) par pseudo-profondeur.....	114
Figure 59: Cartes des résistivités apparentes obtenues par krigeage pour les 22 pseudo profondeurs croissantes .....	121
Figure 60: Histogrammes des fréquences des résistivités apparentes des 13 lignes des SEV.....	127
Figure 61: Présentation des pseudo-sondages moyen, médian et le sondage paragon de la classe 1	137
Figure 62:Présentation des pseudo-sondages moyen, médian et la sondage paragon de la classe 2.	138
Figure 63: Présentation des pseudo-sondages moyen, médian et le sondage paragon de la classe 3	138
Figure 64: Présentation des pseudo-sondages moyen, médian et le sondage paragon de la classe 4	139
Figure 65 : Présentation des pseudo-sondages moyen, médian et du sondage paragon de la classe 5 .....	140
Figure 66: Modèles pour les SEV moyen par classe.....	143
Figure 67: Mode de placement des électrodes selon la configuration Schlumberger .....	151
Figure 68: Les dispositifs Wenner-Schlumberger en imagerie électrique d'après MARESCOT.L, 2006 .....	152
Figure 69 : Schéma de la profondeur $Z_e$ en fonction de l'écartement des électrodes pour un dispositif Wenner-Schlumberger.....	152
Figure 70: Construction d'une pseudo-section électrique avec les dispositifs Wenner et Wenner-Schlumberger (manuel d'utilisation de RES2DINV) modifié .....	153
Figure 71: les modalités d'inversion sur RES2Dinv .....	157
Figure 72a: Situation des profils L1, L2 et T1 sur la carte de la situation géographique des classes des sondages (164 SEV) .....	159
Figure 73: Modèles de résistivité de profil B (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface).....	164
Figure 74: Modèles de résistivité de profil C (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface).....	166
Figure 75: Modèles de résistivités de profil D (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface) .....	172
Figure 76 : Les modèles de résistivité de profil E (a : totalité du bassin, b le détail de la subsurface)	173
Figure 77: Modèles de résistivité de profil F (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface) .....	176
Figure 78: Modèles de résistivité de profil G (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface).....	179
Figure 79: Les modèle de résistivité de profil H (a : totalité du bassin, b le détail de la subsurface) .	180
Figure 80: Modèles de résistivité de profil I (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface) .....	184



Figure 81: Les modèles de résistivité de profil J (a : totalité du bassin, b le détail de la subsurface) .	186
Figure 82: corrélation spatiale entre les résultats de la classification hiérarchiques et les modèles des résistivités des terrains.....	187
Figure 92:Cartes de krigeage des différents profils.....	239



## LISTE DES TABLEAUX

---

---

Tableau 1: Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère superficiel (Chamayou et al, 1975 ; D.R.P.E, 1989 ; in Essahlaoui, 2000).....	34
Tableau 2: Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère profond (in Essahlaoui, 2000).....	35
Tableau 3: Coefficient de corrélation des 22 variables de 201 sondages électriques.....	54
Tableau 4: Coefficient de corrélation des 15 variables de 201 sondages électriques.....	62
Tableau 5: Paramètres de la classification hiérarchique.....	99
Tableau 6: Distances entre centres de gravité des classes.....	100
Tableau 7: paramètres des modèles de variogramme.....	112
Tableau 8: Paramètres des modèles des variogrammes omnidirectionnels.....	133
Tableau 9: Paramètres des modèles des variogrammes directionnels.....	133
Tableau 10: Paramètres des distributions des modèles pour les cinq SEV moyens (C.V : Coefficient de variation) .....	141
Tableau 11: Tableau des meilleurs modèles pour chaque couche des cinq pseudo-sondages moyens et chaque sondage parangons.....	142
Tableau 12: Synthèse des différents rapports permettant de déduire la profondeur efficace ( $Z_e$ ) pour différents dispositifs en fonction de l'écartement $L$ , d'après Edwards 1977 et Loke 2004 .....	154
Tableau 13: synthèse des profondeurs retenues pour construire les pseudo-sections estimées (Riss et al 2010, soumis) .....	155



## Introduction générale

---



# INTRODUCTION GENERALE

---

---

La présente thèse de doctorat est réalisée en cotutelle entre l'université Moulay Ismail (Maroc); laboratoire d'Ingénierie géologique (Géophysique, Hydrogéologie et Géologie de surface) et l'Université Bordeaux1 (France) laboratoire de Géosciences, Hydrosiences, Matériaux et Construction. (GHYMAC). Ce travail a été financé en première partie par le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST) du Maroc, en deuxième partie par l'Agence Universitaire de la Francophonie et les échanges franco-marocain Hubert Curien (Projet Volubilis) entre les Universités Chouaib Doukkali et l'Université Moulay Ismaïl d'une part et l'Université Bordeaux1 d'autre part.

La prospection géoélectrique est parmi les techniques les plus utilisées pour les prospections non destructives du sol et sous-sol au Maroc. Plusieurs prospections de ce genre ont été réalisées, ainsi on retrouve un nombre très important de données de sondages électriques verticaux, établis par plusieurs compagnies, et pour des divers objectifs dans plusieurs bassins. Le but de ce travail est de proposer une nouvelle technique d'interprétation de ces sondages électriques verticaux en un temps réduit, et aussi de bien exploiter cette base de données stockée.

Les méthodes de prospection géophysique pour la caractérisation des terrains de sub-surface sont utilisées depuis longtemps, que l'objectif soit de nature géotechnique, hydrogéologique ou environnemental (Mhamdi et al. 2006, Gouasmia et al ; 2006, Peter, 2008). De nombreuses données ont donc, de ce fait, été engrangées constituant autant de bases de données susceptibles d'être réanalysées ; en effet, il est de plus en plus fréquent, dans le contexte du changement climatique global que l'on cherche à caractériser, pour une région donnée, un état initial afin d'être en mesure d'établir son évolution sous l'effet des modifications environnementales. De nombreuses archives, particulièrement issues de prospection par sondages électriques verticaux (SEV), existent, tant cette méthode a été et est toujours largement utilisée dans de nombreux pays compte tenu de la facilité de sa mise en œuvre et de son faible coût. Par ailleurs, lorsque les SEV sont nombreux et couvrent de façon systématique une grande surface, il est peut être intéressant de les réanalysées dans leur ensemble, non plus indépendamment les uns des autres, à l'instar de ce qui se fait actuellement lors d'une prospection par tomographie de résistivité électrique. Pour valoriser les méthodes on dispose d'une base de données de sondages électriques verticaux établie par la Compagnie Africaine de la Géophysique dans le bassin du Saïss au Maroc.

Le bassin de Saïss appelé aussi bassin du Meknès-Fès a attiré l'attention de nombreux géologues par sa situation géographique entre le Rif et le domaine méso-atlasique. Les travaux des prédécesseurs (Taltasse, 1953 ; Faugères, 1978 ; Cirac, 1987 ; Aït Brahim, 1991 ; Zizi, 1996 Essahlaoui, 2000 ; Kenafi, 2001 ; Amraoui, 2005, etc.) avaient pour finalité l'étude lithostratigraphique, structurale,

reconstruction paléogéographique (datations paléontologiques, analyse paléogéographique), étude de l'évolution géodynamique ainsi que des études hydrogéologiques et géophysique.

Le secteur choisi dans la présente étude est situé dans la partie Nord-Est du bassin sédimentaire de Saïss. Ce bassin est caractérisé par une activité humaine et agricole très importante. Le climat est semi-aride et les ressources en eau deviennent de plus en plus insuffisantes, ce qui impose comme premier objectif pour la majorité des forages effectués la recherche des réservoirs d'eau souterraine. Toutes les données disponibles dans le secteur sont utilisées dans le cadre de ce travail à savoir : les cartes topographiques, les cartes géologiques, les cartes structurales, les cartes hydrogéologiques, les données des forages d'eau, etc.

Dans le cadre de cette étude et pour atteindre notre objectif nous avons utilisé toutes les données de des campagnes électriques disponibles dans la zone

Ce mémoire est réparti en quatre chapitres :

Le premier Chapitre est consacré à la présentation du secteur d'étude dans son contexte géographique, géomorphologique, géologique, climatologique, hydrologique et hydrogéologique indispensables pour toute interprétation des résultats.

La deuxième Chapitre 2 sera consacrée à une étude statistique. Ce chapitre vise à la mise en évidence de l'utilité d'une méthode d'interprétation des sondages électriques afin d'avoir une vision globale de la distribution des résistivités apparentes dans toute la zone. Cette méthode d'interprétation repose sur une simple analyse descriptive suivie d'une analyse en composantes principales et d'une classification hiérarchique ascendante.

L'obtention de cartes de résistivités apparentes fait l'objet du troisième Chapitre. Pour cela on utilisera d'une part une méthode de géostatistiques linéaire et d'autre part les méthodes d'inversion par essaim particulière. A l'issue de ce chapitre, on disposera d'un ensemble de résistivités apparentes qui seront utilisées pour l'obtention d'images de tomographie de résistivités électriques.

Après la présentation des principes généraux de la méthode d'inversion des données de résistivités apparentes pour l'obtention d'images de tomographie de résistivités électriques, on présente les dix images de tomographie électrique et leurs interprétations dans le quatrième chapitre.

Le mémoire se termine par des conclusions générales et des perspectives.



## Géologie de la zone d'étude

---



# CHAPITRE I : GEOLOGIE DE LA ZONE

---

---

## Introduction

Ce premier chapitre concerne la présentation d'une synthèse géologique afin de situer la zone dans un cadre d'évolution géodynamique et structurale globale. Un aperçu climatologique et hydrogéologique avec les caractéristiques hydrodynamiques des différents réservoirs d'eau seront présentées. Ces informations seront indispensables pour les interprétations statistiques, géostatistiques ainsi que pour les inversions géophysiques envisagées dans les chapitres suivants.

## I) Contexte générale de la zone

### **I-1) Situation Géographique et géographie humaine**

Le sillon sud-rifain est une dépression orientée sensiblement est-ouest et qui s'étend de l'atlantique à l'ouest jusqu'à la méditerranée à l'est. Il est subdivisé en trois sous-bassins qui sont d'ouest en est :

- le bassin de Gharb
- le bassin de Saïss (appelé aussi bassin de Meknès-Fès)
- le bassin de Guercif

Le bassin de Saïss orienté E-W, s'étend depuis le seuil d'El Kansera et la Vallée de l'oued Beht à l'ouest jusqu'au col de Touahar vers Taza à l'est. Il est limité au nord par le domaine pré-rifain et les Rides pré-rifaines et au sud par le domaine Méseto-Atlasique. (Figure 1)

Le bassin de Saïss est subdivisé en deux sous-bassin par la flexure de Ain Taoujdate (Figure 2), cette dernière sépare le plateau de Meknès à l'ouest et le Saïss de Fès (appelé aussi plaine de Saïss) à l'Est (Cirac, 1987 ; Fassi, 1999).

#### **I-1-1) Cadre géographique**

La région étudiée fait partie d'une vaste dépression allongée suivant une direction E-W surplombée des rides pré-rifaines à l'extrémité septentrionale, elle correspond à la partie nord de Saïss du Fès (Figure 1), et la partie la plus frontale de la chaîne rifaine. Ce secteur est limité :

- au Nord, par le Prérif et les rides pré-rifaines ;
- au Sud, par le Moyen atlas ;

-à l'Ouest, par le plateau du Meknès ;

-à l'Est, par la vallée d'oued Sebou.

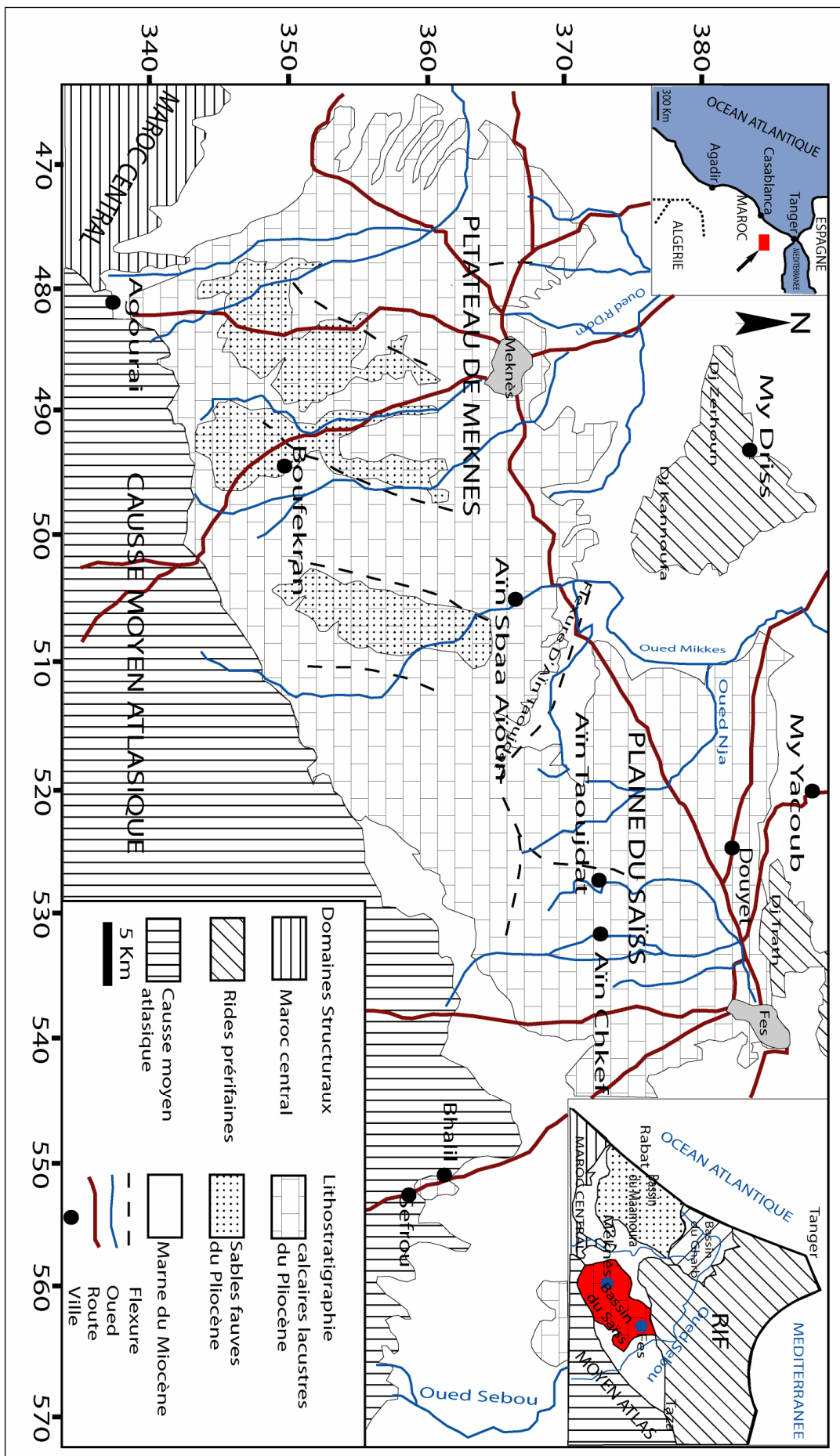


Figure 1: Carte de situation géographique de la zone d'étude (Taltasse, 1953)

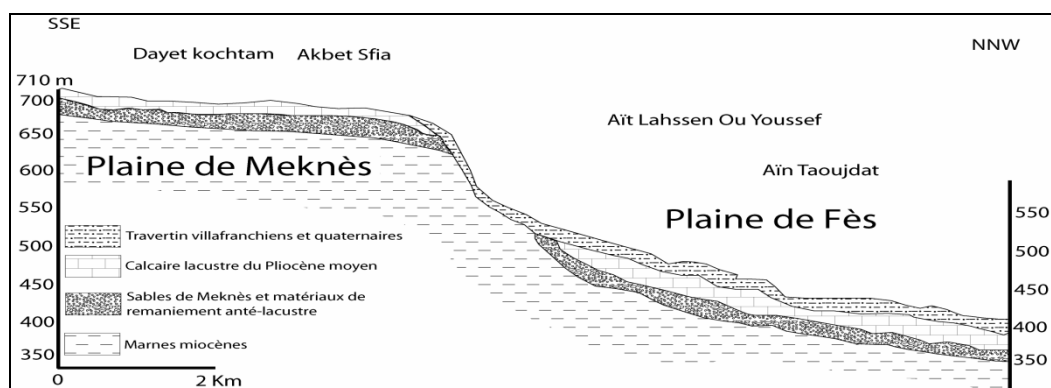


Figure 2: Flexure d'Ain Taoujdate : talus de flexure retouché par l'érosion (Fassi, 1999)

De par sa situation géographique entre les coordonnées cartographiques : les abscisses sont comprises entre 515 km et 532 Km et les ordonnées sont comprises entre 370 km et 386 Km. L'altitude moyenne est de l'ordre de 400 m.

Le bassin de Saïss s'allonge d'est en ouest entre la chaîne rifaine au Nord et le Moyen Atlas au Sud sur 80 km, Depuis la ville de Fès à l'est jusqu'à l'ouest de la ville de Meknès.

### I-1-2) Géographie humaine

La ville du Fès constitue la plus importante agglomération la plus proche du secteur, elle est parmi les plus grandes villes du Maroc et joue un rôle déterminant dans le développement du pays. Cette ville est connue par son activité économique, touristique et agricole qui constitue la plus grande richesse de la région principalement avec l'arboriculture, la céréaliculture et les légumineuses, etc. Selon le recensement de 2004, la population de cette ville est de l'ordre de 977 946 (Amraoui, 2005).

### I-2) Cadre géomorphologique

Morphologiquement le bassin de Saïss correspond à une vaste dépression allongée E-W qui se rétrécit en allant vers l'est (Figure 3, Figure 4, Figure 5). L'altitude de Saïss du Fès, décroît modérément du sud vers le nord. Cette plaine se redresse brutalement au contact des rides pré-rifaines et le pré-rif.

Dans le Saïss du Fès, la pente des cours d'eau est très faible, de ce fait, ils sont peu encaissés et par endroit stagnants, engendrant des zones marécageuses, tel le cas de Merget Douyet (Figure 5) (Amraoui, 2005).

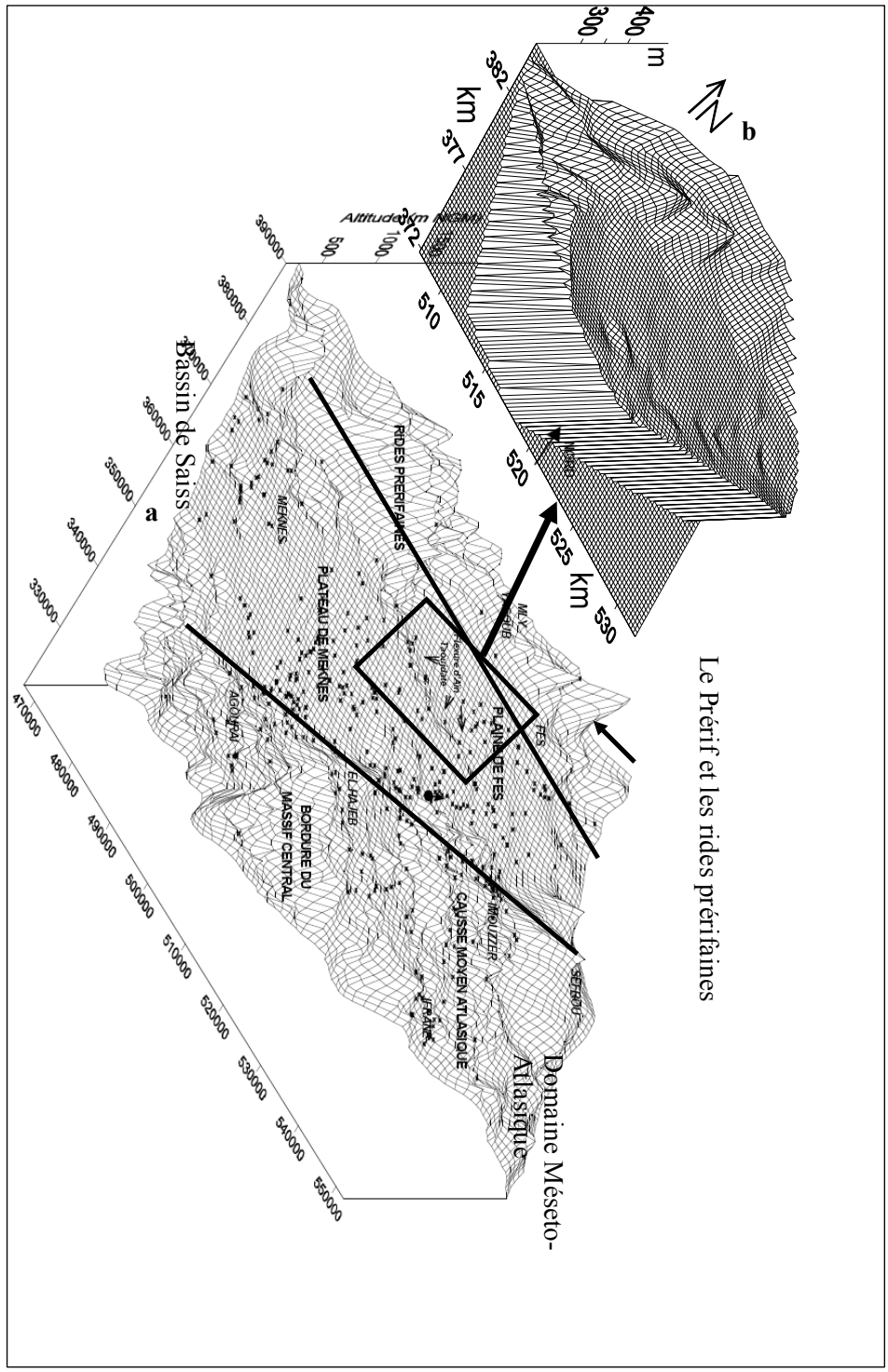


Figure 3: Modèle topographique du Bassin de Saïss (a : Amraoui, 2005, b détail du secteur étudié)



Figure 4: Vue panoramique du bassin de Saïss au pied de Jbel Aicha Mougouttaya

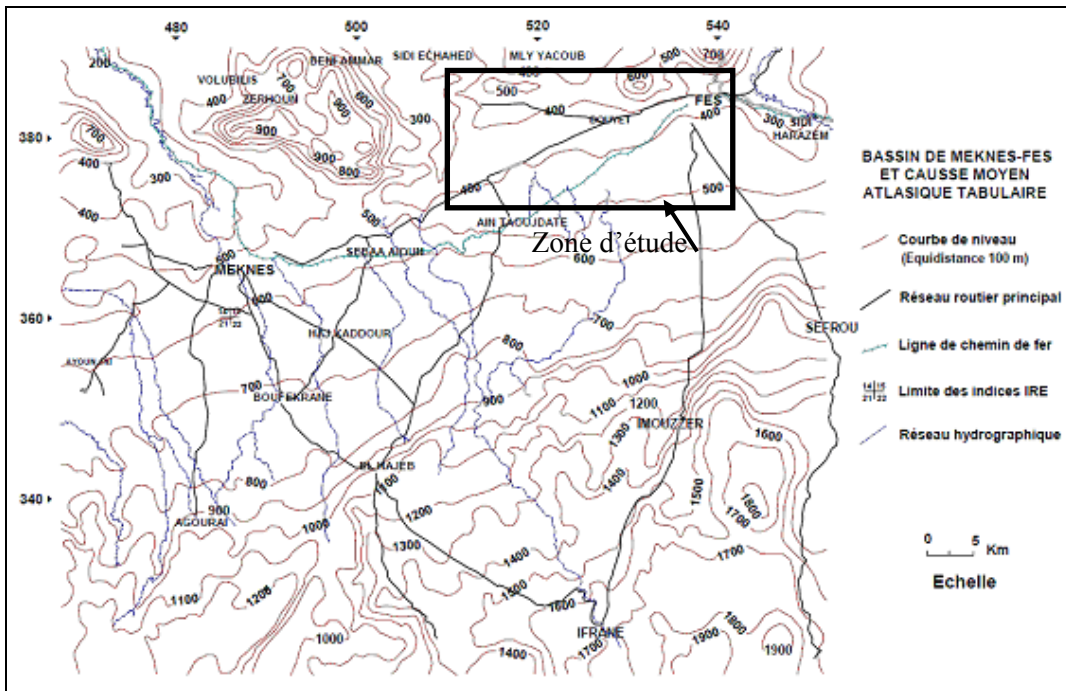


Figure 5: Carte topographique simplifiée en courbes de niveau (Amraoui, 2005) ; le secteur étudié est identifié par le cadre



## II) Cadre Géologique, Hydro-climatologique, et Hydrogéologique

### II-1) Cadre géologique

Sur le plan géologique le secteur faisant l'objet de ce travail couvre la partie méridionale des rides préifaines et la portion septentrionale de Saïss de Fès avoisinante (Figure 6 a et b). Dans le but de bien cerner son contexte géologique nous rappelons ci-après les grands traits structuraux de ces deux grands domaines.

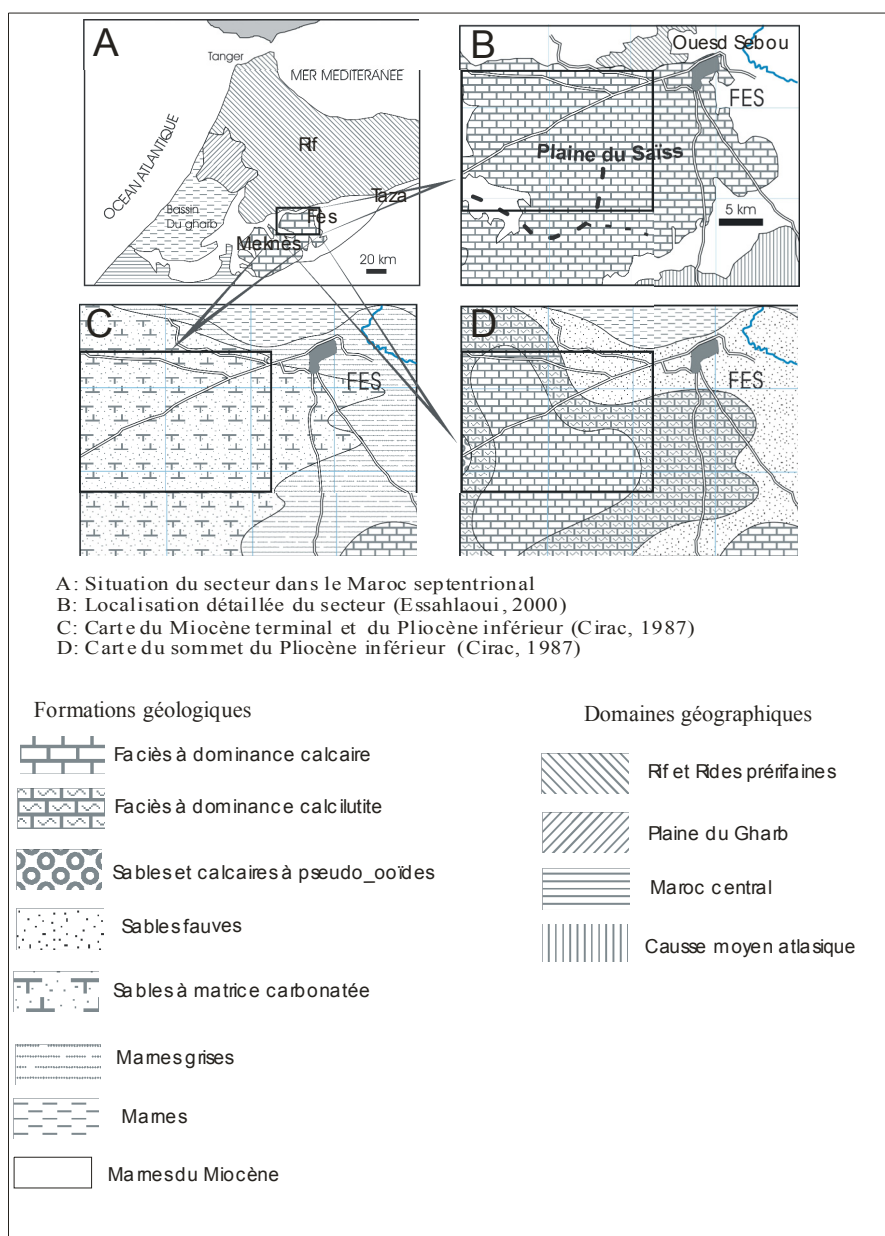


Figure 6: Situation géographique et géologique de la zone d'étude (d'après Cirac, 1987, Essahlaoui, 2000)

## **II-1-1) Géologie régionale**

### **II-1-1-1) Les rides prérfaines**

La zone prérfaine (le prérf) est caractérisée par des faciès marneux et des reliefs peu accusés, il s'agit d'un complexe tectono-sédimentaire d'âge Miocène supérieur à klippes sédimentaires d'âge allant du Lias au Tortonien. Les rides prérfaines correspondent à des chaînons alignés E-W culminant à Jbel Zerhoun (situé au Nord de Meknès) avec une altitude de 1118 m. Leur ossature est constituée de terrains jurassiques encadrés par les marnes néogènes.

Ces reliefs se regroupent en deux arcs (Annexe I) :

-arc oriental ou ride interne : cet arc regroupe les rides Tselfet, de Boukenfoud, de Moulay Idriss, Jbel Nesrani, Jbel fert el Bir et Jbel Dhar Nsour, l'ensemble Takerma-kannoufa, jbel Zerhoun. Notre secteur d'étude comprend une partie des rides les plus orientales.

-arc occidental ou ride externe : cet arc regroupe les rides de jbel Boudraa ; jbel outita, jbel Ari-keloua, jbel kafs, ride Moulay yacoub, ride Nouilat, ride Balas, ride bouazzouf et ride el kensera.

Du point de vue structuration, ils ont fait l'objet de plusieurs interprétations structurales qui s'accordent sur le rôle de la tectonique tangentielle dans leur édification :

-ce sont des écailles chevauchantes vers le NW et vers le sud (Daguin, 1927),

-ils correspondent à un grand chevauchement vers le sud résultant d'un décollement au niveau du Trias lors de la mise en place par compression des structures du prérf (Durand-Delga et al. 1960-62),

-ce sont des structures en compression prise entre deux systèmes de décrochements conjugués NE-SW dextre et WNW-ESE senestres, associés à des mouvements diapiriques (Vidal et Faugères, 1975 et Faugères, 1978) ;

-les rides prérfaines matérialisent le front de chevauchement rifain le plus externe et résultent d'un décollement plat avec amortissement frontal (Morley, 1986 ; Leblanc, 1986 in Amraoui 2005)

-elles résultent du décollement de la couverture méso-cénozoïque de la région vers le sud et de l'affrontement entre le prisme sédimentaire en déplacement et le bâti rigide des paléobordures du bassin jurassique qui aurait joué un rôle de butoir. Le décollement de la couverture Méso-cénozoïque s'est effectué par translation progressive du NE vers le SW et par relais successifs d'anticlinaux de propagation (Haddaoui et al, 1997)

### **II-1-1-2) le Bassin de Saïss**

Le bassin de Saïss, dont le remplissage est constitué essentiellement d'une épaisse série de marnes bleues d'âge Tortonien suivie de sables fauves pliocène et de conglomérats et calcaires lacustres d'âge plio-quadernaire, s'est individualisé à partir du Tortonien. Cette individualisation serait le résultat de la succession

de plusieurs phases d'extension et/ou de compression, exprimées surtout à la limite septentrionale du bassin en relation avec l'exhaussement des rides pré-rifaines (Aït Brahim ; 1983, Aït Brahim et Chotin; 1984).

## **II-1-2) Géologie locale**

Après la présentation de la géographie, ainsi que le contexte géologique général on présente ci-dessous la géologie locale

### **II-1-2-1) Lithostratigraphie**

Le bassin de Saïss est une large structure sédimentaire tertiaire à remplissage miocène et plio-quadernaire. La lithostratigraphie régionale ne diffère pas beaucoup de celle connue à l'échelle du nord du Maroc. Les variations à noter sont celles des formations plio-quadernaires dans le bassin qui varient selon le contexte sédimentaire local.

#### **a) Primaire**

Le socle paléozoïque affleure dans la zone du Maroc hercynien central où il est en contact direct, sur un large espace avec le bassin au sud. Il est représenté par un faciès monotone de schistes fins et de quartzite à intercalation de bancs gréseux, des couches de calcaires sableux à Brachiopodes et des conglomérats de base. Ce socle s'affaïsse et se prolonge vers le nord sous les dépôts mésozoïques et néogènes du bassin de Saïss et des rides pré-rifaines où il a été parfois atteint par les sondages effectués dans le bassin (Essahlaoui, 2000).

Le socle paléozoïque affleure dans la région de Bhalil (région de Sefrou), au Nord est d'El Hajeb, et dans la vallée de l'Oued El Kell au sud-ouest de la ville de Meknès.

#### **b) Trias**

La zone d'étude constitue le prolongement septentrional des bassins de Khemisset et de Boufekrane où la série triasique, complète datée du Trias supérieur (Landinien)-Lias inférieur (référence bibliographique), débute par des dépôts détritiques surmontés par une puissante série halitique (Figure 11). On distingue cinq formations qui correspondent à la succession des faciès argileux et des faciès salifères ainsi que les basaltes doléritiques (Kenafi, 2002) :

Ces faciès triasiques existent mais très localement surtout dans la région de Khemisset (vallée de Oued Beht) et présentent une épaisseur variable à travers tout le bassin. Elle peut atteindre 987 m.

Dans notre secteur le Trias affleure dans sa partie Nord (Figure 14), au long de la faille chevauchante entre le domaine rifain et le bassin de Saïss Il s'agit essentiellement d'argiles rouges oxydées ou bariolées à bancs de gypses et des basaltes doléritiques.

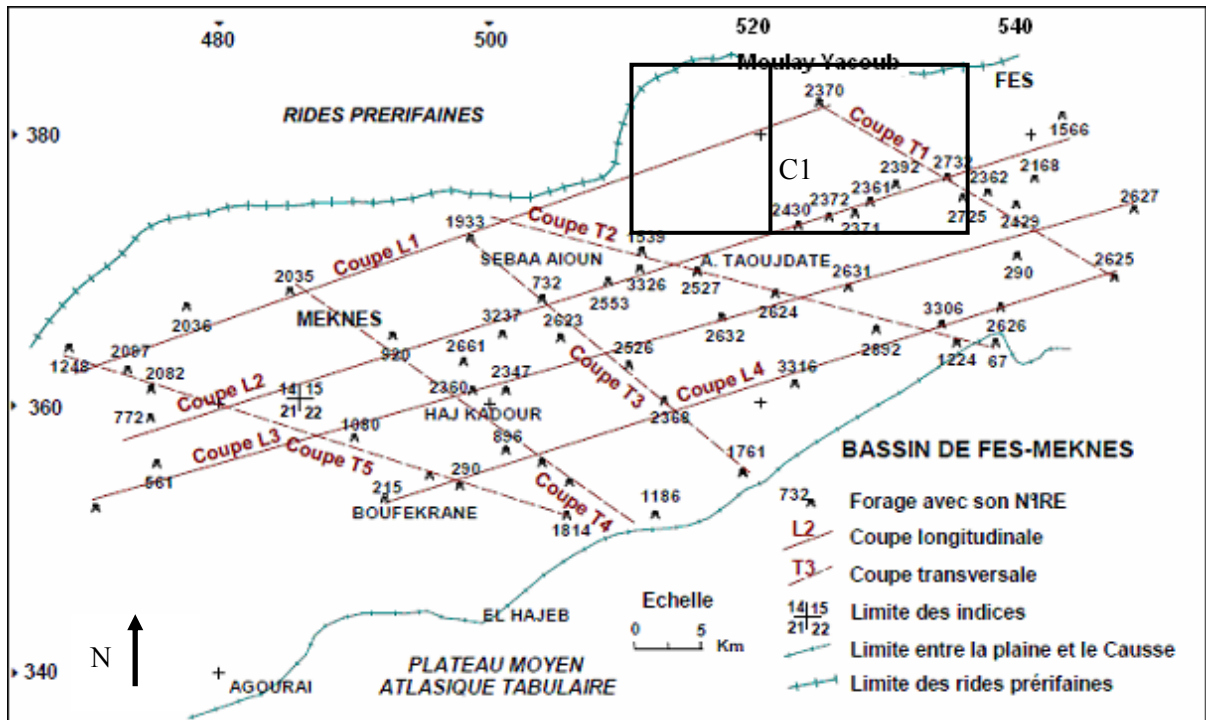


Figure 7: Carte de situation des coupes lithologiques du bassin de Saïss (Amraoui, 2005)

### c) Lias

Les formations du Lias affleurent principalement au sud dans le causse moyen atlasique et au nord dans les rides sud rifaines. Elles constituent le matériel essentiel des reliefs avec des calcaires dolomitiques inférieurs massifs et ruiniformes du Lias inférieur (Lotharingien), surmontées par des calcaires à céphalopodes et calcaires à silex du Lias moyen constitué par les étages Carixien et Domérien. Les formations liasiques présentent une puissance très variable (Essahlaoui, 2000). L'épaisseur de ces formations retrouvées dans certains forages peut atteindre 280 m (région de Sebâa-Ayoune). Les profondeurs de ces formations sont de plus en plus grandes en allant du sud vers le nord (Figure 7, Figure 8 et

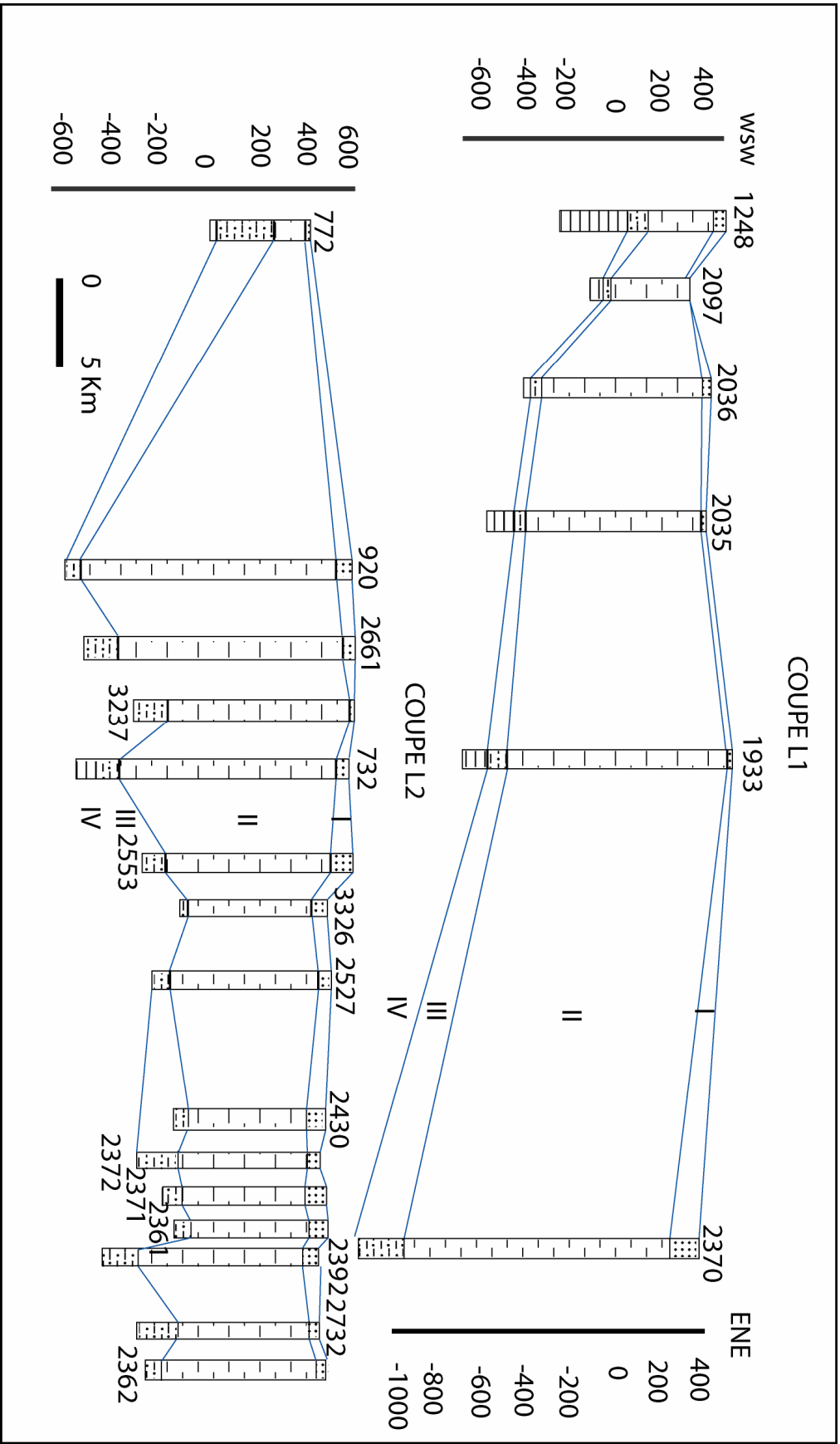


Figure 9). Elles se redressent brutalement front des rides prérimaires.

au

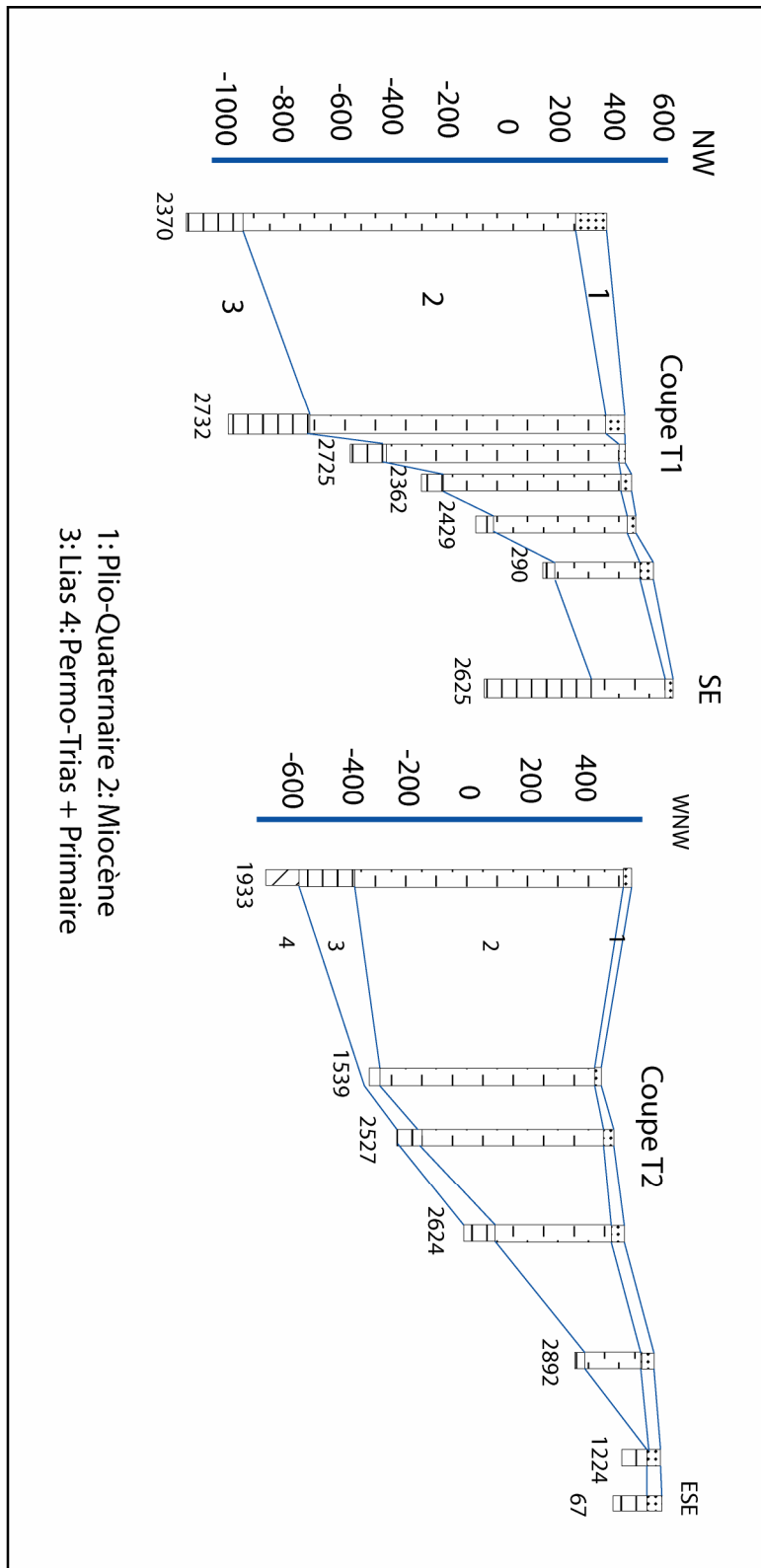


Figure 8: Coupes lithologiques longitudinales traversant le bassin de situation sur la Figure 7 (Amraoui, 2005)

*Figure 9: Coupes lithologiques transversales traversant le bassin de Saïss situation sur Figure 7 (Amraoui, 2005)*

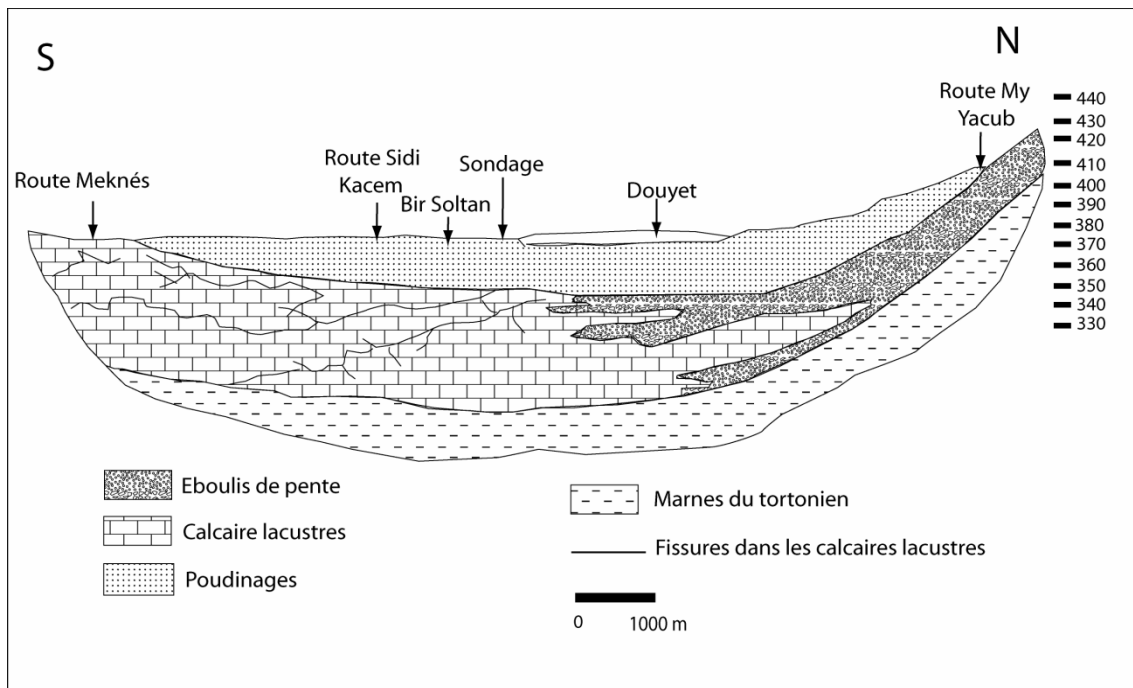


Figure 10: Coupe C1 (Figure 7) montrant le passage latéral de faciès (calcaires lacustres-conglomérats) dans la série pliocène (Taltasse, 1953)

#### d) Miocène supérieur

Les formations du Miocène supérieur sont caractérisées par des faciès homogènes, essentiellement marneux. Leur détail montre, par contre, d'importantes variations verticales et horizontales (Figure 6c, Figure 10). Elles sont représentées par des formations transgressives, qui débutent par un Burdigalien détritique et molassique recouvrant en discordance les terrains liasiques. Cette discordance est caractérisée par la lacune sédimentaire des dépôts d'âge Dogger à Oligocène (Essahlaoui, 2000). Il s'agit de la formation la plus puissante qui remplit la cuvette du bassin. L'épaisseur de ces formations augmente du sud vers le nord jalonnant les formations liasiques.

*Amraoui (2005), a réalisé une coupe lithologique près de Moulay Yacoub (Nord de la zone) où le paysage est formé de collines très ravinées. Cette coupe montre l'affleurement d'une série marneuse très monotone (Figure 7, Figure 8,*



Figure 9, Figure 12, Figure 13), d'épaisseur varie plus ou moins de 800 m. Cette série est surmontée par une série gréseuse, ayant une épaisseur de l'ordre de 30 m et qui se dégage du paysage marneux de par la dureté de ses barres gréseuses et par la couleur jaunâtre de ses faciès.

**- *Burdigalien***

Le Burdigalien constitue le début de la phase de transgression du Miocène supérieur. Il se dépose en discordance sur les formations anciennes (Lias ; parfois Trias et/ou Paléozoïque). Il est constitué de faciès détritiques qui varient latéralement entre les grès, les molasses ainsi que les conglomérats et parfois des calcaires sableux (Tabyaoui, 2005). Ces formations affleurent essentiellement en bordure nord du causse moyen atlasique. Au niveau du bassin, il est reconnu essentiellement par des forages profonds.

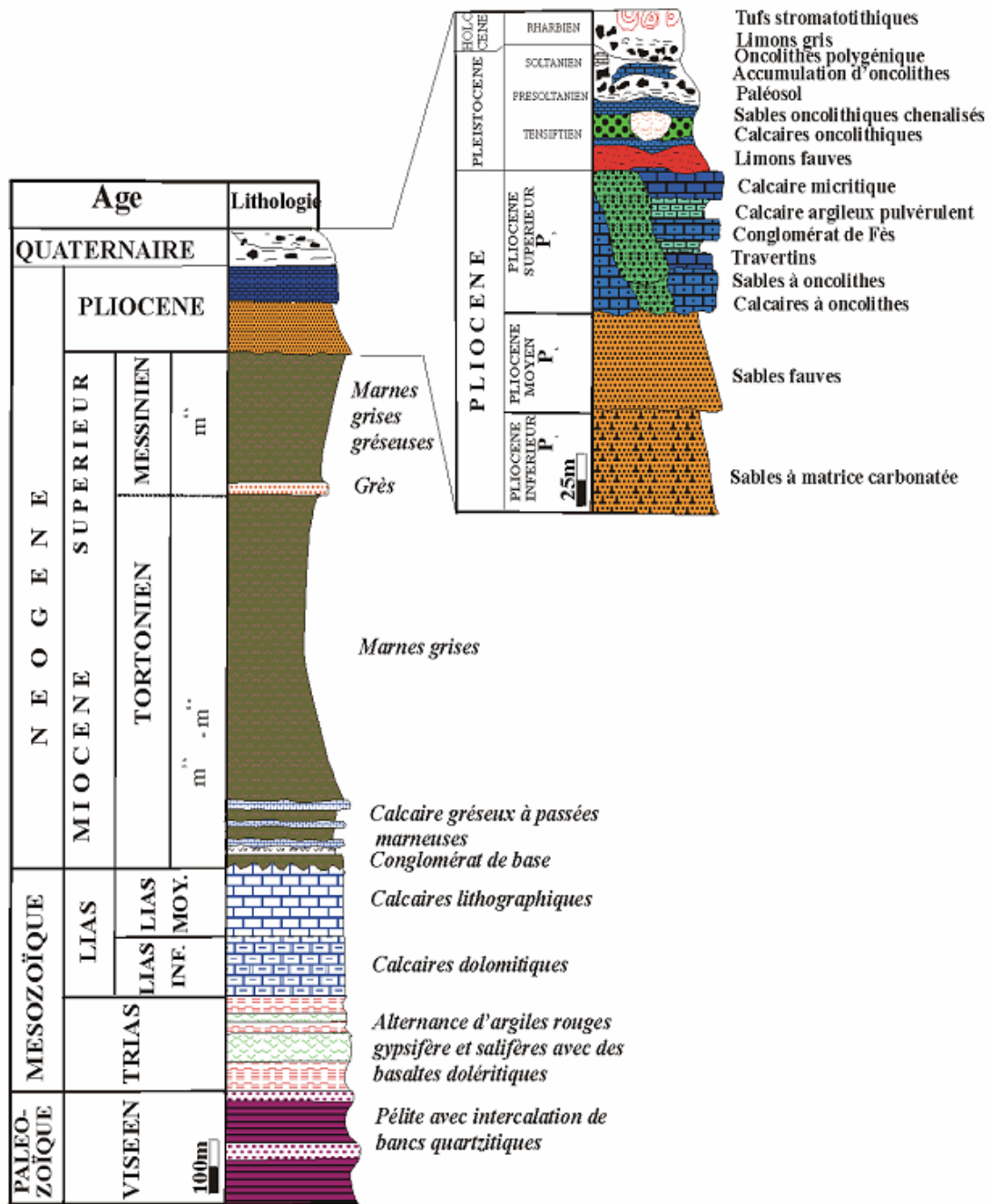
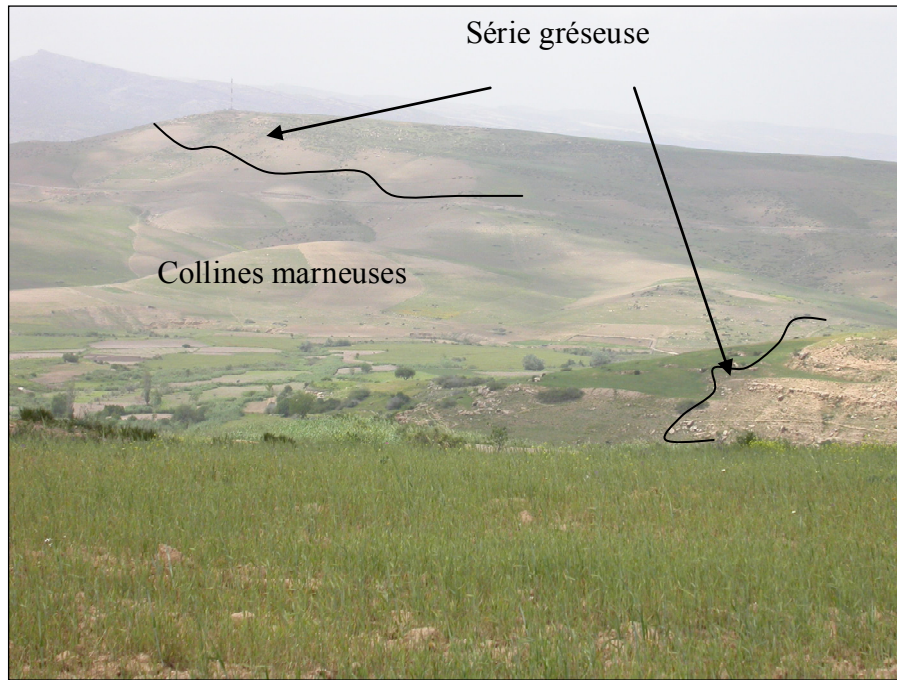
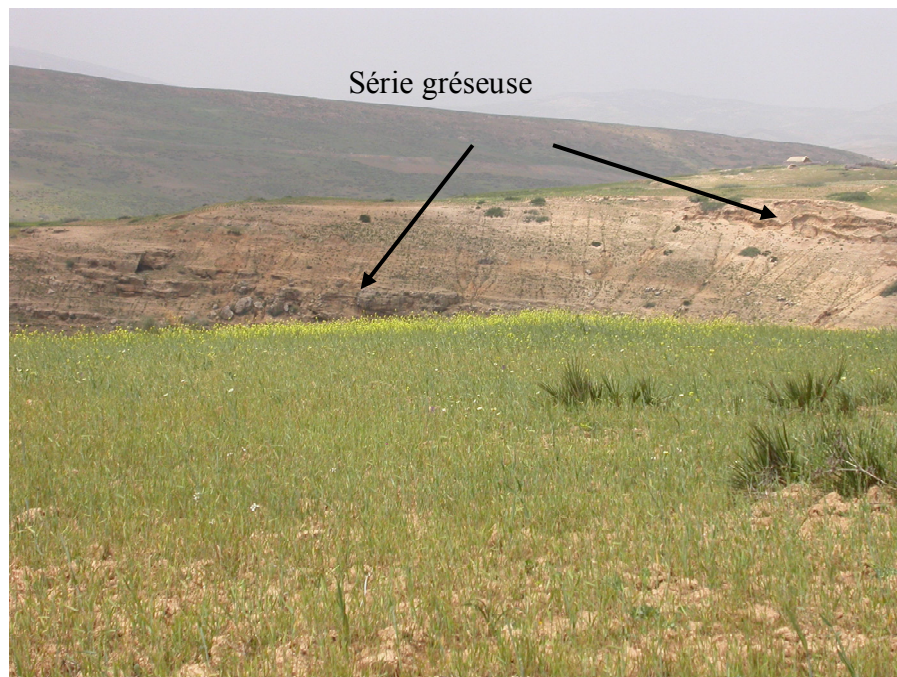


Figure 11: Colonne lithostratigraphique synthétique du bassin de Saïss (Essahlaoui, 2000)



*Figure 12: Vue panoramique des formations néogènes de la zone*



*Figure 13: Les formations gréseuses du Néogène du Saïss de Fès*

### ***- Tortonien***

Au dessus des formations burdigaliennes Figure 11, on trouve épaisse série marneuse d'âge Tortonien (Figure 15, Figure 16). Cette formation est caractéristique d'un dépôt marin profond. Elle présente des couleurs variées : blanche, grise, bleue, etc. L'épaisseur de cette formation augmente du sud vers le nord où elle dépasse les 1000 m (Forage N° IRE° 1929/15) dans la région de Douyet appartenant à notre secteur d'étude. Ces marnes affleurent largement au nord du bassin et parfois dans certaines vallées. Elles sont reconnues aussi par plusieurs forages profonds.

### ***- Messinien***

Le Miocène dans le secteur s'achève avec des marnes grises, des marnes sableuses et parfois par des marnes à intercalation sableuse du Messinien. Au nord de bassin cette formation messinienne repose sur les marnes du Tortonien avec un niveau détritique à la base. (Ait Brahim, 1991).

### **e) Pliocène**

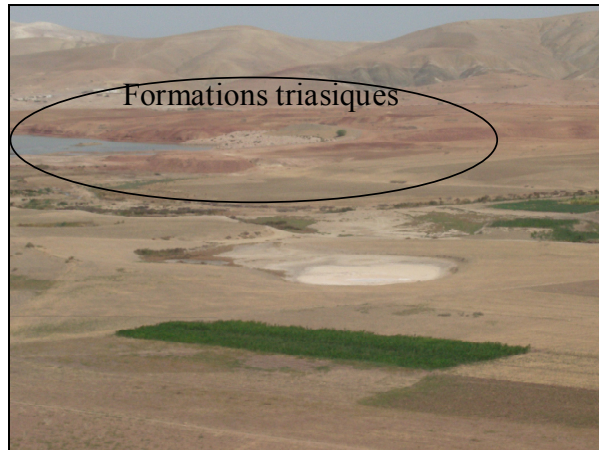
#### ***- Le Pliocène inférieur***

Les faciès de Pliocène inférieur sont généralement sableux avec des sables à matrice carbonatée. Ces faciès peuvent atteindre une épaisseur de 50 à 80 m (Wernli, 1987). Les formations du Pliocène inférieur présentent des variations latérales en allant vers l'est du bassin où elles diminuent d'épaisseur jusqu'à la disparition près de la ville de Fès (Figure 6d, Figure 17).

#### ***- Le Pliocène moyen***

Les formations du Pliocène inférieur se poursuivent par les sables fauves de couleur rouge, jaune ou brune du Pliocène moyen. C'est une série qui se développe essentiellement à l'ouest du bassin où elle peut atteindre 30 m à côté de Meknès (Taltasse, 1953).

Les sables fauves affleurent dans les parties les plus orientales du bassin de Saïss (Ain Taoujdat, Sbaâ Aïoun).



*Figure 14: Affleurement des formations triasiques au nord du secteur d'étude près de barrage Sidi Chahed*



*Figure 15: Affleurement des marnes du Miocène surmontées par les formations Plio-quaternaires à l'est de Meknès dans la vallée d'Oued Mahdouma*



*Figure 16: L'affleurement des marnes du Miocène au nord de la zone*

### - Le Pliocène supérieur

La série pliocène se termine avec des formations des sables à pseudoïdes de 2 m (Cirac, 1987), au dessus desquels s'installe une alternance de calcaire argileux et de calcaire micritique d'une épaisseur environ 30 m. cet étage est reconnu aussi par des calcaires lacustres (Taltasse 1953). Ces calcaires lacustres se présentent sous forme massive avec une épaisseur maximale au centre de la plaine de Saïss (Figure 17) (Szabo, 1976 in Essahlaoui, 2000).

Dans la région de Fès, cette séquence fluvio-deltaïque présente des variations latérales de faciès en fonction de sa position géographique. Cette variation latérale se détecte essentiellement par le passage latéral des calcaires lacustres vers des conglomérats. (Ahmamou, 1987)

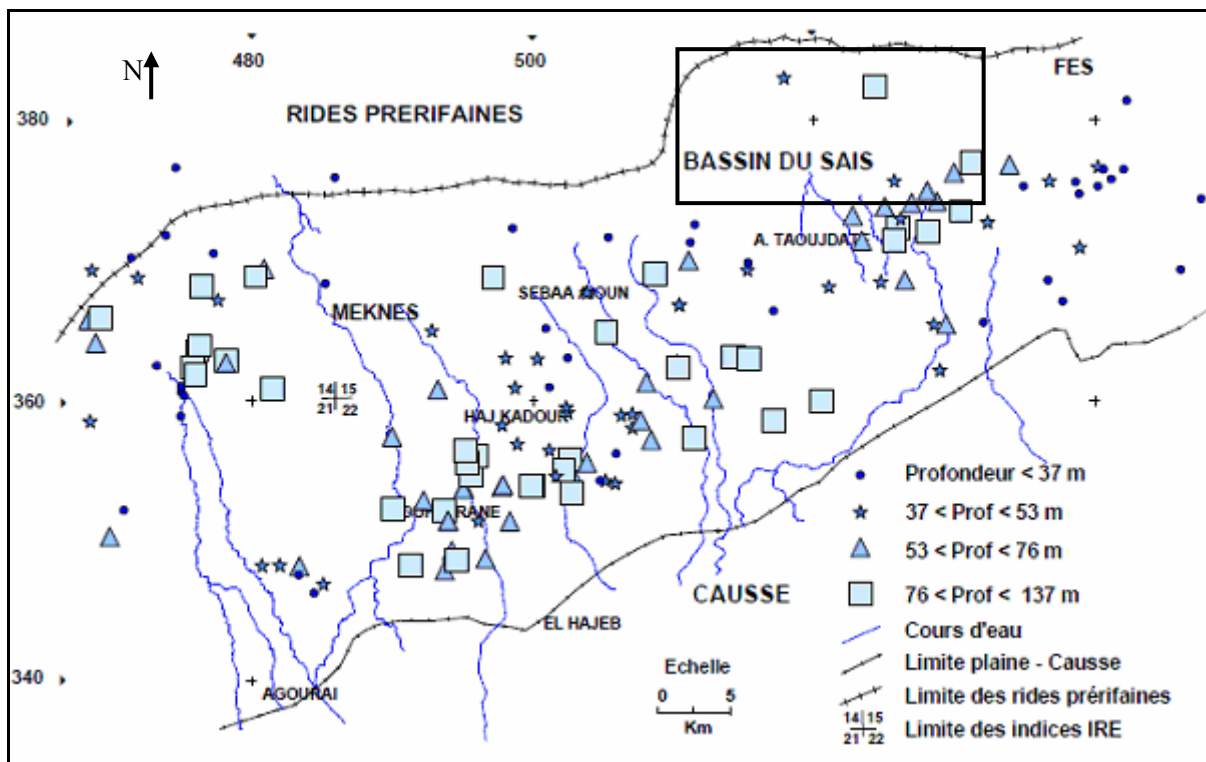


Figure 17: Profondeurs des toits des marnes miocènes ou épaisseur du Plio-Quaternaire (Amraoui, 2005)

### f) Le Quaternaire

La colonne stratigraphique de la zone se termine par un quaternaire très diversifié constitué essentiellement par des tufs, des conglomérats et des microconglomérats, des limons fauves (Figure 11). Ce sont des dépôts d'alluvions et un complexe fluvio-deltaïque daté du Quaternaire moyen et supérieur (Ahmamou, 1987).

#### II-1-2-2) Evolution paléogéographique du bassin de Saïss au cours du Néogène

Le remplissage de la vaste dépression saïssienne a débuté par la transgression tortonienne et s'est poursuivi jusqu'au Quaternaire.

**Au Tortonien :** Les formations détritiques grossières de base constituent le premier terme de la transgression. Elles caractérisent un environnement littoral. La transgression se poursuit par le dépôt de la

puissante série de marne. La mer tortonienne se prolonge jusqu'au centre du Moyen Atlas (Charrière, 1984 ; Fedan, 1988, *in* Amraoui, 2005).

**Au Messinien** : Au début du Messinien, la mer est plus profonde et la méditerranée communique avec l'Atlantique (Cirac, 1985, *in* Amraoui, 2005) à travers le couloir de Fès-Taza. L'exhaussement isostatique de la région de Taza et l'arrivée de l'olisthostrome pré-rifain à la fin de Messinien (Aït Brahim, 1991) ont induit la réduction de la tranche d'eau et ensuite la fermeture du bassin sud-rifain et la rupture de la communication entre la méditerranée et l'Atlantique.

**Au Pliocène inférieur** : l'émersion de la zone pré-rifaine et des rides pré-rifaines ainsi que l'extrémité NE de la Meseta marocaine (Boumir, 1987) ont alimenté le bassin par des apports détritiques qui sont à l'origine des sables à matrice carbonatée.

**Au Pliocène moyen**, cette phase est considérée lacustre (Cirac, 1987) à la fin du Pliocène moyen, les sables fauves se déposent pendant la transgression moghrebienne dont le rivage se situerait à l'est d'Ain Taoujdate, ils vont être émergés suite à l'effet conjugué des corps sableux et de la remontée du seuil d'El Kansera (Boumir, 1987).

**Au Pliocène supérieur** : L'accentuation de l'exhaussement isostatique ainsi que l'accentuation du relief des rides pré-rifaines, ont pour conséquence l'isolement du bassin suite à l'émersion du seuil d'El Kansera connu à cette époque. Le bassin va connaître une phase lacustre, qui s'est manifestée pratiquement dans tout le Maroc, à l'exception du domaine rifain (Choubert et al. 1962).

**Au Quaternaire** : Cette phase est caractérisée par le soulèvement général des reliefs des rides avec des apports importants détritiques grossiers (Cirac, 1987). Les dépôts sont essentiellement fluvio-deltaïques caractérisant cette époque ce qui justifie que le milieu de dépôt est totalement continental.

### **II-1-2-3) Aspect structural**

La zone est affectée par de nombreuses familles de failles de direction généralement NE-SW, E-W et NW-SE témoignant d'une évolution tectono-sédimentaire et géodynamique en plusieurs phases. Ces fracturations sont en relation avec l'évolution des domaines montagneux encadrant ce bassin (Moyen Atlas et le domaine rifain)

#### **a) Les Familles de faille**

D'après les études (géologiques, structurales, géophysiques, etc.) antérieures, le bassin de Meknès-Fès est affecté par un certain nombre de failles qui sont organisées selon des familles qui peuvent être résumé comme suit :

-famille de failles de direction NE-SW (orientation hercyniennes), ce sont les failles les plus abondantes, telle la faille d'Ain Lorma (d'après les études sismiques, Kenafi 2002) et d'autres failles déterminées par des études géoélectriques (Essahlaoui ; 2000). Ces failles se manifestent à la surface par des flexures bien visibles de même direction (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

-Famille de failles de direction perpendiculaire à la première (NW-SE) à NNW-SSE tel que la flexure d'Ain Taoujdate qui subdivise structurellement le bassin en deux compartiments

-Famille de faille de direction E-W, qui suit la structure chevauchante de l'ensemble prérimaire et les rides prérimaires.

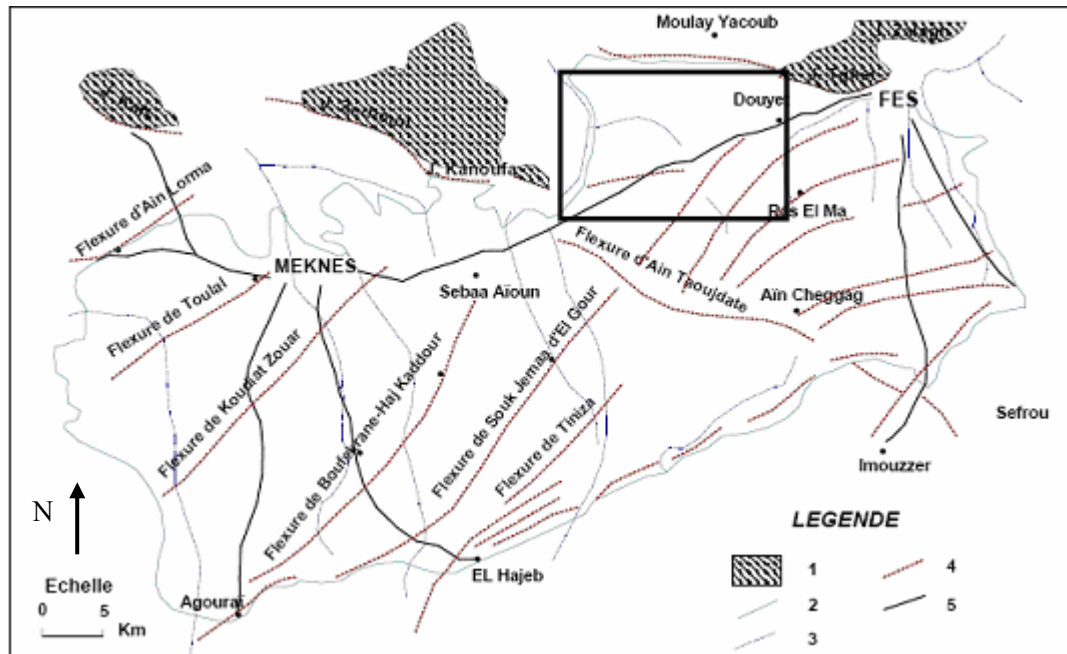


Figure 18: Carte de la répartition des différentes flexures du Bassin de Saïss (Fassi, 1999)

## b) Les phases tectoniques

Ces nombreuses familles de failles sont les témoins des phases tectoniques qui ont structuré le bassin de Saïss. Ces phases sont datées depuis le Tortonien jusqu'au Quaternaire.

-La première phase tectono-sédimentaire d'âge tortonien. Les contraintes de cette phase sont de direction N 90, cette phase est responsable des émergences des rides prérimaires et le début de l'ouverture du bassin de Saïss suivant une distension orientée NW-SE (Amraoui, 2005).

-La deuxième phase tectono-sédimentaire d'âge tortonien supérieur-messinien. La contrainte majeure de cette phase est de direction N 00° à N 40°. Elle a pour conséquence l'accentuation de l'individualisation du bassin de Saïss le long de la direction NE-SW qui est la direction hercynienne (Faugères, 1981). Les rides prérimaires sont totalement émergées. L'érosion de ces dernières alimente le bassin en produits détritiques interstratifiés dans les marnes.

-La troisième phase d'âge plio-quaternaire, est caractérisée par une compression de direction nord-sud. Cette phase est bien enregistrée dans les calcaires lacustres. (Ahmamou et Chalouan, 1988 ; Amraoui, 2005). En effet cette phase est à l'origine de la morphologie actuelle de Saïss.



### **c) Conclusion**

Cette synthèse géologique nous a permis de présenter la lithostratigraphie de la région, les conditions paléogéographiques à l'origine de la diversification des formations, essentiellement celle relative au Plio-Quaternaire, ainsi que les phases tectoniques responsables de l'édification du bassin.

Le bassin de Saïss est une vaste dépression à remplissages mio-plio-quaternaire. Ces formations recouvrent en discordance un substratum paléozoïque, triasique et liasique. Le Paléozoïque est essentiellement schisteux et grésopélimitique surmonté par un Trias argilo-gypsifère, la série de substratum s'achève avec un Lias calcaro-dolomitique. La série de la couverture débute par des dépôts détritiques grossiers, de conglomérats qui se déposent en discordance sur les formations liasiques témoignant le début de la transgression marine. Il s'agit des dépôts caractérisant un milieu littoral. Cette série se poursuit par une épaisse formation marneuse caractérisant un milieu marin profond. La série pliocène évoluant depuis des formations de milieux qui tendent à l'émersion (marnes à matrice carbonatée, des grès) puis lacustre au Pliocène supérieur (calcaire lacustre). La série du remplissage se termine avec des dépôts fluvio-deltaïques quaternaires purement continentaux.

La structuration du bassin est en liaison avec l'évolution tectonique des domaines montagneux encadrant (le domaine rifain au nord et le domaine méseto-atlasique au sud) (Modèle et profils sismiques Annexe I). La zone est fracturée par de nombreuses familles de failles dont les directions dominantes sont N°45 et N°145.t

La structuration profonde du bassin de Saïss en horst et graben a été montrée aussi par quelques profils sismiques présentés à l'Annexe I.

## II-2) Cadre Hydroclimatologique

Par sa situation géographique entre deux domaines montagneux au nord du Maroc, le bassin est sous un étage climatique méditerranéen avec un climat semi-aride à hiver tempéré et humide et à été chaud et sec dans un régime semi-continentale.

### II-2-1) Précipitation

La pluviométrie est parmi les paramètres ayant une grande utilité pour la définition des différents paramètres climatiques. Les précipitations moyennes annuelles du bassin sont en moyenne de 600 mm avec un maximum de 1000 mm sur les hauteurs plus au nord dans le rif et un minimum de 300 mm et les vallées du Beht, (Agence du bassin hydraulique du Sebou, 2006). Les deux stations, de Fès et d'El Hajra, sont les plus proches du secteur d'étude. Elles montrent respectivement des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 499 mm et de 508mm (Essahlaoui, 2000).

L'année pluviométrique est composée de deux saisons, une saison humide qui s'étend d'octobre à mai et une autre sèche de juin à septembre.

### II-2-2) Température

La température est un indice indispensable pour la caractérisation climatique, ainsi que pour le calcul des différents paramètres relatifs au bilan hydrique. Les études antérieures ont montré que, dans le bassin de Saïss, la température maximale moyenne annuelle est de l'ordre de 23 °C alors que la température minimale est d'environ 11°C.

Durant l'année, les mois les plus chauds sont juillet et août avec une température maximale moyenne mensuelle de 32 °C, alors que la température minimale est de 5°C enregistrée pendant le mois de janvier. (Tabyaoui, 2005).

### II-2-3) Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est faiblement développé dans la partie nord du bassin (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) de Meknès-Fès, par contre on note l'existence de plusieurs zones marécageuses telle que Merget Douyet (Figure 1). Le Saïss de Fès, où se localise notre zone d'étude, est drainé par l'oued Fès et les affluents en rive droite de l'oued Mikkès tel que l'oued N'ja. Tous ces oueds sont des affluents du Sebou. Le sens d'écoulement de ces Oueds est généralement du SSE au NNW excepté l'oued N'ja qui a une direction générale NS, et l'oued Fès qui coule de l'ouest vers l'est. Ces deux derniers prennent naissance au niveau du bassin, et sont presque exclusivement alimentés par la pluie tombée sur le bassin. (ABHS, 2006).

La superficie de Saïss de Fès drainée par des petits affluents du Sebou est de l'ordre de 445 km<sup>2</sup>. La pente moyenne des cours d'eau est très faible, elle est de l'ordre de 0,5%.

Les principaux oueds qui drainent la zone sont : l'oued Fès qui prend naissance à la source de Ras El Ma et collecte les eaux des sources, Ain Khachi, Ajoune Bergama, Gueltat laârais, draine la nappe jusqu'à la sortie du plateau de Saïss, ainsi que oued N'ja qui traverse le milieu de secteur d'étude.

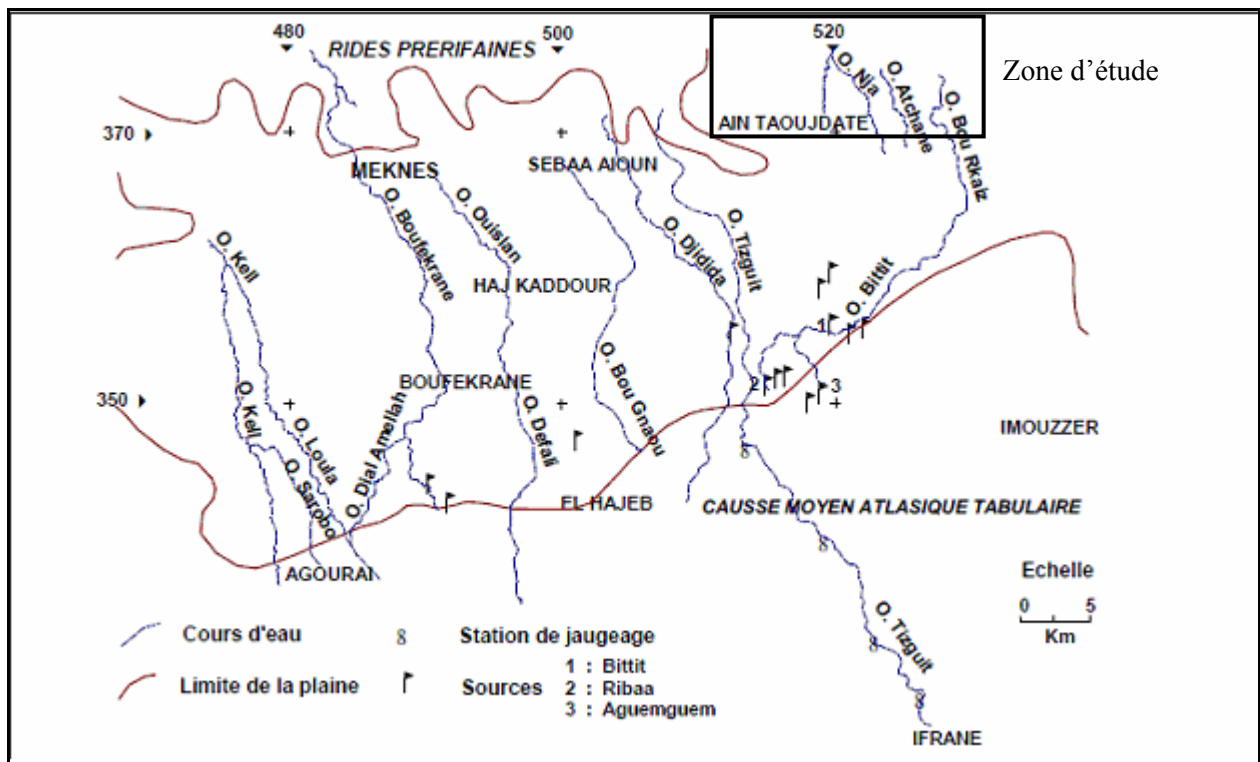


Figure 19: Carte du réseau hydrographique du bassin de Saïss (in Amraoui, 2005)

#### II-2-4) Les Sources

La majorité des sources dans le bassin sont des exurgences des nappes phréatiques plio-quadernaires et profondes du Lias. Ces sources sont caractérisées par (Essahlaoui, 2000) :

- la variabilité de leurs débits (de quelques litres par seconde à 1 700 l/s),
- leur origine (Nappe phréatique ou profonde ou bien mixte)
- leur température (Sources thermales tel celles de My Yacoub, Ain Skhounate, etc.)

## II-3) Cadre Hydrogéologique

### Introduction

Les ressources en eau souterraine de bassin de Saïss constituent une part importante du patrimoine hydraulique du bassin du Sebou et représente environ 20% du potentiel national (ABHS, 2006). Les eaux souterraines de Saïss jouent un rôle déterminant dans le développement socio-économique de la région. Ces ressources sont équipées pour l'approvisionnement en eau potable, notamment de Fès, Meknès et les centres avoisinants (1000 m<sup>3</sup>) (ABHS, 2006) ; elles constituent aussi un facteur essentiel de développement des activités agricoles. Les années de sécheresse qui ont frappé la région depuis 1980 ont eu un impact négatif sur les réserves d'eau de la plaine. Cet impact s'est traduit par une réduction des apports d'eau naturelle, induisant la surexploitation des eaux souterraines.

Il existe deux principales formations aquifères dans la région : les calcaires et les calcaires dolomitiques liasiques et les calcaires lacustres et sables fauves plio-quaternaires.

Dans le bassin, généralement, le Lias forme un aquifère profond captif. Les calcaires et les sables fauves du Plio-Quaternaire forment une nappe dont la piézométrie fluctue avec la pluviométrie et la recharge. Ces aquifères sont discontinus du fait de la tectonique et de l'érosion des formations correspondantes. Le Lias est caractérisé par des failles qui sont susceptibles de former des barrières hydrauliques vis-à-vis de l'écoulement latéral des eaux souterraines.

#### II-3-1) Nappe phréatique

La nappe superficielle du bassin de Saïss a une superficie de 2100 km<sup>2</sup> environ. Les formations aquifères de cette nappe sont constituées principalement par les sables, les conglomérats et localement par les calcaires lacustres (Essahlaoui, 2000) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Elle est alimentée par les infiltrations des eaux pluviales. Son niveau piézométrique est variable. La profondeur du niveau aquifère dépasse 70 m dans le plateau de Meknès et elle est de l'ordre de 30 m dans la région d'Ain Taoujdate et en bordure du causse, et elle est inférieure à 10 m dans la plaine de Douyet (Essahlaoui ; 2000). Noter que dans la région de Douyet, la nappe phréatique est constituée par plusieurs niveaux aquifères séparés par des argiles et marnes. La minéralisation de l'eau est faible et reste inférieure à 1 g/l. Cette nappe est utilisée pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation.

L'analyse des fluctuations piézométriques de la nappe, montre que cette dernière est très sensible à la sécheresse. La partie Est de la nappe a connu une baisse variable de 6 à plus de 20 m en certains endroits (Forage N° IRE 2759/15) au cours des deux dernières décennies.

L'écoulement de cette nappe est de SSE vers le NNW avec un gradient moyen de 0,5 %. Les caractéristiques hydrodynamiques de cette nappe sont résumées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Ce tableau montre que le réservoir superficiel présente des caractéristiques hydrodynamiques variables ceci est en accord avec son hétérogénéité.

Tableau 1: Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère superficiel (Chamayou et al, 1975 ; D.R.P.E, 1989 ; in Essahlaoui, 2000)

Caractéristiques Hydrauliques	Intervalle de variation	Moyenne
T (m <sup>2</sup> /s)	2.10 <sup>-5</sup> à 1.10 <sup>-1</sup>	6,6.10 <sup>-2</sup>
K (m/s)	1.10 <sup>-5</sup> à 5.10 <sup>-2</sup>	6,65.10 <sup>-3</sup>
S	1.10 <sup>-3</sup> à 6,5.10 <sup>-2</sup>	1,8.10 <sup>-2</sup>

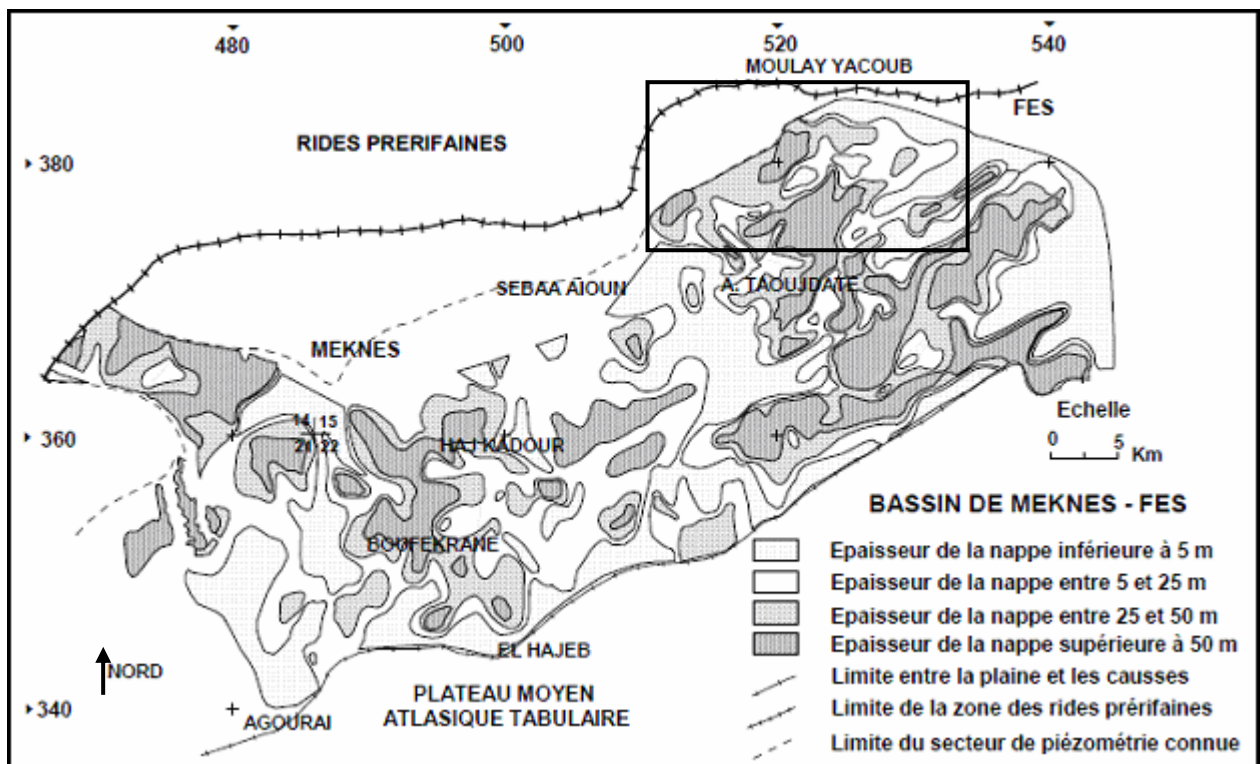


Figure 20: Carte de l'épaisseur de la nappe phréatique du Plio-Quaternaire (in Amraoui, 2005)

### II-3-2) Nappe profonde

La nappe profonde a pour réservoir les formations carbonatées du Lias et parfois les molasses et les conglomérats de la base du Miocène transgressif qui surmontent le Lias (Essahlaoui, 2000 ; Amraoui, 2005). Cette nappe est libre au niveau du causse et s'enfonce ensuite sous les formations marneuses imperméables du Miocène puis y devient captive.

Cette nappe est alimentée par les eaux d'infiltration au pied du Causse (Essahlaoui ; 2000). Elle se manifeste par différents types des sources au niveau du causse, du Bassin, ainsi qu'au pied des rides sud rifaines au Nord.

Les caractéristiques hydrodynamiques de cette nappe sont présentées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

*Tableau 2: Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère profond (in Essahlaoui, 2000)*

Caractéristiques Hydrauliques	Zone d'alimentation	Au Bassin
T (m <sup>2</sup> /s)	$> 6.10^{-1}$	3 à $9.10^{-2}$
K (m/s)	$3.10^{-3}$	1 à $10.10^{-4}$

### III) Conclusion

Cette première partie nous a permis de bien définir les différents aspects, géomorphologique, géologique, et hydroclimatique de la région d'étude ainsi que caractéristiques hydrodynamiques des différents réservoirs.

Le bassin de Saïss est une zone plate encadrée par deux grands domaines montagneux, le domaine rifain au nord et le domaine atlasique au sud. La lithologie du bassin montre deux grands ensembles : le premier comprend le substratum avec les schistes paléozoïque, l'ensemble argilo-gypsifère triasique et finalement les formations calcaro-dolomitiques liasiques. Le deuxième ensemble correspond à des formations de remplissage post-néogène. Cette série débute par un Miocène transgressive (Burdigalien) avec à la base des conglomérats miocènes, suivis des marnes témoignant un milieu marin. Ensuite les formations pliocènes marin avec des sables à matrice carbonatée, des grès et finalement des sables fauves montrent le passage régressif du milieu marin à un milieu lacustre puis à un milieu purement continental durant le Quaternaire avec des dépôts fluvio-lacustres.

La zone est affectée par un nombre de failles de différentes directions, les plus abondantes ce sont celles de la direction N 45° et N 145°. Le bassin a subi plusieurs phases tectoniques dont trois importantes.

Les informations hydroclimatologiques sur la zone d'étude ont montré que le bassin de Saïss est sous un climat semi-aride, avec été chaud et sec et un hiver tempéré et humide. Le réseau hydrographique est peu développé dans le Saïss de Fès avec les principaux oueds (Oued N'ja et Oued Fès).

L'étude hydrogéologique relève l'existence d'un nombre très élevé de sources, qui se situent à la limite de contact avec le causse et avec le prérief.

Le bassin de Saïss présente deux principales nappes, il s'agit de la nappe phréatique qui a pour réservoir les formations plio-quaternaires (calcaires lacustre, conglomérats, sable et grès), et la nappe profonde qui circule dans les calcaires et les calcaires dolomitiques liasiques.

Les synthèses fondées sur les caractéristiques géologiques, climatologiques, hydrologiques et hydrogéologiques sont indispensables pour les interprétations des résultats des analyses statistiques et géostatistiques envisagées pour les deux prochains chapitres.

Le travail présenté dans la suite de ce document a pour objectif de préciser la géométrie des formations plio-quaternaires et miocène dans le secteur d'étude en se fondant sur une analyse détaillée des données de sondages électriques verticaux Schlumberger.





Présentation et analyse de l'ensemble des sondages  
électriques

---



# CHAPITRE II : PRESENTATION ET ANALYSE DE L'ENSEMBLE DES SONDAGES ELECTRIQUES

---

---

## Introduction

Après la présentation de nature géologique, ce chapitre est consacré à l'analyse statistique des résistivités apparentes de sondages électriques verticaux. Cette partie a pour finalité de caractériser électriquement une partie du bassin situé entre Fès et Meknès. Cette caractérisation se résumera à l'obtention de paramètres statistiques globaux et en une analyse de la distribution horizontale et verticale des résistivités apparentes dans le bassin.

En géologie, généralement les statistiques s'applique pour l'analyse des données telle que les données hydrologiques, géochimiques, géophysiques...etc. dont on envisage l'étude. Elles permettent essentiellement de décrire les liens entre les variables et les observations d'une matrice de données (Marcotte, 2000). Plus précisément, voici une série de questions auxquelles les différentes méthodes statistiques pourraient fournir des réponses :

-peut-on prédire le comportement d'une variable à partir d'une ou plusieurs autres variables (problème de régression) ? Quelle est la meilleure équation de prédiction ?

-peut-on identifier, voir interpréter, des facteurs pouvant expliquer les variations observées dans les différentes variables (analyse factorielle) ?

-peut-on filtrer de nos données l'effet dû à des facteurs indésirables (analyse factorielle)?

-peut-on identifier les différences existantes entre divers groupes parmi nos données (analyse discriminante) ? Comment utiliser ces différences pour prédire le groupe auquel appartient une nouvelle (observation) ?

-quelles sont les observations (ou les variables) ayant des ressemblances au niveau de leur comportement (classification automatique) ?

Donc on déduit de ce qui précède l'utilité de l'analyse statistique. Elle permet d'étudier des phénomènes complexes à partir de faits constatés, ainsi de critiquer et analyser les données des résistivités apparentes à l'aide des différentes formules et méthodes. Notre base de données est constituée d'une série de 219 sondages électriques verticaux de type Schlumberger. Les écartements des électrodes AB/2 varient de 3 m à 3 000 m. Ce qui est classiquement nommé individus sera, ici, l'ensemble des SEV et les variables seront les résistivités apparentes par distance inter-électrode d'injection (AB/2) ; la base de données est donc

constituées de 22 séries statistiques composées de 219 individus. Ces sondages ont été effectués par la compagnie africaine de géophysique de 1982 à 1984 à la demande de l'Agence Du Bassin Hydraulique du Sebou. Nous allons présenter ci-dessous les principales méthodes statistiques utilisées pour analyser ces données :

- les méthodes descriptives ou la statistique descriptive,
- l'analyse factorielle : analyse en composantes principales (ACP),
- la méthode de la classification hiérarchique ascendante.

Les méthodes descriptives ou la statistique descriptive : la statistique descriptive consiste à décrire une réalité difficile à définir car comportant une grande part d'aléatoire. Elle est considérée comme un travail de simplification par le calcul des paramètres définie (Janvier, 1999), à l'issue de cette étude, nous aurons calculé par série de résistivités apparentes

- les paramètres de position tels : la moyenne, la médiane ; les quartiles et percentiles,
- les paramètres de dispersion, tels l'étendue, la variance, et l'écart-type,
- le coefficient de variation rapport de l'écart-type à la moyenne.

L'analyse factorielle : analyse en composantes principales (ACP). Elle consiste en la représentation d'un nuage de points qui correspond à une matrice de données avec N individus et P variables dans un sous-espace de l'espace à P dimensions absorbant le maximum de la variance totale du nuage ; son principe, ici, sera donc la projection du nuage des 219 individus (SEV) dans un espace à 22 dimensions (nombre de variables soit de résistivités apparentes pour chaque distance inter-électrodes d'injection  $AB/2$ ).

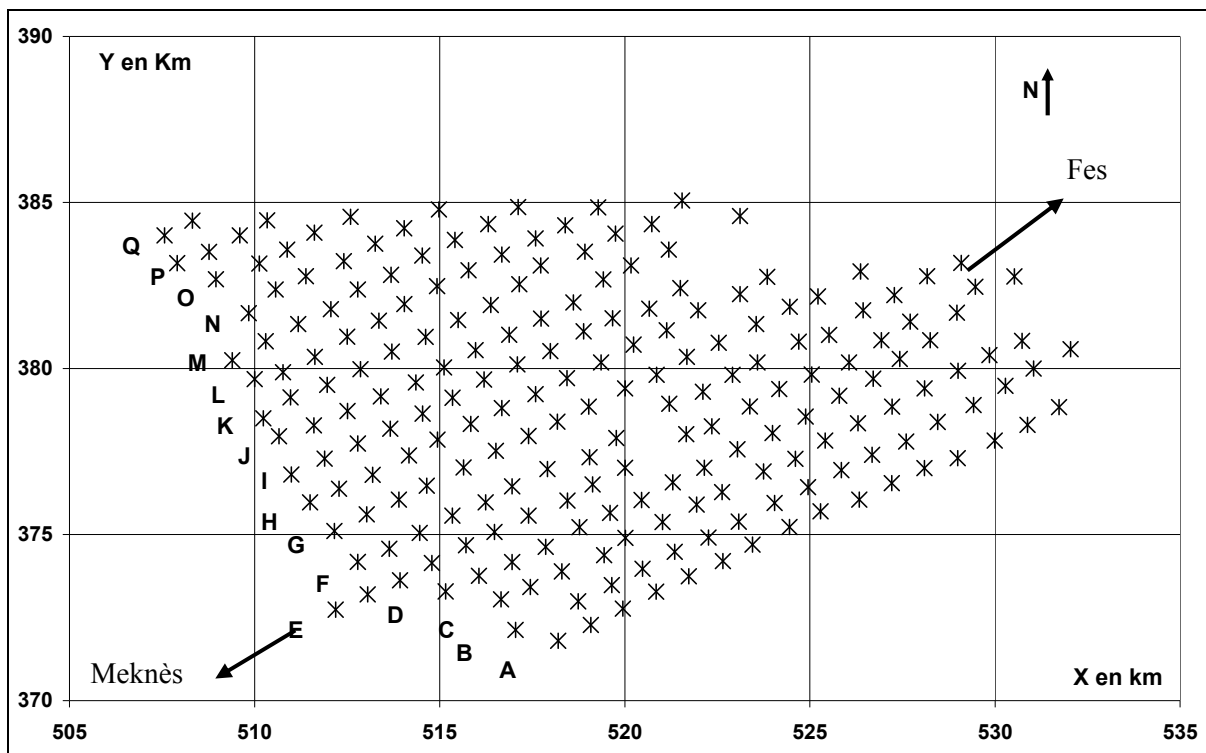
La méthode de la classification hiérarchique ascendante à l'aide du critère de Ward et en utilisant la distance euclidienne sera ensuite employée. Cette méthode conduit à résumer les données à l'aide de la construction d'une typologie, ou partition, des individus en classes homogènes. Cette méthode se base sur l'agrégation progressive des individus par diminution de l'inertie interclasse et corrélativement de l'augmentation de l'inertie intraclasse, le calcul des distances étant fondé sur la métrique euclidienne.

## I) Statistique descriptive

### Introduction

La statistique descriptive est une étape primordiale et indispensable pour toute étude d'un grand nombre de données. Notre base de données constituée de 219 sondages électriques verticaux, et de 22 variables constitue un nombre important de point de mesure (valeurs des résistivités apparentes). Il est nécessaire de résumer ces données afin d'avoir une image englobant et résumant l'information électrique de la zone. La première étape consiste en la détermination des différents paramètres classiques en statistique descriptive pour l'ensemble de tous les sondages électriques et pour chaque écartement d'électrodes  $AB/2$  allant de 3 m à 3 000 m.

### I-1) Analyse globale de la répartition des données



La carte de la Figure 21 montre la répartition spatiale des sondages électriques dans le Bassin de Saïss ; les sondages ont été faits et organisés de sorte à s'aligner selon une direction NE-SW. Au total 219 SEV auront été réalisés suivant 17 lignes, avec les mêmes écartements  $AB/2$  (de 3 m à 3 000 m). Les sondages électriques sont distribués selon un maillage plus ou moins régulier d'environ 1 000 m de côté. Ces lignes des sondages électriques ont été nommées du sud au nord selon l'ordre alphabétique de A à Q.

La Figure 22 présente les fonctions de répartition des résistivités apparentes pour quelques écartements AB/2 représentatifs des 22 écartements, résumant ainsi l'ensemble des écartements (l'ensemble des fonctions de répartition est présenté en annexe II).

L'étude de ces fonctions de répartition pour les différents écartements AB/2 montre une tendance globale à l'homogénéisation des valeurs des résistivités apparentes avec les valeurs AB/2 croissantes (Figure 22). Les valeurs de résistivités sont très étalées pour les premières mesures correspondant aux faibles écartements AB/2 mettant ainsi en évidence l'hétérogénéité des terrains auscultés pour ces écartements, terrains qui sont connus pour appartenir au complexe Plio-Quaternaire. Elles sont plus au moins homogènes et centrées vers des faibles valeurs de résistivité pour les grands écartements AB/2 ; cette homogénéité des résistivités apparentes confirme les connaissances géologiques sur l'épaisseur de la couche marneuse conductrice datée du Miocène (Figure 11)

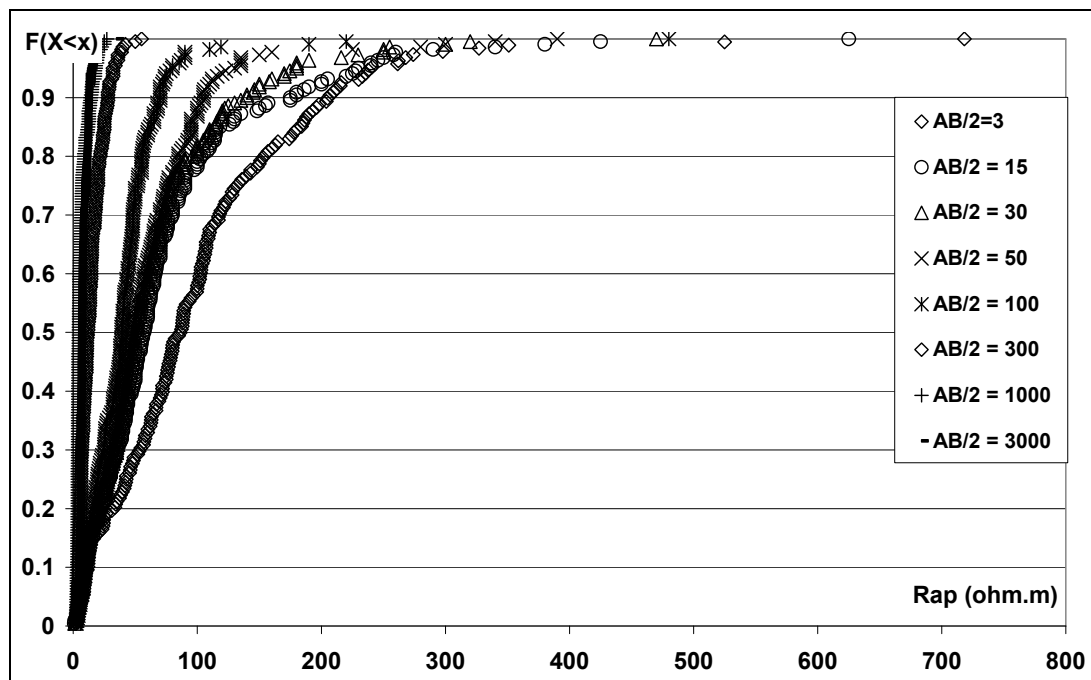


Figure 22: Fonction de répartition des résistivités apparentes pour des AB/2 différents

Ce premier aperçu sur la distribution des données nous permet de distinguer deux types de courbe, l'un présentant un fort étalement à droite (par exemple pour AB/2=50 m), l'autre très redressé et un troisième établissant un continuum entre les deux. Ces courbes traduisent des caractéristiques géoélectriques différentes ; celles du premier type (faibles valeurs de AB/2) sont hétérogènes et de résistivités apparentes élevées et celles du deuxième type sont homogènes et de résistivités apparentes faibles (par exemple AB/2= 1 000 m). Le troisième type correspond à des profondeurs d'investigation intermédiaires pour lesquelles les terrains profonds influencent déjà les valeurs des résistivités apparentes obtenues en surface.

Après cette présentation globale, une analyse des paramètres de position et de dispersion des 22 séries est proposée en introduisant la notion de pseudo-sondage.

## I-2) Les paramètres de position

La Figure 23 montre dans un diagramme bilogarithmique, les valeurs des moyennes, médianes et quartiles (Q1 et Q3) des résistivités apparentes pour l'ensemble des 219 sondages et par valeurs AB/2 croissantes. On parlera de « pseudo-sondage moyen » et de « pseudo-sondage médian ».

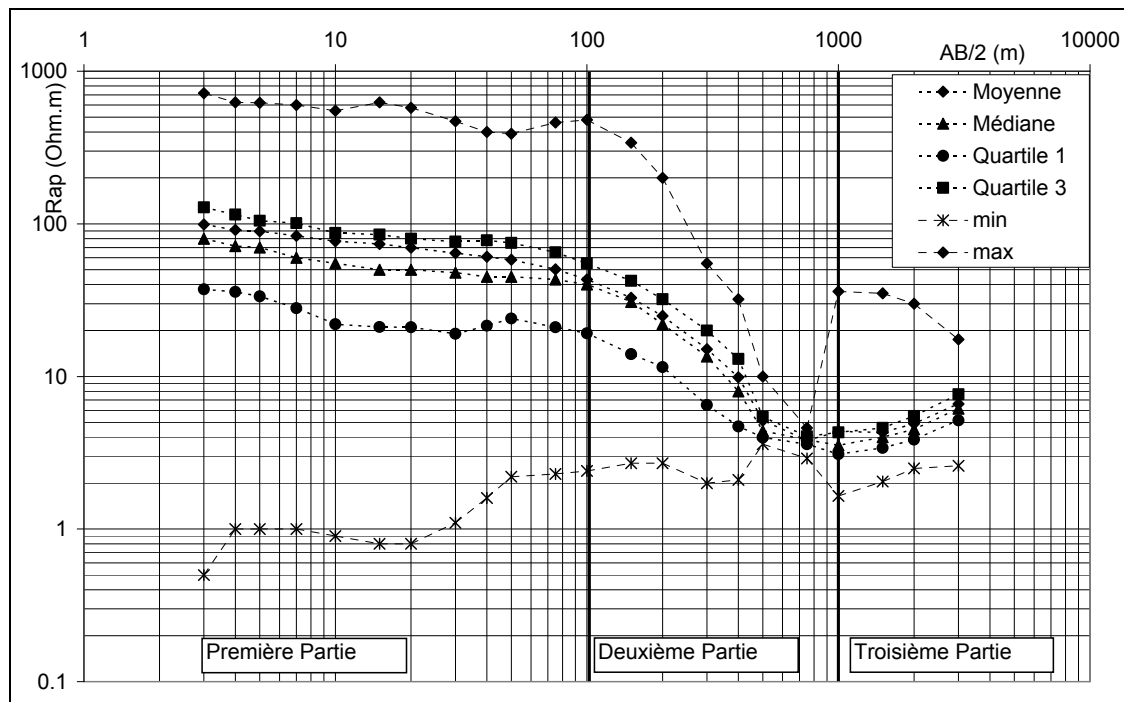


Figure 23: Représentation graphique des paramètres de position en fonction d'AB/2

D'une façon globale, ces quatre paramètres descriptifs nous permettent de bien distinguer les trois parties évoquées au paragraphe précédent. Cette distinction est possible sur chacun des pseudo-sondages (moyen, médian, et ceux représentant les quartiles 1 et 3):

- **La première partie** correspond aux faibles valeurs AB/2 ( $AB/2 \leq 100$  m). Elle montre des valeurs des résistivités apparentes les plus élevées, avec :

-des moyennes qui évoluent dans l'intervalle  $[50 ; 100]$   $\Omega$  ;

-des médianes des résistivités inférieures aux moyennes ; l'écart entre les moyennes et les médianes est au maximum égal à  $23 \Omega.m$  obtenu pour  $AB/2 = 15$  m, et un minimum de  $7 \text{ ohm.m}$  pour  $AB/2 = 75$  m.

Les valeurs des quartiles 3 sont légèrement supérieures à celles des moyennes, avec une valeur maximale égale à  $128,0 \text{ ohm.m}$  enregistrées pour le plus petit écartement  $AB/2 = 3$  m, et un minimum de  $65,0 \text{ ohm.m}$  pour  $AB/2 = 75$  m. Les valeurs des quartiles 1 sont par contre, nettement inférieures, avec une valeur maximale de  $37,2 \text{ ohm.m}$  obtenue également pour  $AB/2 = 3$  m, et un minimum de  $21,0 \text{ ohm.m}$  pour  $AB/2$  égal à  $20$  m et  $75$  m. Les valeurs extrêmes pour cette partie sont caractérisées par des maxima

très élevées et qui peuvent atteindre une valeur de 718 ohm.m et des minima très faibles 0,5 ohm.m obtenu pour  $AB/2 = 3$ .

- **La deuxième partie** correspond aux valeurs  $AB/2$  intermédiaires (de 100 m à 750 m), cette tranche montre une diminution remarquable des valeurs des résistivités. Les valeurs des différents paramètres ont tendance à devenir égales pour des écartements  $AB/2$  supérieurs à 750 m. On note aussi une tendance au rapprochement des valeurs extrêmes pour cette partie, avec augmentation des minima (3 ohm.m pour  $AB/2 = 750$  m), et diminution des maxima (5 ohm.m pour  $AB/2 = 750$  m).

- **La troisième partie** se manifeste par la remontée des différentes courbes présentant les paramètres calculés ( $AB/2 \geq 1000$  m). Les valeurs de la moyenne, la médiane ainsi que des quartiles calculés pour ces formations sont toutes proches les unes des autres. Les valeurs extrêmes ont tendance à s'éloigner avec des valeurs d'environ  $\max = 36$  ohm.m et  $\min = 2$  ohm.m chiffrées  $AB/2 = 1000$  m.

A l'issue de cette première présentation nous pouvons conclure que les terrains analysés montrent une distribution des résistivités apparentes hétérogènes avec généralement un étalement des fortes valeurs (médianes inférieures aux moyennes) pour les parties analysées avec des espacements inter-électrodes inférieurs à 100 m. Les valeurs minimales sont essentiellement dues au sondage F17 (situé au nord-est de la zone) et Q2 qui se situe au nord où affleurent les formations triasiques conductrices (Figure 23) . Pour la deuxième et la troisième parties ( $100 \text{ m} < AB/2$ ), la distribution des résistivités apparentes a tendance à l'homogénéisation en fonction des valeurs  $AB/2$  croissantes (médianes très proches des moyennes). Les valeurs extrêmes les plus rapprochées pour cette tranche sont ceux des sondages F11 (5 ohm.m) et Q1 (3 ohm.m).

### **I-3) Les paramètres de dispersion**

La Figure 24 24 montre, dans un diagramme bilogarithmique, les valeurs des étendues (l'étendue d'une série statistique est l'intervalle compris entre la valeur maximale et la valeur minimale de la série) des écart-types, et de l'intervalle interquartile des résistivités apparentes pour l'ensemble des 219 sondages et par valeurs  $AB/2$  croissantes. Pour chacun des paramètres représentés, globalement trois parties peuvent être identifiées; la première partie présente des valeurs élevées de l'étendue et de l'écart-type et cela pour les écartements  $AB/2$  inférieurs à 100 m. La deuxième partie, pour les écartements  $AB/2$  allant de 100 m à 750 m montre des valeurs décroissantes et nettement plus faibles que les précédentes particulièrement pour les valeurs de l'étendue. La dernière partie est détectable par la remontée des trois paramètres (écart-type, étendue et intervalle interquartile) et cela pour les écartements  $AB/2 > 750$  m.

- **Les valeurs d'étendue** correspondant à des écartements  $AB/2$  inférieurs à 100 m fluctuent autour de 390 ohm.m à plus de 716 ohm.m montrant leur relativement grand étalement particulièrement du côté des faibles valeurs d'écartements comme nous l'avons vu ci-dessus lors de l'étude des valeurs des troisièmes quartiles. Trois ruptures dans la décroissance de l'étendue apparaissent pour  $AB/2 = 15$  m et  $AB/2$



= 100 m et 1000 m ; ces ruptures sont dues essentiellement à l'augmentation des valeurs maximum des résistivités apparentes obtenues successivement pour les sondages (Q2, O5, et F11) pour ces écartements.

La décroissance de la courbe la plus importante des étendues conduit à une valeur de 1,7 ohm.m pour  $AB/2 = 750$  m (diminution brutale, des valeurs maximales et des valeurs minimales) ensuite on note une petite augmentation jusqu'à 35 ohm.m vers  $AB/2 = 1\ 000$  m et finalement une diminution jusqu'à 14,9 ohm.m pour  $AB/2 = 3\ 000$  m.

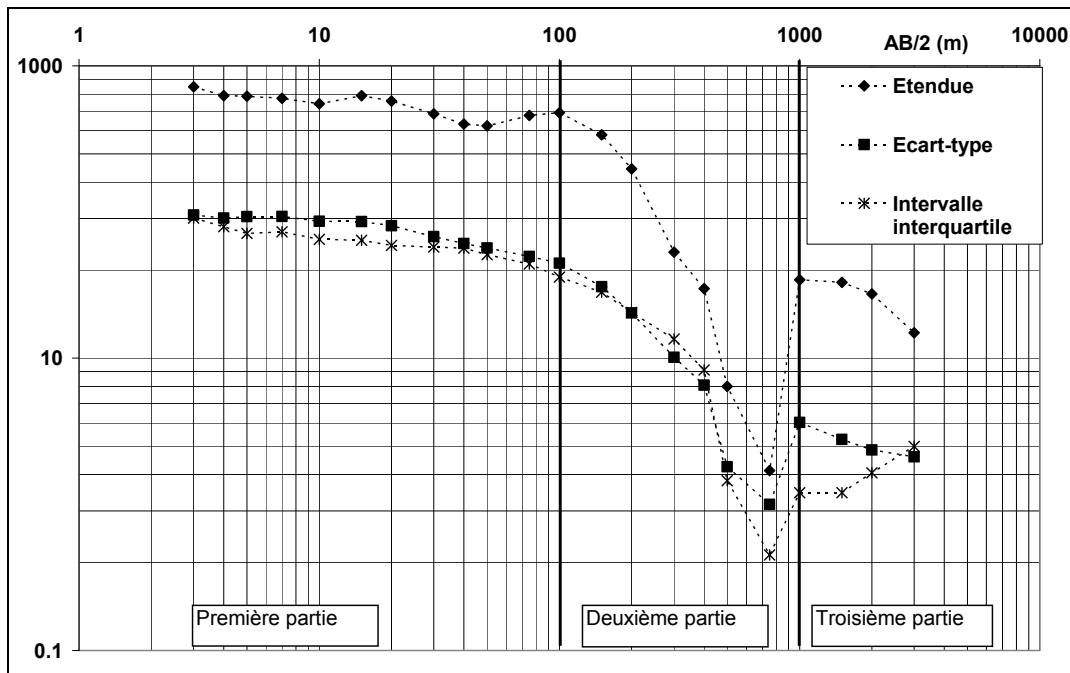


Figure 24: Représentation graphique des paramètres de dispersion en fonction d'AB/2

- **Pour l'écart-type**, la courbe de la Figure 24 est étudiée en conservant la distinction des trois parties établies précédemment : la première correspond à des mesures effectuées pour des écartements  $AB/2$  inférieurs à 100 m et montre les valeurs d'écart-type les plus élevés, avec 96 ohm.m pour  $AB/2 = 3$  m, et 44 ohm.m pour  $AB/2 = 100$  m.

On note que, à chacune des remontées de l'étendue, l'écart type a tendance à moins décroître, voire à rester constant ce qui indique que la contribution à la variance (et donc à l'écart type) des valeurs extrêmes identifiées précédemment reste faible.

Au delà de cet écartement les valeurs de l'écart-type diminuent progressivement jusqu'à atteindre la rupture enregistrée pour tous les autres paramètres et qui correspond à  $AB/2 = 1000$  m où la valeur est de l'ordre de 4 ohm.m.

- **Pour l'intervalle interquartile**, qui est représenté également Figure 24, on remarque que les valeurs de ce paramètre sont globalement proches des valeurs de l'écart-type jusqu'à  $AB/2 = 750$  m où les valeurs deviennent un peu plus faibles.

D'après ces trois paramètres ; on peut conclure que les premiers terrains auscultés avec des écartements  $AB/2 \leq 100$  m, montrent une grande variabilité des résistivités apparentes traduisant l'hétérogénéité des terrains superficiels (principalement le complexe Plio-Quaternaire), cette observation est cohérente avec ce que l'on sait par ailleurs de la mise en place de ces terrains. Cette hétérogénéité est de moins en moins marquée au fur et à mesure que les terrains auscultés deviennent de plus en plus profonds et atteignent les formations conductrices définies auparavant au moyen des paramètres de position, et qui sont connues pour être les marnes miocènes conductrices, homogènes et très épaisses.

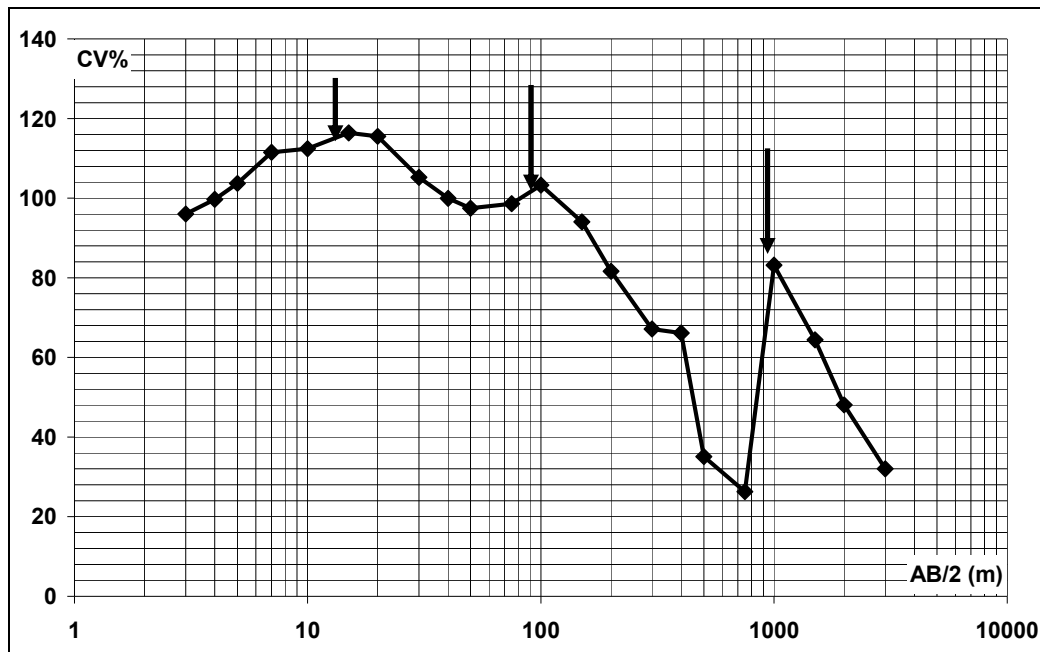


Figure 25: Représentation graphique du coefficient de variation

La Figure 25, montre la représentation du coefficient de variation (rapport de l'écart type à la moyenne) en fonction d'AB/2 sur un diagramme semi-logarithmique. Ce coefficient présente des valeurs élevées et varie entre 50 % et plus de 100 % pour des écartements AB/2 inférieurs à 100 m. Les valeurs du coefficient de variation s'élèvent pour atteindre un premier maximum pour  $AB/2 = 15$  m ; elles décroissent ensuite pour atteindre un deuxième maximum pour  $AB/2 = 100$  m. Par la suite, les valeurs du coefficient de variation diminuent jusqu'à  $AB/2 = 750$  m où elles augmentent pour atteindre une valeur de 83 % vers  $AB/2 = 1000$  m. Les valeurs recommencent ensuite à diminuer jusqu'à une valeur de 32 % pour  $AB/2 = 3000$  m.

Les valeurs du coefficient de variation permettent ainsi de mettre en évidence la variabilité relative des résistivités apparentes et de confirmer la grande variabilité des valeurs de résistivité apparente obtenues pour des écartements inférieurs à 100 m tout en montrant la plus faible variabilité des résistivités apparentes pour des écartements supérieurs à 100 m, traduisant toujours l'homogénéité plus grande des résistivités apparentes obtenues en auscultant des terrains de plus en plus profonds. Cependant la présence de trois maxima demande à être expliquée.

Les deux premiers maxima sont précédés d'une baisse de l'étendue, d'une faible baisse des valeurs d'écart type et d'une baisse des valeurs moyennes, médianes et troisièmes quartiles : cela met donc en évidence l'importance de la baisse des valeurs de résistivité apparente relativement à leur variabilité. Ceci est dû aux sondages K2 pour  $AB/2 = 15$  m et L2 pour  $AB/2 = 100$  m qui ont une valeur élevée de la résistivité apparentes pour ces espacements. Le dernier maximum pour  $AB/2 = 1000$  m, est associé aux minima des valeurs des paramètres de position et de l'étendue, d'une stationnarité des valeurs d'écart type mais d'une légère augmentation de l'étendue; la variabilité est donc, dans ce cas, encore importante relativement aux valeurs des moyennes ; cette variabilité est due au SEV Q1 qui a une valeur de résistivité apparente de l'ordre de 36 ohm.m pour  $AB/2 = 1000$  m.

Dans l'ensemble et à la suite de l'analyse de ces différents paramètres, on peut distinguer, en se fondant sur les transitions marquées par les maxima, les minima, les coefficients de variation, les étendues et les écart-types, trois grands ensembles de terrain superposés et totalement différents l'un de l'autre dans le bassin de Saïss.

**Le premier ensemble**, correspond aux formations de subsurface détectées par des écartements  $AB/2$  inférieurs à 100 m; cet ensemble est très hétérogène, résistant, ce qui traduit la grande variabilité dans l'espace des formations plio-quadernaires constitués par des grès, des sables fauves, des conglomérats, et des calcaires lacustres.

**Le deuxième ensemble** en dessous du premier, conducteur et relativement homogène et plus épais, correspond d'après les connaissances sur la géologie locale à l'épaisse formation marneuse du Miocène.

**Le troisième ensemble** ( $AB/2 \geq 1000$  m), détectable par l'augmentation des différents paramètres calculés (moyenne, médiane, etc.), correspond géologiquement aux formations mollassiques de la base du Miocène et aux calcaires liasiques.

L'analyse précédente est globale ; elle ne prend pas en compte la position dans l'espace des sondages électriques. L'étude de la répartition spatiale des sondages électriques sera envisagée plus loin. Afin de bien cerner le problème on propose ci-dessous de compléter cette approche statistique en cherchant à mettre en évidence des relations de proximité entre les SEV au moyen de méthodes de la statistique multidimensionnelle (ACP et CHA).

## **II) ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES SEV AVEC 22 VARIABLES**

L'analyse en composantes principales se base sur l'étude du tableau des données constitué pour une première étape des 219 individus (Sondages électriques) et des 22 variables étudiées dans les paragraphes précédents ; une deuxième étape sera consacrée à l'analyse des données de subsurface, donc en conservant les 219 individus mais avec seulement 15 variables (AB/2 varie de 3 m à 300 m).

L'analyse en composantes principales consiste à rechercher un petit nombre de nouvelles variables. Les axes engendrés par les variables sont appelés axes principaux. Les variables étant choisies pour former une base orthonormée (Ruben Rodriguez Herrera et al, 2002), elles sont orthogonales entre elles, normées et non corrélées. Elles permettent de définir la sphère unité dite aussi cercle corrélatore, et résument aussi bien que possible les données de départ.

Les composantes principales sont des combinaisons linéaires des variables centrées réduites. Cette méthode permet d'étudier les relations entre individus en fonction de leurs proximités, ainsi que les corrélations entre les variables (Escofier et al, 1998). Plusieurs critères permettent d'obtenir les composantes, le critère de l'inertie est le plus ancien (Pearson, 1901) et qui a comme avantage, que l'approche est géométrique (Tenenhaus, 2007).

Le principe de l'approche géométrique de PEARSON (Tenenhaus, 2007) consiste en ce que chaque ligne du tableau de données est considérée comme un point dans un espace à P dimensions ; pour visualiser le positionnement des individus les uns par rapport les autres, il faut projeter le nuage de points de l'espace à P dimensions sur un espace de plus faible dimension.

La représentation dans l'espace des variables se base donc sur la représentation de chaque ligne de la matrice des données qui correspond aux valeurs des résistivités apparentes pour les différents écartements AB/2 ; on obtient ainsi pour chaque sondage, un vecteur dans un espace à 22 dimensions qui à pour origine le centre de gravité (moyenne des valeurs).

Pour présenter les données, on peut construire des cartes d'individus dans des plans avec les premiers axes principaux résumant ainsi bien la majorité de la variabilité. Dans notre cas, les trois premières composantes principales seront suffisantes. On peut aussi présenter des cartes des variables on utilisant les corrélations entre les variables pour les premières composantes principales.

### **II-1) Analyse en composantes principales des 219 sondages électriques et 22 variables**

Dans notre première étape on travaille en prenant en compte la totalité des sondages électriques sans tirage et avec une pondération uniforme. L'étude a été faite sur des données centrées réduites.

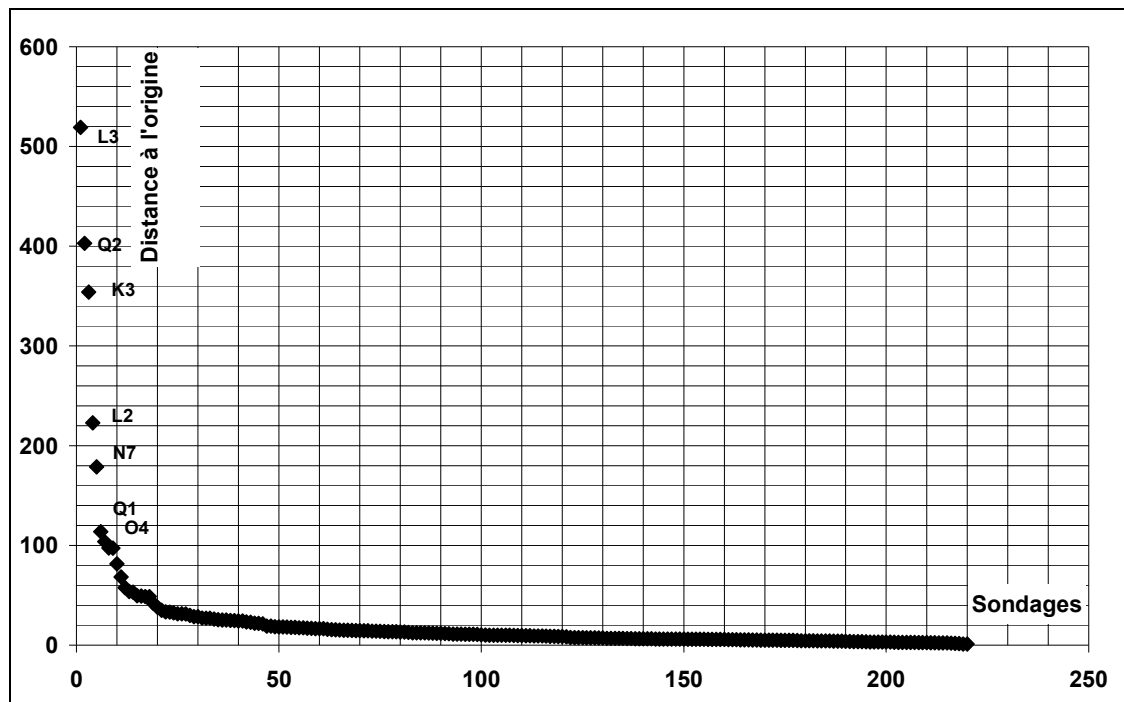


Figure 26: Distance à l'origine G des sondages électriques verticaux

La première analyse après le calcul de la distance des sondages au centre de gravité G du nuage de points, a montré l'existence des sondages électriques qui présentent une distance très importante à l'origine (Figure 26). Donc ils contribuent beaucoup à la variance totale. Par conséquent ces sondages sont dits atypiques et du fait de leur forte contribution ils sont éliminés avant d'entamer l'analyse en composantes principales.

Ces points sont successivement (Figure 26) : L3, Q2, K3, L2, N7, Q1, O4, I7, J3, K10, M7, I4, J4, L9, P4, J7, H9, L10. Le calcul de leur sondage moyen, montre que, ses sondages présentent des résistivités apparentes très élevées par rapport aux autres sondages dans la zone, et la majorité de ces sondages atypiques sont situés au nord-ouest et au nord-est du secteur (Voir Annexe II). Après l'élimination de ces 18 sondages électriques, on recalcule les principaux paramètres descriptifs de 201 sondages électriques. Les résumés statistiques sont présentés dans les Figure 27, Figure 28, Figure 29.

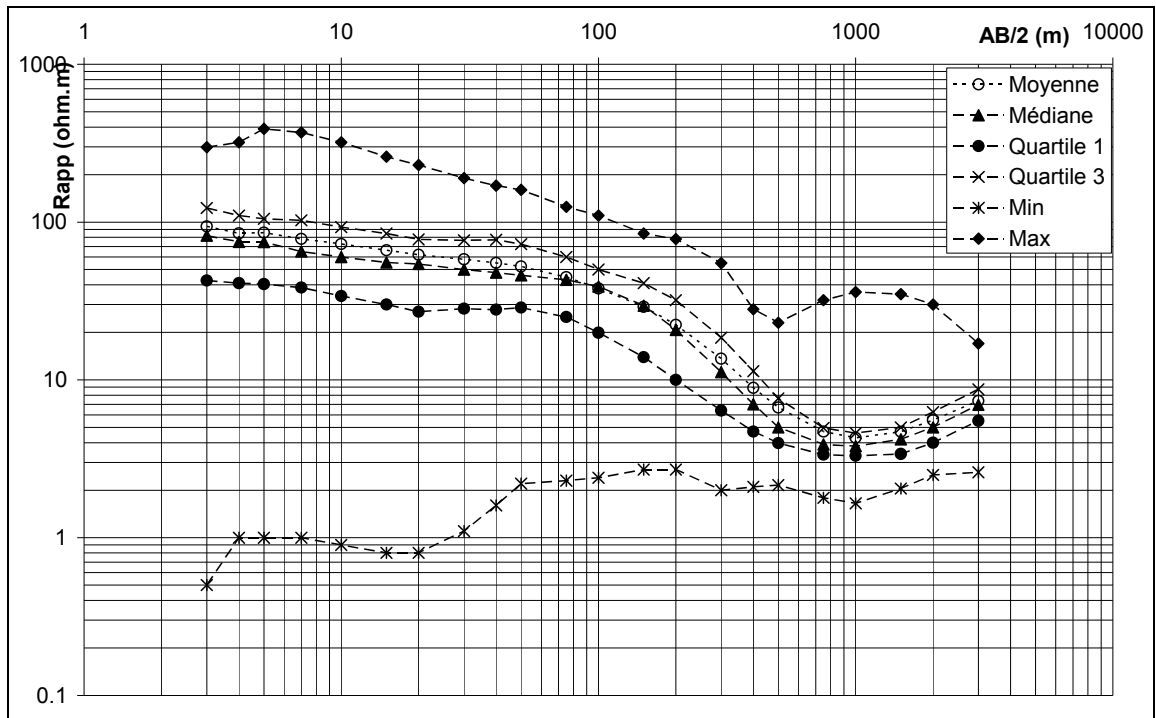


Figure 27: Paramètres de position pour 201 SEV

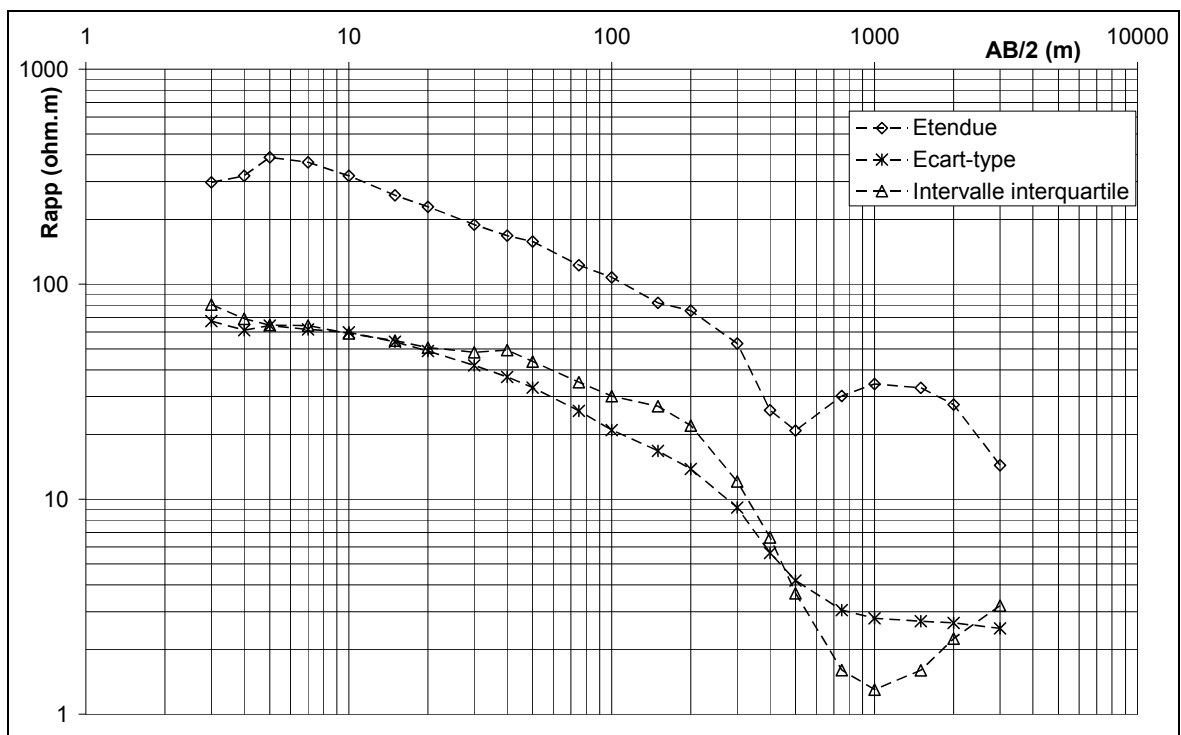


Figure 28: Paramètres de dispersions pour 201 SEV

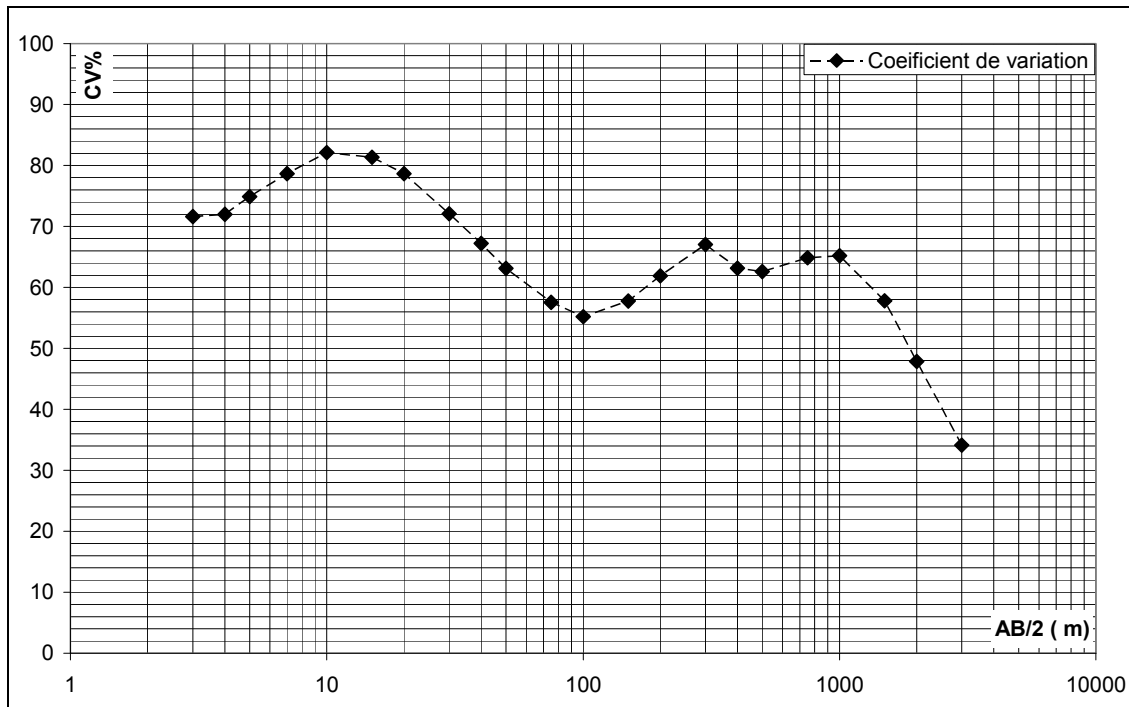


Figure 29: Coefficient de variation pour 201 SEV

Une analyse simple des Figure 27, Figure 28, Figure 29, montrent que l'allure globale des différents paramètres calculés est semblable à celle obtenue avant l'élimination des 18 SEV atypiques. Une moyenne et un écart-type présentant respectivement les paramètres de position et de dispersion diminuent progressivement avec AB/2 croissant. Pour le coefficient de variation on note un changement radical dans les valeurs, essentiellement pour le maxima qui est était enregistré pour  $AB/2 = 100$  m. On peut donc conclure que ces sondages atypiques ayant des résistivités apparentes très élevées ou bien très faibles tels les sondages L9, L10, Q1, Q2 par rapport au reste des sondages de la région ont un influence importante dans l'augmentation de la variance des résistivités apparentes ce qui confirme l'intérêt de les éliminer.

Après avoir identifié les individus atypiques, une analyse de la matrice des corrélations linéaires des variables prises deux à deux s'impose avant toute analyse factorielle. L'analyse de la matrice des corrélations (Tableau 3) nous conduit à distinguer, selon les valeurs des coefficients qui varient naturellement entre -1 et +1, trois cas principaux :

- Cas 1 : on considère ici les couples de variables pour lesquels les valeurs sont proches de 1. Les variables sont fortement corrélées linéairement et positivement entre elles, c'est le cas des résistivités apparentes pour les faibles valeurs AB/2, ( $AB/2 = < 300$  m).

- Cas 2 : on rassemble dans ce cas les couples de variables pour lesquels les valeurs des coefficients de corrélation sont proches de 0. Cela est observé pour les résistivités apparentes correspondant aux écartements variant entre  $AB/2 = 100$  m et  $AB/2 = 300$  m associés aux faibles écartements. ( $AB/2 = < 300$  m).

- Cas 3 : on réunit dans ce cas les couches de variables pour lesquels les coefficients de corrélation linéaire des résistivités apparentes pour les grands écartements  $AB/2$ , sont positifs ou négatifs et différents de zéro montrant ainsi une éventuelle dépendance mais de nature purement statistique.

De ce qui précède, on montre toujours que les terrains du premier ensemble, montrent les résistivités apparentes les plus élevées et les plus dispersées. Ces terrains présentent une grande hétérogénéité avec une relative concentration des valeurs inférieures aux médianes et un étalement des fortes valeurs montrées par des valeurs de troisième quartile distantes des valeurs des médianes. L'étendue et l'écart-type des valeurs des résistivités apparentes sont très élevées pour cet ensemble, cela met en évidence la grande variabilité des formations plio-quaternaires dont on sait qu'elles sont constituées de calcaires lacustres, sables fauves, grès et des conglomérats (Cirac, 1987).

Les deuxième et troisième ensembles, sont marqués par la nette diminution de tous les paramètres étudiés conduisant à des valeurs très faibles. Ils sont caractérisés par les valeurs des moyennes, et des médianes quasi égales entre elles à partir de  $AB/2 = 100$  m. La diminution progressive de la dispersion des valeurs aboutit pour  $AB/2 = 1\ 000$  m à des valeurs presque égales entre elles, de la moyenne, la médiane, et des quartiles. On note aussi la diminution des valeurs de l'étendue, de l'écart-type, et du coefficient de variation jusqu'à  $AB/2 = 1\ 000$  m, ce qui traduit l'influence de l'homogénéité des niveaux miocènes (deuxième ensemble) qui sont des formations marneuses de basse énergie avant qu'elles ne soient influencées par les conglomérats de la base du Miocène et par les formations calcaro-dolomitique du Lias (troisième ensemble) qui font remonter les valeurs des résistivités apparentes tout en conservant des valeurs médianes légèrement inférieures aux valeurs moyennes.

Cette étude reste toujours une description globale des résistivités apparentes dans le bassin et ne tient pas compte de la position dans l'espace des sondages, ce qu'on va faire dans les paragraphes suivants.



Tableau 3: Coefficient de corrélation des 22 variables de 201 sondages électriques

AB/2=	3	4	5	7	10	15	20	30	40	50	75	100	150	200	300	400	500	750	1000	1500	2000	3000	
3	1,00																						
4	0,95	1,00																					
5	0,76	0,84	1,00																				
7	0,65	0,77	0,95	1,00																			
10	0,55	0,69	0,84	0,90	1,00																		
15	0,48	0,62	0,74	0,83	0,93	1,00																	
20	0,44	0,58	0,64	0,74	0,86	0,97	1,00																
30	0,36	0,48	0,54	0,64	0,75	0,89	0,96	1,00															
40	0,29	0,39	0,46	0,54	0,64	0,80	0,89	0,97	1,00														
50	0,24	0,33	0,40	0,47	0,55	0,71	0,80	0,92	0,98	1,00													
75	0,16	0,23	0,29	0,32	0,36	0,48	0,57	0,72	0,83	0,91	1,00												
100	0,10	0,14	0,19	0,20	0,22	0,33	0,40	0,54	0,66	0,76	0,93	1,00											
150	0,00	0,02	0,05	0,06	0,08	0,15	0,19	0,30	0,40	0,49	0,71	0,88	1,00										
200	-0,08	-0,07	-0,04	-0,02	-0,01	0,05	0,07	0,15	0,23	0,30	0,52	0,73	0,94	1,00									
300	-0,19	-0,18	-0,17	-0,15	-0,14	-0,10	-0,09	-0,06	0,00	0,04	0,21	0,43	0,73	0,88	1,00								
400	-0,28	-0,29	-0,28	-0,26	-0,25	-0,22	-0,22	-0,20	-0,17	-0,14	0,00	0,18	0,48	0,68	0,91	1,00							
500	-0,32	-0,34	-0,33	-0,32	-0,30	-0,29	-0,28	-0,28	-0,26	-0,25	-0,15	-0,01	0,26	0,46	0,75	0,94	1,00						
750	-0,28	-0,31	-0,28	-0,27	-0,26	-0,26	-0,26	-0,27	-0,28	-0,29	-0,28	-0,23	-0,08	0,08	0,37	0,66	0,85	1,00					
1000	-0,13	-0,16	-0,12	-0,13	-0,13	-0,12	-0,12	-0,12	-0,15	-0,18	-0,25	-0,28	-0,26	-0,16	0,04	0,30	0,53	0,85	1,00				
1500	0,09	0,08	0,13	0,12	0,10	0,12	0,13	0,15	0,12	0,08	-0,04	-0,16	-0,29	-0,32	-0,30	-0,19	-0,04	0,32	0,73	1,00			
2000	0,17	0,16	0,21	0,20	0,17	0,19	0,21	0,23	0,20	0,16	0,04	-0,09	-0,26	-0,32	-0,35	-0,30	-0,19	0,16	0,59	0,97	1,00		
3000	0,19	0,20	0,23	0,24	0,25	0,27	0,30	0,32	0,29	0,25	0,11	-0,03	-0,22	-0,29	-0,38	-0,37	-0,28	0,01	0,38	0,76	0,82	1,00	

## II-2) Présentation graphique des valeurs propres et les nouveaux axes factoriels

La projection des vecteurs représentant les données centrées réduites sur l'espace des axes principaux engendre un nuage des points qui est étendu dans la première direction principale. Les directions principales sont définies par les axes principaux associés aux valeurs propres les plus élevées. Le premier axe associé à la première valeur propre la plus élevée (Figure 30), définit la première direction d'allongement du nuage.

Par la suite, on n'étudie la projection des variables que sur les premiers axes principaux qui absorbent en général, la majeure partie de la variance contenue dans le tableau initial des données.

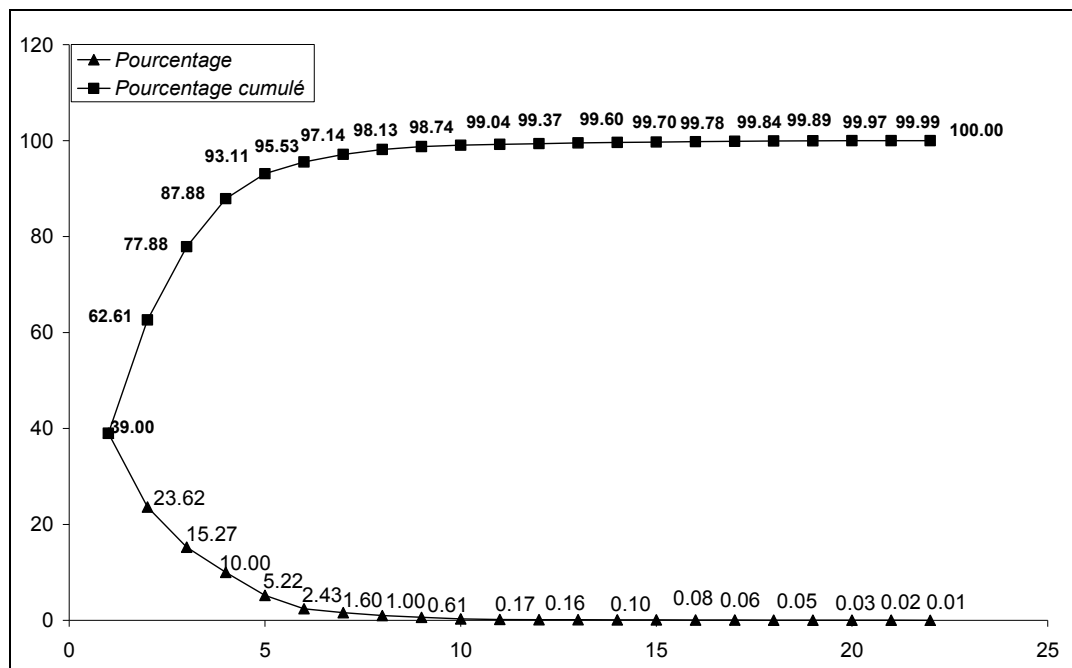


Figure 30: Représentation graphique des pourcentages et pourcentages cumulés de la variance absorbée par les valeurs propres

Nous remarquons que la valeur de la première valeur propre n'est pas très élevée. Le premier axe absorbe 39 % de la variance délivrée par le tableau des données alors que le deuxième axe n'en absorbe que 23 %. Le troisième, lui, en absorbe 15%. C'est ainsi que les trois premiers axes liés aux trois premières valeurs propres absorbent 77 % de la variance totale (Figure 30).

Les premiers résultats obtenus de l'analyse en composante principale sont présentés graphiquement sous la forme, d'une part du graphe du nuage des points représentant les individus sur deux des trois premières composantes principales et, d'autre part, des cercles des corrélations associés, puisque la représentation graphique des individus et des variables ne se fait pas dans le même repère. En effet, les proximités entre individus s'interprètent en termes de similitudes par contre les proximités entre les variables le sont en termes de corrélation.

### **II-3) Représentation graphique des données dans le plan factoriel F1 (39%)-F2 (24%)**

Le premier plan factoriel avec ces deux premières composantes principales absorbe 63 % de la variance totale, ou ce qui revient au même, de l'inertie totale.

#### ***Cartes des variables***

La carte des variables (Figure 31) présente la projection des variables sur les nouveaux axes. Le cercle des corrélations représenté par le plan F1-F2, montre que, les résistivités apparentes obtenues avec les petits écartements  $AB/2$  sont corrélées positivement à l'axe F1 (premier facteur) : les résistivités apparentes pour les écartements  $AB/2 = 15$  et  $AB/2 = 20$  sont les variables qui contribuent le plus fortement à la définition de l'axe F1. Cette corrélation se dégrade lorsque les écartements augmentent pour devenir nulle lorsque les écartements sont égaux à 200 m. Au delà de cet écartement les résistivités apparentes sont négativement corrélées à l'axe F1 mais en ayant une faible saturation dans le plan F1F2, ce qui n'était pas le cas précédemment. Les résistivités apparentes pour les très grands écartements présentent des saturations faibles dans le plan F1F2 tout en étant positivement corrélées aux axes F1 et F2. Le deuxième axe F2, oppose essentiellement les résistivités apparentes pour les écartements  $AB/2$  les plus grands et certains écartements intermédiaires allant de  $AB/2 = 75$  à  $AB/2 = 500$ . Les résistivités apparentes pour les écartements  $AB/2 = 200$  et  $AB/2 = 300$ , sont fortement corrélées négativement à cette deuxième composante principale et donc contribuent à la définition de cet axe

On conclut donc que ce plan avec ces deux premiers axes factoriels nous permettra de séparer (Cf. paragraphe suivant), les sondages électriques présentant des résistivités apparentes élevées en subsurface des sondages pour lesquels les résistivités apparentes en subsurface sont les plus faibles (rôle de l'axe F1). Par ailleurs l'axe F2 sépare les SEV pour lesquels les résistivités apparentes obtenues pour de grands écartements sont les plus importantes de ceux pour lesquels ce sont les résistivités apparentes pour les écartements intermédiaires qui le sont

#### ***Carte des individus***

La carte des individus (Figure 32) présente la projection des sondages électriques sur le premier plan factoriel construit par les deux premières composantes principales sous forme d'un nuage des points suivant les coordonnées de chaque point sur les axes F1 et F2. Les sondages à composante positive sur l'axe F1 sont ceux ayant des fortes résistivités apparentes pour les écartements de  $AB/2 = 10$ ,  $AB/2 = 15$ ,  $AB/2 = 20$ , et  $AB/2 = 30$ ,  $AB/2 = 50$ . A l'opposé c'est-à-dire les sondages électriques à composantes négatives sur l'axe F1 ayant les plus faibles valeurs de résistivité apparentes pour les mêmes valeurs de  $AB/2$ , et aussi des faibles résistivités apparentes pour les  $AB/2 = 300$ ,  $AB/2 = 400$ ,  $AB/2 = 500$ ,  $AB/2 = 750$ .

Le deuxième axe factoriel F2, sépare les sondages ayons une importante valeur de résistivité apparente pour les grands écartements  $AB/2 = 1500$ ,  $AB/2 = 2000$ , et  $AB/2 = 3000$  en haut (composante positive sur

F2), des sondages qui ont une faible valeur pour les mêmes AB/2 (composantes négative sur F2). Il sépare aussi les sondages qui ont les plus importantes valeurs de résistivité apparente pour les AB/2 = 150, 200 et 300 (composantes négatives sur F2)

#### **II-4) Représentation graphique des données dans le plan factoriel F1 (39 %) et F3 (15%)**

Le deuxième plan factoriel F1-F3, absorbe 54 % de l'information globale, il est donc important d'analyser l'apport de ce troisième facteur.

##### ***Cartes des Variables (Figure 33)***

Le troisième facteur est corrélé négativement à presque à toutes les variables sauf AB/2 = 3, AB/2 = 4, AB/2 = 5 ainsi que AB/2 = 150 Cette corrélation, est particulièrement marquée pour les résistivités apparentes correspondant aux écartements AB/2 = 1000, AB/2 = 750, et AB/2 = 1500.

##### ***La carte des individus (***

##### ***Figure 34)***

Le deuxième plan principal permet de séparer les sondages qui ont des valeurs de résistivité apparente élevées pour les écartements AB/2 = 1000, AB/2 = 1500, et AB/2 = 750 par rapport aux sondages qui ont des faibles valeurs de résistivité apparente pour ces mêmes écartements AB/2.

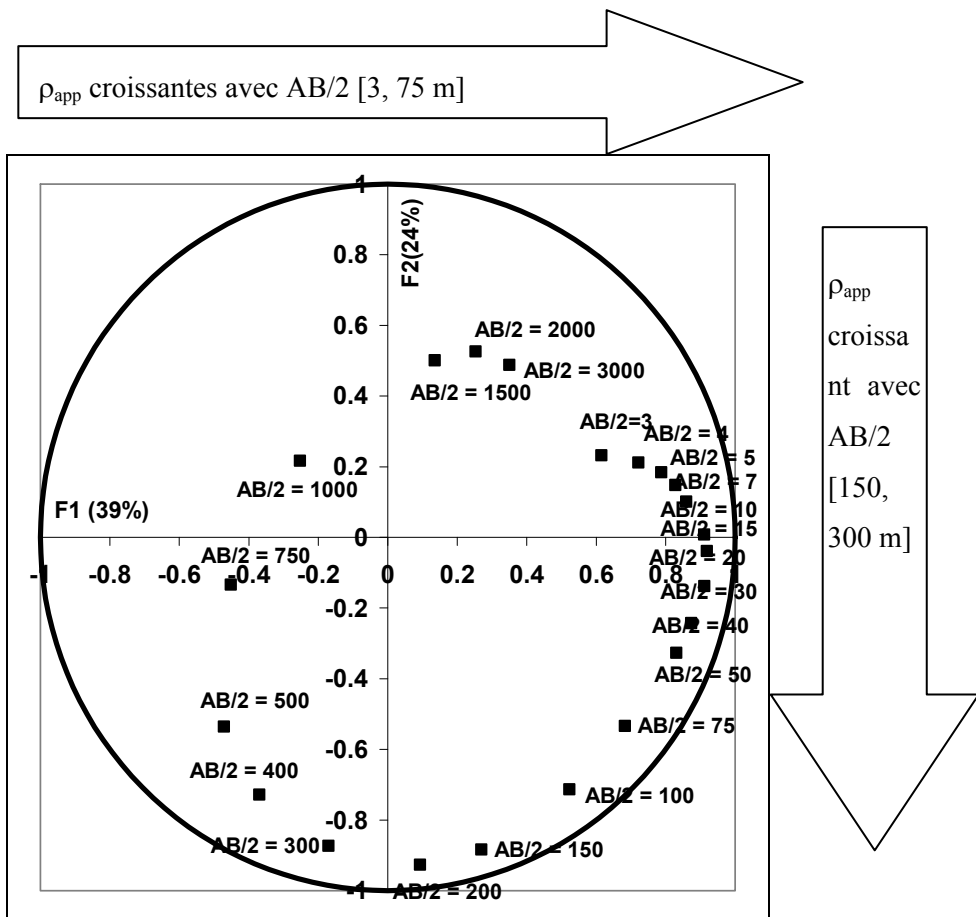


Figure 31 : Cercle des corrélations et carte des variables des SEV sur le premier plan factoriel des 22 variables

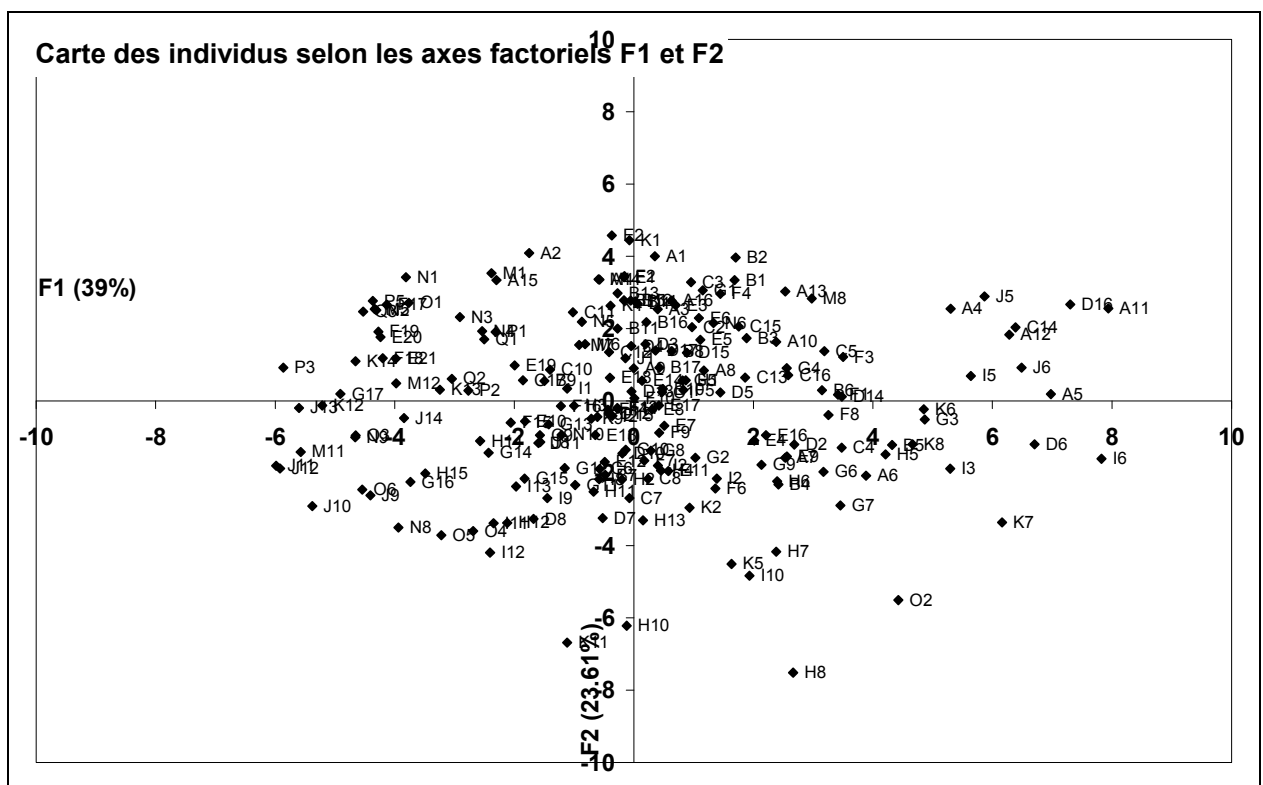


Figure 32: Cartes de projection du nuage des sondages électriques sur le premier plan factoriel

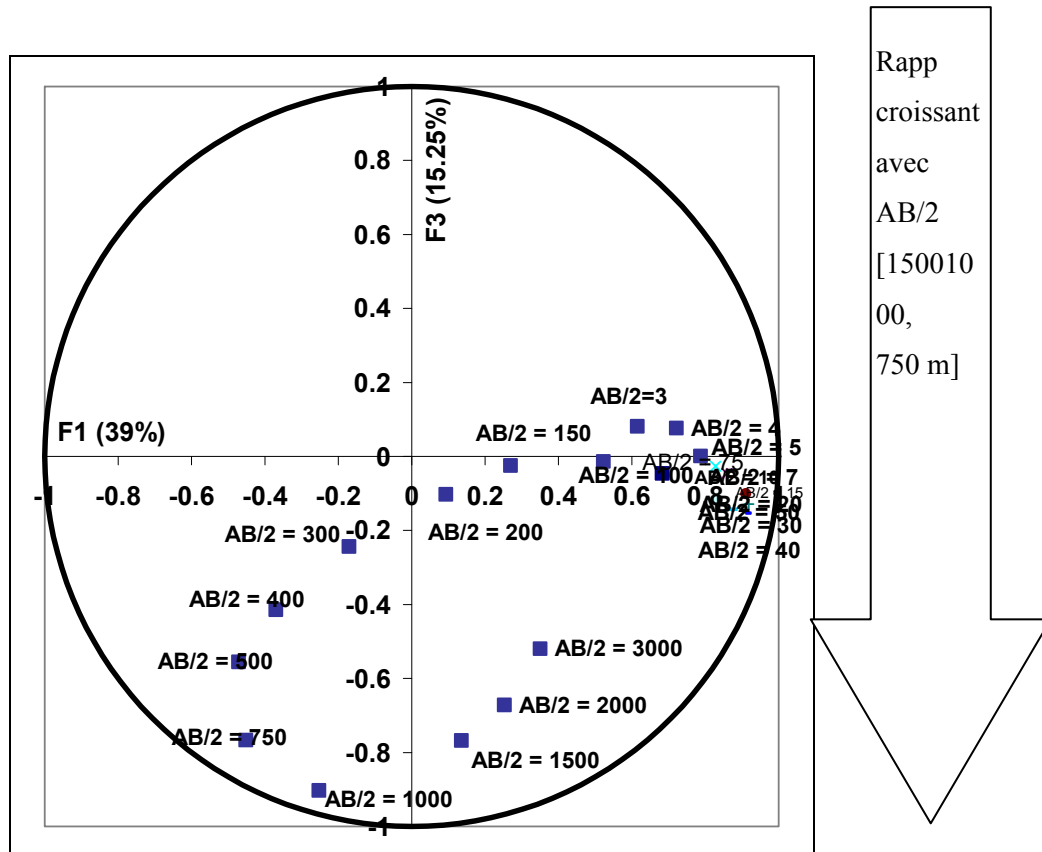


Figure 33: Cercle des corrélations et la carte des variables des SEV dans le deuxième plan factoriel des 22 variables et 201 SEV

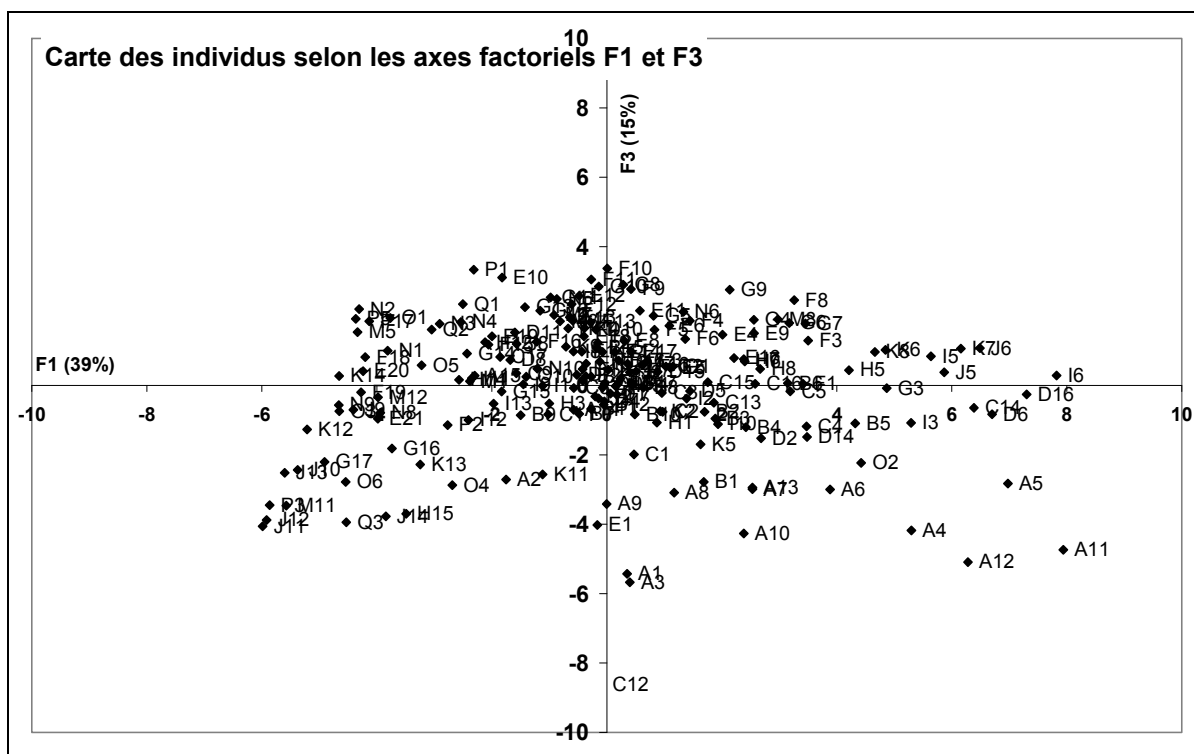


Figure 34: cartes de projection du nuage des sondages électriques (201SEV) dans le deuxième plan factoriel

## **Conclusion**

L'analyse en composantes principales nous a fourni les principales informations sur la dispersion des sondages électriques (Individus) en fonction des différentes valeurs des résistivités apparentes par demi-écartements des électrodes d'injection de courant.

Ainsi, par exemple on trouve :

-des sondages qui présentent des résistivités élevées pour les faibles écartements ( $AB/2 = 3$  m à  $AB/2 = 75$  m) tels que (A11 A5, D16, I6, D6, C14),

-des sondages ayant des résistivités apparentes élevées pour les écartements  $AB/2 = 100$  à  $400$  m, tels que H8, H10, K11, K5, I12 par rapport au reste ayant les valeurs les plus faibles pour les mêmes écartements tels que A1, K1, B2, A2, et

-finalement des sondages ayant les résistivités apparentes élevées pour les pseudoprofondeurs  $AB/2 = 750$ , à  $1500$  m, sont tel que C12, A3, A1 par rapport aux autres sondages ayant les valeurs les plus faibles pour les mêmes écartements tels que F10, E10, P1.

## **III) ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES SEV AVEC 15 VARIABLES (LES FORMATIONS DE SUBSURFACE)**

La majorité de la variabilité des résistivités apparentes se manifeste pour les formations de subsurface en raison, on le rappelle, de l'hétérogénéité des formations plio-quaternaires. Il paraît donc pertinent de restreindre l'étude à ces formations en se limitant aux résistivités apparentes correspondant aux écartements  $AB/2$  inférieurs à  $300$  m. Cette valeur a été définie on se basant sur l'analyse de la matrice de corrélation (Tableau 3). Cette dernière montre en effet une indépendance statistique au delà des  $AB/2 = 150$  m,  $AB/2 = 200$  m et jusque vers  $AB/2 = 300$  m.

### **III-1) Statistiques descriptives**

Les Figure 27, Figure 28, Figure 29, résument les principaux paramètres descriptifs des résistivités apparentes obtenues pour les formations de subsurface. Ces formations montrent des valeurs résistivités apparentes très élevées avec une moyenne qui dépasse généralement  $50$  ohm.m. Ces formations ayant des résistivités apparentes très hétérogènes, montrent aussi une grande variabilité de ces formations comme déjà décrite auparavant.

La Tableau 4 montre la matrice des corrélations entre les variables étudiées pour les formations de subsurface, cette matrice est naturellement un sous-ensemble de la matrice donnée Tableau 3. On y retrouve donc les corrélations positives déjà évoquées dont les valeurs qui diminuent avec l'augmentation des écartements  $AB/2$  jusqu'à devenir majoritairement quasi-nulles pour  $AB/2 = 150$  m ; au delà les corrélations deviennent progressivement négatives.

### **III-2) Analyse des valeurs propres des nouveaux axes factoriels**

La Figure 35, montre la répartition de la variance totale en fonction des facteurs. L'axe F1 absorbe 54 % de la variance totale, l'axe F2 26 % et finalement l'axe F3 11 % ; ainsi ces seules trois premières valeurs propres absorbent au total 91 % de la variance totale.



Tableau 4: Coefficient de corrélation des 15 variables de 201 sondages électriques

AB/2=	3	4	5	7	10	15	20	30	40	50	75	100	150	200	300
3	1,00														
4	0,95	1,00													
5	0,76	0,84	1,00												
7	0,65	0,77	0,95	1,00											
10	0,55	0,69	0,84	0,90	1,00										
15	0,48	0,62	0,74	0,83	0,93	1,00									
20	0,44	0,58	0,64	0,74	0,86	0,97	1,00								
30	0,36	0,48	0,54	0,64	0,75	0,89	0,96	1,00							
40	0,29	0,39	0,46	0,54	0,64	0,80	0,89	0,97	1,00						
50	0,24	0,33	0,40	0,47	0,55	0,71	0,80	0,92	0,98	1,00					
75	0,16	0,23	0,29	0,32	0,36	0,48	0,57	0,72	0,83	0,91	1,00				
100	0,10	0,14	0,19	0,20	0,22	0,33	0,40	0,54	0,66	0,76	0,93	1,00			
150	0,00	0,02	0,05	0,06	0,08	0,15	0,19	0,30	0,40	0,49	0,71	0,88	1,00		
200	-0,08	-0,07	-0,04	-0,02	-0,01	0,05	0,07	0,15	0,23	0,30	0,52	0,73	0,94	1,00	
300	-0,19	-0,18	-0,17	-0,15	-0,14	-0,10	-0,09	-0,06	0,00	0,04	0,21	0,43	0,73	0,88	1,00

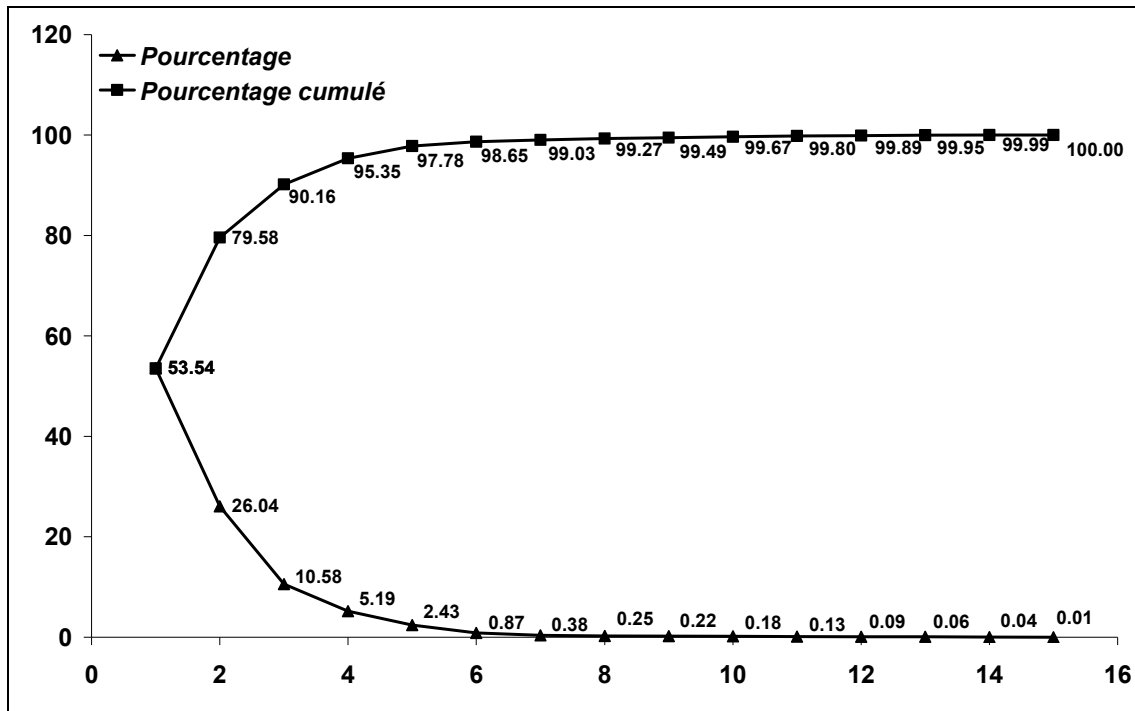


Figure 35: représentation graphique des pourcentages et des pourcentages cumulés des valeurs propres (15 variables et 201 SEV)

### III-3) Représentation graphiques des données dans le plan factoriel F1 (54 %) et F2 (26 %)

#### Cartes des variables (Figure 36)

Le premier facteur qui absorbe 54 % de l'information globale est corrélé positivement à quasiment toutes les variables ; les coefficients de corrélation croissent avec les écartements AB/2 allant de 3 à 30 m (la valeur est alors proche de 1) pour décroître ensuite jusqu'à s'annuler pour l'écartement AB/2 = 300 m. Le deuxième facteur présente une corrélation positive croissante lorsque les écartements AB/2 décroissent de 30 à 3 m et une corrélation négative lorsqu'ils croissent de 30 à 300 m.

#### Carte des individus (Figure 37)

La carte des individus, l'axe F1, permet de caractériser les sondages qui ont des fortes valeurs de résistivités apparentes pour les AB/2 = 10, AB/2 = 15, AB/2 = 20, AB/2 = 30, AB/2 = 40 (composantes positives et élevées sur l'axe F1) et de les opposer à ceux qui ont des composantes négatives et donc des résistivités apparentes les plus faibles pour ces mêmes AB/2 écartement. Et l'axe F2 sépare les sondages électriques qui ont des fortes résistivités apparentes pour les écartements AB/2 = 3, AB/2 = 4, AB/2 = 5, AB/2 = 7, AB/2 = 15, AB/2 = 20 des sondages qui présentent des faibles valeurs des résistivités apparentes pour ces mêmes écartements.

### **III-4) Représentation graphique des données dans le plan factoriel F1 (54%) et F3 (11%)**

#### *Cartes des variables* (Figure 38)

Le deuxième plan factoriel absorbe 64 % de l'information globale. Le troisième axe à une variance faible par rapport aux deux premiers axes. Ce troisième axe factoriel permet d'opposer des valeurs intermédiaires d'AB/2 (AB/2 = 20 à AB/2 = 75 m) avec les grands (AB/2 = 150 à AB/2 = 300 m) et les faibles écartements AB/2 (AB/2 = 3 à AB/2 = 15 m)

Les sondages ayant des résistivités faibles pour les écartements d'AB/2 = 3, AB/2 = 4, AB/2 = 5, AB/2 = 30, AB/2 = 40, et AB/2 = 50 m a ceux ayant des résistivités plus intéressantes pour les mêmes écartements.

#### *Carte des individus* (Figure 39)

Ce deuxième plan principal différencie les sondages qui ont des valeurs importantes de résistivités apparentes pour les AB/2 intermédiaires (corrélés positivement avec l'axe F3) et les sondages qui ont des faibles valeurs de résistivités apparentes pour le même AB/2 et qui sont corrélés négativement à cet axe.

L'analyse en composantes principale ne tient pas compte de la position des points dans l'espace, non plus de degrés de ressemblance entre les sondages, et afin d'entamé cet objectif on passera dans le paragraphe suivant à la classification hiérarchique ascendante.

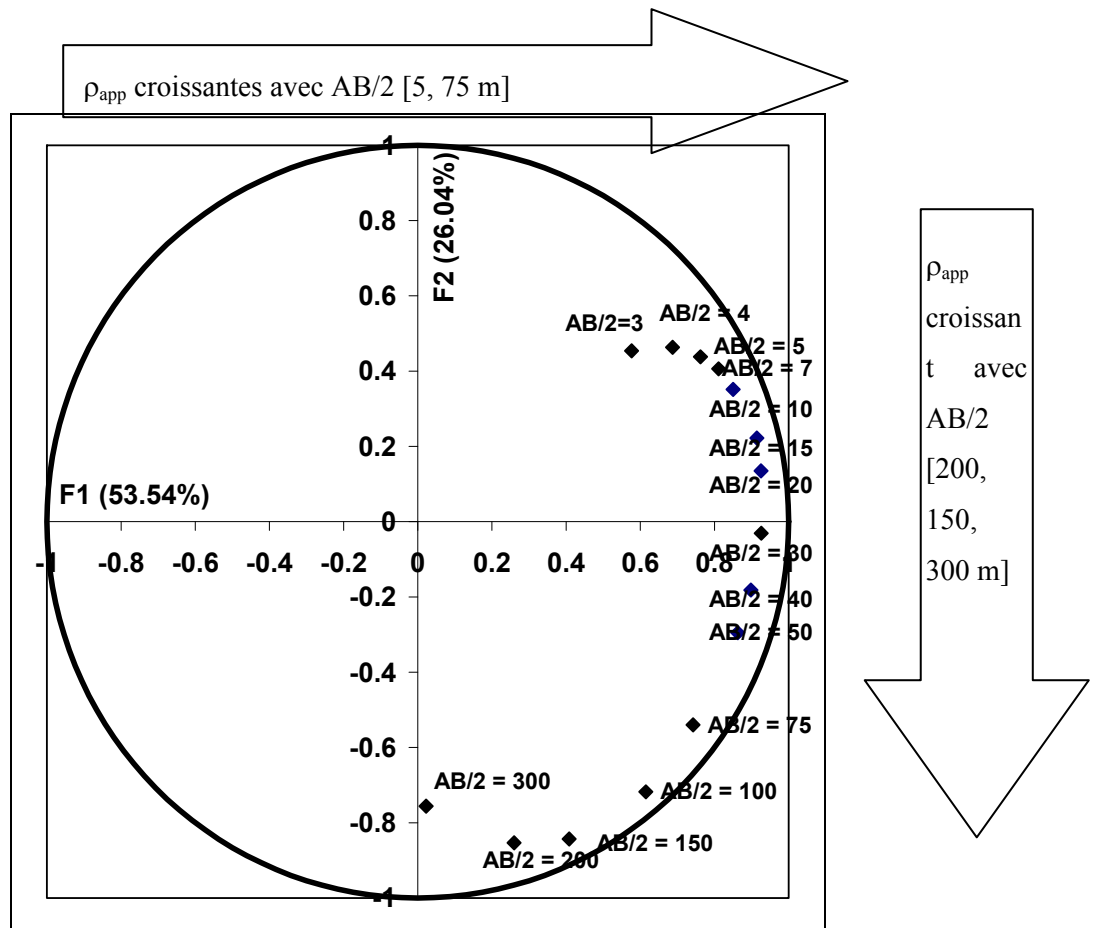


Figure 36: Cercle des corrélations et la carte des variables des SEV sur le premier plan factoriel des 15 variables (201 SEV)

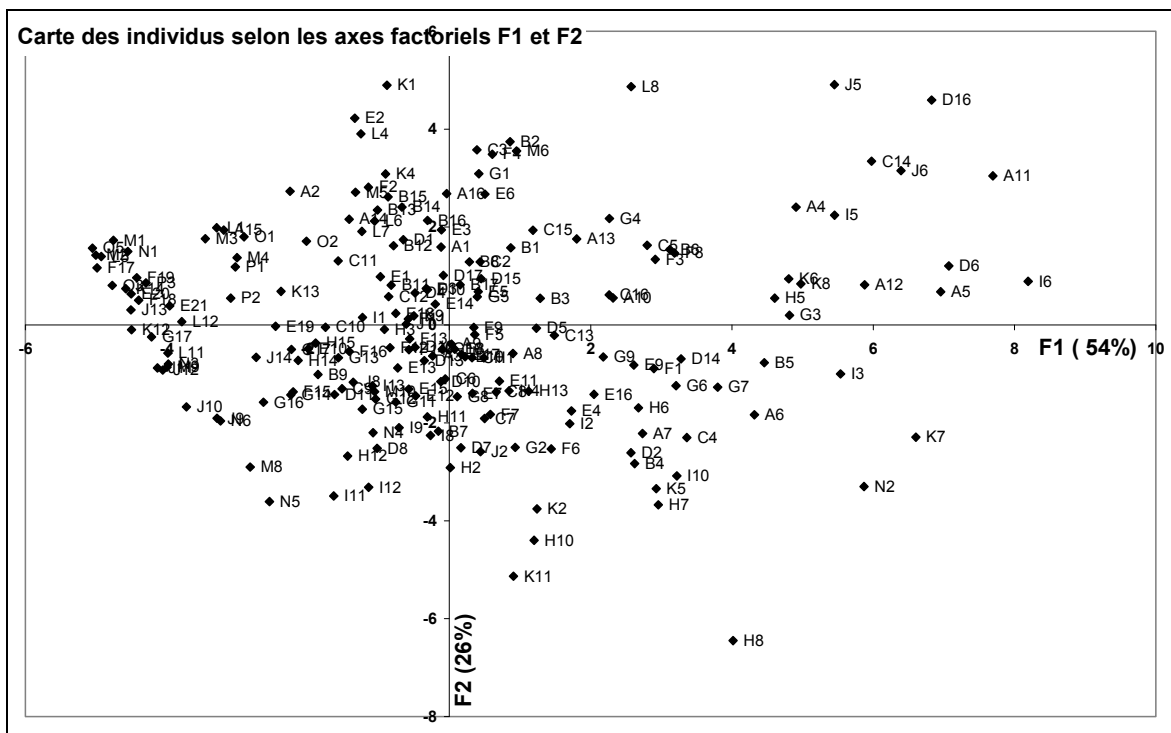


Figure 37: Cartes de projection du nuage des sondages électriques sur le premier plan factoriel (201 SEV)

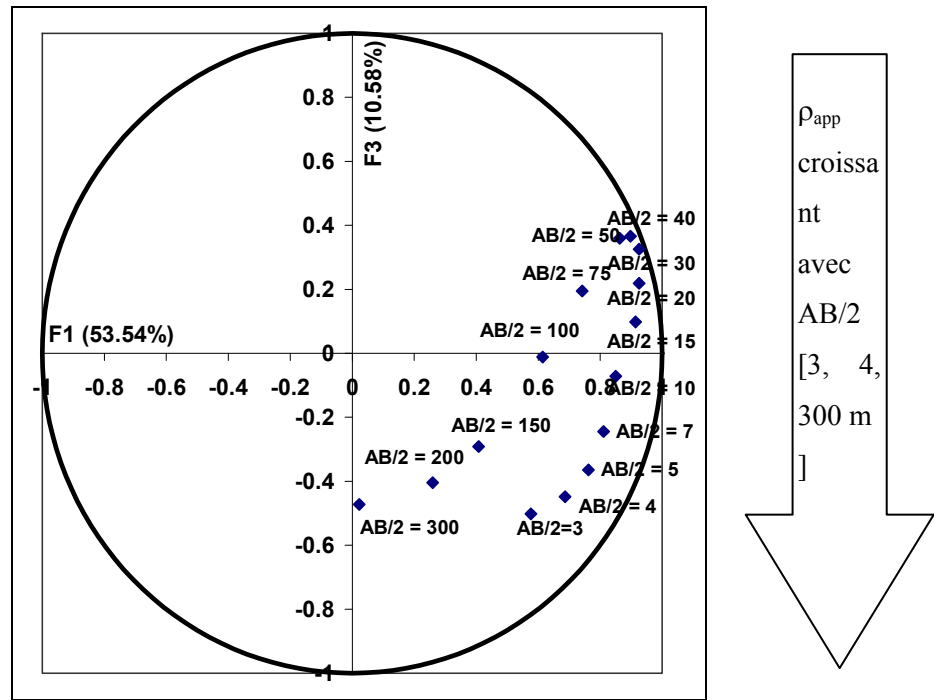


Figure 38: Cercle des corrélations et la carte des variables des SEV sur le deuxième plan factoriel des 15 variables (201 SEV)

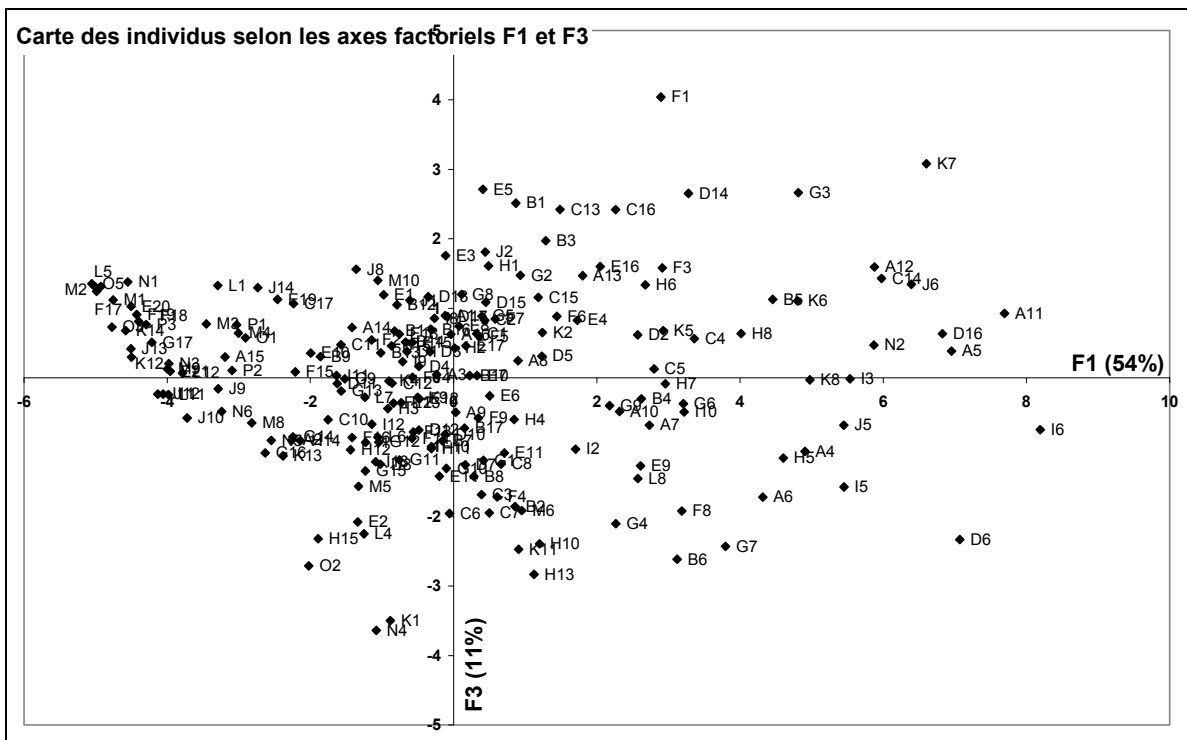


Figure 39: Carte de projection du nuage des sondages électriques sur le deuxième plan factoriel (201 SEV)

#### **IV) CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE AVEC LA METHODE DE WARD ET DISTANCE EUCLIDIENNE**

La classification est une branche de l'analyse des données ; elle consiste à identifier d'une façon automatique des groupes ou des classes à partir d'importantes masses d'information.

Il existe plusieurs méthodes de classification dont nous utiliserons dans ce chapitre la classification hiérarchique. Le principe de la classification hiérarchique consiste à l'agglomération progressive, de façon ascendante deux à deux des éléments les plus proches (L. Lebart et al, 2006).

La méthode de la classification hiérarchique ascendante se base sur la construction d'une typologie ou des partitions des sondages électriques en classes relativement les plus homogènes en se basant sur la distance euclidienne entre le sondage et le centre de gravité (moyenne).

Cette méthode se base sur l'agrégation progressive des individus par diminution de l'inertie interclasse et corrélativement de l'augmentation de l'inertie intraclasse, le calcul des distances étant fondé sur la métrique euclidienne. Cette classification se déroule en étape :

-l'étape 1, chaque sondage forme une classe,

-l'étape 2, l'ensemble des sondages forme des partitions en N classes en calculant les distances entre les sondages selon la métrique euclidienne, et l'agrégation est selon la méthode de Ward,

-l'étape 3, c'est l'étape finale où il ne subsiste plus qu'une seule classe.

***Cas 22 variables*** (Figure 41, Figure 42)

L'analyse de l'indice de niveau a pour objectif de définir le nombre de classe le plus justifiable pour notre base de données où l'inertie interclasse est la plus faible (Figure 40). Donc après six classes on note la diminution des valeurs de cet indice. Justifiant ainsi le choix de six classes d'agrégation des sondages électriques. L'étude des propriétés des sondages appartenant à chaque classe se fera par l'analyse des sondages moyens calculés pour chacune des six classes (Figure 43, Figure 44).

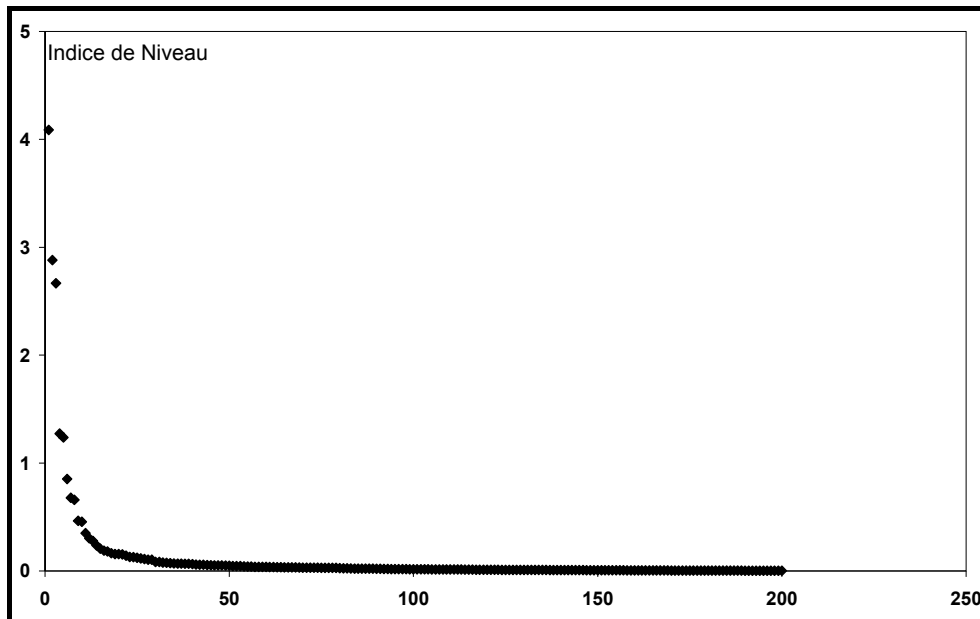


Figure 40: Représentation graphique de la variation des indices de niveau en fonction de l'agrégation des classes pour 22 variables (201 SEV)

La première classe contient 48 SEV : ils sont localisés dans la partie ouest et sud-est du secteur (Figure 43). Les SEV de cette classe présentent des composantes faibles regroupées autour du centre de gravité donc tantôt positives tantôt négatives sur l'axe F1, par contre les composantes sont toutes positives sur l'axe F2. Les composantes sur l'axe F3 sont majoritairement positives mais quelques SEV aux composantes positives sur F1 montrent des composantes négatives importantes sur l'axe F3. Ces SEV montreront donc une tendance à avoir des résistivités apparentes moyennes à légèrement élevées pour les faibles écartements ( $F2 > 0$ ), faibles pour les écartements intermédiaires ( $AB/2$  compris entre 100 et 400 m,  $F2 > 0$ ) relativement faibles et parmi les plus élevées pour les écartements supérieur à 1000 m ( $F2 > 0$  et  $F3$  très négatif pour quelques SEV). Le pseudo-sondage moyen (Figure 44), tout comme le sondage paragon (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, Annexe) de cette classe résume la classe en montrant une résistivité apparente élevée pour les formations de subsurface, et qui diminue progressivement jusqu'à  $AB/2 = 750$  m, où elle augmente de nouveau.

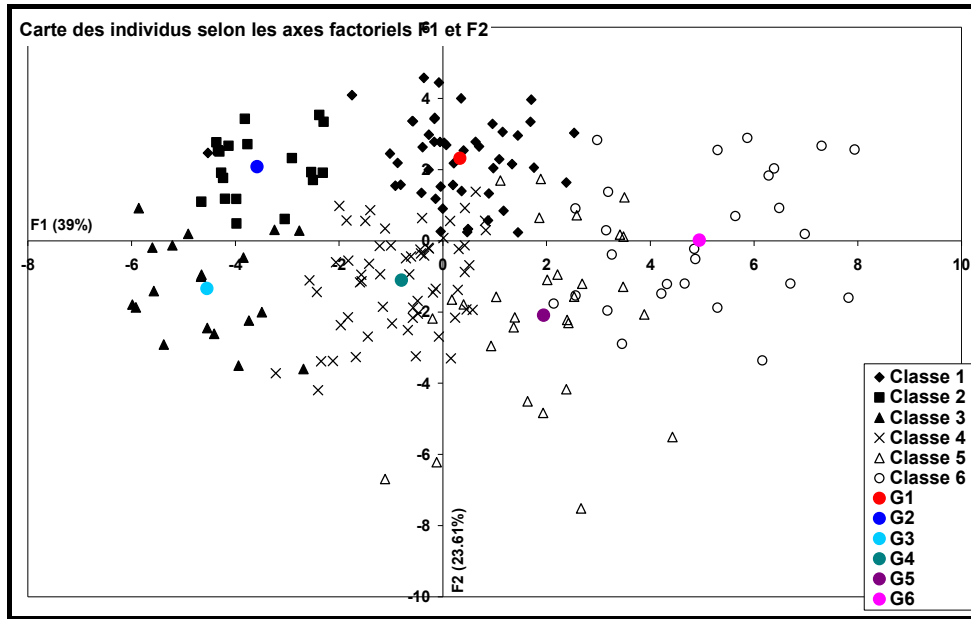


Figure 41: Carte des classes des individus et leurs centres (Cas de 22 variables) selon le premier plan factoriels (201 SEV)

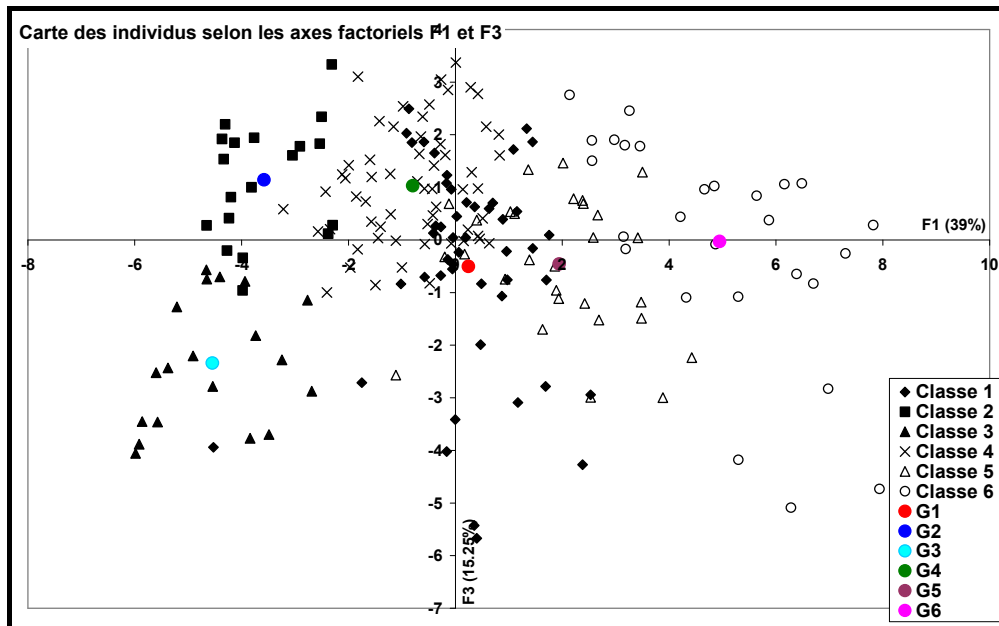


Figure 42: Carte des classes des individus et leurs centres (Cas de 22 variables) selon le deuxième plan factoriels (201 SEV)

La deuxième classe (19 SEV), les sondages de cette classe se localisent essentiellement au nord de la zone. Avec des composantes négatives sur F1, positives sur F2 et principalement positives sur F3. Ces SEV sont ceux qui présentent globalement les plus faibles résistivités apparentes en immédiate subsurface et les plus élevées aux écartements les plus grands. Le pseudo-sondage moyen (Figure 44) ainsi que le sondage paragon (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** annexe) de cette classe montre bien des résistivités apparentes les plus faibles pour les formations de subsurface ; ces résistivités apparentes



diminuent ensuite régulièrement jusqu'à  $AB/2 = 750$  m, où elles augmentent de nouveau sous l'influence des formations résistantes de la base du Miocène et du Lias.

La troisième classe (19 SEV) : ces sondages se localisent au Nord du bassin tout comme les sondages de la classe 2 ceux-ci présentent des composantes négatives sur F1 mais négatives tant sur F2 que sur F3. Ceci explique la remontée des résistivités apparentes pour les écartements intermédiaires et la tendance à présenter des résistivités apparentes plus élevées que celles des sondages de la classe 2 pour les grands écartements. Le pseudo-sondage moyen (Figure 44) ainsi que le sondage paragon (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** annexe) de cette classe, ont montré que pour les premières mesure les résistivités apparentes sont très faible comme les sondages de la classe 2 jusqu'à  $AB/2 = 20$  m ensuite les valeurs des résistivités apparentes augmentent et restent les plus élevées pour les écartements  $AB/2$  allant de 200 m à 1 000 m

La quatrième classe (59 SEV) : cette classe est la plus représentée avec des sondages qui se localisent au centre du bassin et essentiellement vers l'est. Tout comme les SEV de la classe 1 ceux de cette classe présente des composantes réparties autour du centre de gravité sur l'axe F1 mais avec des composantes majoritairement négatives sur l'axe F2. Les composantes sur l'axe F3 sont principalement positives ce qui se traduira par des résistivités apparentes les plus faibles pour les grands écartements. Les résistivités apparentes pour les très faibles écartements sont plus faibles que celles de la classe 1, elles restent plus faibles pour des écartements suivants jusqu'à ce que l'influence des composantes négatives sur l'axe F2 se fasse sentir avec des résistivités apparentes supérieures à celles de la classe 1 dès les écartements égaux à 50 m. Le pseudo-sondage moyen (Figure 44), et le sondage paragon (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** annexe) de cette classe présentent une forme assez semblable à celle du pseudo-sondage moyen de toutes les classes confondues (Figure 3). Ils reflètent bien les trois grands ensembles (résistant-conducteur-résistant).

La cinquième classe (29 SEV), les sondages de cette classe se localisent au centre du bassin comme les sondages de la classe 4, mais plutôt vers l'ouest Avec des composantes positives sur l'axe F1 et majoritairement négatives sur l'axe F2 les SEV de cette classe montrent des résistivités apparentes élevées pour les très faibles écartements et toujours parmi les plus élevées pour les écartements supérieurs. Le pseudo-sondage moyen (Figure 44) et le sondage paragon (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** annexe) de cette classe ressemblent à celui de la classe 4 pour ce qui concerne les résistivités apparentes pour les très faibles écartements et les plus grands écartements ; les résistivités apparentes pour les écartements  $AB/2$  variant entre 5 m et 150 m de la classe 5 sont plus élevées que celles de la classe 4 en raison des composantes positives sur F1.

La sixième classe (27 SEV), les sondages de cette classe ont tous une composante positive sur l'axe F1, et sur les axes F2 et F3 se répartissent de part et d'autre de l'origine sur les axes F2 et F3. Les sondages de cette classe sont agrégés selon leurs résistivités les plus élevées pour les premières mesures ( $F1 > 0$ ). Le

sondage moyen (Figure 44) ainsi que le sondage paragon (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** annexe) de cette classe ont la même allure que ceux de la classe 1. Avec des composantes positives les plus élevées sur l'axe F1 les sondages de cette classe sont ceux qui présentent tous des résistivités apparentes les plus élevées en subsurface (faibles écartements) de tous les sondages de la zone.

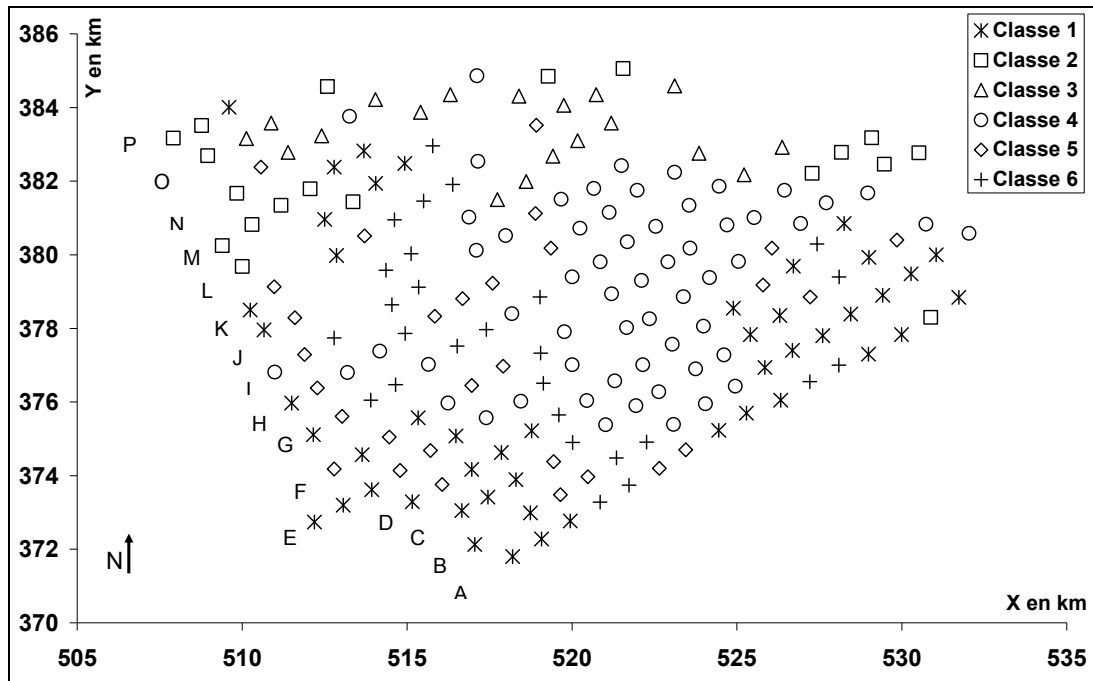


Figure 43: Situation géographique des classes des sondages électriques avec 22 variables et 201 SEV

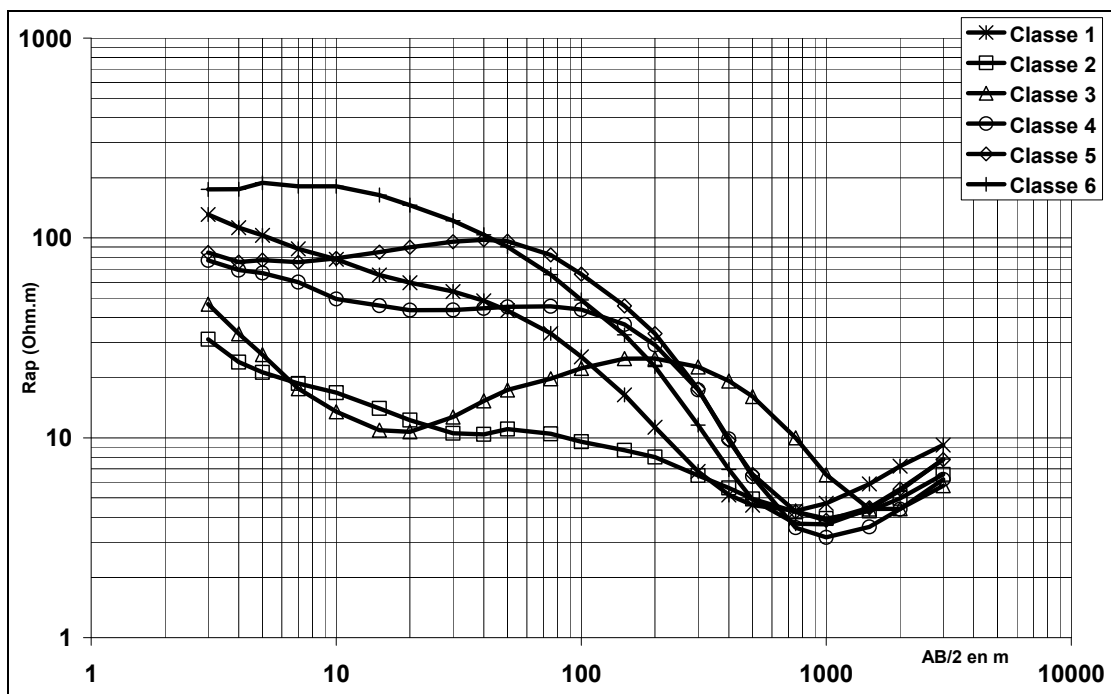


Figure 44: Pseudo-sondages moyens par classe des sondages électriques avec 22 variables et 201 SEV

Cette première classification, basée sur la totalité des données (201 individus et 22 variables), et complétée dans le paragraphe suivant par l'analyse de la classification hiérarchique des données de subsurface ( $3 \text{ m} \leq AB/2 \leq 300 \text{ m}$ ), Figure 47 et Figure 48.

### ***Cas 15 variables***

Cette classification a changé l'agrégation des sondages électriques, mais d'une façon globale, elle a gardé la même distribution dans l'espace en fonction des caractéristiques électriques pour chaque sondage moyen de chaque classe. Le nord du bassin est occupé par les sondages des classes 2 (24 SEV), et ceux de la classe 4 (30 SEV), ayant les résistivités apparentes électriques les plus faibles en surface. Les sondages de ces deux classes ont une composante négative sur l'axe F1 ( $F1 < 0$ ) ; les sondages de la classe 4 ont une résistivité légèrement plus élevée par rapport aux sondages de la classe 2 pour les premières mesures, et les résistivités apparentes les plus implorantes pour les écartements de 200 et 300 m. Les sondages des classes 1 (38 SEV) et 6 (23 SEV) sont situés au sud-est et au sud-ouest ainsi qu'au nord de la zone. Les sondages de ces classes sont majoritairement positives sur l'axe F2 ( $F2 > 0$ ), les sondages de la classe 6 sont ceux ayant les plus fortes contributions sur l'axe F1 ( $F1 > 0$ ) et dont sont caractérisés par des résistivités apparentes les plus élevées pour les premières mesures. Les sondages moyens de ces classes ont la même allure (Figure 45, Figure 46, Figure 48, Figure 47), avec des résistivités apparentes plus élevées pour la classe 6 par rapport ceux de classe 1.

Les sondages des classes 5 (35 SEV) et 3 (51 SEV), sont situés au centre du bassin avec une majorité des sondages de la classe 3 à l'est, les sondages de cette dernière occupe le centre de premier plans principale en ayant un sondage moyen le plus proche du pseudo-sondage moyen de la totalité des sondages. Ils montrent une résistivité apparente plus faible que les sondages de la classe 5 qui se situent à l'Ouest de la zone. La majorité des sondages de cette classe (Classe 5) a une composante entièrement positive sur F1 et majoritairement négative sur l'axe F2. Les sondages de cette classe sont caractérisés par les résistivités apparentes les plus élevées pour  $AB/2 = 50, 75$  et  $100 \text{ m}$ .

A l'issue de cette classification, on peut conclure que ce sont les résistivités apparentes obtenues pour des valeurs  $AB/2 \leq 300 \text{ m}$  qui conditionnent principalement l'appartenance d'un SEV à une classe ou à une autre. Les six sous-zones définies sont bien représentées électriquement par leur sondage moyen. Cette délimitation n'est pas due au hasard, elle est naturellement liée aux caractéristiques géologiques de chaque sous-zone.

La Figure 47 47 montre la situation des individus (i.e. SEV) par classe pour une classification faite sur les données des résistivités apparentes de subsurface. Les classes 2 et 4 ont des résistivités apparentes des pseudo-sondages moyens les plus faibles ; les sondages sont situés au nord de la zone où affleurent les formations marneuses du Miocène. Les sondages des classes 1, 3 et 5 qui occupent la majeure partie de la zone présentent des variations des résistivités apparentes dues à des variations latérales des formations plio-quaternaires définies par Cirac 1987 (Figure 6 c et d) par le passage latéral des grès à des

conglomérats vers l'est. Par contre les sondages de la classe 6, qui montrent des résistivités apparentes les plus élevées suivent géographiquement la vallée de l'Oued N'ja.

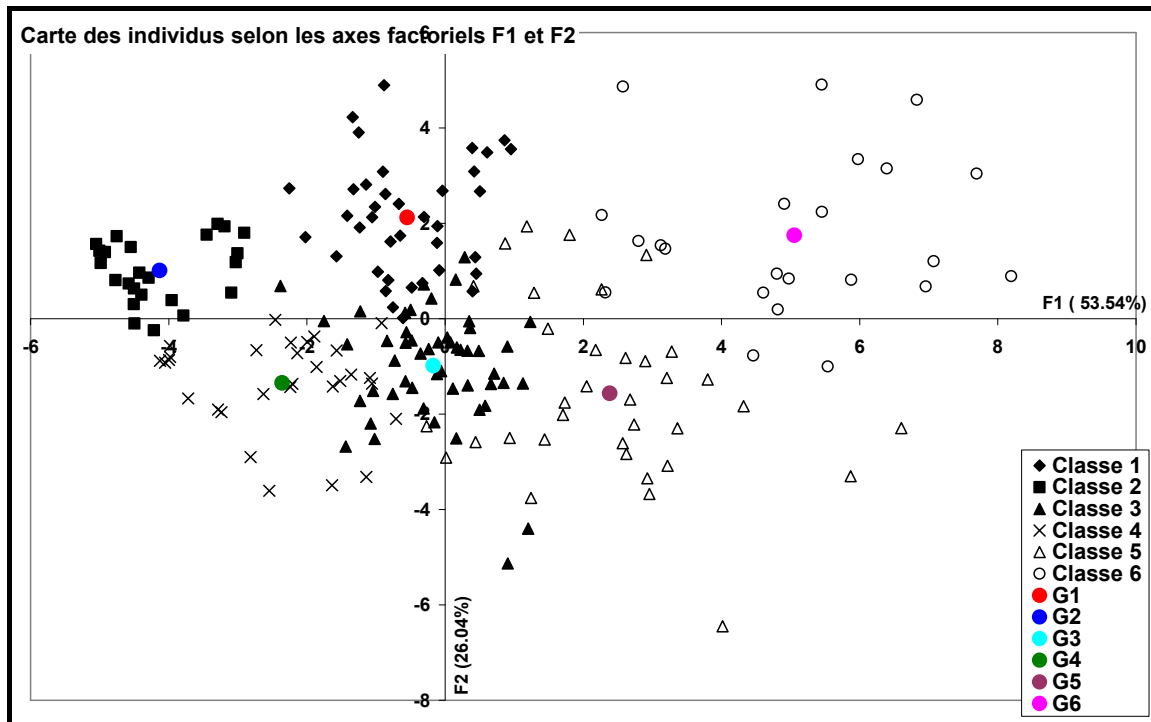


Figure 45: Carte des classes des individus et leurs centres de gravité (Cas de 15 variables et 201 SEV) selon les deux premiers axes factoriels

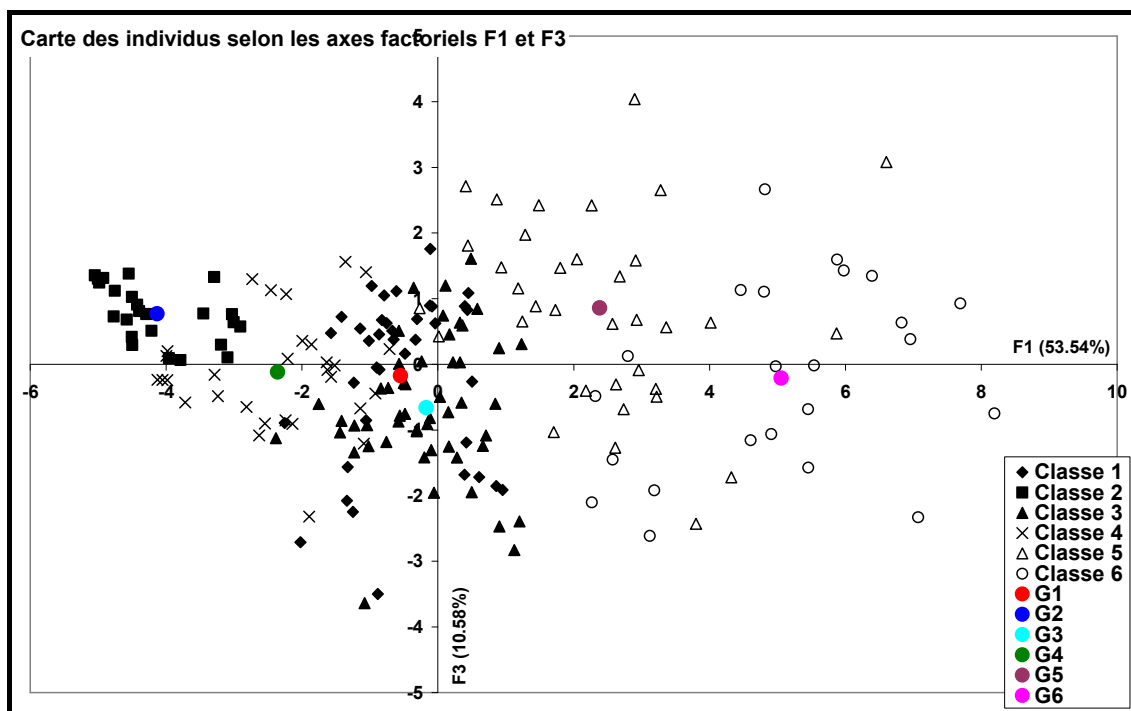


Figure 46: Carte des classes des individus et leurs centres de gravité (Cas de 15 variables et 201 SEV) selon le deuxième et le troisième axe factoriels

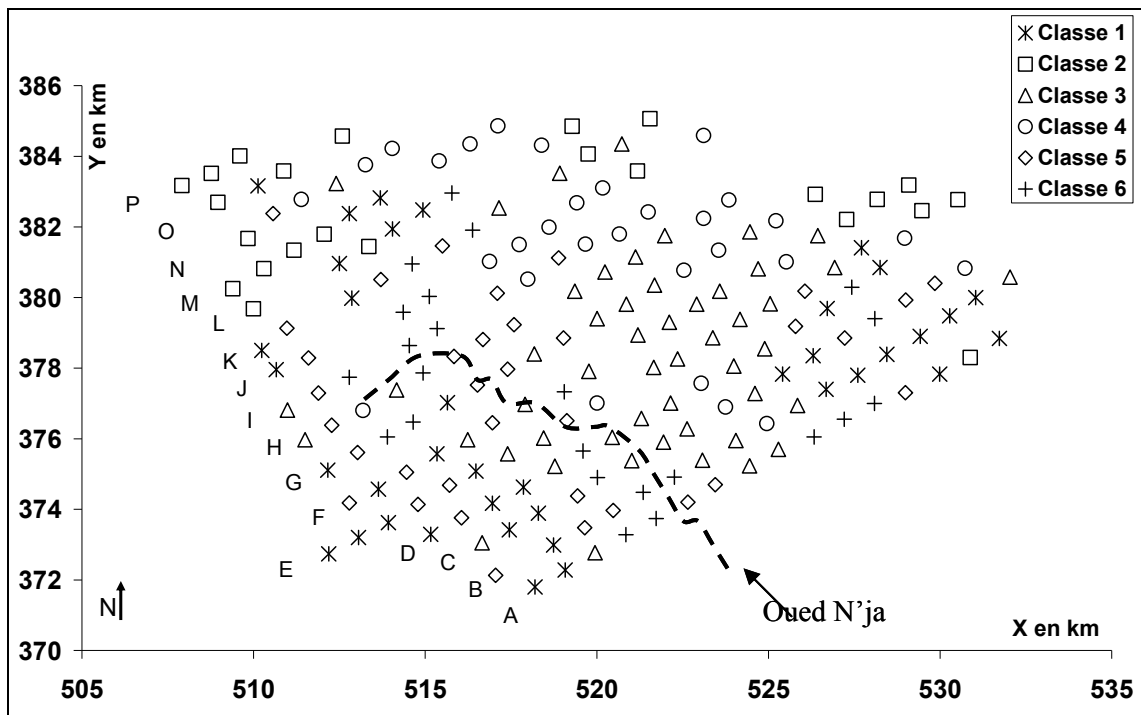


Figure 47: Situation géographique des classes des sondages électriques avec 15 variables et 201 SEV

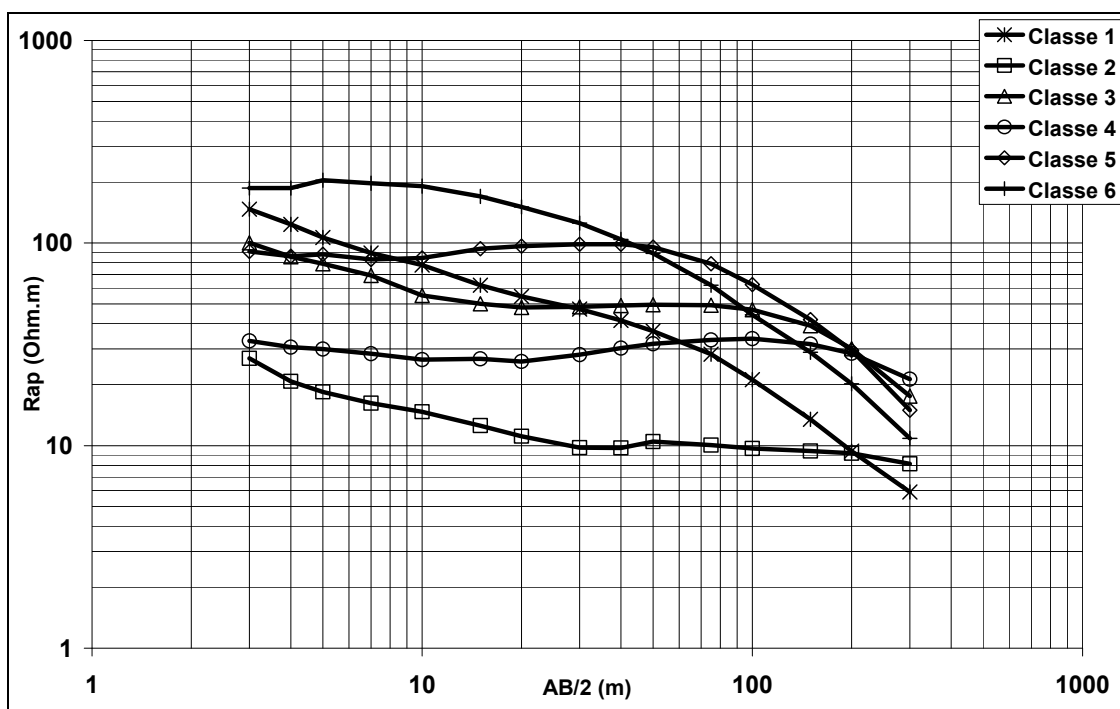


Figure 48: Pseudo-sondages moyens par classe des sondages électriques avec 15 variables et 201 SEV

## V) CONCLUSION GENERALE

A l'issue de l'analyse statistique de la base de données contenant la totalité de 219 sondages mais limité à 201 SEV, on a mis en évidence l'utilité de telles méthodes comme nouvelles approches d'interprétation d'une masse importante de sondages électriques. Dans le secteur d'étude et, suite à cette analyse on a pu redéfinir les trois grands ensembles verticalement superposés globalement connus géologiquement à travers des forages mécaniques effectués dans la zone (Cf. chapitre 1) ; cette reconnaissance a été complétée par l'analyse de la variabilité des résistivités apparentes.

La statistique descriptive a donc permis de résumer les principales caractéristiques électriques des trois ensembles définis dans la zone :

-le premier ensemble : résistant, avec valeurs des résistivités apparentes très hétérogènes qui caractérisent bien les formations Plio-Quaternaires (Calcaire lacustre, conglomérats, sables fauves.....etc),

-le deuxième ensemble : conducteur, avec des valeurs des résistivités apparentes quasiment homogènes, il reflète les formations marneuses du Miocène.

-le troisième ensemble : résistant, détecté par la remontée des différents paramètres statistiques (Moyenne, Médiane, et les Quartiles), annonçant ainsi la détection des formations liasiques (Calcaire dolomitique).

L'analyse en composantes principales a permis une analyse en tenant compte de la distribution dans l'espace des valeurs des résistivités apparentes. Ainsi la classification hiérarchique ascendante a complété cette étude en agrégeant les sondages électriques en six classes les plus homogènes entre eux. C'est ainsi qu'on a délimité les deux classes des sondages situés au Nord du secteur où affleurent les formations marneuses du Miocène et les formations argileuses triasique au Nord-Ouest, ce qui explique les résistivités apparentes les plus faibles enregistrées par les sondages électriques situés dans cette zone. Le reste des sondages occupant la totalité de la surface montrent des variations latérales généralement d'Ouest en Est. Le dernier cas, ce sont les sondages de la classe 6 et qui jalonnant l'Oued N'ja montrent des résistivités apparentes en subsurface les plus élevées.

analyse géostatistique limitée au bassin de Saïss au sens strict

---





# CHAPITRE III : ANALYSE GEOSTATISTIQUE LIMITE AU BASSIN DE SAÏSS AU SENS STRICT

---

---

## **Introduction**

Après l'analyse statistique des données des résistivités apparentes des 201 sondages électriques verticaux, il est nécessaire d'établir des corrélations verticales et horizontales des résistivités apparentes. Ce chapitre vient pour assurer cette étape par des analyses géostatistiques et l'interprétation de leurs résultats.

La plupart des caractéristiques géologiques et géoélectriques de bassin de Saïss tout en présentant une certaine constance à l'échelle du bassin varie localement d'un point à l'autre. Cette variation existe tout aussi bien horizontalement que verticalement, d'où l'intérêt qu'il y a à caractériser cette variabilité. Ainsi, après une analyse statistique classique qui aura permis d'identifier des zones aux caractéristiques géoélectriques (résistivités apparentes) homogènes, une analyse géostatistique permettra de déterminer, par le calcul de variogrammes des logarithmes décimaux des résistivités apparentes leurs distances de corrélation (portée). En effet, les méthodes de la géostatistique qui se basent sur la théorie des variables régionalisées permettent de caractériser les fluctuations d'un paramètre, ici, les résistivités apparentes.

L'ensemble des valeurs des résistivités apparentes distribuées horizontalement selon des mailles carrées de  $1 \text{ km}^2$ , et verticalement en fonction des écartements  $AB/2$  sera le jeu de données analysé.

L'analyse exploratoire des données est toujours une étape préalable utile à une démarche de modélisation géostatistique. Elle permet une première prise de connaissance des plages de variation des données, d'une éventuelle structuration des données et oriente donc le choix du modèle qui formalisera l'ensemble de ces caractéristiques.

## **D) PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS**

Notre objectif est donc d'obtenir des images 2D horizontales et verticales de l'estimation de la distribution des résistivités électriques apparentes. Pour atteindre cet objectif on est conduit à réaliser des analyses statistiques, des calculs, et de la modélisation géostatistique. Notre base de données correspond aux sondages électriques verticaux situés dans le bassin. La distribution horizontale de l'emplacement des SEV correspond à un maillage plus ou moins régulier avec un pas d'environ  $1\ 000 \text{ m}$  ; cependant, selon la verticale, associée aux écartements des électrodes et, par suite à des pseudo-profondeurs, (Cf. Équation 2 ci-dessous) la distribution est irrégulière ; l'évolution de l'écartement entre électrodes d'injection va de  $1 \text{ m}$  pour les premières mesures à  $1\ 000 \text{ m}$  pour les dernières mesures.

Notre étude débute avec une analyse statistique des seuls sondages électriques au nombre de 164 situés dans le bassin à une altitude variant peu alentours 400 m de l'un à l'autre ; les SEV situés en limite nord c'est-à-dire en bordure du Rif (49) en zone plus accidentée sont éliminés ; cette analyse aboutit à une classification des SEV. Ensuite on propose le calcul et l'analyse des variogrammes expérimentaux pour chaque niveau AB/2 ainsi que pour chaque profil. Ensuite ces variogrammes expérimentaux sont modélisés, et la phase finale correspond à l'estimation par Krigeage des résistivités apparentes par niveau ce qui donne lieu à des cartes de distribution des résistivités apparentes. Enfin une interprétation des résultats en termes géologiques est proposée après inversion des pseudo-sondages moyens par classe.

## II) ANALYSE STATISTIQUE DES 164 SONDAGES ELECTRIQUES

L'ensemble des cent soixante quatre sondages électriques verticaux présenté dans l'introduction constitue les données d'archive que nous nous proposons de réanalyser en considérant les SEV dans leur ensemble et non pas de façon indépendante les uns des autres.

Ces SEV sont régulièrement répartis sur la partie nord-est du bassin de Saïss selon des profils orientés NE-SW et à des distances l'un de l'autre proche du kilomètre (Figure 49) ; un sous ensemble de ces SEV a déjà été étudié (Riss et al, 2008, Harmouzi et al, 2007).

L'objectif assigné à ce paragraphe est d'obtenir une synthèse de l'ensemble des données de résistivités apparentes permettant d'avoir une vision globale des caractéristiques électriques moyennes des formations constituant le bassin et de leur dispersion.

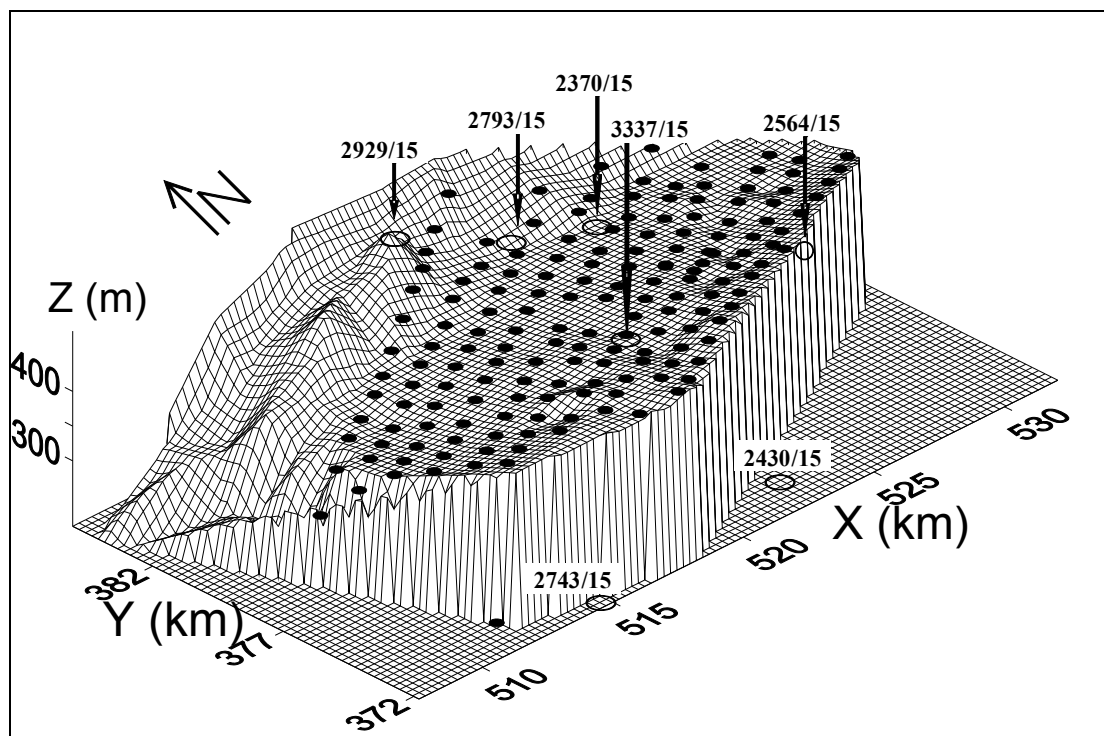


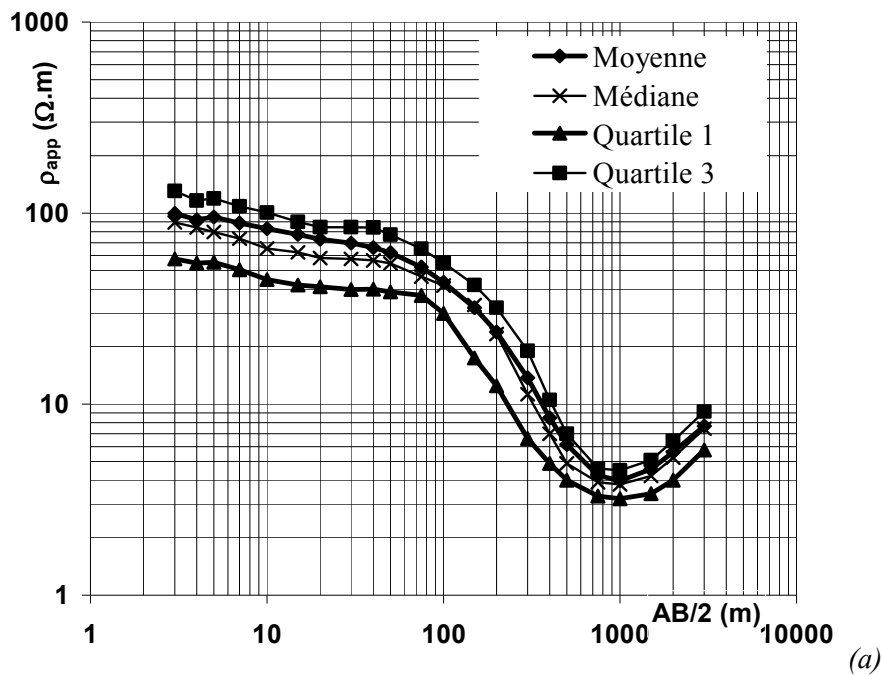
Figure 49: Emplacement des 164 sondages sur une carte en relief de la zone avec emplacement de quelques forages réalisés sur le site

## II-1) Description quantitative des SEV

La série des sondages étudiée constitue donc une série statistique multidimensionnelle de taille égale au nombre de sondages (soit ici  $N = 164$ ) dont les variables sont les résistivités apparentes mesurées pour chaque écartement d'électrodes d'injection  $AB/2$  (on préférera parfois, ci-dessous et selon le cas, parler de pseudo-profondeurs d'investigation en adoptant la définition de Edwards, 1977. Le nombre de variables est donc égal au nombre d'écartement  $AB/2$  soit  $p = 22$ ).

L'analyse des pseudo-sondages moyen, médian, ainsi que les quartiles 1 et 3, seront présentés sous la forme d'un graphe en coordonnées bi-logarithmiques sur lequel les valeurs des résistivités moyennes (médianes, ...) sont reportées en fonction des valeurs  $AB/2$  (ou, selon le cas, des pseudo-profondeurs d'investigation  $z_e$ )

*Ces pseudo-sondages permettent de situer, dans l'ensemble des valeurs de résistivités apparentes possibles, celles qui correspondent aux terrains du bassin de Saïss (*



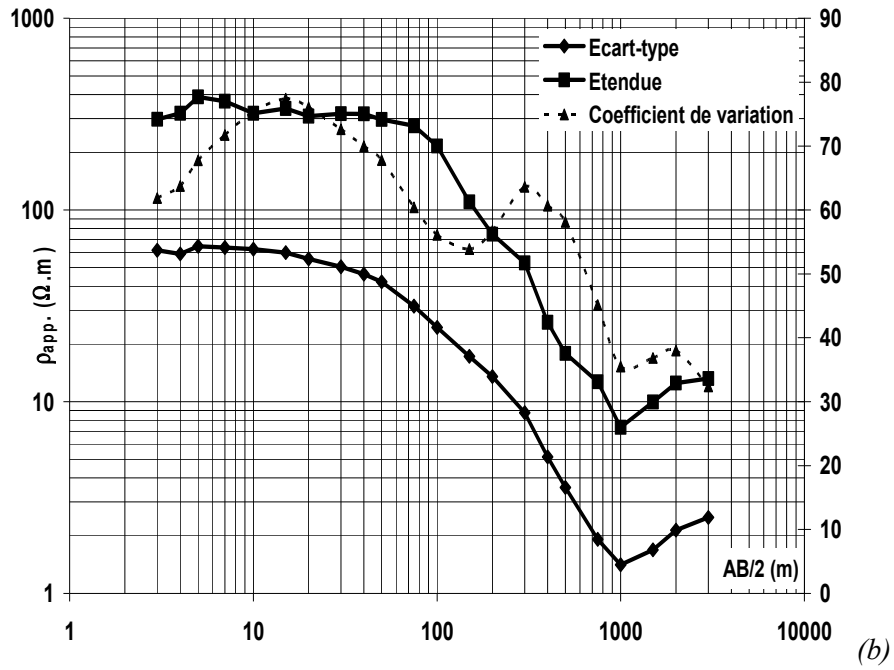
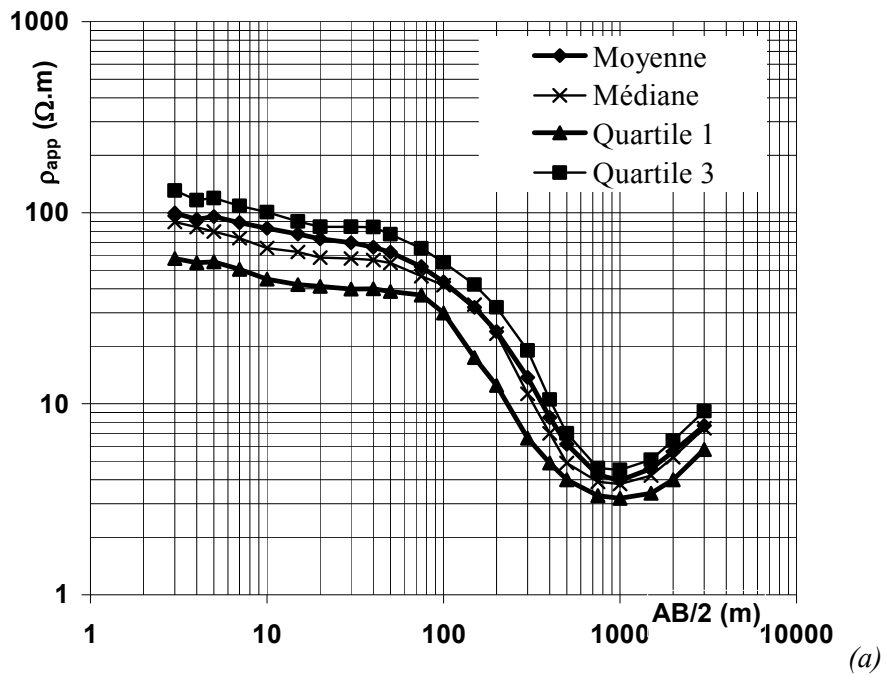


Figure 50a). Les pseudo-sondages de la



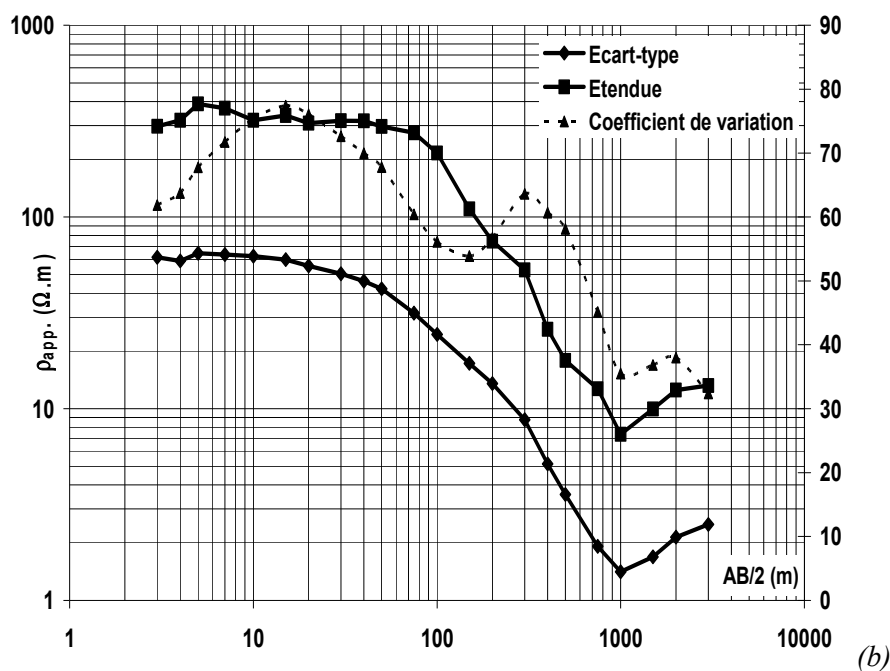


Figure 50 50b construits à partir des paramètres de dispersion (écart type et étendue) de la série statistique permettent, eux, de qualifier l'hétérogénéité des résistivités apparentes.

Les pseudo-sondages moyen, médian et quartiles montrent une répartition des résistivités apparentes en trois grands ensembles marquant la succession de terrains résistants, conducteurs et résistants dont la structuration spatiale conduit à une dispersion des résistivités apparentes de plus en plus faible jusqu' à  $AB/2 = 1000$  m. Les transitions dans les valeurs des résistivités apparentes s'opèrent, d'une part pour les demi distances entre électrodes d'injection égales à 100 m et, d'autre part, pour des demi distances égales à 1000 m. Dans le premier cas, la transition est soulignée par une diminution rapide des résistivités apparentes marquant la nette influence des faibles résistivités des terrains du Miocène et, dans le second cas, c'est l'arrêt de la décroissance des résistivités apparentes suivie de leur remontée qui marque la transition. Ces pseudo-sondages électriques traduisent bien, comme nous l'avons déjà vu au chapitre précédent (Chapitre II), la structuration globale du bassin en ses trois ensembles successifs : les formations du Plio-Quaternaire globalement résistantes, celles du Miocène conductrices, et enfin celles plus résistantes regroupant le Burdigalien et le Lias supérieur.

Les terrains de subsurface (premier ensemble) montrent des résistivités apparentes les plus élevées et les plus dispersées. Les résistivités apparentes moyennes varient entre 50 et 130  $\Omega.m$  ; elles sont plus élevées que les valeurs médianes démontrant l'existence de valeurs très élevées. Ces terrains présentent une grande hétérogénéité avec une relative concentration des valeurs inférieures aux médianes et un étalement des fortes valeurs marqué par des valeurs des troisièmes quartiles relativement distantes des valeurs des médianes. Par ailleurs, l'étendue des valeurs des résistivités apparentes est très élevée pour les faibles valeurs de  $AB/2$  et décroît fortement ensuite (

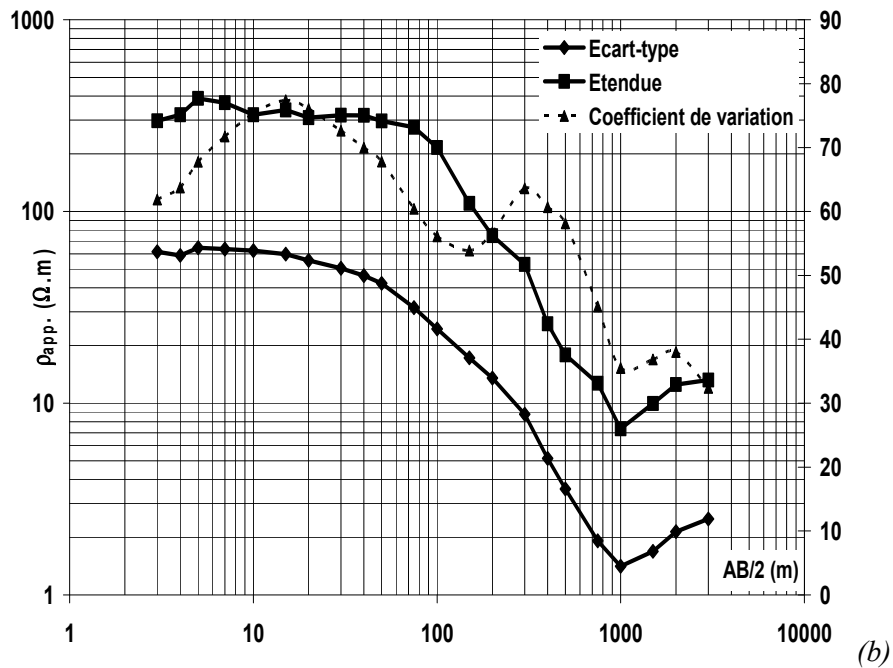
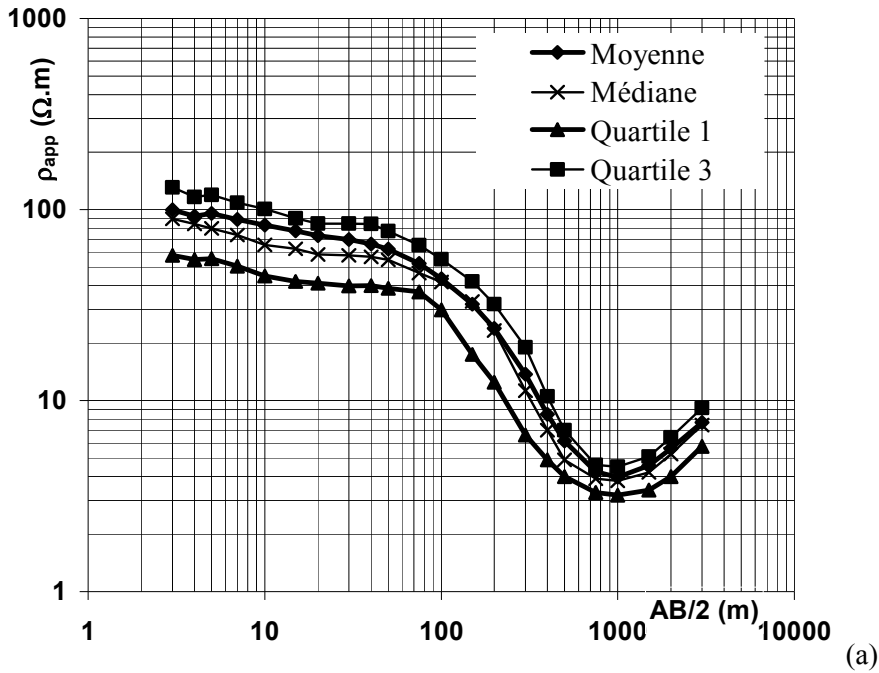


Figure 50.b). Cela met en évidence la grande variabilité des formations plio-quaternaires dont on sait qu'elles sont constituées à l'échelle régionale de grès, de sables fauves, de conglomérats et de calcaires lacustres (Cirac, 1987).

Les résistivités apparentes du deuxième ensemble sont marquées par leur nette diminution conduisant à des valeurs faibles, voire très faibles et par la quasi égalité des valeurs moyennes et médianes pour les valeurs de  $AB/2$  allant de 100 à 200 m; la diminution progressive de la dispersion des valeurs aboutit pour  $AB/2 = 1000$  m à une répartition des valeurs des quartiles, de la moyenne, et de la médiane dans un

intervalle réduit (3,20-4,50  $\Omega$ .m) avec une étendue et un écart type décroissants jusqu'à  $AB/2 = 1000$  m (respectivement 1,4 et 7,3  $\Omega$ .m pour  $AB/2 = 1000$  m). Cette tendance à la monotonie des valeurs des résistivités apparentes traduit l'influence de l'homogénéité des niveaux miocènes avant qu'elles ne soient influencées par les conglomérats de la base du Miocène et par le Lias calcaro-dolomitique qui font remonter les valeurs des résistivités apparentes tout en conservant des valeurs médianes légèrement inférieures aux valeurs moyennes.

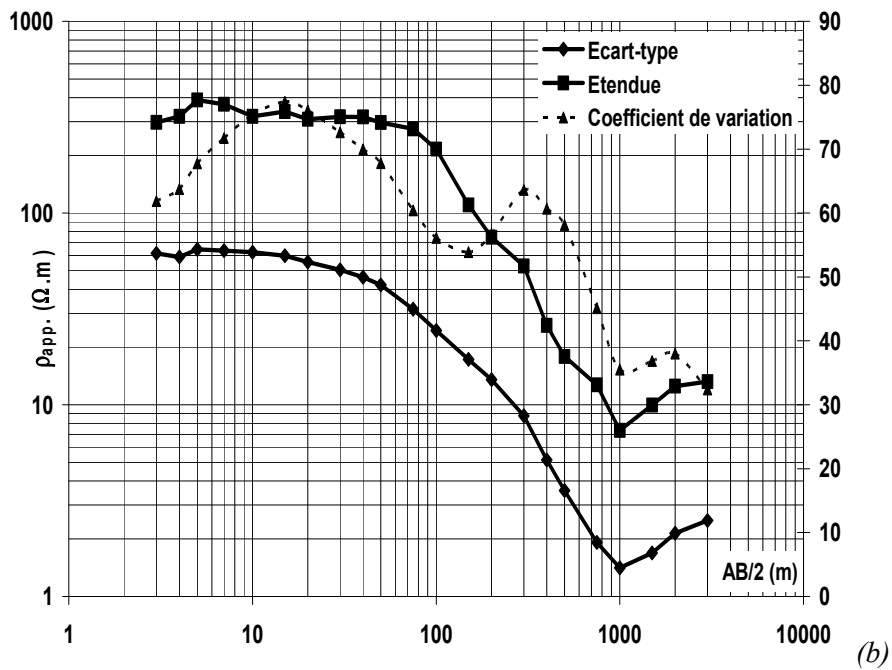
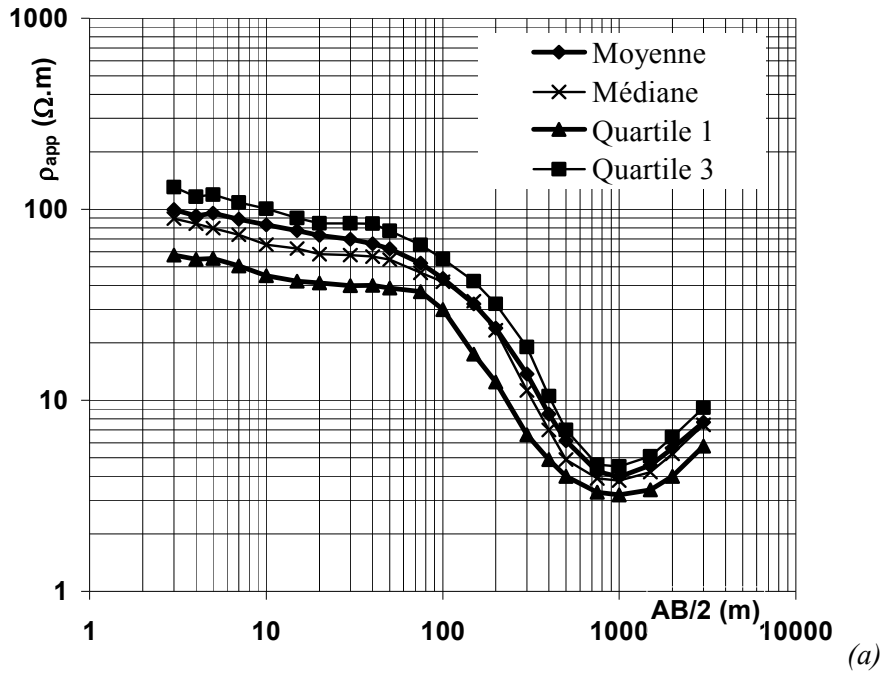


Figure 50: Pseudo-SEV moyen, médian et quartiles (a) et (b) valeurs de l'étendue, de l'écart type et du coefficient de variation (échelle de droite) des résistivités en fonction des valeurs des demi-écartements  $AB/2$  (164 SEV)



Cette analyse globale ne tient pas compte de la position dans l'espace des sondages. Cela sera l'objet de l'étude variographique détaillée proposée plus loin. Auparavant une approche statistique multidimensionnelle globale conduisant à une classification associée à une cartographie des sondages en fonction des valeurs des résistivités apparentes les caractérisant est proposée à l'instar de ce qui a été proposé dans le chapitre 2 mais, ici, en ne tenant compte que des 164 sondages.

## II-2) Classification des SEV : typologie des SEV du bassin de Saïss

L'expression analytique de la résistivité apparente mesurée en un point avec un dispositif Schlumberger est donnée par l'Équation 1 (Pekeris, 1940, Koefed, 1970, Parasnis. D; 1997) :

$$\text{Équation 1 } \rho_{ap-Schl}(L/2) = \rho_1 + L^2 \int_0^{\infty} (T(\lambda) - \rho_1) \mathcal{J}_1\left(\lambda \frac{L}{2}\right) \lambda d\lambda$$

Avec

$$T_i(\lambda) = \frac{T_{i+1} + \rho_i th(\lambda t_i)}{1 + \frac{T_{i+1} th(\lambda t_i)}{\rho_i}}$$

Où  $L/2$  est la demi-longueur entre électrodes d'injection,  $T(\lambda)$  le noyau intégral de Schlichter et  $\lambda$  la variable d'intégration et  $J_1$  la fonction de Bessel du premier ordre.

Cette expression repose sur un ensemble d'hypothèses, la plupart du temps difficiles à réunir, qui sont de deux ordres. Les premières sont relatives à la géométrie et aux caractéristiques des terrains et les deuxièmes sont relatives au mode d'injection et à la nature du courant. Elles peuvent être résumées ainsi :

- les couches doivent être en nombre fini, d'épaisseur finie et séparées par des limites planes et horizontales à l'exception de la dernière qui est considérée d'épaisseur infinie,
- l'extension latérale des couches est considérée comme infinie,
- les couches sont considérées comme homogènes et isotropes du point de vue électrique,
- les sources de courant continu doivent être ponctuelles et de dimension négligeable au regard de l'échelle de l'expérience.

Il est clair, que ces conditions, particulièrement celles relatives à la nature et à la géométrie des couches, ne sont pas totalement réunies ; ceci est particulièrement le cas pour les formations de subsurface du Plioquaternaire dont les conditions paléogéographiques de mise en place conditionnent tout à la fois une hétérogénéité verticale et horizontale. Aussi pour pallier cette difficulté et, dans l'objectif d'avoir une bonne représentation des propriétés géoélectriques du bassin de Saïss, nous proposons une analyse statistique multidimensionnelle de la série des résistivités apparentes, afin de

proposer une interprétation globale des terrains sous-jacents. Cette analyse repose d'une part sur une analyse en composantes principales des 164 SEV en données centrées réduites et, d'autre part, sur une classification hiérarchique ascendante (Saporta, 1990) selon les mêmes principes qui ont été exposés dans le chapitre II dans lequel l'analyse statistique de la totalité des données (201SEV) a été proposée. Chaque sondage est alors considéré comme un point dans un espace vectoriel à vingt deux dimensions ( $p = 22$ ) dont les composantes sont les valeurs centrées et réduites des résistivités apparentes mesurées pour chacune des vingt deux distances inter-électrodes  $AB/2$ . L'observation de cet espace se fait classiquement par celle de sa projection dans les plans des premières composantes principales qui préservent au mieux la dispersion des points conjointement à l'analyse des corrélations linéaires des variables (Figure 51), ici des résistivités apparentes mesurées pour chaque couple de longueur inter-électrodes  $AB/2$ . Les calculs, pour l'analyse statistique multidimensionnelle, sont réalisés au moyen du logiciel SPAD©.

Dans ce qui suit, pour faciliter la rédaction, les demi longueurs ( $L/2 = AB/2$ ) des sondages de type Schlumberger sont transcrites en pseudo-profondeurs ( $z_e$  : profondeur médiane d'investigation (Edwards, 1977) comme suit :

$$\rho_{app} = f(z_e)$$

avec

$$\text{Équation 2 } z_e = 0,191L$$

La résistivité apparente des terrains varie avec la pseudo-profondeur, plus celle-ci est importante plus l'influence des terrains superficiels décroît ; cette diminution, compte tenu de la dispersion des valeurs, n'est pas aisément quantifiable. On propose donc de calculer les coefficients de corrélation entre résistivités apparentes par couple de pseudo-profondeurs. Le coefficient de corrélation des résistivités apparentes pour un couple de pseudo-profondeurs (Figure 51) traduit, tout à la fois, la relation de dépendance fonctionnelle des résistivités apparentes entre elles et la relation de dépendance statistique (non causale). Les valeurs prises par les coefficients de corrélation permettent donc d'établir les couples de pseudo-profondeurs pour lesquels et à partir desquels la dépendance fonctionnelle n'apparaît plus ainsi que les tendances statistiques des résistivités apparentes à être corrélées ou non.

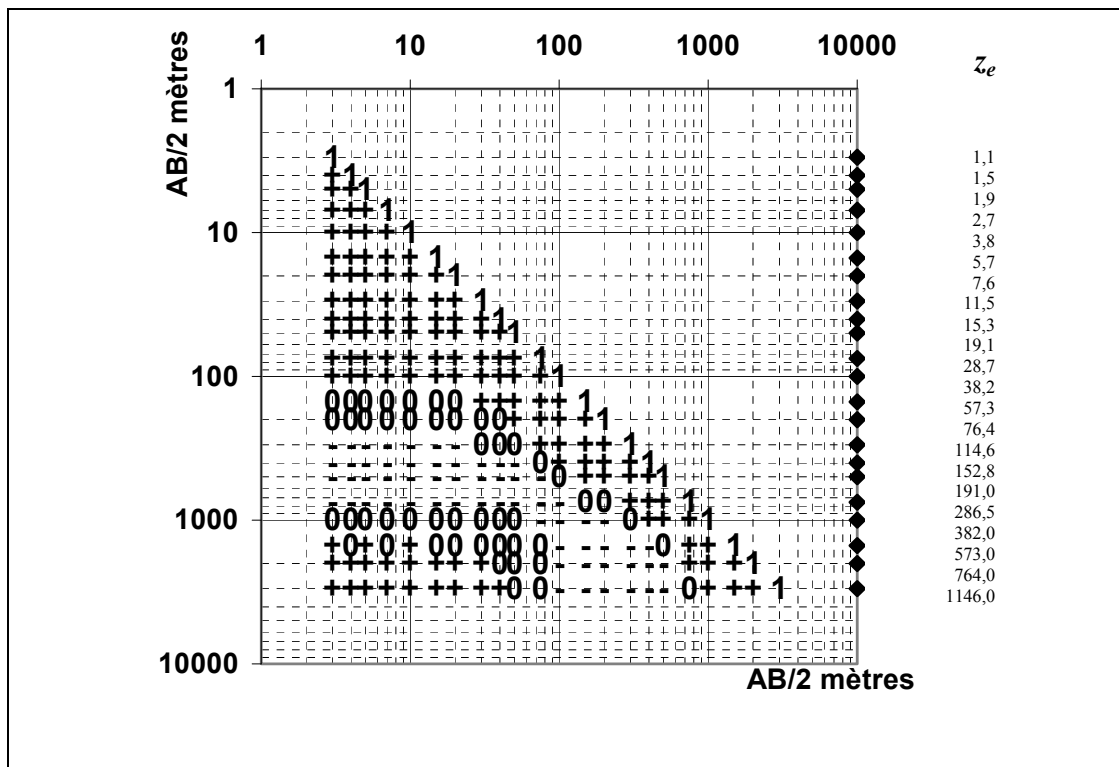


Figure 51: Cartographie des coefficients de corrélation des résistivités apparentes par couple de pseudo-profondeurs (les symboles +, - et 0 représentent une corrélation positive, négative ou une absence de corrélation) (164 SEV)

Par exemple, les coefficients de corrélation pour les couples de pseudo-profondeur  $z_e = 76$  m ( $AB/2 = 200$  m) et  $z_e' = [3, 5, \dots, 15]$  m ( $AB/2 = 3, 4, \dots, 40$  m) prennent des valeurs qui ne permettent pas de rejeter l'hypothèse  $H_0$  de l'indépendance des valeurs des résistivités apparentes ( $r < 0,15$  avec un degré de liberté  $\nu = N-2 = 162$  pour le risque de première espèce  $\alpha = 0,05$ ). Le non rejet de l'hypothèse  $H_0$  permet, dès lors, de considérer que les valeurs des résistivités apparentes obtenues pour des pseudo-profondeurs inférieures à 15 m sont fonctionnellement indépendantes des résistivités obtenues pour les pseudo-profondeurs plus grandes. La Figure 51 permet ainsi de suivre les couples de pseudo-profondeurs pour lesquels la dépendance serait de nature essentiellement statistique ; ces couples sont ceux qui sont situés en dessous des zéros sur cette figure ; ce sont ceux correspondant à la plage des valeurs négatives des coefficients de corrélation (opposition entre les résistivités apparentes des couches de la subsurface résistantes et des niveaux du Miocène plus conducteurs) et à la plage des valeurs situées encore en dessous. Cette dernière plage pour laquelle les coefficients sont positifs traduit l'influence des niveaux résistants sous-jacents (le Lias essentiellement). On se propose donc d'établir une typologie des SEV du bassin de Saïss.

La typologie proposée est fondée sur la classification hiérarchique ascendante des cent soixante quatre sondages. Les variables sont les résistivités apparentes par pseudo-profondeur traitées en données

centrées réduites par la méthode de Ward et en utilisant la distance euclidienne (Saporta, 1990). Les résultats sont présentés et décrits en s'appuyant :

-sur la répartition des sondages sur les plans factoriels (essentiellement F1-F2 et F1-F3) issus de l'analyse en composantes principales (

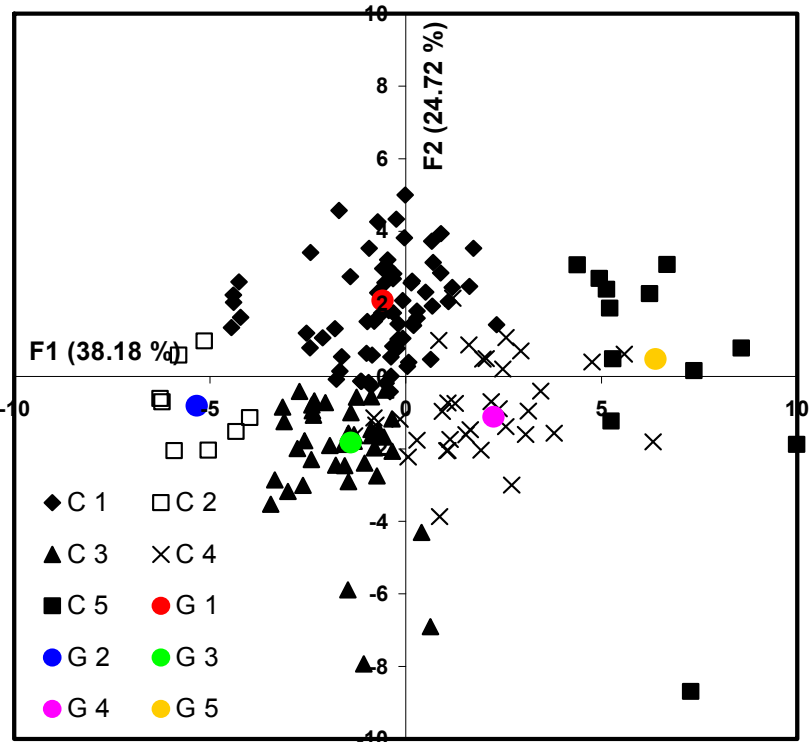
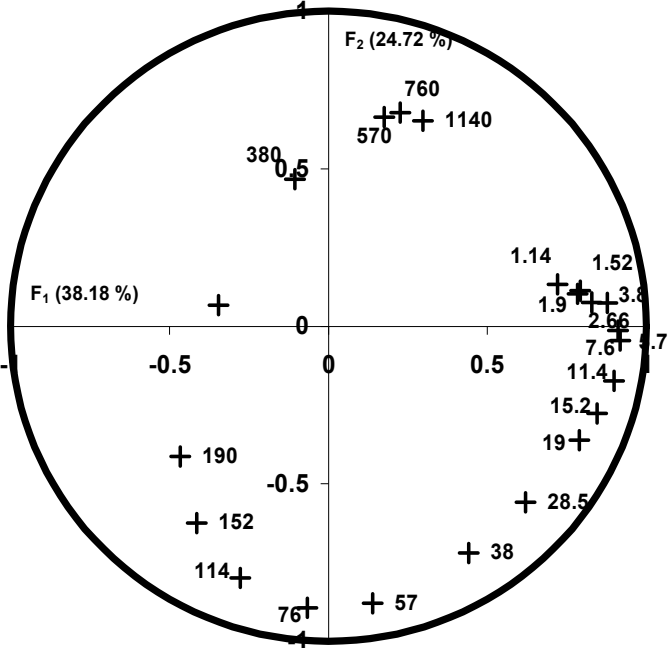


Figure 52à,

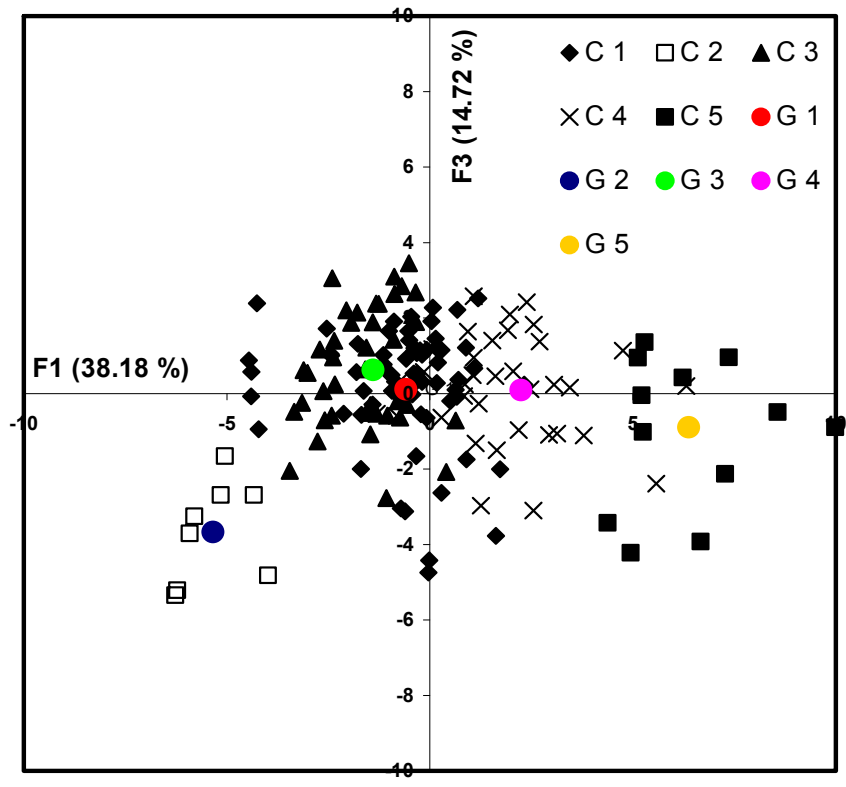
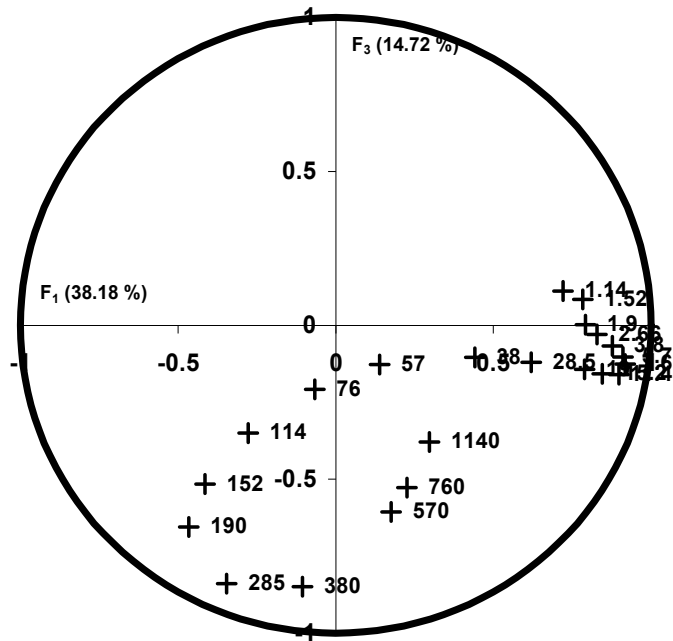


Figure 53a),

-sur la localisation géographique des sondages (Figure 54),

-sur les résultats globaux de la classification hiérarchique (tableau des distances entre centres de gravité des différentes classes et des inerties intra et interclasses).

Cinq classes de SEV ressortent de l'analyse : les cinq classes s'organisent en deux groupes, le groupe des classes 1, 3 et 4 les plus proches du centre de gravité et le groupe des classes 2 et 5 les plus éloignées (Figure 54). Par ailleurs les distances entre centres de gravité mettent en évidence l'éloignement des classes 2 et 5 et de chacune de ces deux classes aux trois autres classes qui sont relativement plus proches l'une de l'autre (Tableau 6). Ces cinq classes s'individualisent également bien sur le plan des deux premières composantes principales qui absorbent 62,90% de la variance totale. Une opposition nette s'établit entre les sondages des classes 2 et 5 : en effet, partant des sondages pour lesquels les composantes sur l'axe F1 sont négatives vers ceux pour lesquels les composantes sont positives, on distingue bien la classe 2, de la classe 5. Les valeurs des résistivités apparentes pour les faibles pseudo-profondeurs ( $z_e \leq 11,4$  m) sont parmi les plus faibles pour la classe 2, les plus fortes pour la classe 5.

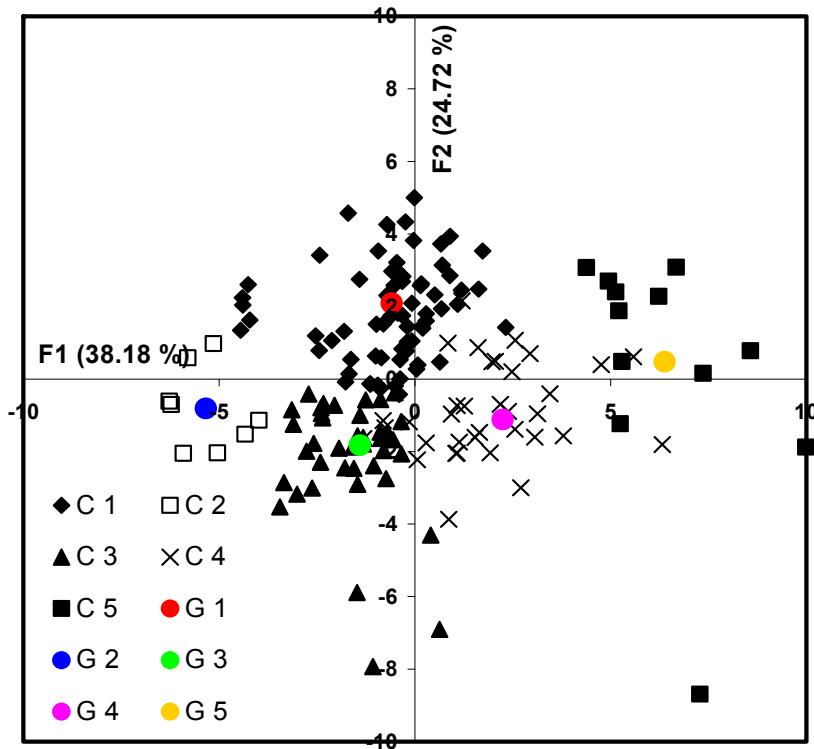
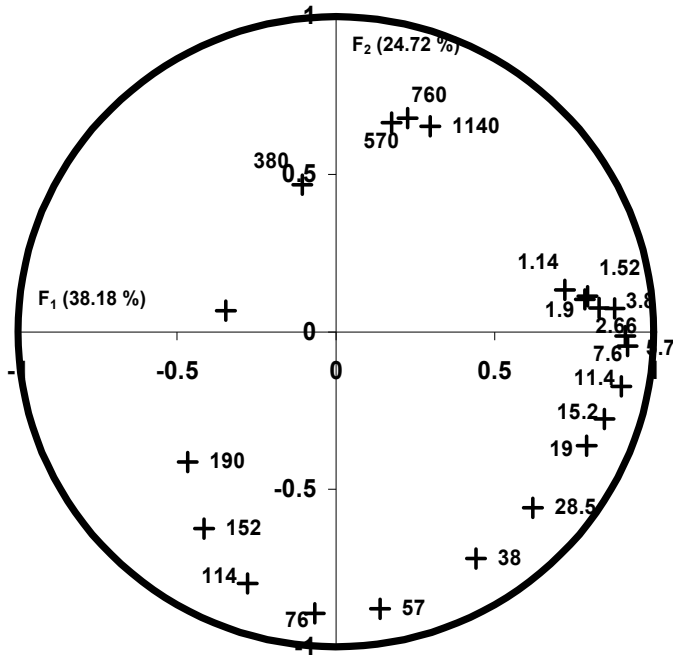


Figure 52: Cercle des corrélations F<sub>1</sub>-F<sub>2</sub> et projection des SEV sur le plan factoriel F<sub>1</sub>-F<sub>2</sub> (les lettres G marquent les centres de gravité par classe)

(Les étiquettes pour le graphe de gauche indiquent les pseudo-profondeurs des variables résistivités apparentes) (164 SEV)

Les classes 1, 4 et 3 distribuées autour du sondage moyen (origine du système,

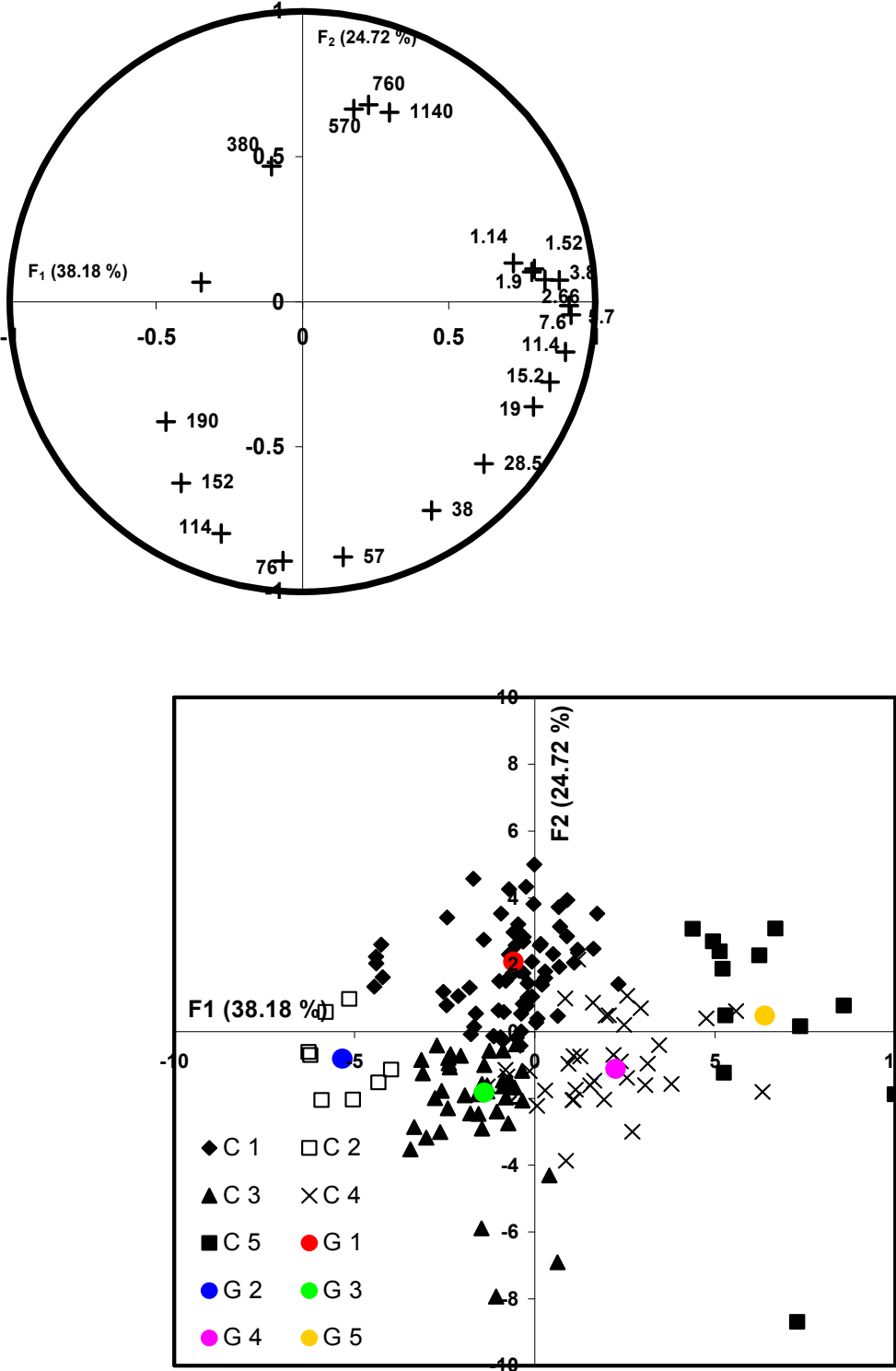


Figure 52 et



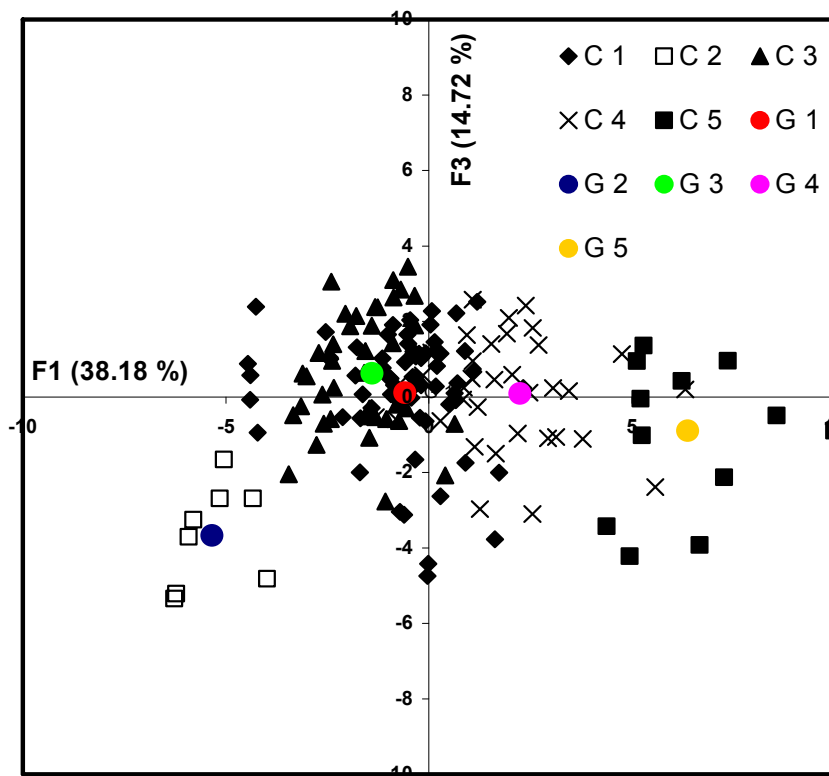
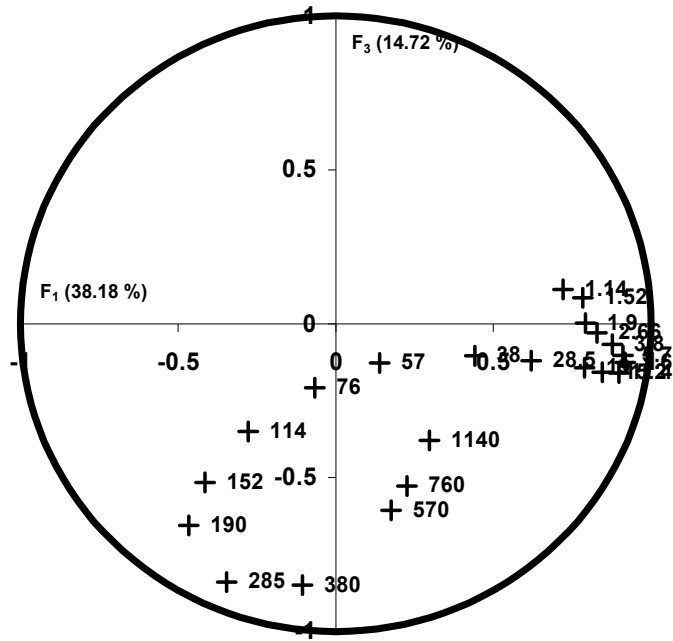


Figure 53) se distinguent également bien l'une de l'autre mais en tenant compte de leurs composantes sur le deuxième axe principal. En effet les composantes positives sur cet axe sont dues à l'influence des faibles valeurs des résistivités apparentes pour les pseudo-profondeurs intermédiaires ( $38,2 < z_e \leq 114,0$  m) et aux grandes valeurs de résistivités apparentes pour les grandes pseudo-profondeurs ( $570 < z_e \leq 1140$  m); les sondages des classes 1 et 3 sont ceux pour lesquels les

résistivités apparentes, pour ces pseudo profondeurs, sont respectivement les plus faibles et les plus fortes ; ceux de la classe 3 au contraire de ceux de la classe 1 montrent les plus fortes résistivités apparentes pour les pseudo-profondeurs intermédiaires mais les plus faibles pour les grandes pseudo-profondeurs. Par ailleurs les sondages de la classe 4 montrent des résistivités apparentes pour les faibles pseudo-profondeurs supérieures à celles des classes 1 et 3. Ces observations se traduisent sur la

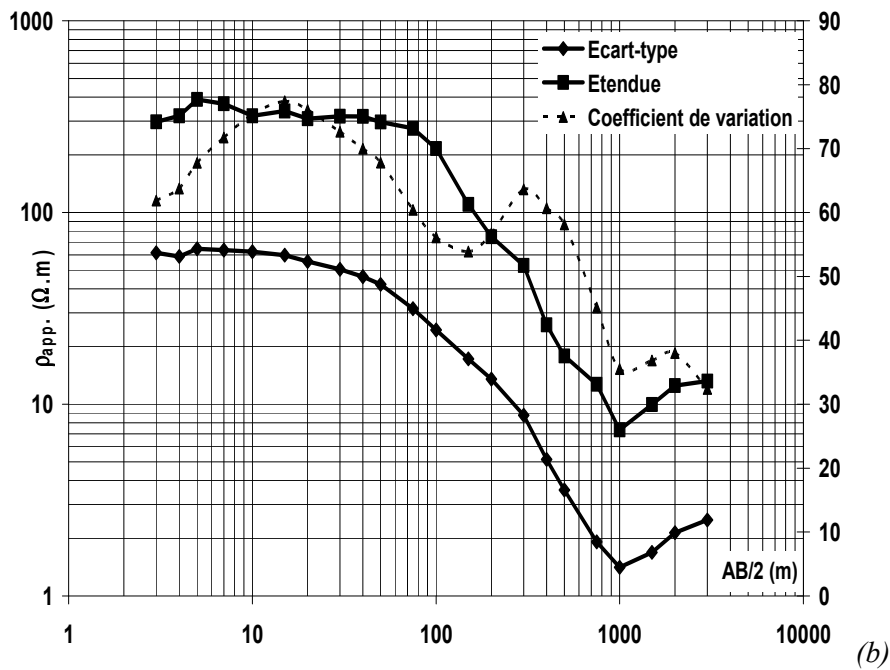
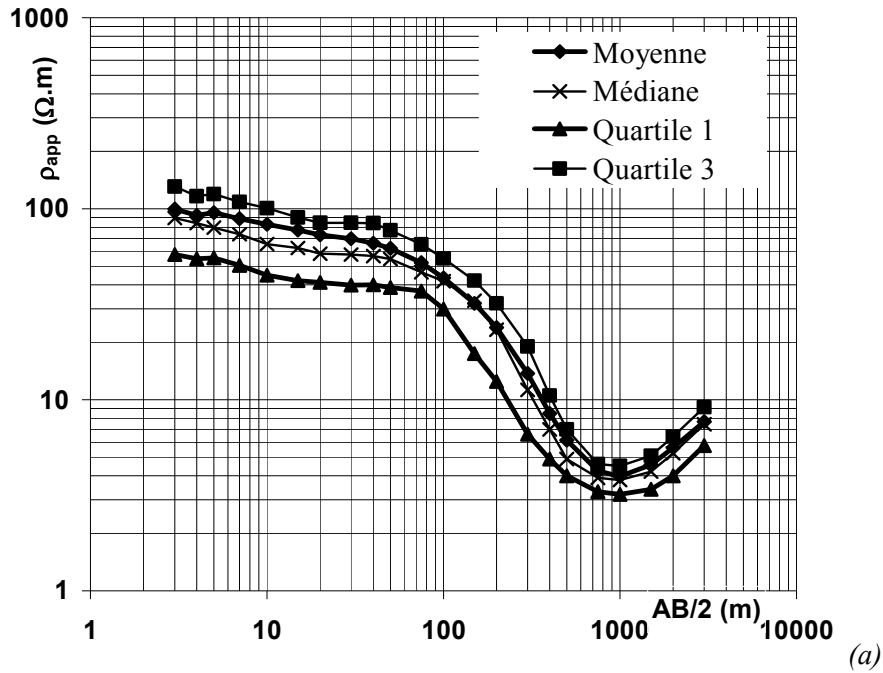


Figure 50 50 par le croisement des pseudo-sondages moyens des classes 4 et 5 pour  $z_e = 38,2$  m et des classes 1 et 3 pour  $z_e = 5,28$  m.



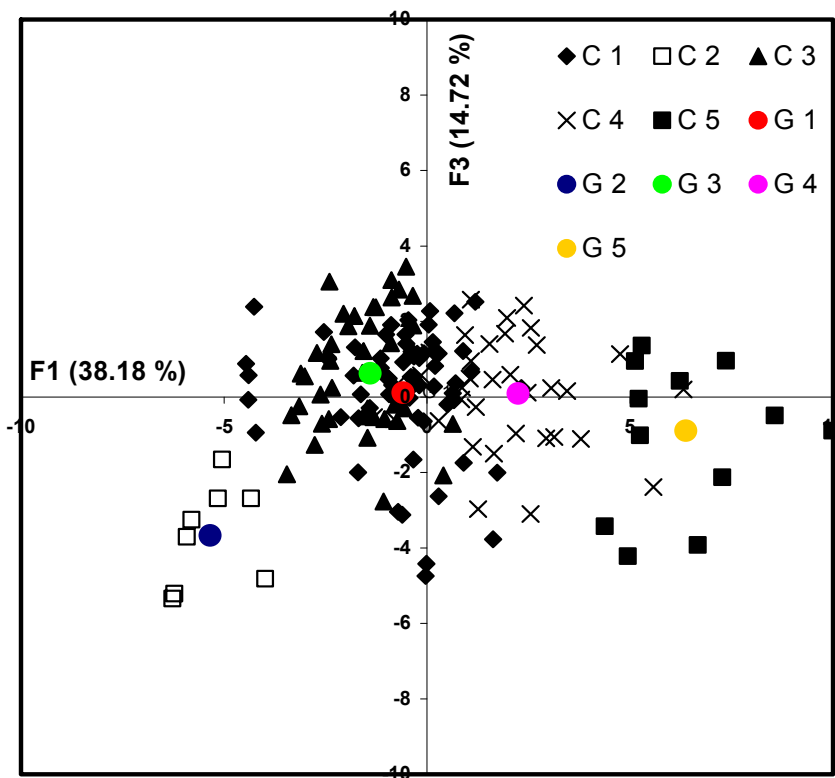
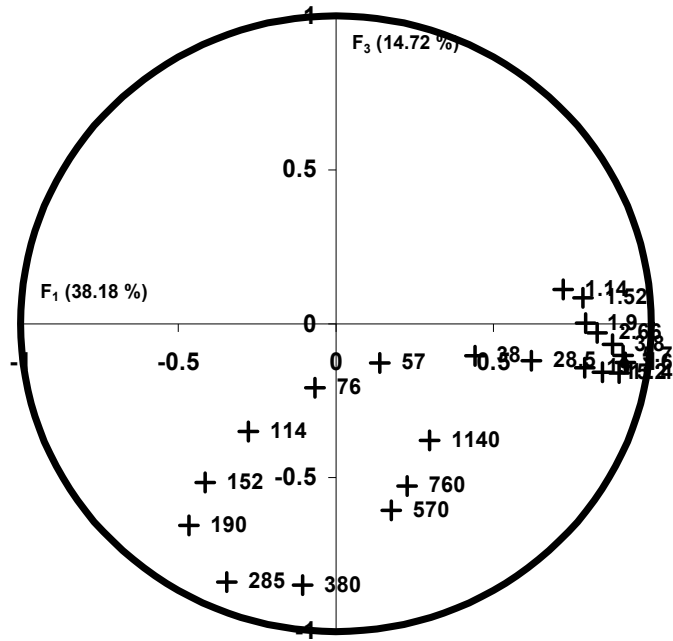
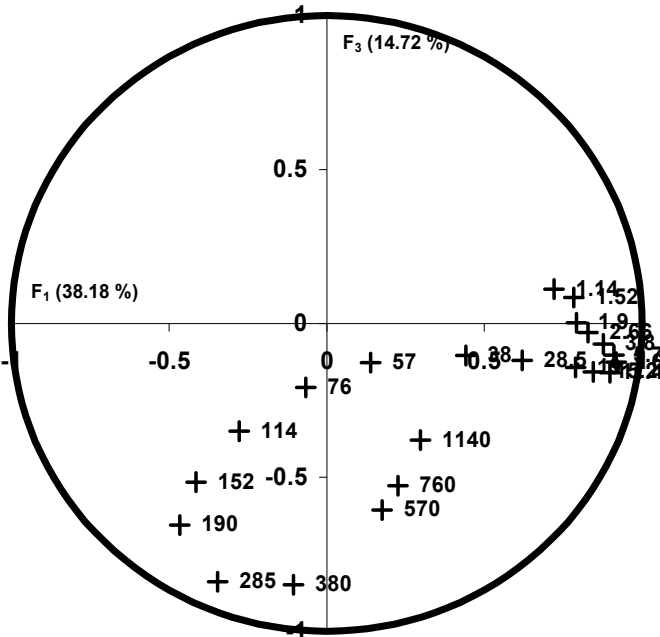


Figure 53: Cercle des corrélations F1-F3 et projection des SEV sur le plan factoriel F1-F3 (les lettres G marquent les centre de gravité par classe)

(Les étiquettes pour le graphe de gauche indiquent les pseudo-profondeurs des variables résistivités apparentes) (164 SEV)

Les valeurs négatives sur l'axe F3 qui absorbe 10,45% de la variance totale mettent en évidence les sondages pour lesquels les résistivités apparentes pour certaines grandes pseudo-profondeurs sont les plus élevées [ $Z_e = 380\text{m}$  en particulier]. Cet axe montre ainsi que les sondages de la classe 2 présentent tous des résistivités apparentes élevées (avec des composantes négatives sur l'axe F3) pour  $z_e = 380\text{ m}$  alors que les sondages des autres classes montrent des résistivités apparentes beaucoup plus réparties pour ces pseudo-profondeurs.

La cartographie des SEV en fonction de leur appartenance à telle ou telle classe est montrée Figure 54 ; il est possible d'y constater que les sondages d'une classe donnée ne se répartissent pas de façon aléatoire et que cette répartition traduit, dans une certaine mesure, la structuration géologique du bassin de Saïss. En effet, les sondages de la classe 2 (8 SEV) caractérisés par des valeurs de résistivité les plus faibles en sub-surface se répartissent essentiellement en limite nord ; on doit leur associer cinq sondages de la classe 1 situés au nord est du bassin en raison de leurs très faibles valeurs de résistivités apparentes en sub-surface (sondages de cette classe dont les composantes sur l'axe F1 de la



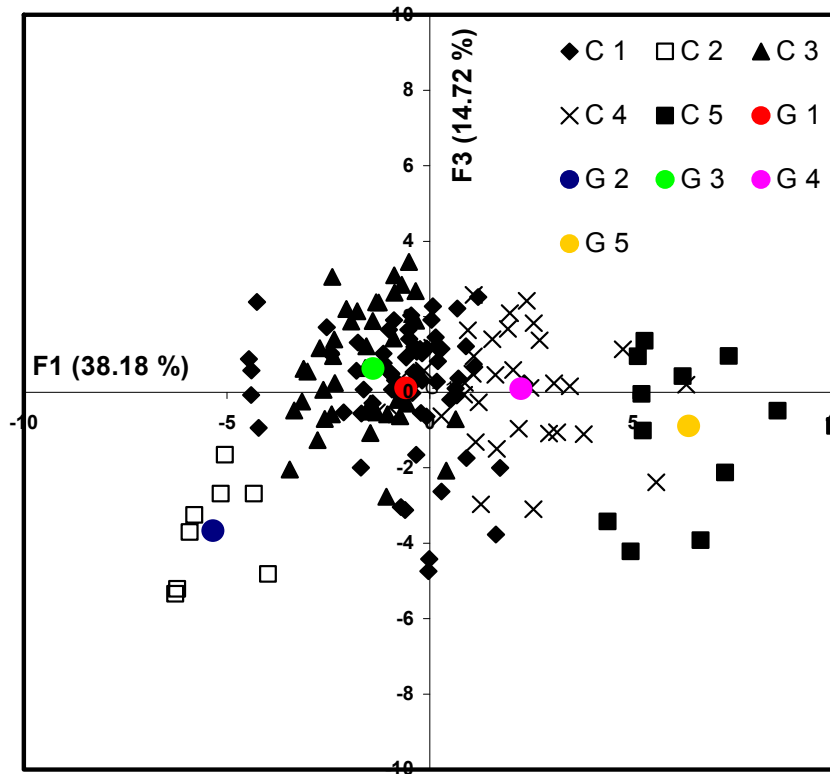


Figure 53 53 sont les plus faibles). Les sondages de la classe 5 (13 SEV) se répartissent en trois domaines de faible extension chacun mais pour lesquels les résistivités apparentes en subsurface sont les plus grandes. Les sondages des classes 1 et 4 (respectivement 68 et 35 sondages) se répartissent en zones connexes organisées en deux couronnes concentriques non fermées au nord autour des sondages de la classe 3 (40 sondages).

Tableau 5: Paramètres de la classification hiérarchique

Classe	Nombre d'individus	Inertie totale	Inertie Intraclasse	Inertie interclasse	% Inertie totale	Distance des centres des classes à l'origine
1	68	5,38	3,73	1,65	24,55 %	2,0
2	8	2,71	0,28	2,43	12,27 %	6,9
3	40	3,89	1,95	1,94	17,73 %	2,8
4	35	3,47	2,49	0,99	15,91 %	2,1
5	13	6,55	2,81	3,74	29,55 %	6,8

Les résultats présentés jusqu'ici ont reposé sur une analyse globale des résistivités apparentes : en premier lieu tous les sondages confondus et, en deuxième lieu, par classe de sondages. Afin de mieux décrire l'évolution des résistivités apparentes en fonction des pseudo-profondeurs et de caractériser leur variation spatiale, on propose, ci-dessous, une cartographie des résistivités apparentes par modélisation

géostatistique pseudo-profondeur par pseudo-profondeur dont l'interprétation sera fondée sur l'inversion des sondages moyens par classe.

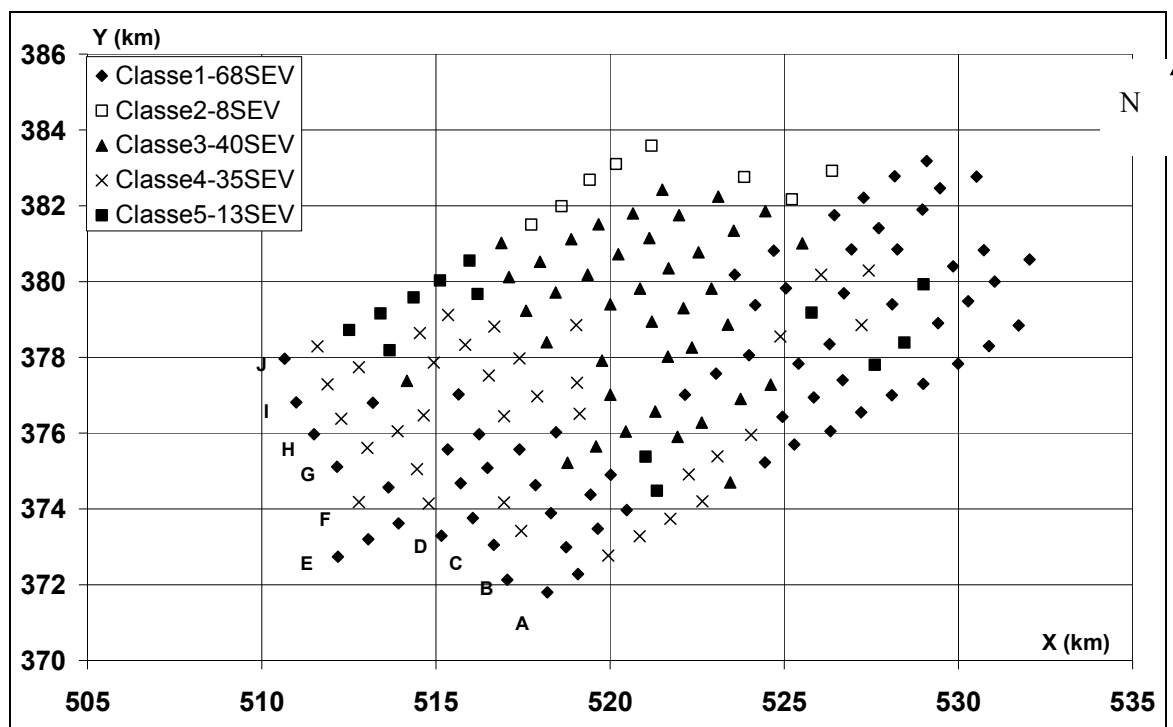


Figure 54: Localisation géographique des 164 sondages

Tableau 6: Distances entre centres de gravité des classes

Variable	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Classe 1	0	-	-	-	-
Classe 2	7,2	0	-	-	-
Classe 3	4,2	6,2	0	-	-
Classe 4	3,7	8,6	3,8	0	-
Classe 5	7,8	12,3	8,8	5,3	0

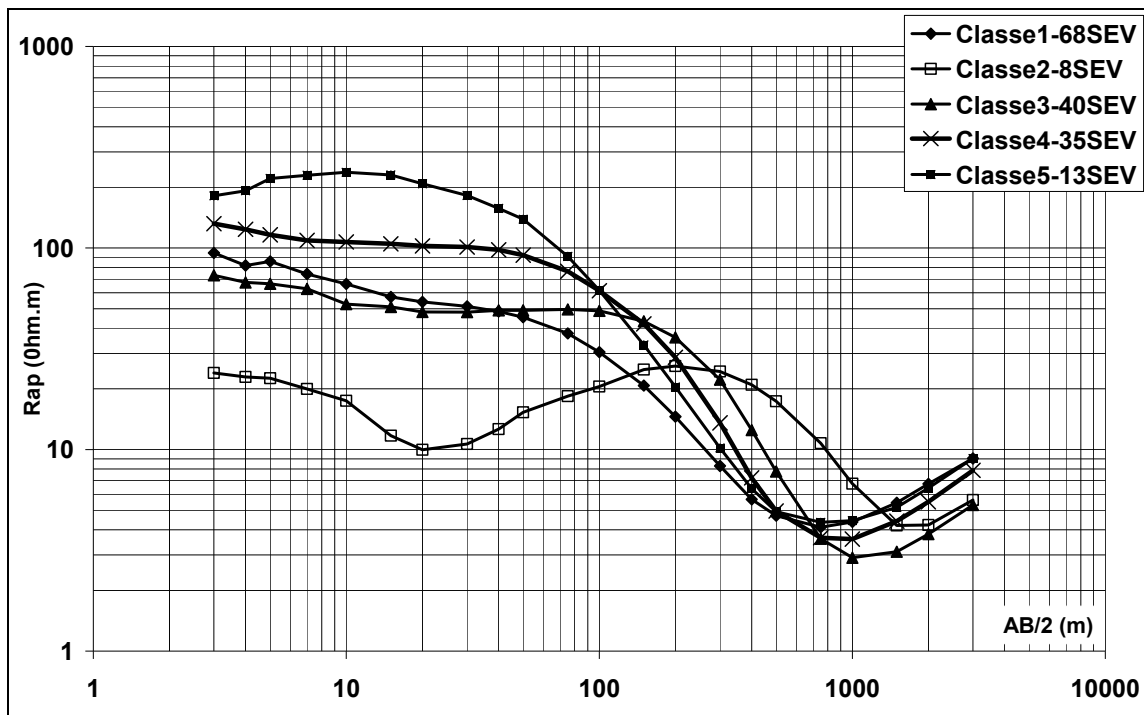


Figure 55: Pseudo-sondages moyens des cinq classes (164 SEV)

### III) ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES DONNEES

#### III-1) Cartographie par Krigeage des résistivités apparentes par pseudo-profondeur

##### III-1-1) La méthode

On se propose, dans ce paragraphe d'établir une cartographie des résistivités apparentes pour chaque pseudo-profondeur par modélisation géostatistique (Krigeage). Cette étude se décompose en trois étapes, toutes fondées sur les variogrammes des logarithmes décimaux des résistivités apparentes pour une pseudo-profondeur considérée:

- établissement des cartes variographiques,
- ajustement d'un modèle à chaque variogramme expérimental,
- Krigeage pour la cartographie,

Les résistivités apparentes sont considérées comme des variables régionalisées (Armstrong, 1998).

$$\text{Équation 3} \quad \rho_{app} = \rho_{app}(x, z_e)$$

où  $x$  est la vecteur position du SEV dans le plan correspondant à la pseudo-profondeur  $z_e$ . Les cartes variographiques, qui nous permettent de mettre en évidence une éventuelle anisotropie dans la structure spatiale des données, sont l'expression graphique des variogrammes calculés dans chaque direction de l'espace (ici tous les  $10^\circ$ ):

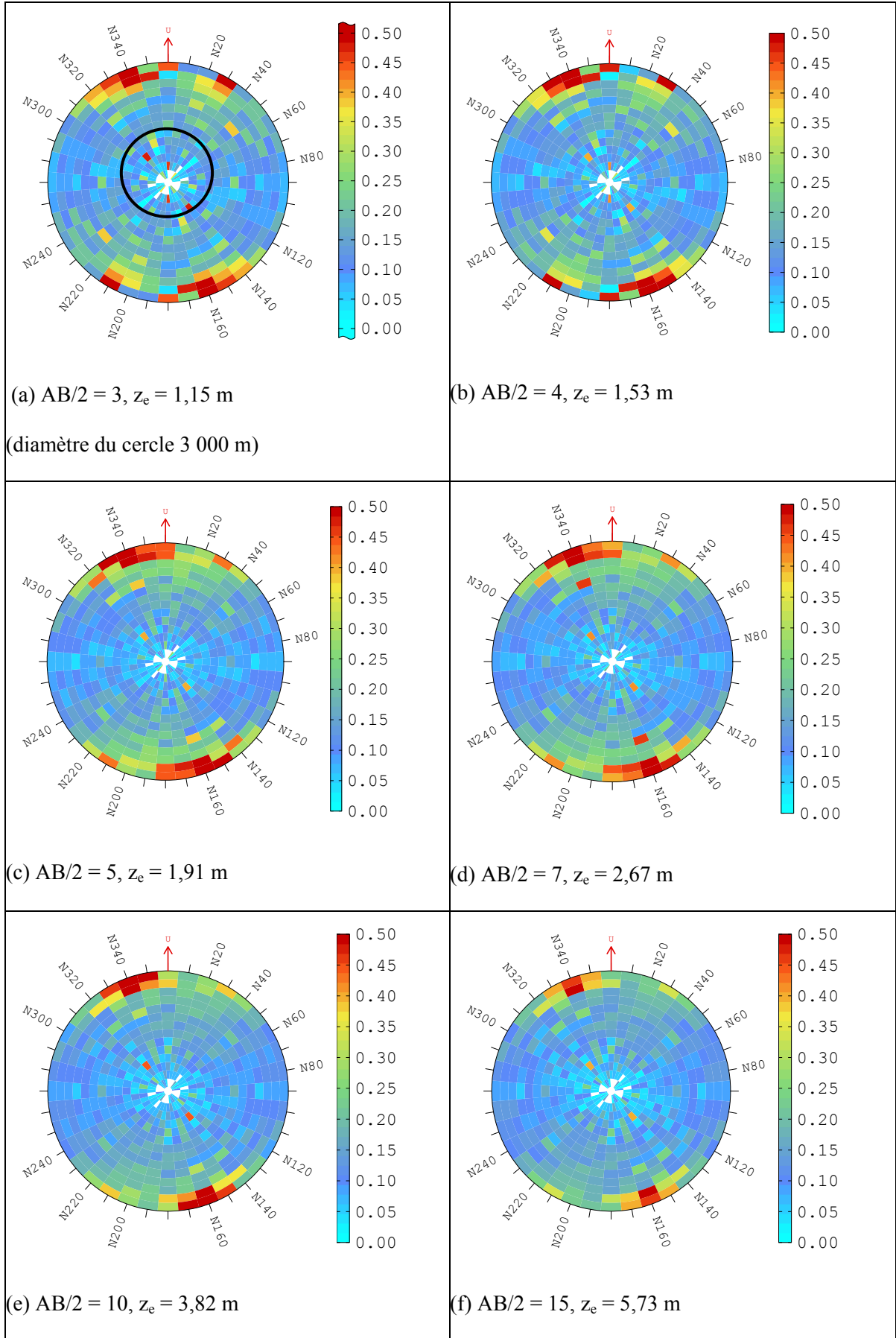


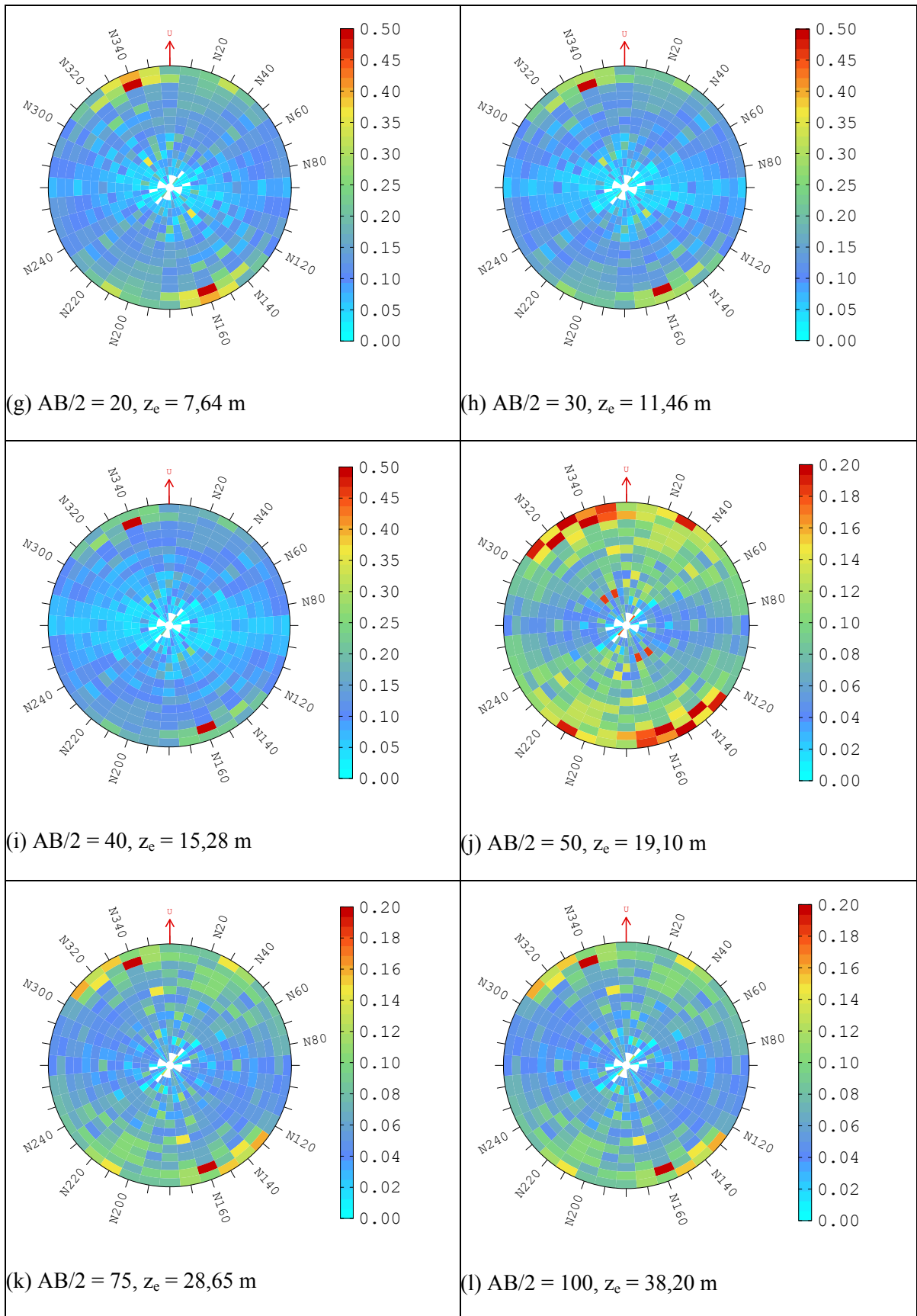
$$\text{Équation 4} \quad \hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (\log(\rho_{app}(x)) - \log(\rho_{app}(x+h)))^2$$

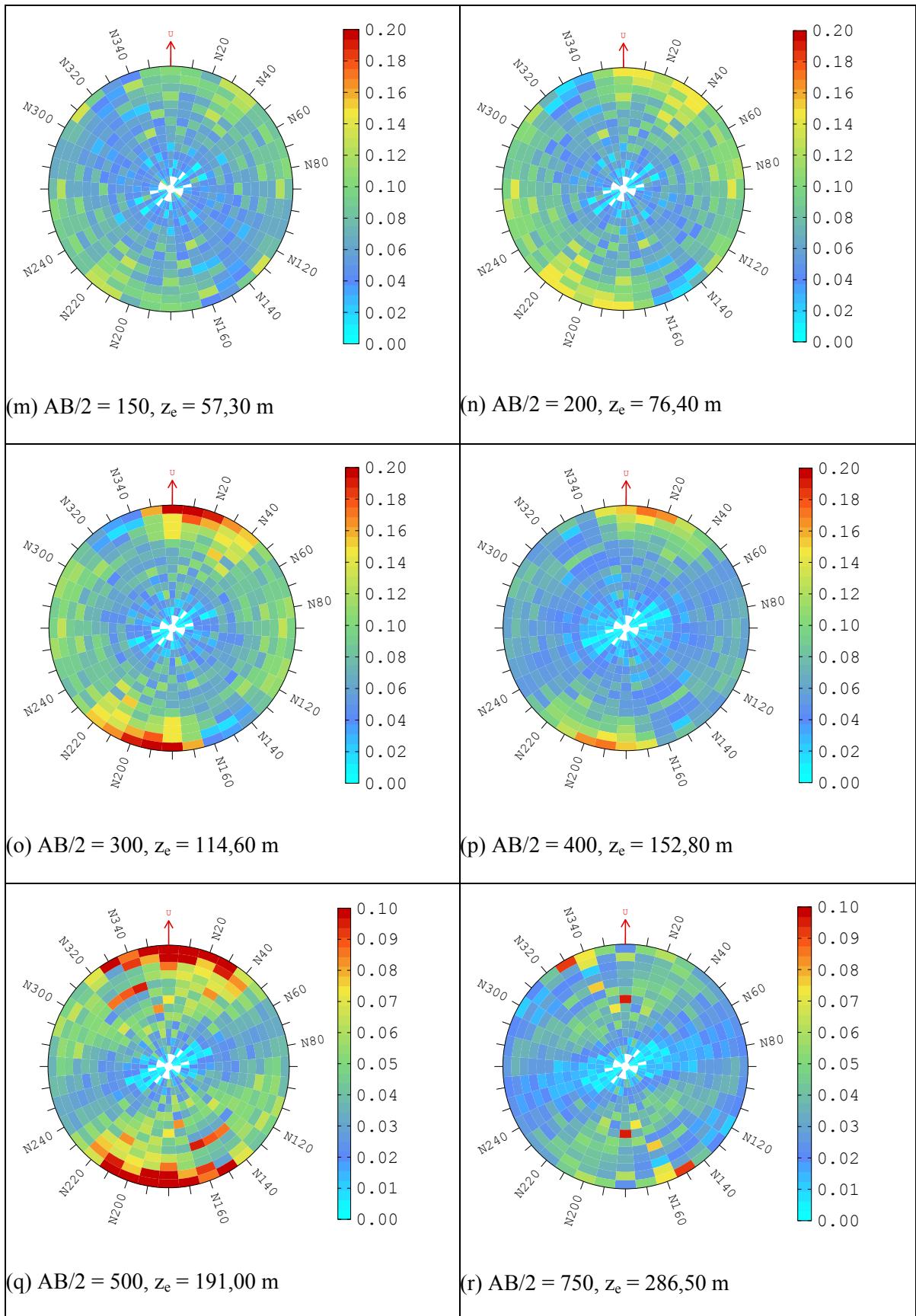
Où  $h$  est la distance entre points pour lesquels on calcule l'accroissement de la résistivité apparente. et  $N$  est le nombre de couples dont les points sont espacés de  $h$ .

La Figure 56 56 présente des cartes variographiques pour chacune des pseudo-profondeurs  $z_e$  (15 pas de 650 m), l'échelle des couleurs correspond aux valeurs prises par le variogramme pour chaque direction et chaque pas de mesure, ce qui impose une modélisation des variogrammes pour ces 22 pseudo-profondeurs.

On montre sur la Figure 56 56, les vingt deux cartes variographiques qui ont été calculées ; ces cartes sont établies avec un pas  $h$  compris entre 650 m et 9750 m. Ces cartes présentent un double intérêt : elles montrent d'une part que, pour les faibles valeurs de  $h$  (pour  $h < 3\,000$  m), il n'y pas ou très peu d'anisotropie zonale ni géométrique et, d'autre part, que, pour des valeurs de  $h$  croissantes, l'anisotropie associée à des gammes de valeurs de variance variables apparaît, traduisant ainsi l'évolution de la structuration géoélectrique du bassin. Ainsi, au delà de  $h = 3\,000$  m alors qu'une direction NNW SSE apparaît pour les niveaux de faibles pseudo-profondeurs avec des valeurs des variances relativement élevées (Figure 56 a, f), les deux directions sont clairement exprimées (Figure 56 s, u) pour les plus grandes pseudo-profondeurs mais avec des valeurs très faibles. L'une de ces directions est celle de l'allongement du bassin (N 70°E) ; dans cette direction, la variance est particulièrement faible (au maximum égale à 0,04) montrant ainsi l'homogénéité des résistivités apparentes ; l'autre (N 0°E) est la direction d'approfondissement du bassin pour laquelle les valeurs de variance atteignent 0,07 traduisant des résistivités apparentes légèrement plus dispersées. Les cartes variographiques, pour les pseudo-profondeurs intermédiaires (Figure 56 n, r) sont caractérisées par une anisotropie plus diffuse et des variances des valeurs de variance intermédiaires aux précédentes.







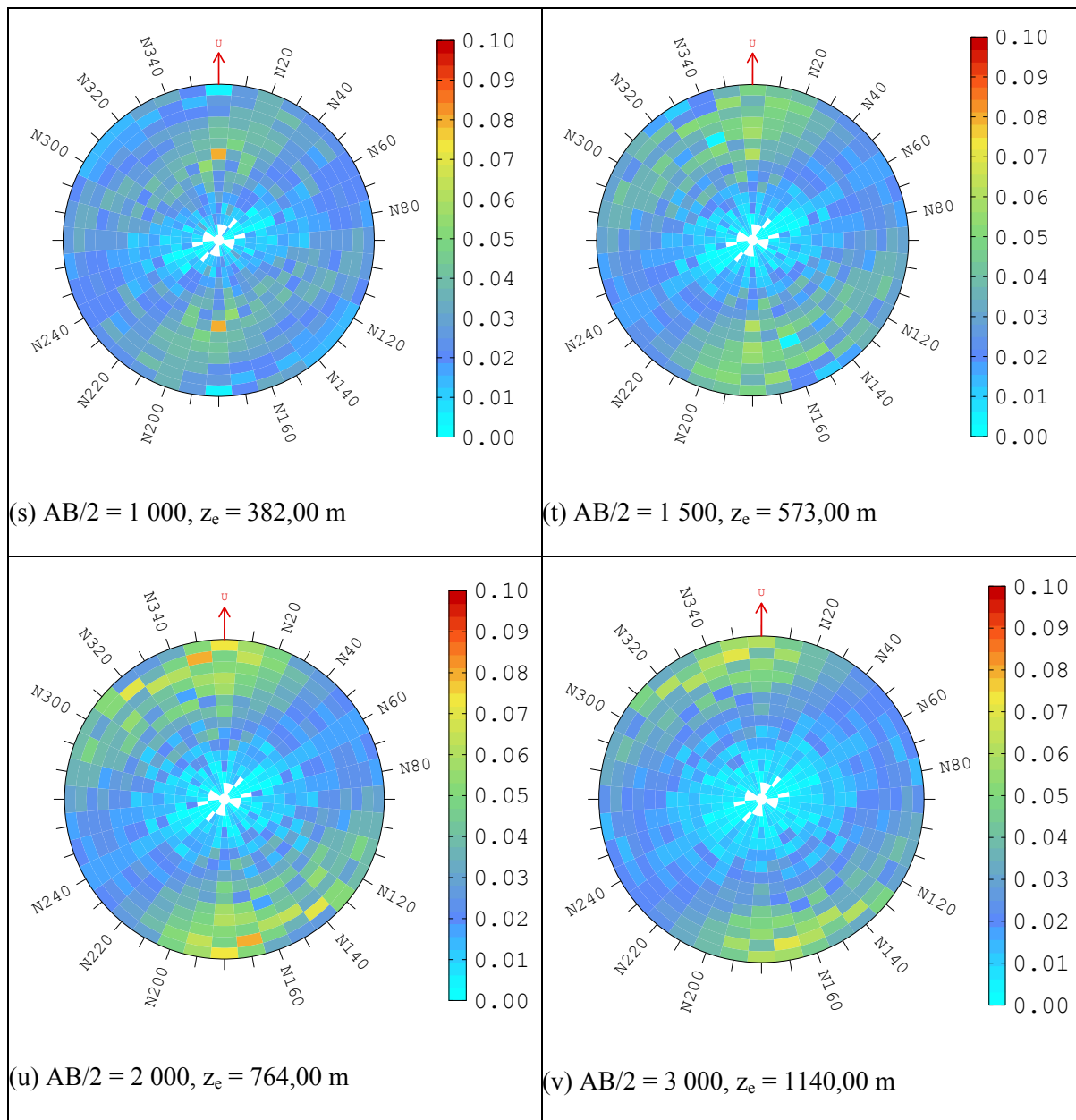
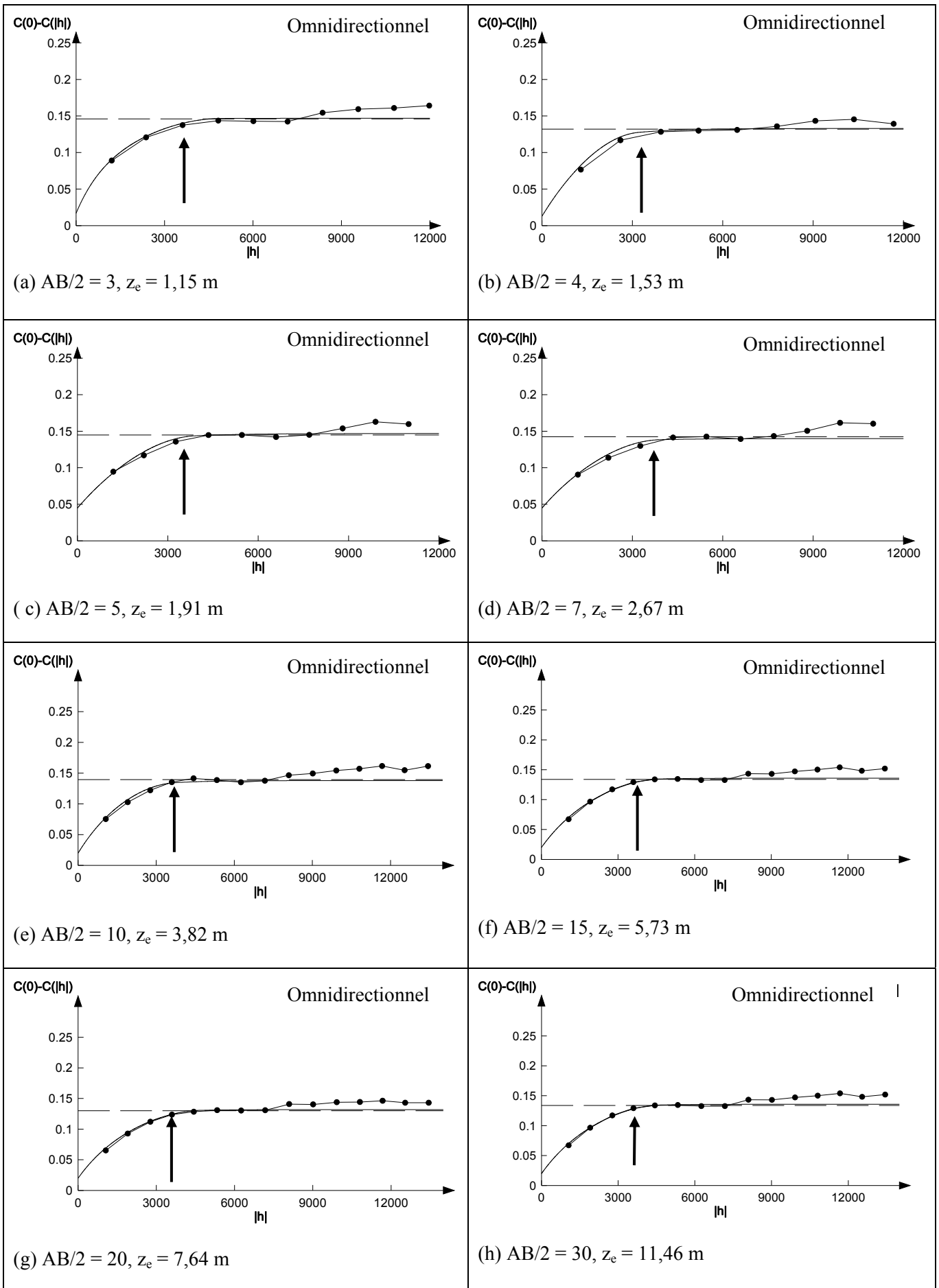


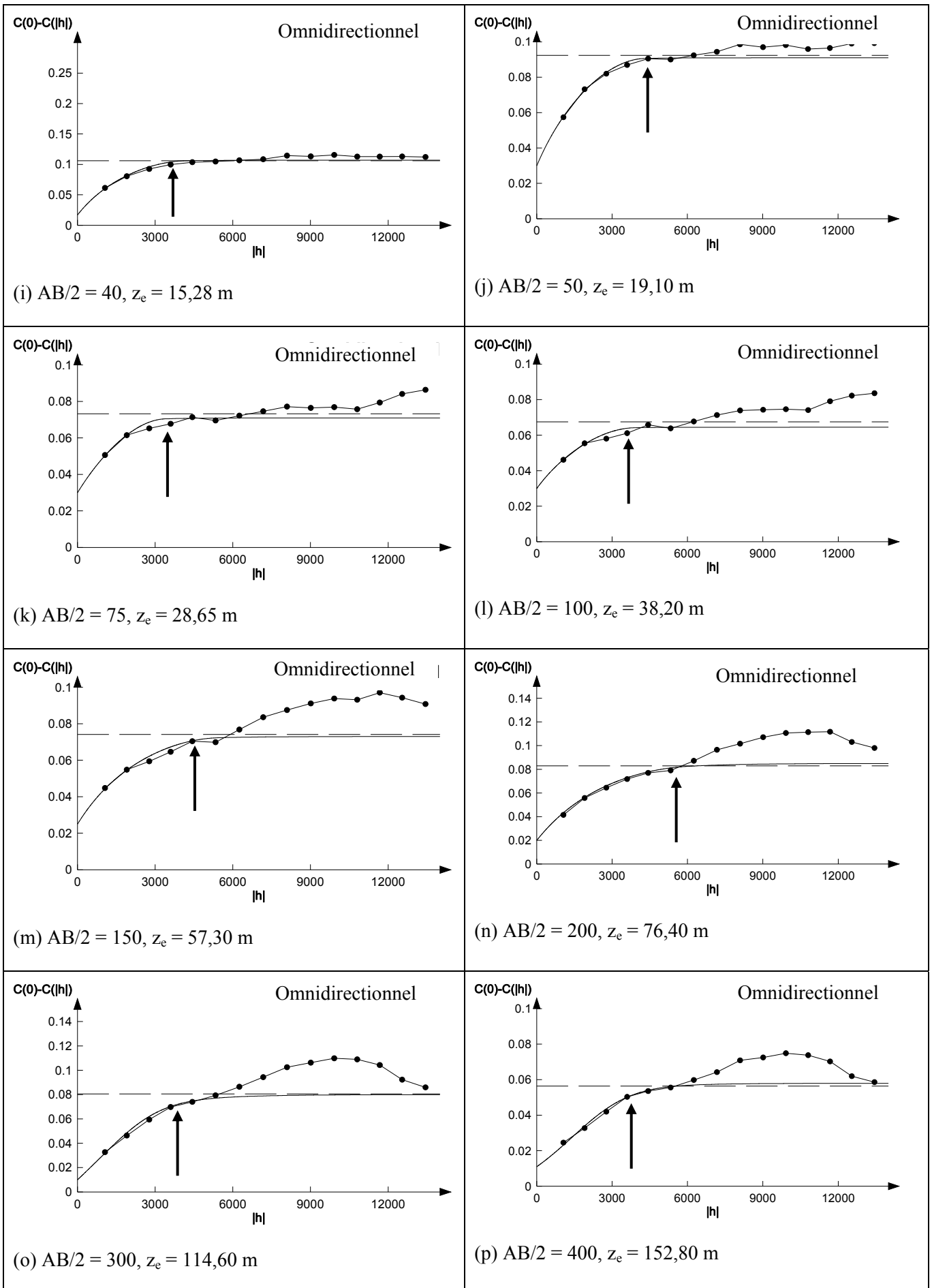
Figure 56: Cartes variographiques pour les 22 pseudo-profondeurs  $z_e$  (15 pas de 650 m)

En raison de l'absence d'anisotropie pour les faibles valeurs de  $h$ , il a été décidé de modéliser pour chaque pseudo-profondeur un variogramme expérimental omnidirectionnel, préalable nécessaire à l'estimation des résistivités apparentes par Krigeage. Pour tous les niveaux, les variogrammes sont tous très bien modélisés pour des valeurs de  $h$  inférieures ou égales à 3 000 m par la prise en compte, d'un effet de pépite et de deux structures l'une de type sphérique ou gaussien et l'autre de type exponentiel (Figure 57). Les valeurs des paramètres des modèles propres à chacune des pseudo-profondeurs sont présentées

Tableau 7; les valeurs des portées et des variances des variogrammes omnidirectionnels sont, elles, pour chacune des vingt deux pseudo-profondeurs données Tableau 8.







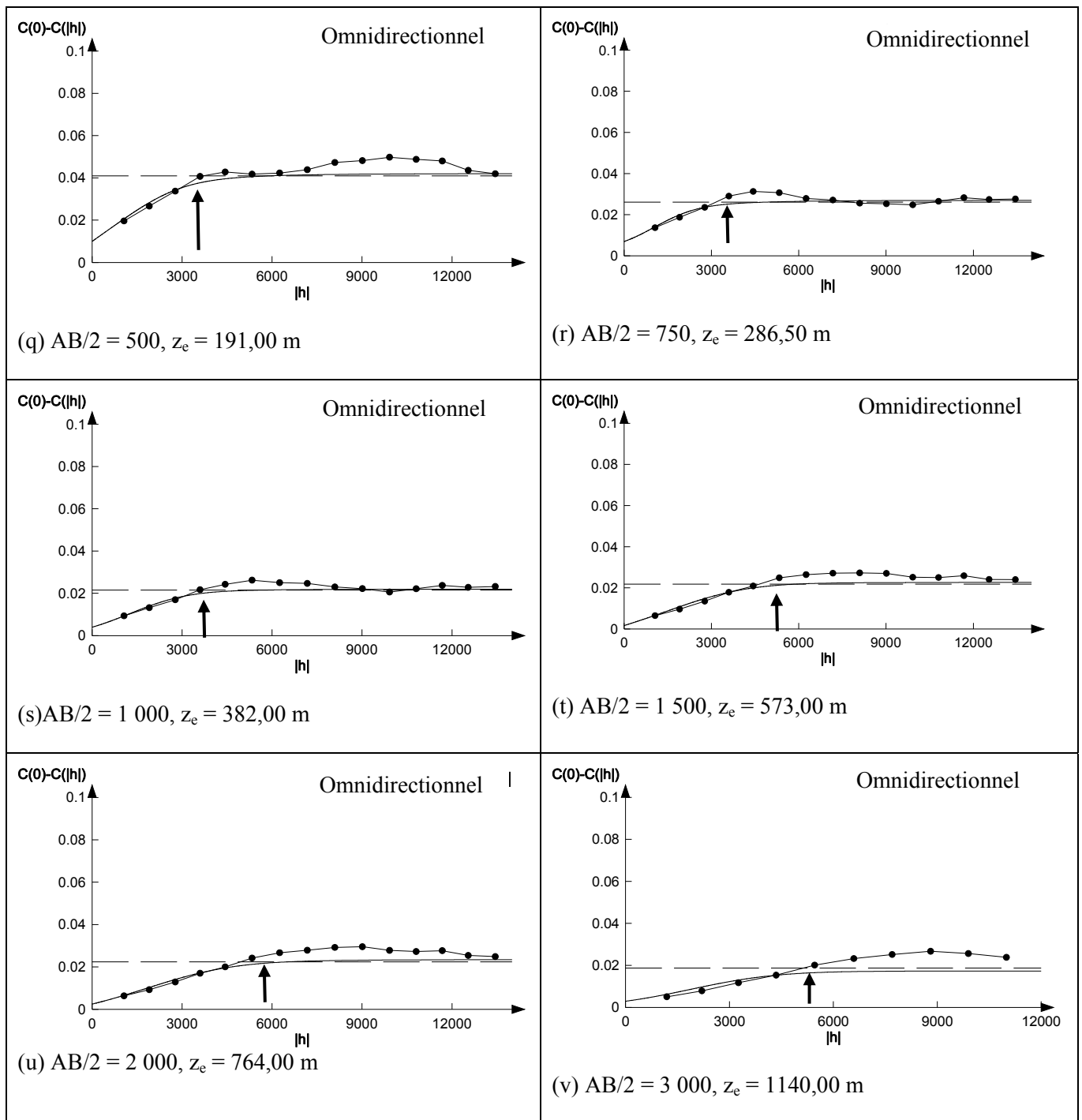


Figure 57: Variogrammes des logarithmes des résistivités apparentes

1- expérimentaux (points reliés), 2- modèles (ligne continue) (les portées sont indiquées par une flèche et les variances sous la forme d'un trait discontinu)

Tableau 7: paramètres des modèles de variogramme

	Effet de pépite	Modèle Sphérique		Modèle exponentiel		Variance totale $\log(\text{ohm.m})^2$
		Portée (m)	Palier	Portée (m)	Palier	
(a) $z_c = 1,15$ AB/2 = 3 m	0,017	4900	0,060	2700	0,070	0,147
(b) $z_c = 1,53$ AB/2 = 4 m	0,013	4300	0,050	3200	0,070	0,133
(c) $z_c = 1,91$ AB/2 = 5 m	0,045	3900	0,066	4800	0,036	0,147
(d) $z_c = 2,67$ AB/2 = 7 m	0,047	3900	0,065	3920	0,030	0,142
(e) $z_c = 3,82$ AB/2 = 10 m	0,020	3700	0,009	3900	0,060	0,086
(f) $z_c = 5,73$ AB/2 = 15 m	0,020	4700	0,066	3800	0,050	0,156
(g) $z_c = 7,64$ AB/2 = 20 m	0,020	4750	0,062	3700	0,050	0,132
(h) $z_c = 11,46$ AB/2 = 30 m	0,015	4300	0,064	3300	0,041	0,120
(I) $z_c = 15,28$ AB/2 = 40 m	0,017	4200	0,050	3300	0,040	0,107
(J) $z_c = 19,10$ AB/2 = 50 m	0,030	4300	0,040	3200	0,021	0,091
(k) $z_c = 28,65$ AB/2 = 75 m	0,030	3400	0,030	3300	0,011	0,071
(l) $z_c = 38,20$ AB/2 = 100 m	0,030	3900	0,024	3200	0,011	0,065
(m) $z_c = 57,30$ AB/2 = 150 m	0,025	5400	0,023	4500	0,025	0,073
(n) $z_c = 76,40$ AB/2 = 200 m	0,020	6000	0,020	6200	0,045	0,085
(o) $z_c = 114,60$ AB/2 = 300 m	0,010	Modèle Gaussien		5900	0,040	0,080
		4200	0,030			
(p) $z_c = 152,80$ AB/2 = 400 m	0,011	Modèle Gaussien		5900	0,020	0,058
		4700	0,027			
(q) $z_c = 191,00$ AB/2 = 500 m	0,010	Modèle Gaussien		5900	0,020	0,042
		4000	0,012			
(r) $z_c = 286,50$ AB/2 = 750 m	0,007	Modèle Gaussien		5900	0,010	0,027
		3100	0,010			
(s) $z_c = 382,00$ AB/2 = 1000 m	0,004	Modèle Gaussien		5700	0,008	0,019
		4000	0,010			
(t) $z_c = 573,00$ AB/2 = 1 500 m	0,002	Modèle Gaussien		6000	0,009	0,021
		5500	0,012			
(u) $z_c = 764,00$ AB/2 = 2 000 m	0,003	Modèle Gaussien		7700	0,009	0,024
		6000	0,012			
(v) $z_c = 1140,00$ AB/2 = 3 000	0,003	5500	0,010	5900	0,004	0,007

Tableau 4 : Portées et variances totales par pseudo-profondeur des Variogrammes omnidirectionnels

AB/2 (m)	ze (m)	Portée (m)	Variance totale (ohm.m) <sup>2</sup>
3	1,15	4000	0,142
4	1,53	3000	0,130
5	1,91	3500	0,145
7	2,67	4500	0,143
10	3,82	4500	0,140
15	5,73	4700	0,135
20	7,64	4600	0,130
30	11,46	4600	0,120
40	15,28	4700	0,110
50	19,10	4600	0,087
75	28,65	4500	0,075
100	38,20	4600	0,067
150	57,30	5000	0,072
200	76,40	5000	0,082
300	114,60	5000	0,080
400	152,80	5000	0,057
500	191,00	3800	0,042
750	286,50	3900	0,026
1000	382,00	4000	0,022
1500	573,00	5000	0,022
2000	764,00	6200	0,022
3000	1140,00	5000	0,019

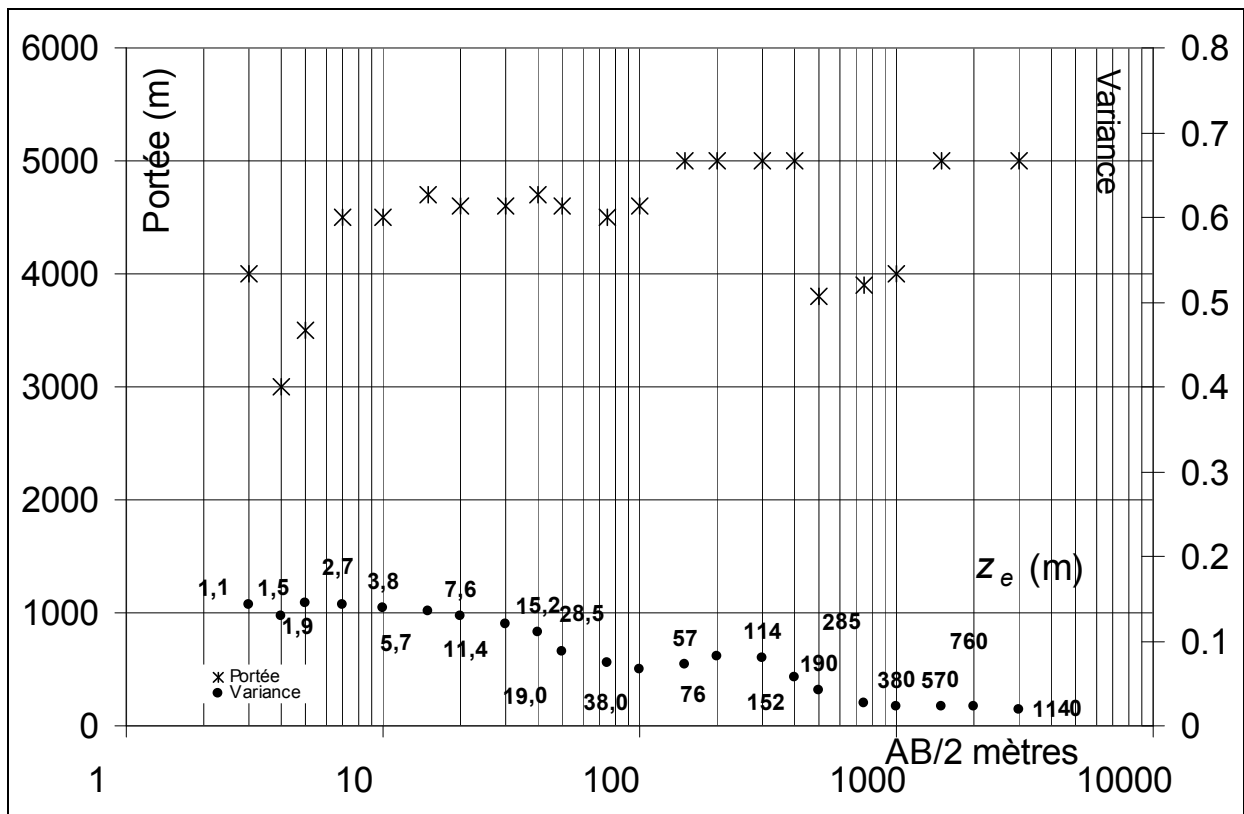


Figure 58: Graphe des portées (Gauche) et des variances (à droite) par pseudo-profondeur

Les cartes de Krigeage des résistivités apparentes (réalisées avec logiciel ISATIS© de Géovariances, 2008) résultent de l'estimation des valeurs des résistivités apparentes en tout point des nœuds d'une grille ; les modèles de variogrammes sont utilisés pour ces estimations : les résistivités apparentes sont linéairement estimées au moyen de l'équation ci-dessous :

$$\text{Équation 4} \quad \log(\rho_{app}^*) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \log(\rho_{app_i})$$

$$\text{avec} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$$

où  $\lambda_i$  sont les poids de Krigeage.

En respectant un voisinage circulaire qui a été choisi égal avec un rayon de 3 000 m ; en effet cette distance correspond, pour chaque variogramme à la distance pour laquelle l'ajustement des variogrammes théoriques aux variogramme expérimentaux est correct. Ce voisinage est divisé en quatre quadrants et le krigeage est basé sur la recherche au minimum d'un point par quadrant.

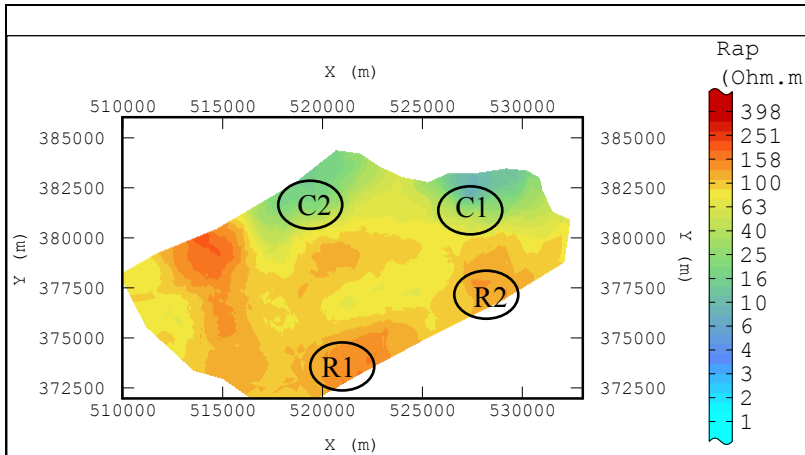
### III-1-2) Les cartes krigées

Après que les vingt deux cartes variographiques aient été calculées au moyen du logiciel ISATIS©, les vingt deux variogrammes expérimentaux omnidirectionnels l'ont été ainsi que les vingt deux cartes des résistivités apparentes par pseudo-profondeur; ces cartes sont assimilables à des « traînés électriques »

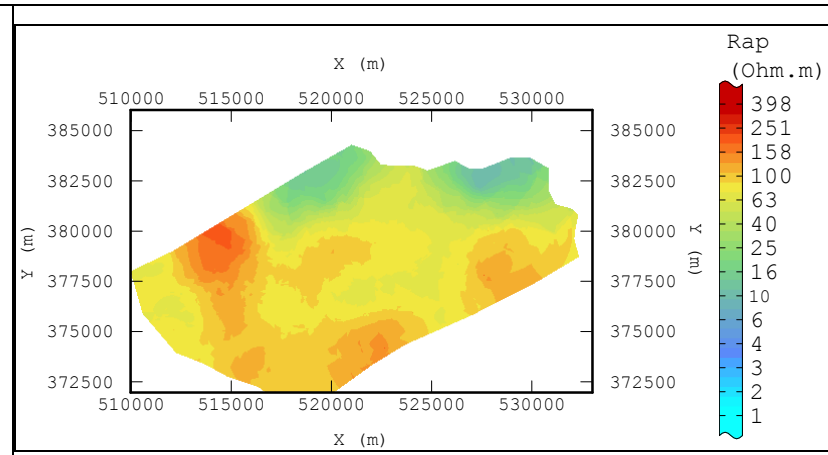
bidimensionnels. L'étendue spatiale des cartes krigeés correspond à un domaine du bassin dont la topographie est quasi horizontale.

On a présenté, Tableau 4, et Figure 58, les distances de corrélation et les variances par pseudo-profondeur. Il est alors possible de constater que, globalement, la dispersion des valeurs des résistivités apparentes (exprimées, on le rappelle, par leur logarithme), diminue avec  $z_e$  croissant jusqu'à  $z_e = 764$  m. En effet, la variance globale est élevée pour  $z_e = 1,15$  m (0,68), elle diminue pour  $z_e = 5,73$  m, atteint 0,022 pour  $z_e = 764$  m ; ensuite, elle augmente et devient égale à 0,046 pour  $z_e = 1146$  m. Dans le détail, la variance ne diminue pas de façon continue puisque de  $z_e = 57$  à 76 m (AB/2 : [100, 200 m]) elle augmente légèrement, pour décroître de  $z_e = 152,80$  à 382 m (AB/2 : [400, 1000 m]) et rester constante de  $z_e = 382$  à 764 m ([AB/2 : [1 000, 2 000 m])). Par ailleurs, l'analyse des distances de corrélation montre qu'elles fluctuent entre 3 000 et 5 000 m.

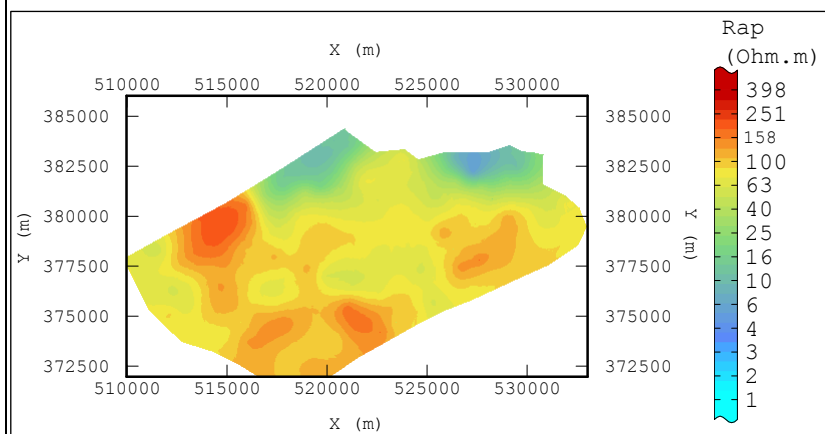
La tendance générale à la diminution de la variance traduit l'homogénéisation des résistivités apparentes au fur et à mesure que l'auscultation du bassin est de plus en plus profonde (i.e.  $z_e$  croissante) avec une atténuation (voire la disparition) de l'influence des résistivités des terrains les plus superficiels. La présence d'une distance de corrélation par pseudo-profondeur reflète l'organisation spatiale des résistivités apparentes. Une analyse détaillée de la distribution spatiale des résistivités apparentes par pseudo-profondeur est proposée ci-dessous (Figure 59).



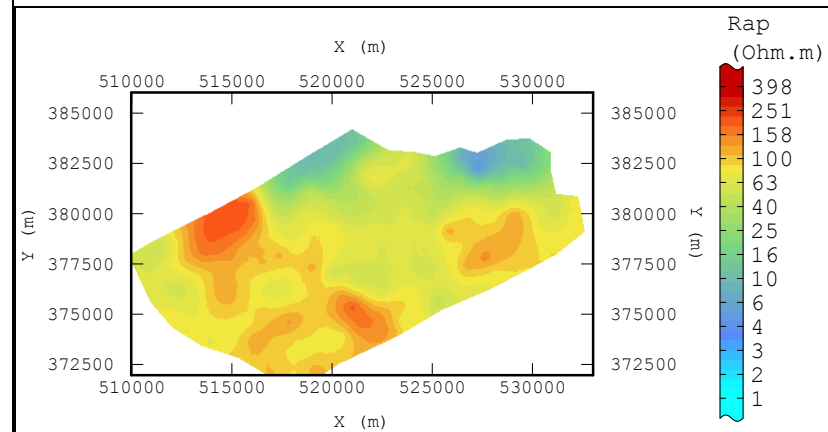
(a)  $AB/2 = 3$  et  $z_e = 1,15$  m



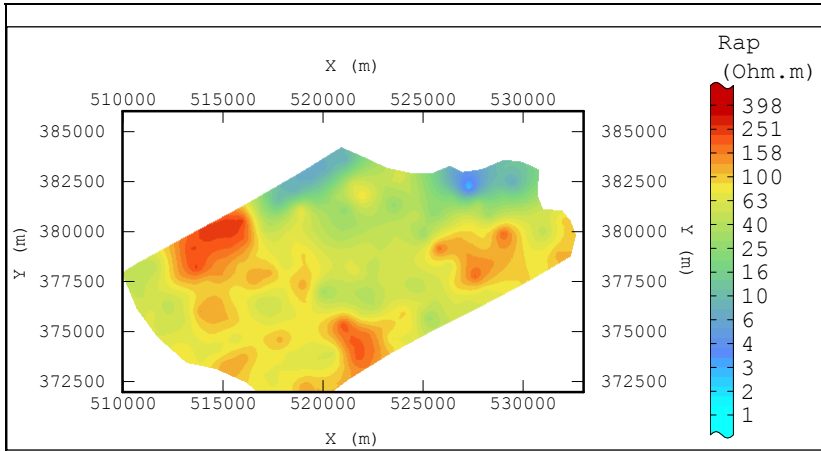
(b)  $AB/2 = 4$  et  $z_e = 1,53$  m



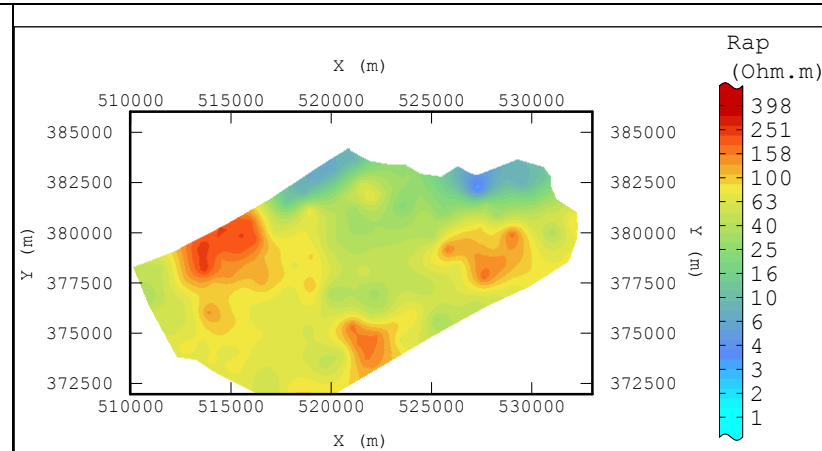
(c)  $AB/2 = 5$  et  $z_e = 1,91$  m



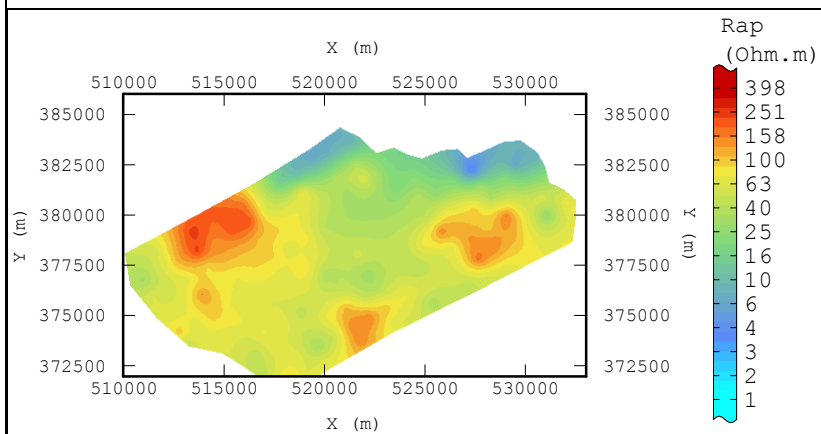
(d)  $AB/2 = 7$  et  $z_e = 2,67$  m



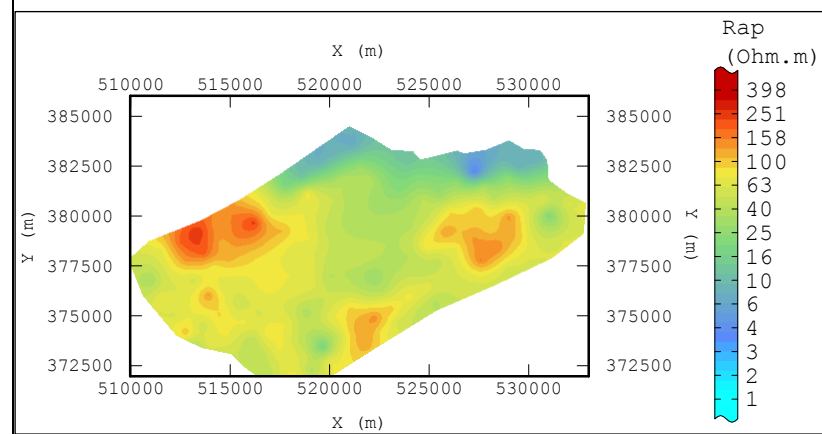
(e)  $AB/2 = 10$  et  $z_e = 3,82$  m



(f)  $AB/2 = 15$  et  $z_e = 5,73$  m

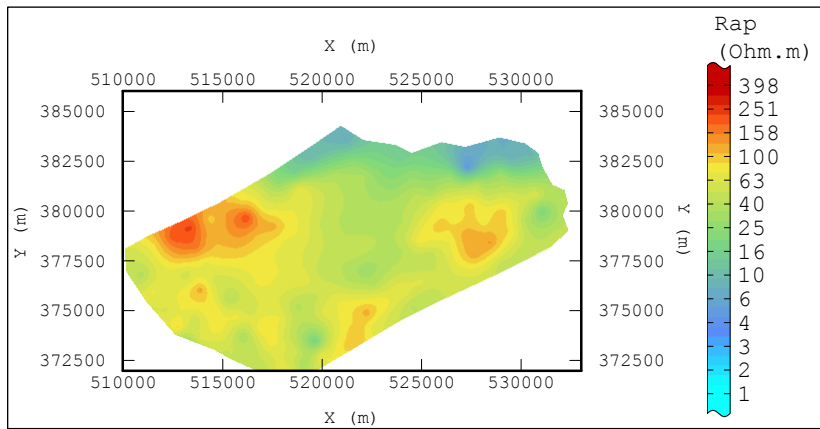


(g)  $AB/2 = 20$  et  $z_e = 7,64$  m

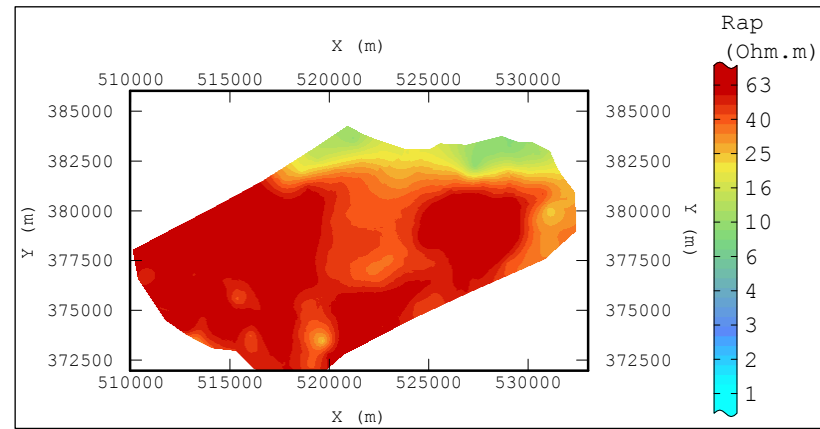


(h)  $AB/2 = 30$  et  $z_e = 11,46$  m

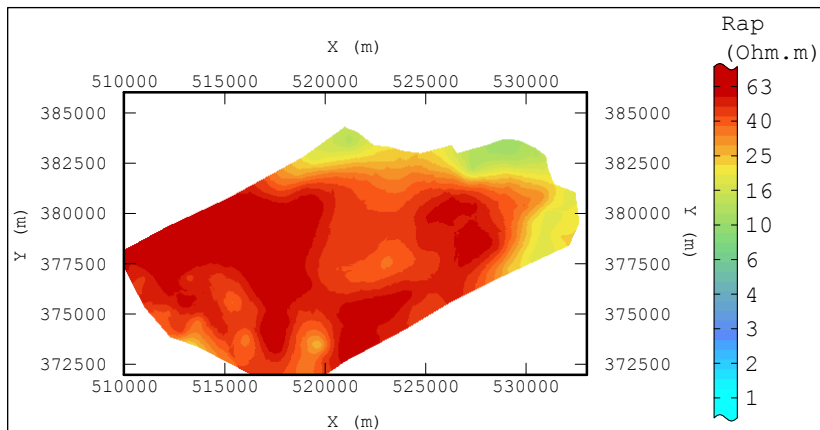




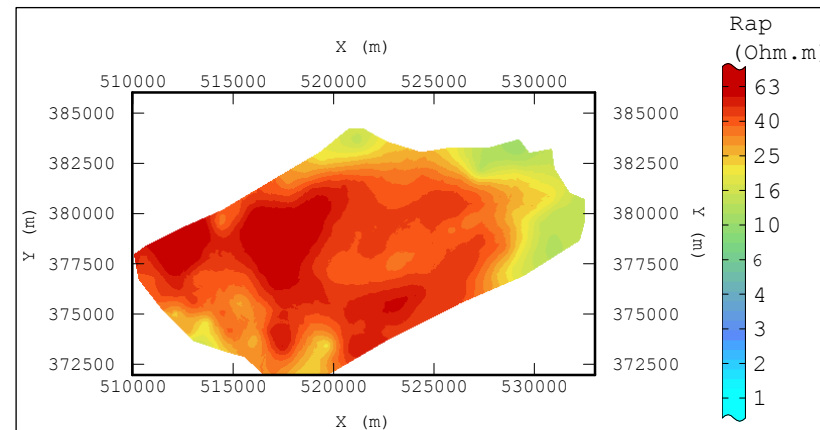
(i)  $AB/2 = 40$  et  $z_e = 15,28$  m



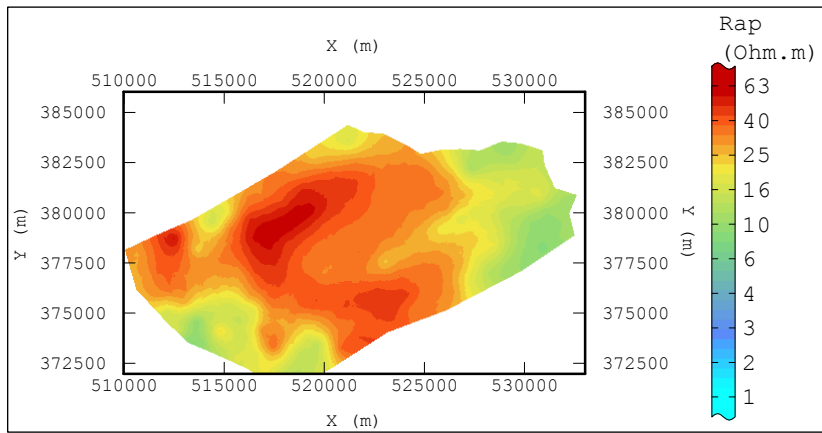
(j)  $AB/2 = 50$  et  $z_e = 19,10$  m



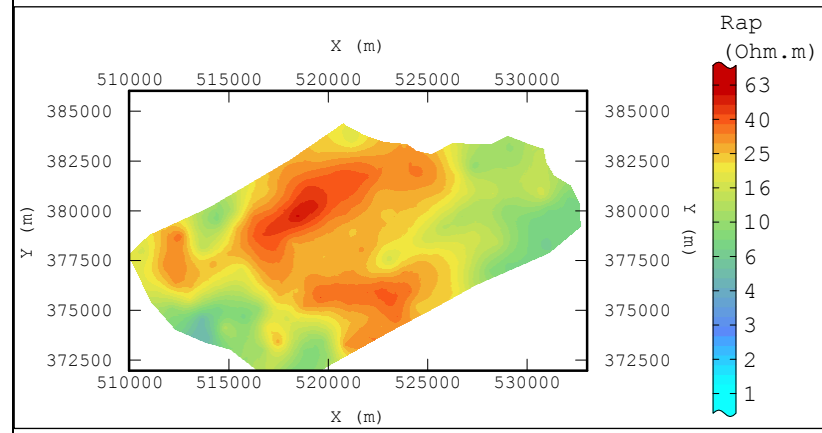
(k)  $AB/2 = 75$  et  $z_e = 28,65$  m



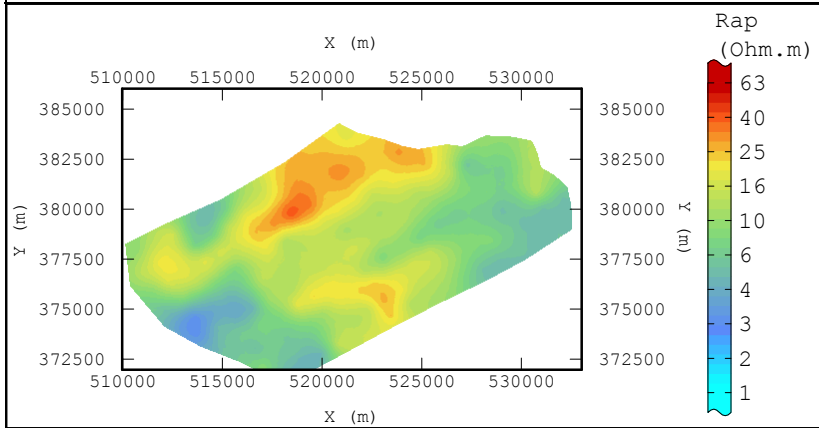
(l)  $AB/2 = 100$  et  $z_e = 38,20$  m



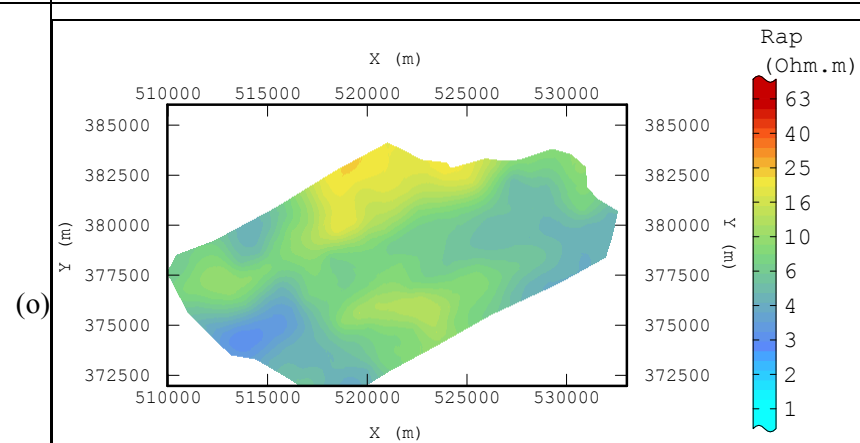
(m)  $AB/2 = 150$  et  $z_e = 57,30$  m



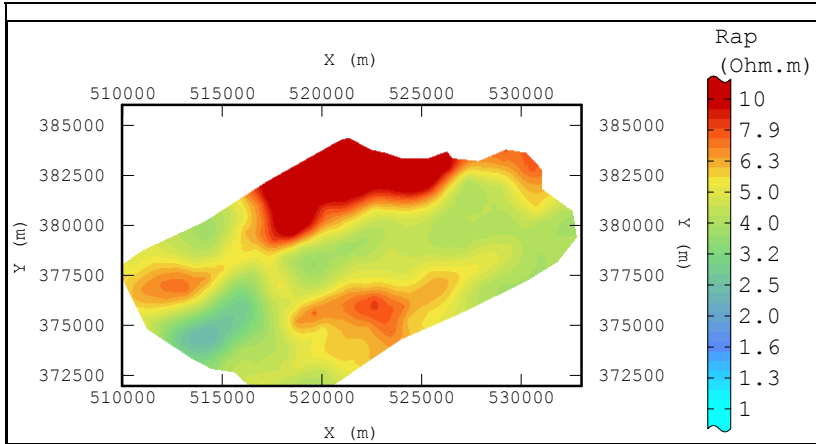
(n)  $AB/2 = 200$  et  $z_e = 76,40$  m



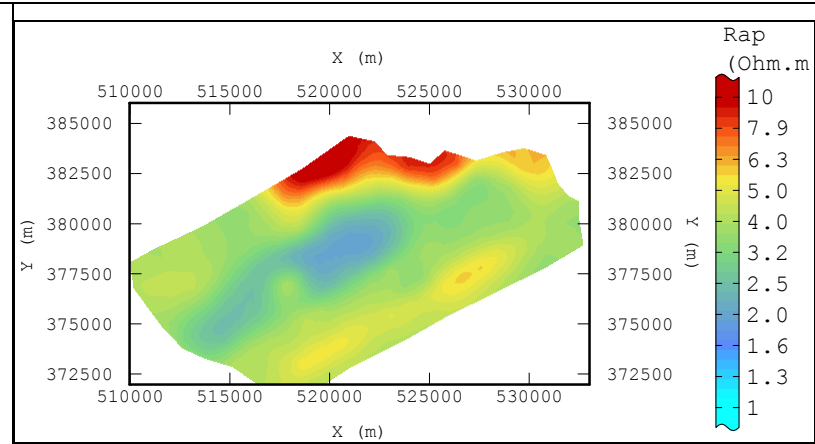
$AB/2 = 300$  et  $z_e = 114,60$  m



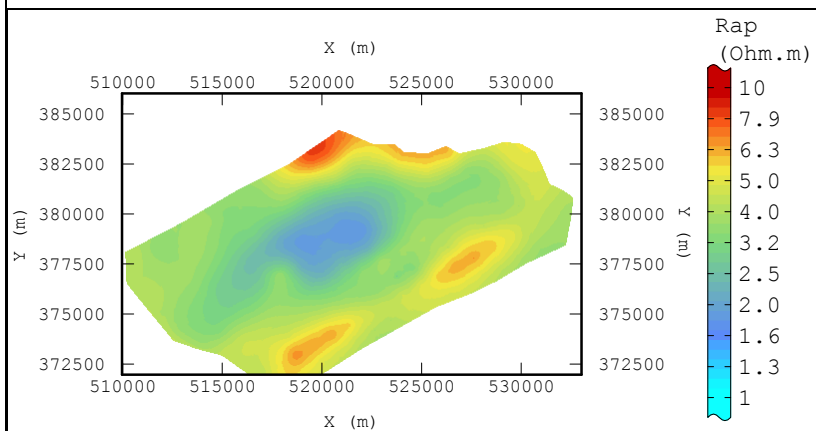
(p)  $AB/2 = 400$  et  $z_e = 152,80$  m



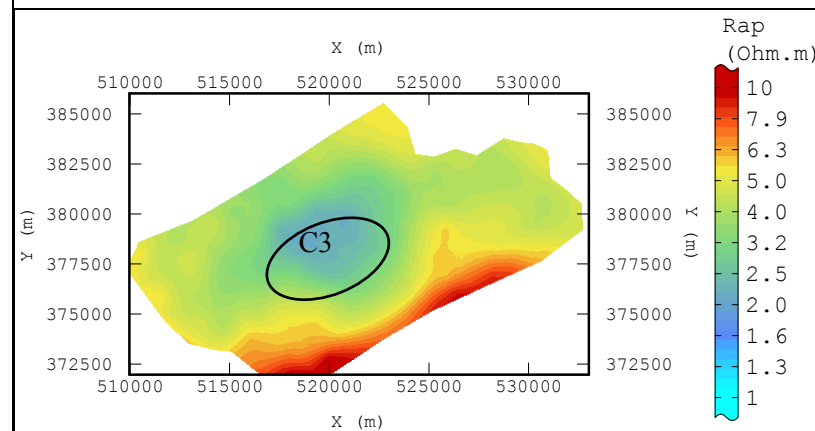
(q)  $AB/2 = 500$  et  $z_e = 191,00$  m



(r)  $AB/2 = 750$  et  $z_e = 286,50$  m



(s)  $AB/2 = 1\ 000$  et  $z_e = 382,00$  m



(t)  $AB/2 = 1\ 500$  et  $z_e = 573,00$  m

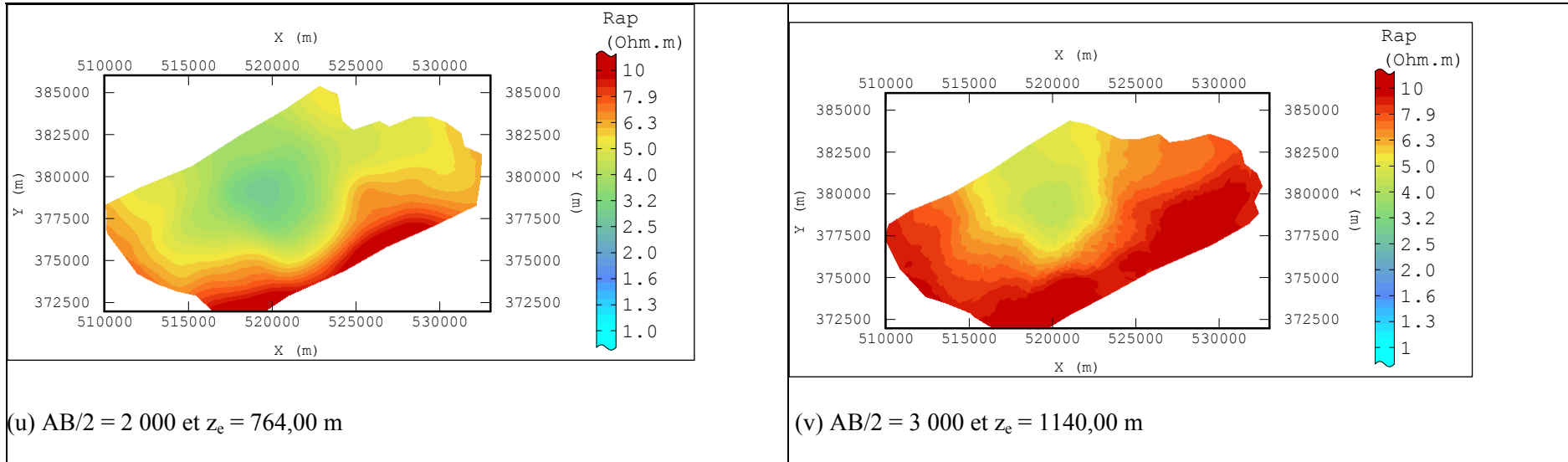


Figure 59: Cartes des résistivités apparentes obtenues par krigeage pour les 22 pseudo profondeurs croissantes

( $AB/2 = 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000$  m

Ou  $z_e = 1,14 ; 1,52 ; 1,9 ; 2,66 ; 3,8 ; 5,7 ; 7,6 ; 11,4 ; 15,2 ; 19 ; 28,5 ; 38 ; 57 ; 76 ; 114 ; 152 ; 190 ; 285 ; 380 ; 570 ; 760 ; 1140$  m)

Pour  $z_e$  compris entre 1,15 et 7,64 m (Figure 59 a, b, c, ..., et g) les résistivités apparentes sont organisées en domaines à faibles valeurs, peu ou pas connectés et séparés par des zones pour lesquelles les résistivités apparentes sont supérieures à  $63 \Omega.m$  pouvant localement dépasser  $350 \Omega.m$ . Pour les faibles valeurs de  $z_e$ , la variance est élevée et la distance de corrélation est voisine de 4 000 m reflétant ainsi l'hétérogénéité des terrains. Lorsque la pseudo-profondeur augmente, on constate la diminution des valeurs de la variance qui atteint un premier minimum pour  $z_e = 38,20$  m (Figure 58); cela traduit l'érosion progressive des zones à plus fortes valeurs de résistivité apparente et l'étendue progressive par interconnexion des domaines à plus faibles valeurs de résistivité apparente. Une tendance à l'homogénéisation des résistivités apparentes transparaît donc avec diminution de l'influence des terrains les plus superficiels et les plus résistants ; cette observation est à mettre en relation avec les coefficients de corrélation dont les valeurs sont voisines de zéro pour certains couples de pseudo-profondeurs dont  $z_e = 38,20$  m et  $z_e = [1,15 ; 1,53 ; 1,91$  m].

Au-delà de  $z_e = 38,20$  m la variance augmente légèrement jusqu'à  $z_e = 76,40$  m (Figure 58), les coefficients de corrélation pour les couples de pseudo-profondeurs  $\{z_e = 57,30$  m,  $z_e' = [3, 4, 5, \dots, 20$  m] $\}$  et  $\{z_e = 76,40$  m et  $z_e' = [3, 5, \dots, 30$  m] $\}$  sont toujours voisins de zéro et la portée augmente légèrement. Cela reflète une nouvelle structuration des résistivités apparentes en trois domaines : un domaine central présentant les valeurs de résistivités apparentes les plus élevées (supérieures à  $25 \Omega.m$  et deux domaines, l'un à l'est et l'autre à l'ouest de plus faibles résistivités apparentes ( $< 25 \Omega.m$ ). Ces deux domaines tendent ensuite à s'interconnecter via un sillon d'orientation NE-SW où les résistivités apparentes sont inférieures à  $10 \Omega.m$  dès la pseudo-profondeur  $z_e = 152,80$  m et toujours manifesté à la pseudo-profondeur  $z_e = 286,5$  m (Figure 59 r).

Au-delà de cette pseudo-profondeur, la variance diminue et se stabilise à sa plus faible valeur de  $z_e = 382$  m à  $764$  m. Ces variations sont le reflet de l'importance géographique prise par le sillon central des très faibles résistivités apparentes ( $2$  à  $4 \Omega.m$ ), puis au-delà, par l'apparition en limite sud d'un nouveau domaine en forme de couronne ouverte au nord (Figure 59 u) et aux résistivités apparentes plus élevées ( $\geq 10 \Omega.m$ ). Cette couronne laisse une zone centrale d'orientation NS et de faible résistivité apparente ( $4 \Omega.m$ , sondages des classes 2, 3 ayant des composantes négatives sur les axes F1 et F2 et pro parte de la classe 4).

### III-1-3) Relations entre cartes issues du krigeage et classes de sondage

L'analyse statistique multidimensionnelle a permis de classer les sondages en tenant compte, de la totalité des résistivités apparentes ; il en a résulté la carte de la Figure 54 54. Les cartes de type « traîné électrique 2D » obtenues par krigeage ont, elles, permettent de mettre en évidence la distribution spatiale des résistivités apparentes (Figure 59). On se propose, dans ce paragraphe, de préciser les caractéristiques géoélectriques du bassin en fonction de la répartition spatiale par pseudo-profondeur de chaque classe de sondages.

L'analyse en composantes principales a mis en évidence l'opposition des sondages de la classe 5 et de ceux de la classe 2. Cette opposition est due, on le rappelle, aux valeurs positives ou négatives prises respectivement par les sondages ainsi de ces deux classes sur l'axe principal F1. D'un point de vue spatial, ces sondages sont répartis de façon spécifique sur les cartes krigées correspondant aux pseudo-profondeurs les plus faibles ( $z_e$  compris entre 1,15 m et 15,28 m). Les sondages de la classe 5 auxquels il faut associer quelques sondages de la classe 4 s'organisent en domaines résistants dont l'extension spatiale diminuera avec la pseudo-profondeur. Les sondages de la classe 2 auxquels il faut ajouter quelques sondages de la classe 1 correspondent clairement aux domaines à très faibles résistivités apparentes en surface situés à l'est et au nord-est.

L'architecture des domaines à fortes résistivités apparentes en sub-surface n'est pas due uniquement aux sondages de la classe 5 mais également à quelques sondages de la classe 4. Cependant, à la différence des sondages de la classe 5, ceux de la classe 4 montrent très vite une baisse des résistivités apparentes participant en cela à l'extension et l'interconnexion des domaines à faibles résistivités apparentes ( $R_{app} < 63 \Omega.m$ ,  $z_e = 38,20$  m) qui correspondent principalement à la classe 4.

A partir de cette pseudo-profondeur, les résistivités apparentes tendent à s'homogénéiser ce qui se manifeste par une érosion progressive du domaine central et par une extension progressive des domaines SW et NE (domaines de répartition des sondages de la classe 1 qui montrent des composantes positives sur l'axe principal  $F_2$  négativement corrélés aux résistivités apparentes des pseudo-profondeurs  $z_e$  comprises entre 57,30 m et 114,60 m). Au-delà de cette pseudo-profondeur la caractéristique majeure est la baisse des résistivités apparentes des sondages des classes 1, 3, 4 et 5 conduisant à la formation du sillon central d'orientation SW-NE bien identifié pour  $z_e = 286$  m ( $R_{app} < 5 \Omega.m$ ). Les sondages de la classe 2 situés au nord est présentent, à ces pseudo-profondeurs des résistivités apparentes plus élevées (7 à  $10 \Omega.m$ ).

Les plus grandes pseudo-profondeurs sont caractérisées par la spécificité des sondages des classes 1 et 3 dont les composantes sont respectivement positives et négatives sur l'axe  $F_2$  positivement corrélé aux résistivités apparentes des pseudo-profondeurs  $z_e$  comprises entre 573 et 1146 m. Les résistivités apparentes des sondages de la classe 3 sont encore très faibles ( $R_{app} < 5 \Omega.m$ ) et marquent avec les sondages de la classe 2 la partie centrale nord du bassin alors qu'un domaine augmentant en taille et enveloppant cette partie centrale voit ses résistivités apparentes légèrement augmenter (sondages des classes 1, 4 et 5)..

## **III-2) Cartographie par krigeage des résistivités apparentes par profil**

### **III-2-1) La méthode**

Cette deuxième partie de notre analyse géostatistique vise les lignes des sondages orientées NE-SW, ainsi l'élaboration des cartes verticales correspond à l'imagerie 2D de ces profils. Une difficulté d'ordre

théorique est apparue en raison de la nature non nécessairement stationnaire des résistivités apparentes issues de sondages électriques de type Schlumberger en raison des distances non constantes entre électrodes d'injection de courant. Malgré cette difficulté non encore résolue les résultats encourageants que nous avons obtenus (cf., Chapitre 3) nous ont conduit tout de même à présenter les résultats ci-dessous. Cette étape constitue un préalable pour la préparation des inversions 2D par tomographie électrique. (Chapitre suivant).

La méthodologie reste la même que celle employée pour l'établissement des cartes horizontales, elle comprend trois étapes :

- le calcul des histogrammes des fréquences des classes des résistivités apparentes afin de visualiser la structure globale de la distribution verticale des résistivités apparentes,

- le calcul des variogrammes expérimentaux et la modélisation de ces variogrammes. Les variogrammes expérimentaux ont été calculés et modélisés à l'aide du programme Variowin©. La première étape c'est le calcul du variogramme omnidirectionnel donc sans tenir compte la variabilité des structures dans une direction par rapport à l'autre. La deuxième étape c'est le calcul des variogrammes directionnels avec la direction 0 (N90) qui correspond à la direction horizontale du profil, et la direction perpendiculaire 90 (N180) qui représente les données en pseudo-profondeurs

- le krigeage pour la cartographie : les cartes du krigeage ont été faites sur une grille à maille carrée de côté 50 m. les données sont ceux des sondages seuls effectués sur le terrain. En revanche pour les cartes verticales (concernant les profils), le krigeage a été fondé sur les données des sondages appartenant à ce profil en plus des données extraites du krigeage des cartes horizontales et qui sont les plus proches des vrais sondages. Cette technique nous a permis d'avoir plus de précision et d'améliorer la qualité des profils krigés puisque le maillage d'origine est irrégulier (1 km horizontalement et entre 1 m et 1 km verticalement).

L'interpolation est basée sur les paramètres des modèles des variogrammes établis ; les modèles utilisés sont les modèles directionnels en tenant compte de l'anisotropie calculée entre les deux directions perpendiculaires. Le voisinage choisi est une ellipse avec un grand diamètre de 6 000 m ; et un petit diamètre de 1 200 m. Le krigeage a été faite en tenant compte de quatre quadrans avec un point au minimum pour chaque partition et une tolérance angulaire de 45°.

Le calcul des histogrammes des fréquences des logarithmes décimaux des résistivités apparentes a pour intérêt de visualiser la distribution des classes des logarithmes des résistivités apparentes. L'analyse des histogrammes des fréquences des résistivités apparentes (Figure 60) montre pour tous les profils de A à J, deux grands ensembles des résistivités apparentes. Les classes à résistivités apparentes faibles et d'autre élevées. La fréquence des classes des résistivités faibles augmente en allant du sud vers le Nord (de A à J). On note que pour le profil A on a une quasi équivalence entre le nombre de classe ayant une résistivité apparente faible et celui des classes ayant une résistivité apparente élevée, cela change vers le nord où la

majeure partie des classes présente des résistivités apparentes faibles. Cette distribution des fréquences des résistivités apparentes est en accord avec la géologie de la zone qui est plus marneuse vers le Nord, et par conséquent il y a une dominance des terrains conducteurs.

#### **a) Profil A**

Le profil A, est la première ligne dans notre zone d'étude, il est situé plus au sud. Ce profil a une longueur de 15 252 m et, constitué de 16 SEV distants en moyen de 953,25 m. Chaque sondage a des mesures de résistivités apparentes correspondront à des écartements de AB/2 de 3 m à 3000 m.

La majorité des sondages de ce profil sont de la classe 1 et trois sondages appartiennent à la classe 4 (Figure 54), cette dernière se situe au centre du profil et montre des résistivités plus élevées en surface que les sondages de la classe 1.

Le modèle du variogramme omnidirectionnel (Tableau 8) montre deux structures avec de plus un effet de pépite de 0,09. La première structure correspond à un modèle sphérique avec une portée de 1 600 m et un palier de l'ordre de 0,151, la deuxième structure correspond à un modèle exponentiel avec une portée de l'ordre de 1 120 m et un palier de 0,091.

L'analyse des caractéristiques des variogrammes directionnels Tableau 9 (direction 0° et 90°) montre que latéralement (direction 0°) les terrains sont plus homogènes avec une portée de 3 600 m alors que verticalement la portée est de l'ordre de 540 m. cette variabilité de la portée se traduit par une anisotropie de l'ordre de 0,15.

#### **b) Profil B**

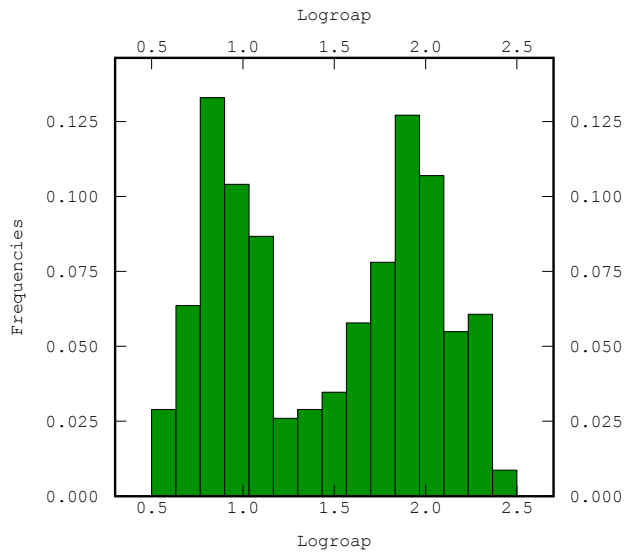
Le profil B est constitué de 17 sondages électriques, distants en moyenne de 1 012,24 m, la totalité de ces sondages est située au sud de la zone, les terrains sont relativement homogènes. Les écartements AB/2 utilisés varient de 3 m à 3 000 m.

La majorité des sondages de ce profil sont de la classe 1, et quatre sondages (B5, B6, B12, B13) sont de la classe 5 (Figure 54). Cette dernière montre des résistivités les plus élevées en surface.

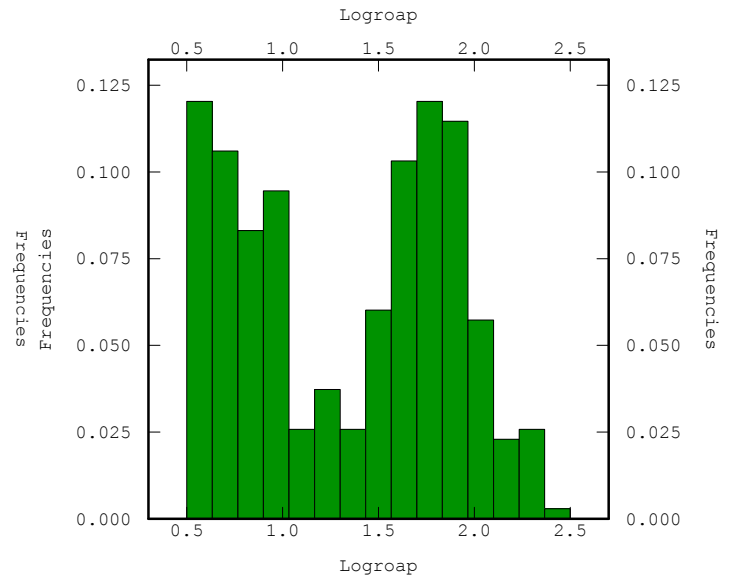
Le modèle du variogramme omnidirectionnel (Tableau 8) montre deux structures en plus d'un effet de pépite de 0,09. La première structure correspond à un modèle sphérique avec une portée de 1 200 m et un palier de l'ordre de 0,186, la deuxième structure correspond à un modèle exponentiel avec une portée de l'ordre de 1 100 m et un palier de 0,107.

L'analyse des caractéristiques des variogrammes directionnels (Tableau 9) (direction 0° et 90°), montre que latéralement (direction 0°) les terrains sont plus homogènes avec une portée de 3 500 m alors que verticalement la portée est de l'ordre de 455 m. cette variabilité de la portée se traduit par une anisotropie de 0,13.

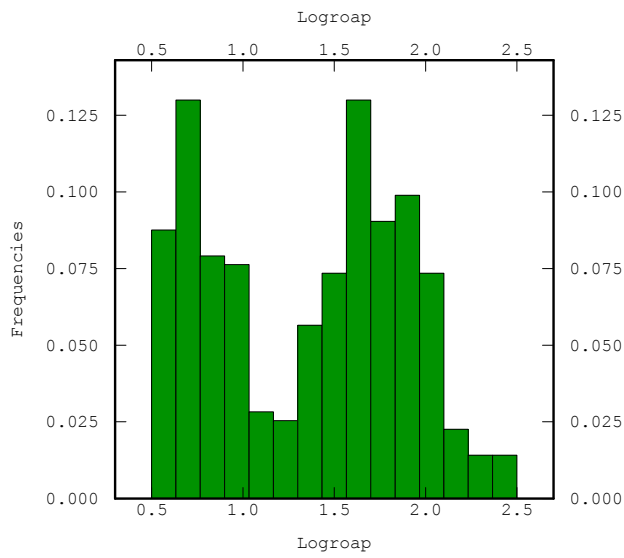




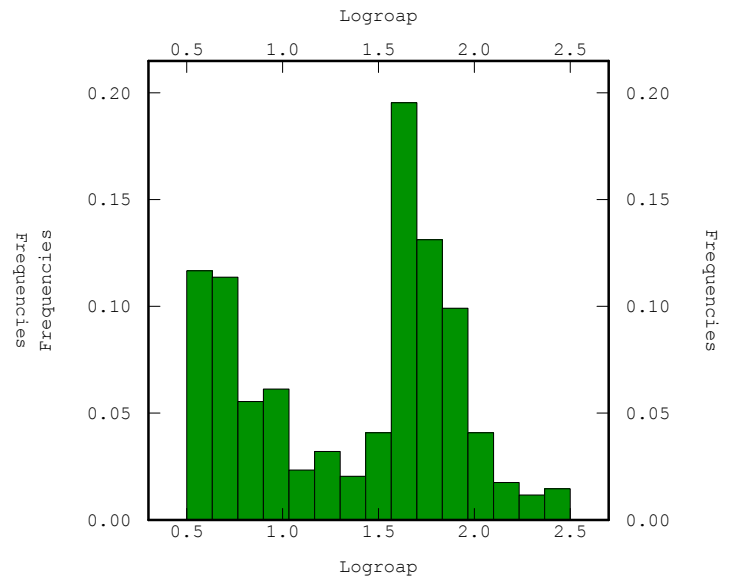
A



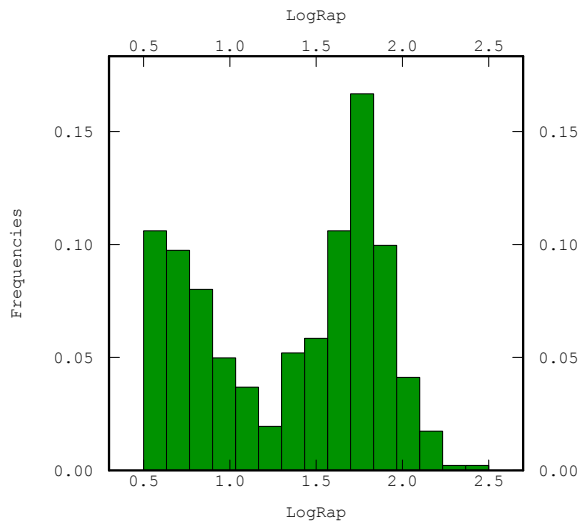
B



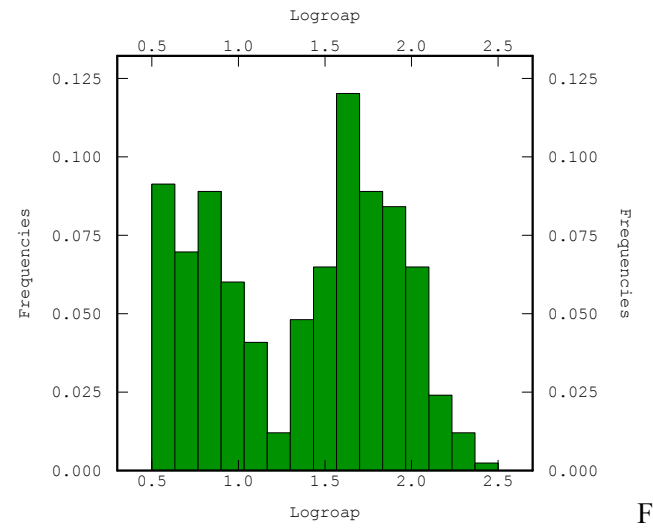
C



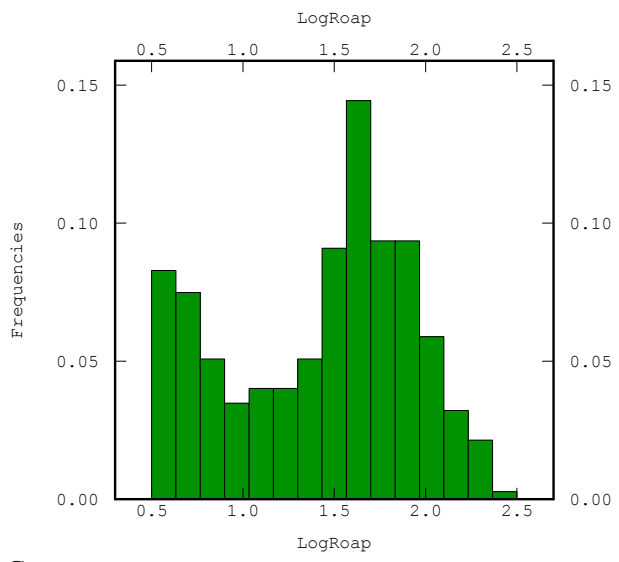
D



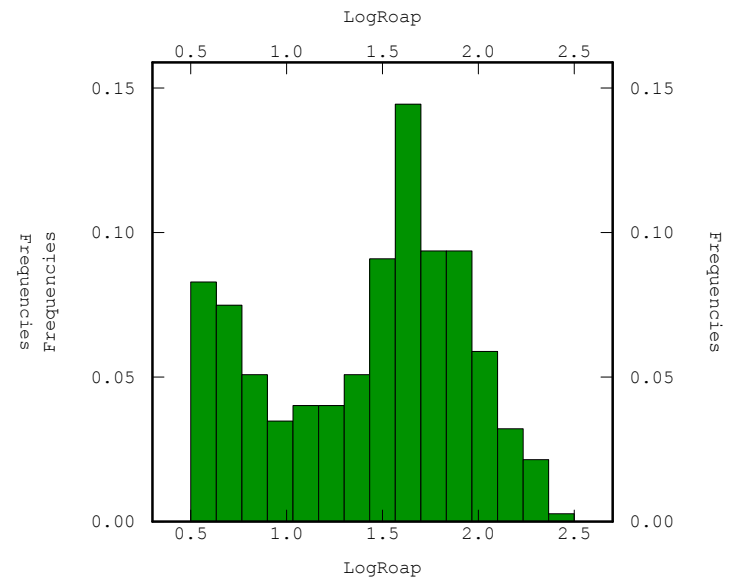
E



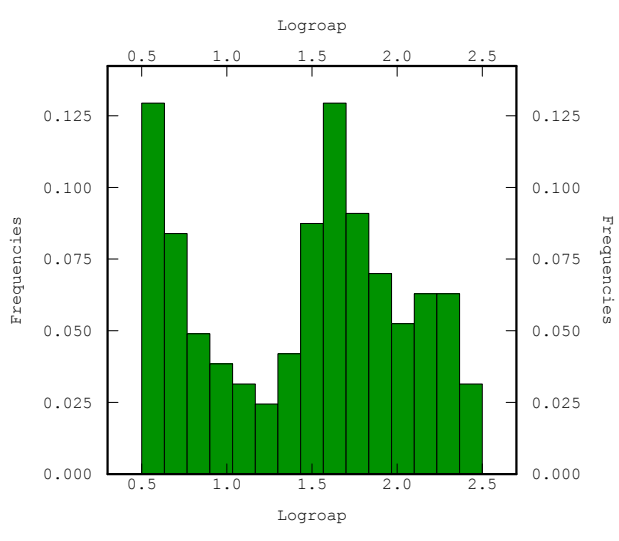
F



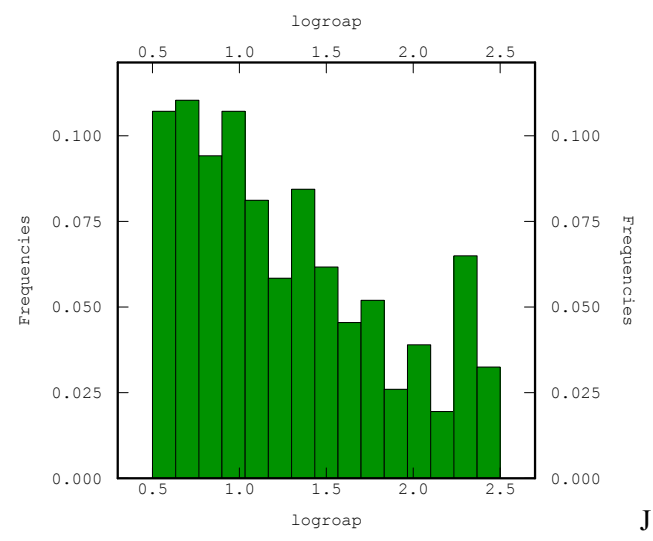
G



H



I



J

Figure 60: Histogrammes des fréquences des résistivités apparentes des 13 lignes des SEV

### **c) Profil C**

Le profil C est constitué de 17 sondages électriques, distants en moyenne de 945,76 m, la totalité de ses sondages est située dans le bassin avec des terrains relativement plus homogènes. Les écartements AB/2 utilisés sont entre 3 m et 3 000 m.

Les sondages de ce profil appartiennent à quatre classes. Le centre de ce profil est occupé par cinq sondages de la classe 3 (Figure 54), qui sont moins résistants que les sondages des classes 1, 4, et 5 situés dans les zones plus périphériques du profil.

Le modèle du variogramme omnidirectionnel (Tableau 8) montre deux structures en plus d'un effet de pépite de 0,08. La première structure correspond à un modèle sphérique avec une portée de 1 200 m et un palier de l'ordre de 0,18, la deuxième structure correspond à un modèle exponentiel avec une portée plus faible de l'ordre de 1 100 m et un palier de 0,107.

L'analyse des caractéristiques des variogrammes directionnels (Tableau 9) (direction 0° et 90) montre que latéralement (direction 0°) les terrains sont plus homogènes avec une portée de 3 300 m alors que verticalement la portée est de l'ordre de 462 m. Cette variabilité de la portée se traduit par une anisotropie de 0,14.

### **d) Profil D**

Le profil D est constitué de 16 sondages électriques, distants en moyenne de 944,81 m, la totalité de ses sondages sont situés dans le bassin avec des terrains relativement plus homogènes. Les écartements AB/2 utilisés sont entre 3 m et 3 000 m.

L'agencement des sondages est presque le même que le profil C (Figure 54), avec un centre moins résistant que les bords.

Le modèle du variogramme omnidirectionnel (Tableau 8) montre deux structures en plus d'un effet de pépite de 0,08. La première structure correspond à un modèle sphérique avec une portée de 1 160 m et un palier de l'ordre de 0,19, la deuxième structure correspond à un modèle exponentiel avec une portée plus faible de l'ordre de 1 100 m et un palier de 0,145.

L'analyse des caractéristiques des variogrammes directionnels (Tableau 9) (direction 0° et 90°), montre que latéralement (direction 0°) les terrains sont plus homogènes avec une portée de 2 920 m alors que verticalement le portée est de l'ordre de 438 m. cette variabilité de la portée se traduit par une anisotropie de 0,15.

### **e) Profil E**

Le profil E est constitué de 21 sondages électriques, distants en moyenne de 995 m, la totalité de ses sondages sont situées dans le centre du bassin avec des terrains relativement plus homogènes. Les écartements d'AB/2 utilisés sont entre 3 m et 3 000 m.

Toujours les sondages de la classe 3 occupent le centre du profil encadrés par les sondages des classes 1 et 4 (Figure 54).

Le modèle du variogramme omnidirectionnel (Tableau 8) montre deux structures en plus d'un effet de pépité de 0,07. La première structure correspond à un modèle sphérique avec une portée de 1450 m et un palier de l'ordre de 0,125, la deuxième structure correspond à un modèle exponentiel avec une portée plus faible de l'ordre de 500 m et un palier de 0,105.

L'analyse des caractéristiques des variogrammes directionnels (Tableau 9) (direction 0° et 90°), latéralement (direction 0°) les terrains sont plus homogènes avec une portée de 3500 m alors que verticalement la portée est de l'ordre de 455 m. cette variabilité de la portée se traduit par une anisotropie de 0,13.

#### **f) Profil F**

Le profil F est constitué de 19 sondages électriques distants en moyen de 980,47 m, la totalité de ces sondages électriques est située dans le bassin avec une homogénéité des formations (la majorité des SEV sont de la classe 3), et toujours les parties périphériques sont occupées par les sondages des classe 1 et 4 (Figure 54).

Le modèle du variogramme omnidirectionnel (Tableau 8) a deux structures et un effet de pépité égal à 0,07. Concernant la première structure, elle correspond à un modèle sphérique avec une portée de 1500 m et un palier de 0,16, par contre la deuxième structure à un modèle exponentiel avec une portée de 600 m et un palier de 0,12.

Les variogrammes directionnels (Tableau 9) (Direction 0° et 90°) correspondent à des modèles avec deux structures, sphérique et exponentielle. La première structure a une portée de 3400 m dans la direction 0 (latérale) et 408 m dans la direction 90 (Verticale). Le modèle de cette structure a un palier de l'ordre de 0,14 et montre une anisotropie entre les deux directions de 0,12.

La deuxième structure correspond à un modèle exponentiel avec une portée de 1980 m dans la direction 0 et 238 dans la direction 90 avec un palier de 0,13 et une anisotropie de l'ordre de 0,12.

#### **g) Profil G**

Le profil G est constitué de 17 sondages électriques, distants en moyenne de 953,9 m (Figure 54). L'ouest de la ligne est occupé par les sondages de la classe 4 et de la classe 1, alors qu'à l'est on trouve des sondages de la classe 3 ainsi que deux sondages de la classe 2 dont les résistivités apparentes des terrains de subsurface sont les plus faibles.

Le modèle du variogramme omnidirectionnel (Tableau 8) montre deux structures en plus a un effet de pépité de 0,07. La première structure correspond à un modèle sphérique avec une portée de 1 500 m et un palier de l'ordre de 0,14, la deuxième structure correspond à un modèle exponentiel avec une portée plus faible de l'ordre de 2 000 m et un palier de 0,112.

L'analyse des caractéristiques des variogrammes directionnels (Tableau 9) (direction 0° et 90°), montre que latéralement (direction 0°) les terrains sont plus homogènes avec une portée de 4 800 m alors que verticalement la portée est de l'ordre de 672 m. cette variabilité de la portée se traduit par une anisotropie de 0,14.

#### **h) Profil H**

Le profil H est constitué de 15 sondages électriques distants en moyenne de 939,6 m entre eux, La majorité des sondages de ce profil est de la classe 3 (Figure 54),

Le modèle du variogramme omnidirectionnel (Tableau 8) montre deux structures en plus à un effet de pépite de 0,07. La première structure correspond à un modèle sphérique avec une portée de 1 200 m et un palier de l'ordre de 0,108, la deuxième structure correspond à un modèle exponentiel avec une portée plus faible de l'ordre de 2 000 m et un palier de 0,11.

L'analyse des caractéristiques des variogrammes directionnels (Tableau 9) (direction 0° et 90°), montre que latéralement (direction 0°) les terrains sont plus homogène avec une portée de 4 300 m alors que verticalement la portée est de l'ordre de 602 m. cette variabilité de la portée se traduit par une anisotropie de 0,14.

#### **i) Profil I**

Le profil I est constitué de 13 sondages électriques distants en moyenne de 916,46 m, la partie Est de ce profil est dominé par les sondages de la classe 3, et la partie ouest par les sondages de la classe 5 (Figure 54). Les sondages de cette dernière montrent les résistivités apparentes les plus élevées de la zone pour les formations de subsurface.

Le modèle du variogramme omnidirectionnel (Tableau 8) montre deux structures en plus à un effet de pépite de 0,07. La première structure correspond à un modèle sphérique avec une portée de 790 m et un palier de l'ordre de 0,18, la deuxième structure correspond à un modèle exponentiel avec une portée plus faible de l'ordre de 1584 m et un palier de 0,105.

L'analyse des variogrammes directionnels (Tableau 9) (direction 0° et 90°) montre que latéralement (direction 0°) les terrains sont plus homogènes avec une portée de 4 100 m alors que verticalement la portée est de l'ordre de 451 m. cette variabilité de la portée se traduit par une anisotropie de 0,11.

#### **j) Profil J**

Le profil j est constitué de 13 sondages électriques, distants en moyenne de 1085 m. La partie est de ce profil est occupée par les sondages de la classe 2, les sondages de cette dernière montrent des résistivités plus faibles, alors que la partie ouest est occupée par 4 sondages de la classe 5 et un sondage de chaque des autres classes (Figure 54).

Le modèle du variogramme omnidirectionnel (Figure 8) montre deux structures en plus d'un effet de pépite de 0,06 La première structure correspond à un modèle sphérique avec une portée de 1350 m et un

palier de l'ordre de 0,14, la deuxième structure correspond à un modèle exponentiel avec une portée plus faible de l'ordre de 2 700 m et un palier de 0,12

L'analyse des caractéristiques des variogrammes directionnels (

Figure 9) (direction 0° et 90°) montre que latéralement (direction 0°) les terrains sont plus homogène avec une portée de 6 350 m alors que verticalement la portée est de l'ordre de 762 m. cette variabilité de la portée se traduit par une anisotropie de 0,12.

L'analyse synthétique des variogrammes des différents profils montre un effet de pépite relativement constant qui varie en moyenne autour de 0,07. Cette valeur diminue progressivement depuis le profil A avec 0,09 jusqu'au profil J avec 0,06.

La portée pour le modèle omnidirectionnel augmente successivement du profil A (1950 m) jusqu'à profil D (3200 m), cette portée diminue au profil E pour atteindre une valeur de 2374 m et augmente brutalement pour avoir une valeur de 4050 m pour le profil F (où la majorité des sondages appartiennent à la classe 3 (Figure 54), et reste presque stable pour le reste des profils (G ; H ; J). Ces valeurs montrent que le bassin est de plus en plus homogène en allant vers le nord avec une relative homogénéisation dans la direction des profils (NE-SW). Cela est bien montré par les distances de corrélation qui peuvent atteindre 4 050 m pour le profil F. cette augmentation des distances de corrélation est due à l'augmentation de l'épaisseur de la couche marneuse miocène au fur et à mesure qu'on se déplace vers le Nord.

Concernant le palier, il ne présente pas de grand changement d'un profil à l'autre à l'exception des profils G et H, il varie entre 0,2 et 0,3.

Tableau 8: Paramètres des modèles des variogrammes omnidirectionnels

	Effet de pépité	1ere Structure		2eme Structure	
		Modèle Sphérique		Modèle Exponentiel	
		Portée (m)	Palier	Portée (m)	Palier
Profil A	0,090	1600	0,150	1400	0,062
Profil B	0,090	1200	0,156	2000	0,045
Profil C	0,080	1300	0,175	2300	0,030
Profil D	0,080	1300	0,190	2100	0,028
Profil E	0,070	1450	0,125	500	0,105
Profil F	0,070	1950	0,125	900	0,120
Profil G	0,070	1500	0,140	2000	0,112
Profil H	0,070	1200	0,108	2000	0,110
Profil I	0,070	790	0,180	1584	0,105
Profil J	0,060	1350	0,140	2700	0,120

Tableau 9: Paramètres des modèles des variogrammes directionnels

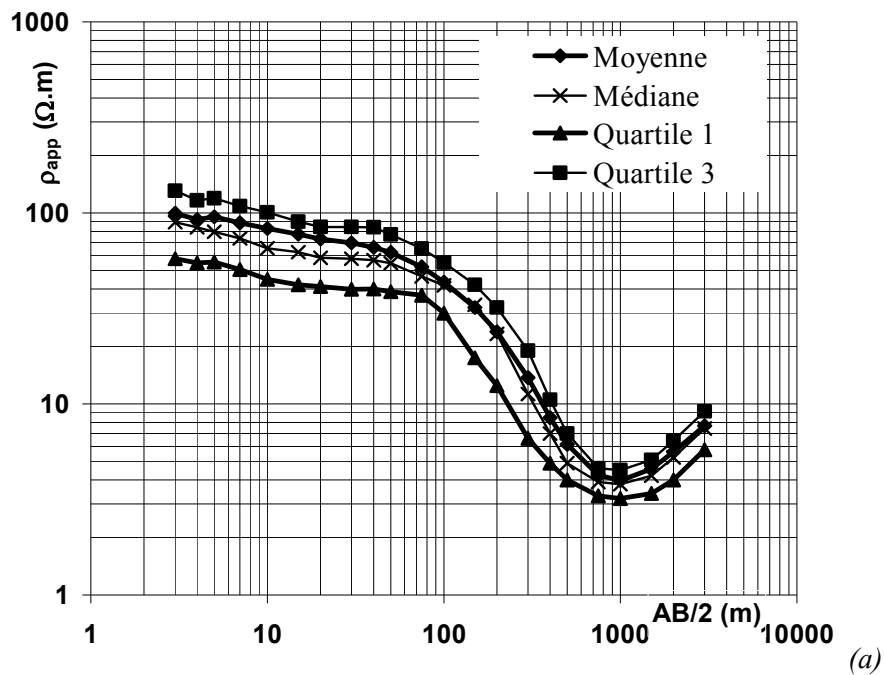
	Effet de pépité	1ere Structure			2eme structure		
		Modèle sphérique			Modèle exponentiel		
		Portée (m)	Palier	Anisotropie	Portée (m)	Palier	Anisotropie
Profil A	0,090	2850	0.130	0.150	750	0.069	0,150
Profil B	0,090	4260	0.071	0.150	2400	0.125	0.150
Profil C	0,080	3000	0.154	0.140	2100	0.037	0.140
Profil D	0,080	1880	0.154	0.180	2300	0.050	0.180
Profil E	0,070	2800	0,150	0,130	700	0,080	0,130
Profil F	0,070	3700	0.140	0.120	1800	0.090	0.120
Profil G	0,070	1100	0,090	0,140	3700	0,150	0,140
Profil H	0,070	1200	0,110	0,140	3100	0,090	0,140
Profil I	0,070	1100	0,151	0,110	3000	0,102	0,110
Profil J	0,060	1200	0,080	0,120	3750	0,180	0,120



### III-2-2) Les cartes krigeés des profils

Après l'analyse des histogrammes des fréquences des logarithmes des résistivités apparentes par profil, ainsi que le calcul et la modélisation des variogrammes expérimentaux on présente l'analyse des cartes de krigeage des résistivités apparentes des profils pour compléter l'étude de la distribution verticale des résistivités apparentes selon ces profils. Ces cartes correspondent à des images verticales 2D.

*Les cartes krigeés (Annexe 2) montrent du sud vers le nord, les trois grandes structures déjà statistiquement définies par les pseudo-sondages (moyenne, médiane, quartiles, écart-type ...)*



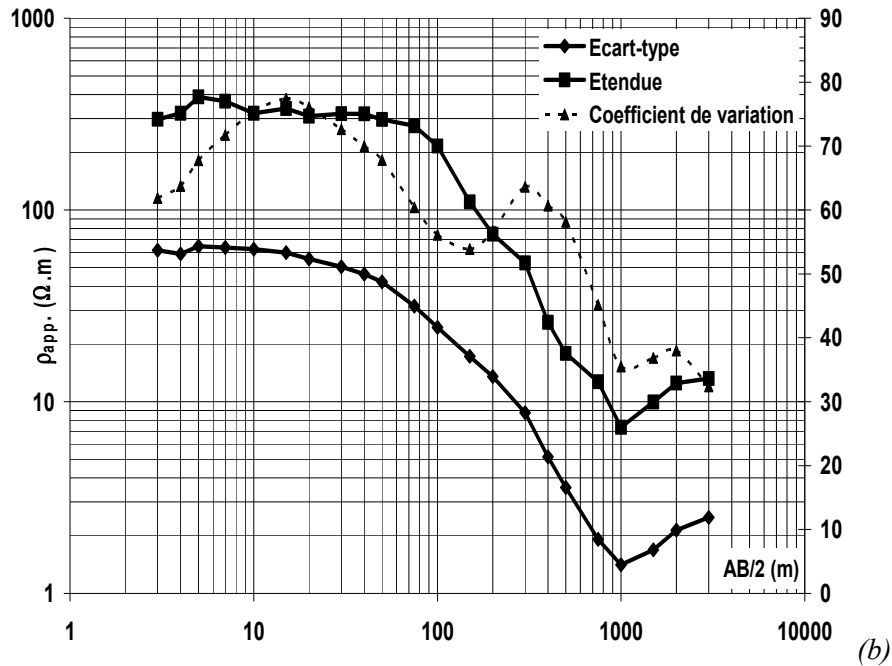


Figure 50)..etc.) et globalement déjà reconnues géologiquement reconnues géologiquement (Cf. Chapitre 1)

L'analyse des cartes krigées du sud vers le nord (de A à J), montre une augmentation de l'épaisseur du niveau à faible résistivité apparente ; initialement sous forme de lentilles discontinues allongées E-W bien visibles sur le profil A, elles deviennent continues et de plus en plus épaisses en allant vers le profil J (vers le Nord).

Les profils A et B, sont composés de sondages dont la majorité appartient aux classes 1 et 4 (Figure 54). Ces sondages sont proches de l'origine dans l'espace factoriel et ne présentent pas de caractéristiques extrêmes. Ces deux profils montrent sur les cartes horizontales deux zones de résistivités apparentes plus élevées en subsurface (R1 et R2 sur la Figure 59 59a) qui diminuent jusqu'à la disparition à  $z_e = 152$  m, et ensuite réapparaissent mais avec des résistivités plus faibles et se développant au fur et à mesure que  $z_e$  augmente sous l'influence des formations résistantes du Miocène de base et du Lias, qui sont les moins profondes dans la zone.

Les profils C et D montrent le début de la zone de moindre résistivité apparente qui occupe le centre du bassin (C3 sur la Figure 59 59t) avec la majorité des sondages de la classe 3. Les sondages de cette dernière présentent une composante négative sur l'axe F2 et une faible composante (positive et négative) sur l'axe F1 Les sondages de cette classe sont caractérisées par des résistivités apparentes plus élevées pour les pseudo-profondeurs ( $z_e = 57$  m et  $z_e = 76$  m).

Pour les profils E et F, on note l'élargissement de la zone de moindre résistivité apparente C3 en subsurface, ainsi que l'apparition d'une zone conductrice en subsurface à l'est de ces profils.

A partir du profil G, les résistivités apparentes deviennent de plus en plus faibles en allant vers l'est du profil ; ce profil est essentiellement constitué des sondages de la classe 3 et de la classe 2. qui ayant une composante négative sur F1 sont caractérisés par des résistivités apparentes faibles pour les faibles pseudo-profondeurs.

Les profils C, D, E, F et G situés dans la zone centrale du bassin, se manifestent sur les cartes horizontales par la zone la plus conductrice qui marque une direction compatible avec la direction de l'allongement de ces profils, cela est dû à l'influence de la couche marneuse qui est très épaisse pour ces profils.

Les Profil I et J, montrent à l'ouest une zone très résistante marquée par les sondages de la classe 5, qui ayant une composante positive la plus importante sur l'axe F1, sont donc les sondages ayant les résistivités apparentes les plus élevées pour les faibles pseudo-profondeurs. Ces deux profils montrent sur les cartes horizontales de krigeage deux zones (C1 et C2 sur la Figure 54 54), l'une à faible résistivité apparente à l'est et, l'autre à résistivité apparente plus élevée à l'ouest pour les pseudo-profondeurs faibles et moyennes jusqu'à  $z_e = 76$  m; au delà de cette valeur et jusqu'à  $z_e = 764$  m, c'est une zone de résistivité apparente plus élevée qui s'installe l'est.

#### **IV) STRUCTURATION DU BASSIN DE SAISS**

A la suite de l'étude de la distribution des résistivités apparentes et de la mise en évidence de la spécificité de sondages de chacune des cinq classes on se propose, ci-dessous, d'inverser chacun des « pseudo-sondages » moyens de chaque classe. Ainsi que le sondage dit paragon, il s'agit d'un vrai sondage dont les caractéristiques sont les plus proches du pseudo-sondage moyen de chaque classe. A cette fin la méthode d'optimisation globale par essais particuliers est employée (Fernández Martínez et al., 2008 a, b, c).

Les méthodes classiques d'optimisation pour l'inversion des SEV postulent l'existence d'une meilleure solution à découvrir ; l'approche sur laquelle repose les algorithmes globaux est une approche pour laquelle le modèle est conçu comme un vecteur aléatoire (Aster *et al.*, 2005). Ainsi la solution à un problème d'optimisation se traduira par des distributions a posteriori des paramètres du modèle (ici des résistivités vraies et des épaisseurs des terrains) pour les données expérimentales prises en compte (les résistivités apparentes associées aux distances  $AB/2$ ). Il s'agit en quelque sorte d'obtenir une distribution statistique de paramètres des modèles pour des données expérimentales connues :  $f(m|d)$  Les algorithmes globaux permettent donc d'avoir un regard statistique sur le phénomène étudié. C'est ainsi que chacun des cinq sondages moyens et cinq sondages parangons est inversé. On donne dans le Tableau 11 les paramètres statistiques des distributions des modèles obtenus pour chacun des SEV moyen avec une erreur inférieure à 5% et, Tableau 11, les caractéristiques des meilleurs modèles (c'est-à-dire ceux présentant la plus faible erreur). Les paramètres résumant les distributions des résistivités vraies et des épaisseurs obtenues pour chaque couche de chaque modèle montrent que pour les modèles présentant une erreur inférieurs à 5% la variabilité est faible (moyenne et médiane très proches les unes des autres,

étendue et intervalles interquartiles faibles et coefficient de variation très faibles), sauf toutefois pour la dernière couche de chaque modèle pour laquelle une gamme de valeurs de résistivité relativement large reste compatible avec les données des sondages moyens.

Les sondages parangons des cinq classes sont:

- parangon de la classe 1 : D11
- parangon de la classe 2 : J10
- parangon de la classe 3 : C9
- parangon de la classe 4 : E9
- parangon de la classe 5 : C1

**- Classe 1**

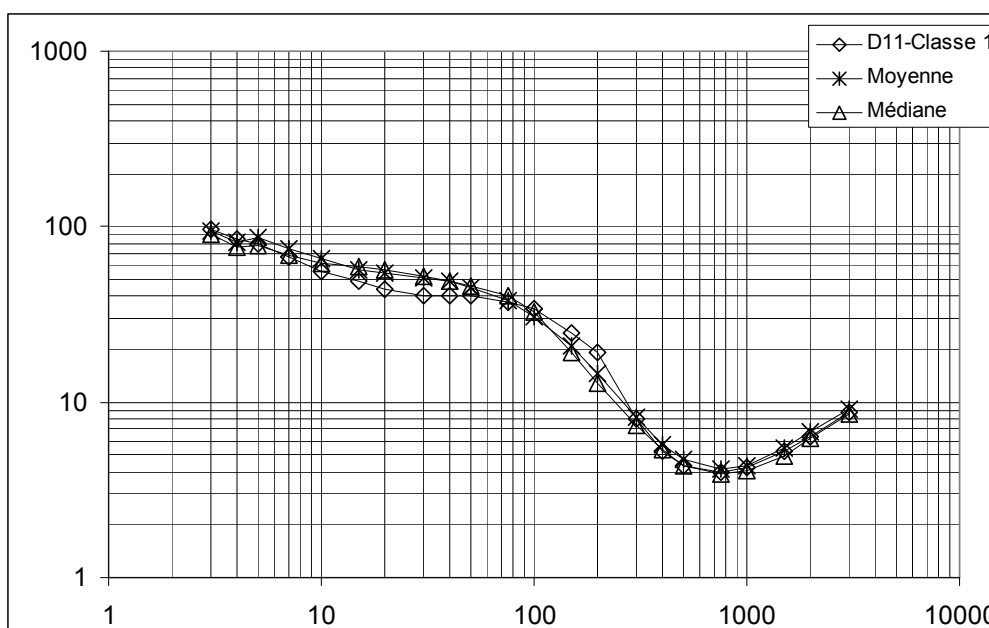


Figure 61: Présentation des pseudo-sondages moyen, médian et le sondage parangon de la classe 1

L'analyse de la moyenne ainsi que la médiane de cette classe, montre que la moyenne est très proche de la médiane. Le sondage parangon de cette classe est le sondage D11 (Figure 61). Ce dernier est, lui-même, est très semblable au pseudo-sondage moyen et au pseudo-sondage médian de cette classe.

Cette classe est relativement homogène. Ainsi le sondage moyen est le pseudo-sondage résumant le mieux les caractéristiques électrique de cette classe. Les résultats du meilleur modèle de l'inversion de ce sondage ainsi que de sondage parangon sont présentés dans le Tableau 11.

**- Classe 2**

L'analyse de pseudo-sondage moyen ainsi que le pseudo-sondage médian de cette classe, montre que les valeurs moyennes sont plus élevées que les valeurs médianes. Le sondage parangon de cette classe est le sondage J10. Ce parangon est très semblable au pseudo-sondage médian de cette classe (Figure 62). Il

existe donc des fortes valeurs de résistivité apparente les écartements faibles concernant essentiellement les deux sondages H15 et G16.

Pour cette classe on représente le pseudo-sondage moyen ainsi que du sondage parangon comme présentant et des caractéristiques électriques de cette classe. Les résultats du meilleur modèle de l'inversion de ce sondage ainsi que de sondage parangon sont présentés dans le Tableau 11

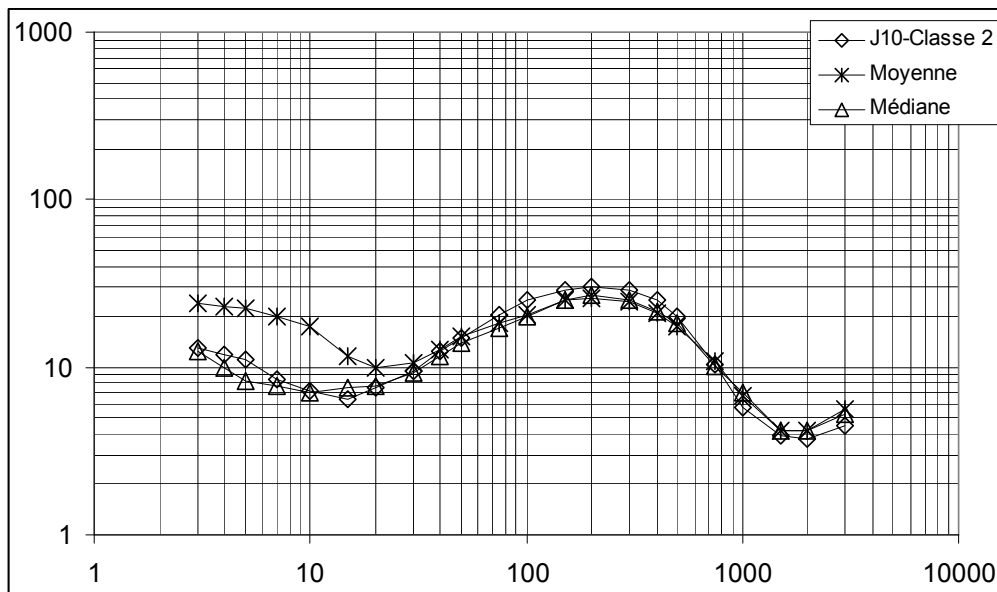


Figure 62:Présentation des pseudo-sondages moyen, médian et la sondage parangon de la classe 2

- Classe 3

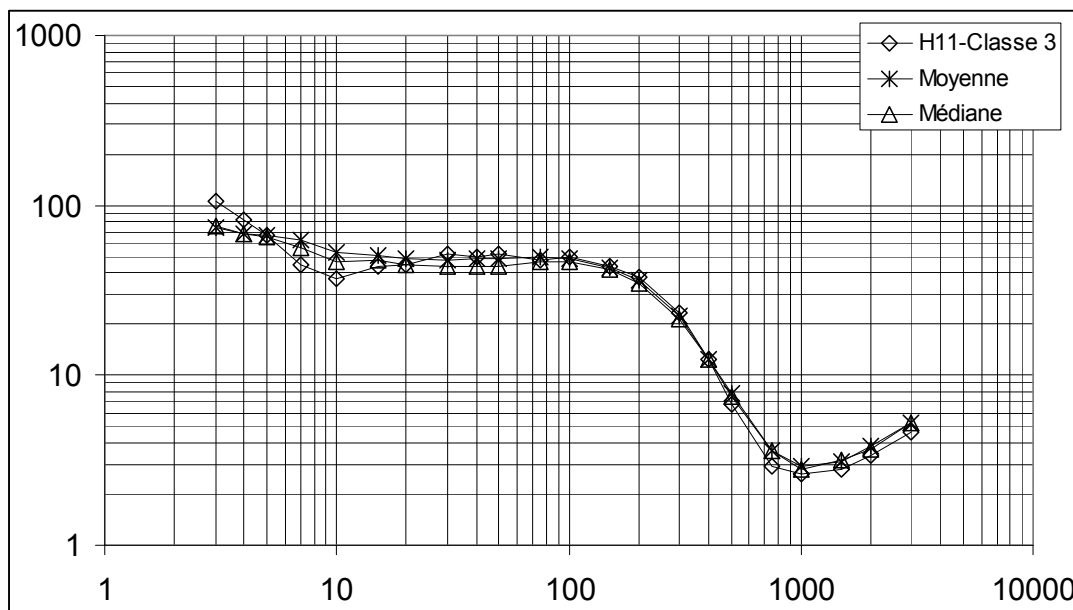


Figure 63: Présentation des pseudo-sondages moyen, médian et le sondage parangon de la classe 3

L'analyse de pseudo-sondage moyen ainsi que le pseudo-sondage médian de cette classe, montre que les valeurs moyenne sont proches des valeurs médianes moyenne est très proche de la médiane. Le sondage parangon de cette classe est le sondage H11 (Figure 63). Ce dernier est lui-même très semblable au pseudo-sondage moyen et au pseudo-sondage médian sauf pour les premières mesures où ce dernier présente une pente anormale (dépassé 45°) d'où l'utilité d'inverser le sondage moyen de cette classe.

Le pseudo-sondage moyen est du sondage parangon présentant et résumant les caractéristiques électrique de cette classe. Les résultats du meilleur modèle de l'inversion de ce sondage ainsi que de sondage parangon sont présentés dans le Tableau 11.

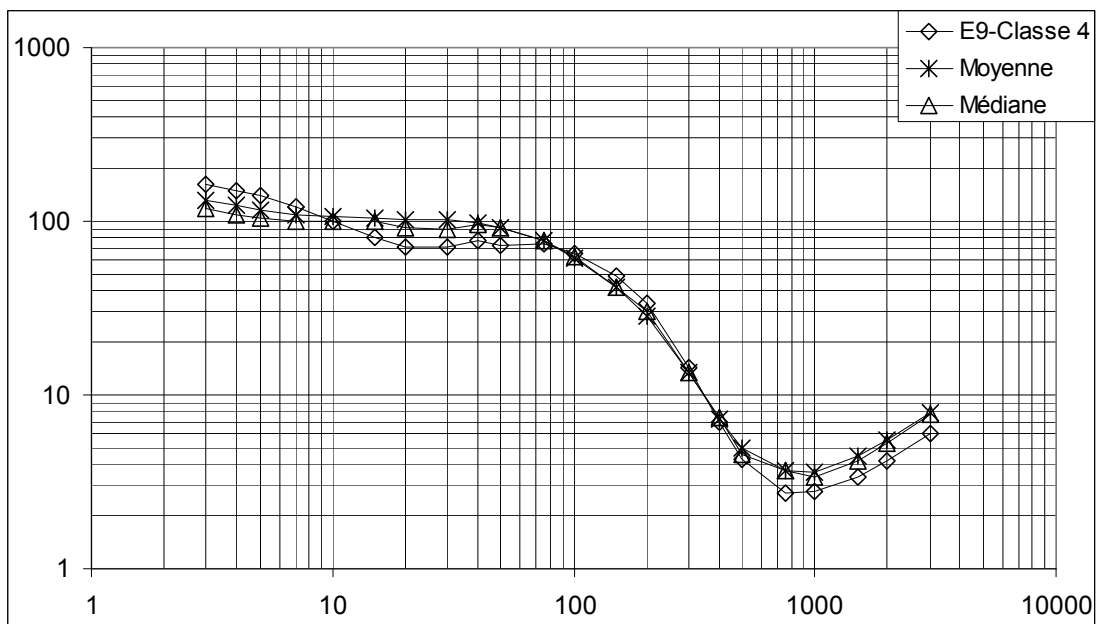


Figure 64: Présentation des pseudo-sondages moyen, médian et le sondage parangon de la classe 4

#### - Classe 4

L'analyse de pseudo-sondage moyen ainsi que le pseudo-sondage médian de cette classe, montre que la moyenne est très proche de la médiane. Le sondage parangon de cette classe est le sondage E9 (Figure 64). Ce dernier est, lui-même, très semblable au pseudo-sondage moyen et au pseudo-sondage médian.

Le pseudo-sondage moyen est le sondage présentant et résumant les caractéristiques électrique de cette classe. Les résultats du meilleur modèle de l'inversion de pseudo-sondage moyen ainsi et le sondage parangon sont présentés dans le Tableau 11.

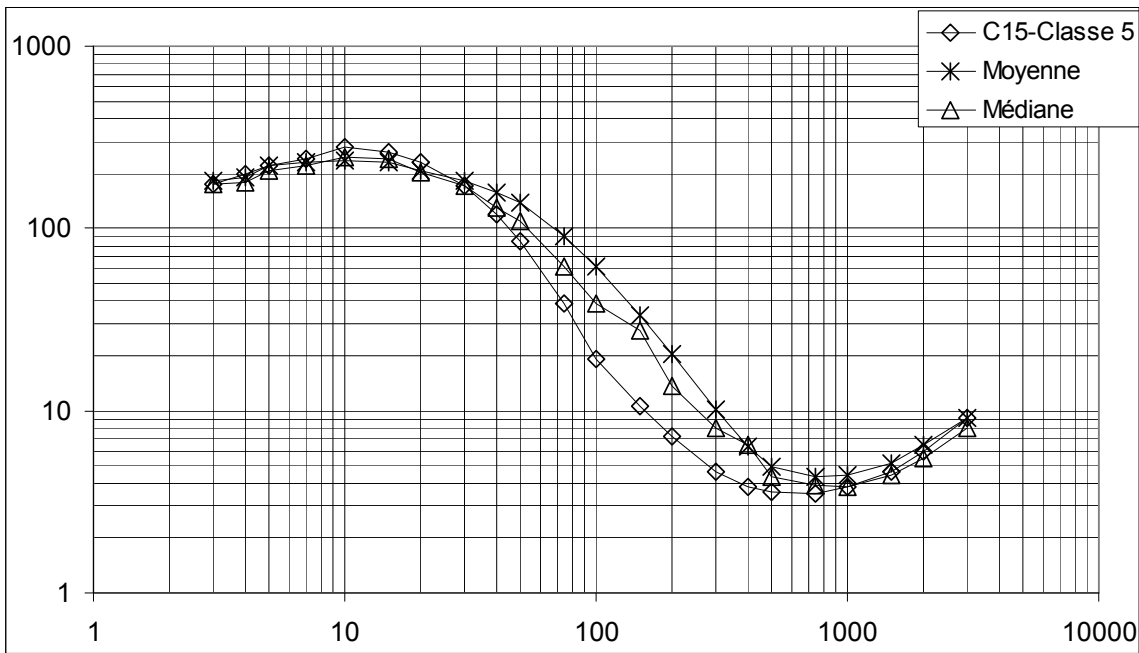


Figure 65 : Présentation des pseudo-sondages moyen, médian et du sondage parangon de la classe 5

L'analyse de pseudo-sondage moyen ainsi que le pseudo-sondage médian de cette classe, montre que les valeurs du pseudo-sondage moyen sont plus élevées que ceux du pseudo-sondage médian, cette variation est bien marquée pour les mesures des écartements intermédiaires. Le sondage parangon de cette classe est le sondage C15. Ce parangon présente des résistivités apparentes faibles par rapport au pseudo-sondage médian au pseudo-sondage moyen (Figure 65). Le pseudo-sondage moyen de cette classe est très éloigné du pseudo-sondage médian et du sondage parangon, cela s'explique par la présence de fortes valeurs des résistivités apparentes pour les écartements intermédiaires.

Le pseudo-sondage moyen est le sondage présentant et résumant les caractéristiques électriques de cette classe. Les résultats du meilleur modèle de l'inversion de ce pseudo-sondage ainsi que du sondage parangon sont présentés dans le Tableau 11

L'analyse des résultats des modèles d'inversions des sondages moyens de chacune des cinq classes sont présentés ci-dessous.

Tableau 10: Paramètres des distributions des modèles pour les cinq SEV moyens (C.V : Coefficient de variation)

Couch e		Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4		Classe 5	
		Erreur <4%		Erreur <4%		Erreur <4%		Erreur <5%		Erreur <5%	
		$\rho$	e (m)	$\rho$	e (m)	$\rho$	e (m)	$\rho$	e (m)	$\rho$	e(m)
1	Moyenne	98,0	2,8	24,3	6,1	61,6	2,0	111,7	34,5	55,0	0,3
	Médiane	98,2	2,8	24,3	6,1	61,6	2,0	111,7	34,5	54,7	0,3
	Intervalle	3,4	0,3	0,1	0,0	1,7	0,0	0,3	1,3	3,2	0,0
	Min	89,9	2,2	22,6	5,5	56,8	1,9	109,7	31,8	50,0	0,1
	Max	103,6	3,6	26,1	6,7	66,3	2,1	1,0	1,1	159,7	1,5
	Ecart-type	2,5	0,2	0,2	0,1	1,3	0,0	0,3	0,8	4,6	0,0
	C.V	3%	7%	1%	1%	2%	2%	0%	2%	8%	16%
2	Moyenne	55,2	24,7	2,6	5,0	9,8	16,9	45,0	89,7	227,3	26,4
	Médiane	55,1	25,1	2,6	5,0	9,8	16,8	45,2	89,4	228,2	26,1
	Intervalle	2,1	5,2	0,0	0,0	0,2	0,8	2,1	1,7	3,6	0,7
	Min	50,9	18,2	2,4	5,0	9,3	14,9	40,2	85,6	215,9	23,6
	Max	58,4	41,7	3,0	5,2	10,4	19,0	0,9	1,0	237,1	29,2
	Ecart-type	1,42	3,26	0,04	0,01	0,17	0,62	1,26	1,13	3,22	0,73
	C.V	3%	13%	2%	0%	2%	4%	3%	1%	1%	3%
3	Moyenne	29,2	74,8	33,3	218,9	29,6	226,9	3,1	799,8	40,0	84,7
	Médiane	29,2	74,4	33,3	218,8	29,6	227,0	3,1	800,0	40,4	84,3
	Intervalle	3,2	2,3	0,4	4,8	0,4	3,4	0,1	0,0	1,8	1,9
	Min	20,7	70,6	30,0	195,2	28,0	210,4	2,9	749,1	33,3	79,4
	Max	33,8	79,6	37,1	243,1	31,5	238,6	0,9	1,0	45,9	92,7
	Ecart-type	2,2	1,6	0,5	4,1	0,4	3,2	0,1	2,2	1,6	1,8
	C.V	7%	2%	1%	2%	1%	1%	2%	0%	4%	2%
4	Moyenne	3,7	995,2	3,1	1674,	3,3	1558,	19,8	0,0	3,9	1277,
	Médiane	3,7	998,6	3,1	1674,	3,3	1553,	1,8	0,0	3,9	1283,
	Intervalle	0,1	7,2	0,1	91,8	0,1	151,8	4,2	0,0	0,1	28,8
	Min	3,5	955,7	2,5	1185,	3,0	1233,	0,1	0,0	3,5	1110,
	Max	3,9	1000,	3,6	2000,	3,6	2000,	0,0	4,6	4,2	1448,
	Ecart-type	0,1	7,5	0,1	68,6	0,1	98,3	330,5	0,1	0,1	35,4
	C.V	2%	1%	3%	4%	2%	6%	1669	510%	2%	3%
5	Moyenne	43,8		604,2		59,1		0,1	10,3	683,8	
	Médiane	39,5		550,7		44,3		0,1	10,9	672,2	
	Intervalle	15,4		252,9		32,6		0,0	1,3	118,5	
	Min	24,4		23,8		13,9		0,1	3,7	108,6	
	Max	113,5		2000,		2000,		1,0	0,4	1000,	
	Ecart-type	14,5		294,6		94,4		0,0	1,6	117,0	
	C.V	33%		49%		160%		0%	15%	17%	
6	Moyenne							248,8			
	Médiane							213,5			
	Intervalle							134,0			
	Min							33,4			
	Max							0,2			
	Ecart-type							345,4			
	C.V							139%			



Tableau 11: Tableau des meilleurs modèles pour chaque couche des cinq pseudo-sondages moyens et chaque sondage parangons

Couches	Erreur minimale	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4		Classe 5	
		Parangon (D11)	SE Moyen	Parangon (J10)	SE Moyen	Parangon (H11)	SE Moyen	Parangon (E9)	SE Moyen	Parangon (C15)	SE Moyen
		2,7 %	2,7%	2,8 %	2,3%	7,7 %	3,5%	5 %	4,7%	4,1 %	4%
1	Résistivité ( $\Omega.m$ )	100	97,5	14,7	24,5	239,4	60,9	192	112	60,3	54,8
	Epaisseur (m)	3,1	3,7	2,8	6,1	1,2	2,02	2,9	33,7	0,5	0,26
2	Résistivité ( $\Omega.m$ )	40	47,9	5	2,8	43,1	9,7	71	46,3	294,3	229
	Epaisseur (m)	90,8	28,5	13,7	5,02	52,3	16,2	106	88,8	16,7	26
3	Résistivité ( $\Omega.m$ )	0,5	30	100	32,6	964	29,6	0,2	3,14	17,8	40,7
	Epaisseur (m)	8,2	66	79,1	216,8	5,2	228,7	16,8	800	67,5	84
4	Résistivité ( $\Omega.m$ )	3,6	3,9	3,1	3,2	2,2	3,3	2,8	4,23	3,3	4
	Epaisseur (m)	974,5	998,9	1998	1684	1386	1662	1136	0,01	1117	1295
5	Résistivité ( $\Omega.m$ )	46	69	30,7	557	751	80	178	0,1	1500	875,5
	Epaisseur (m)								11,4		
6	Résistivité ( $\Omega.m$ )								253,9		

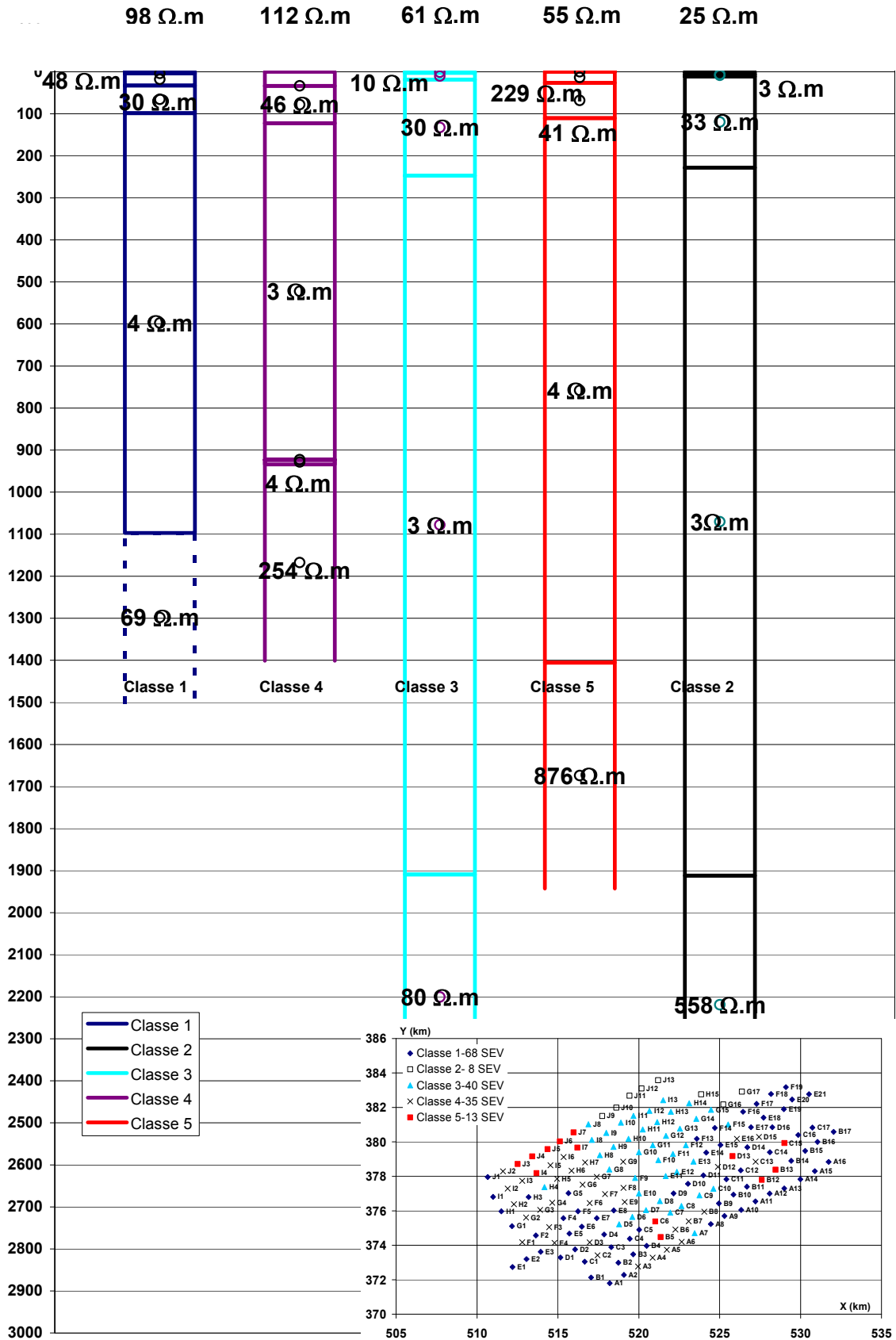


Figure 66: Modèles pour les SEV moyen par classe

Les résistivités et les épaisseurs des terrains pour les sondages électriques moyen de chaque classe sont données Figure 66 et Tableau 11. L'interprétation des résultats des inversions est réalisée avec les données des forages (49) :

-1929/15 (X = 517,904 et Y = 383,045), 2793/15, (X = 521,925 et Y = 382,620), 2370/15(X = 524,38 et Y = 381,75) situés au nord du secteur,

-2564/15 situé à l'est (X = 532,708 et Y = 380,332),

-2743/15 situé au sud-ouest (X = 514,744 et Y = 372,000),

-3337/15 (X = 522,800 et Y = 373,200) et 2430/15 (X = 520 et Y = 376,3) situés dans la partie centrale sud

Les résultats des inversions des pseudo-sondages moyens des classes 1, 4 et 5, présentent les terrains superficiels les plus résistants ; ces terrains sont représentés par trois couches dont les épaisseurs cumulées varient de 100 m à 120 m, ils se manifestent sur les cartes de krigeage des résistivités apparentes variant de 100 à 398  $\Omega.m$  pour les faibles pseudo-profondeurs par les trois grandes zones les plus résistantes au sud et au nord-ouest du secteur (Figure 59) ; les résistivités de la troisième couche (la plus épaisse des trois) atteignent des valeurs de l'ordre de 30 à 40  $\Omega.m$  . Les forages 2430, et 3337, qui sont situés près ou au milieu de ces formations résistantes, montrent l'existence de terre végétale pour la couche la plus superficielle et de calcaires lacustres ainsi que des grès pour les deux suivantes.

L'inversion des pseudo-sondages moyens des classes 2 et 3 montre l'existence des couches superficielles très conductrices (3 et 10  $\Omega.m$ ) et de faible épaisseur (moins de 20 m), correspondant à la zone conductrice située au nord et NE du secteur identifiée sur les cartes krigeés pour les faibles pseudo-profondeurs (Figure 59) ; le forage 2793 permet d'interpréter ces niveaux comme des limons marneux rouges ainsi que des argiles et des calcaires à intercalations de marnes. Un peu plus profondément (vers 80 m de profondeur) ces pseudo-sondages présentent une couche plus résistante (30 et 40  $\Omega.m$ ) et qui peut persister jusqu'à 228 et 250 m de profondeur; ce niveau correspondre à des niveaux conglomératiques (forage 2370/15), devenant plus au nord des calcaires (Forage 1929/15).

Les formations superficielles sont donc d'épaisseur variable allant de 100 à 120 m sur le pourtour du bassin et jusqu'à 250 m dans la partie centrale. Ces formations recouvrent toutes des formations à très faibles résistivités (3 à 4  $\Omega.m$ ) mais dont l'épaisseur varie ; l'influence de ces faibles résistivités est, par suite, plus précoce dans les parties sud est et est du bassin que dans la partie centrale comme on peut le constater sur la carte des résistivités apparentes obtenue pour  $AB/2 = 200$  m ( $z_e = 76,40$  m, Figure 59). Ces formations correspondent toutes aux marnes grises décrites dans les forages 2370/15, 3337/15 comme pouvant être plastiques; ces marnes sont à rapporter au Miocène. La partie centrale (pseudo-sondages moyens des classes 2, 3 et 5) présente une épaisseur de marne la plus importante (respectivement 1684, 1662 et 1295 m ce qui se marque bien sur les cartes des résistivités apparentes dès  $AB/2 = 1500$  m) avant

qu'un niveau plus résistant ne soit rencontré. Les pseudo-sondages moyens des classes 1 et 4 montrent des épaisseurs de marnes égales respectivement à 1000 et 800 m avant de montrer un niveau plus résistant tout comme le faisaient les sondages moyens des classes 2, 3 et 5 ; l'apparition plus rapide, pour ces sondages, des niveaux résistants est déjà visible sur les cartes des résistivités apparentes  $AB/2 = 1000$  m. Ces niveaux sont à relier aux formations des grès, et des calcaires dolomitiques du Lias. Un approfondissement du bassin vers le nord et le nord-est ainsi mise en évidence. En résumant ainsi dans le secteur on a :

-le complexe plio-quaternaire, très hétérogène avec trois couches superposées, ayant une résistivité élevée sauf pour les deux premières couches des classes 2 et 3. Les résistivités obtenues pseudo-sondages moyens se distribuent sur l'intervalle 25-230  $\Omega.m$  en tenant pas compte les classes 2 et 3. Ces valeurs sont cohérentes avec les valeurs généralement retenue (Tableau Annexe 4)

-le deuxième ensemble (le Miocène), présente un caractère homogène pour la totalité des terrains avec une épaisseur très importante ( $> 900$  m), et une résistivité très faible (l'ordre de 3  $\Omega.m$ ). Ces valeurs sont un peu plus faibles que celles qui sont généralement retenues (10 à 30  $\Omega.m$ )

-le dernier ensemble représenté par les couches 5 et 6. Ce complexe de la base de Miocène du toit de Lias est caractérisé par des résistivités comprises entre 69 et 876  $\Omega.m$ .

La limite supérieur paraît élevée au regard des valeurs généralement retenues

## **Conclusion**

Les sondages électriques verticaux, constituent toujours le moyen le plus utilisé pour la recherche des réservoirs d'eau au Maroc, en raison de leur profondeur d'investigation qui est importante, ainsi que leur coût relativement peu onéreux. Les méthodes statistiques et géostatistique constituent des moyens rapides fiables et quantitatifs pour l'étude et l'interprétation des tels sondages lorsqu'ils sont en nombre important. Les résultats issus de ces deux techniques avec les connaissances géologiques du bassin concordent bien.

Notre méthodologie de travail est basée sur des techniques qui permettent de réanalyser une base importante des sondages électriques verticaux tout en conservant leur relation. Les méthodes statistiques descriptives nous ont permis de distinguer électriquement trois grands ensembles verticaux (Résistant et hétérogène, Conducteur et homogène, Résistant relativement hétérogène). Ces résultats sont obtenus principalement par le calcul des pseudo-sondages moyens ou médian. Cette analyse a englobé tous les sondages (164) et tous les niveaux (22 valeurs d'espacement interélectrodes) d'où l'intérêt qu'il y a eu à ajouter une analyse en composantes principales et une classification hiérarchique ascendante afin de cerner la particularité de chaque sondage en fonction de ces niveaux (espacement interélectrodes ou pseudo-profondeurs) et de les classer en cinq classes dont les propriétés électriques sont nettement différentes. A l'issue de cette partie on a pu suivre l'évolution pseudo-profondeur par pseudo-profondeur

des variations des résistivités apparentes pour tout le bassin. Les cartes des résistivités apparentes en fonction des pseudo-profondeurs, les inversions des sondages électriques moyens de chaque classe et le calage des résultats avec les données des forages mécaniques effectués dans la zone ont permis d'obtenir une vision géoélectrique claire et globale de chaque zone du bassin à travers un modèle calculé.

Trois grands ensembles sont définis :

-1<sup>er</sup> ensemble dont l'épaisseur varie de 100 à presque 250 m, correspond géologiquement au complexe plio-quadernaire avec des grès, des calcaires lacustres ainsi que des conglomérats et localement vers le nord des marnes.

-2<sup>eme</sup> ensemble conducteur dont l'épaisseur est très importante et variable d'une zone à l'autre ce qui montre d'une façon globale l'approfondissement du bassin vers le nord et une structuration soit par faille soit par flexure d'orientation globale nord sud. Les marnes du Miocène sont de plus en plus épaisses vers le nord et le nord-est du bassin.

-Le dernier ensemble résistant correspond géologiquement aux conglomérats de base du Miocène et des calcaires dolomitique du Lias supérieur. Cet ensemble est moins profond vers le sud du bassin, ce qui explique la zone résistante dans les cartes de krigeage pour les plus grandes pseudo-profondeurs.

Les résultats des analyses statistiques et géostatistiques complétés par les inversions des sondages moyens pas classe, ont mis en évidence la fiabilité de ces techniques pour l'interprétation d'un nombre important de sondages électriques au lieu de la méthode ordinaire fastidieuse qui se base sur l'inversion des sondages un par un et les corrélent ultérieurement pour construire la structure globale du domaine étudié. Avec les techniques qu'on a utilisées, on peut avoir des résultats très satisfaisants en un temps plus réduit.



---

**INVERSION DES LIGNES DES SONDAGES ELECTRIQUES VERTICAUX PAR  
TOMOGRAPHIE 2D**

---





# CHAPITRE IV : INVERSION DES LIGNES DES SONDAGES ELECTRIQUES VERTICAUX PAR TOMOGRAPHIE 2D

---

---

## **Introduction**

Après l'analyse géostatistique et le krigeage des cartes 2D, tant horizontales que verticales (Cf chap 3), nous obtenons un jeu de données, ici de résistivité apparente, important. Ces données sont acquises avec un maillage adapté aux contraintes de la géostatistique, aux limites des méthodes de résistivité électrique par sondage, à la connaissance statistique des données du bassin de Saïss et aux connaissances géologiques. Cette distribution n'est pas directement compatible avec le format de données exploitables par le code utilisé : RES2Dinv. L'objectif de ce chapitre est de montrer comment nous avons extraits des données des cartes précédemment réalisées pour construire une pseudo-section.

Nous constituerons deux nouvelles bases de données à deux échelles différentes :

- La première dans laquelle les valeurs des résistivités apparentes sont distribuées selon une maille régulière de  $a = 50$  m pour l'étude de la totalité du bassin ;
- La deuxième pour laquelle la maille est égale à 20 m pour l'étude de la zone de subsurface.

La méthode développée ci-dessous sera ensuite appliquée pour obtenir dix images 2D de tomographie électrique du terrain aux deux échelles.

Cette méthode comprend deux étapes. La première étape consiste en la création de fichiers de données de résistivités apparentes à partir des mesures krigées compatibles avec des fichiers exploitables par RES2DINV. Ces fichiers devront être structurés de façon identique à ceux issus de tomographie de résistivité acquise avec un dispositif Wenner-Schlumberger ; on parlera alors de pseudo-section « estimée » c'est-à-dire de pseudo-sections obtenues par estimation numérique et pas directement par la mesure sur le terrain. La deuxième étape consiste en l'inversion 2D des pseudo-sections estimées et l'obtention d'images de tomographie de résistivité électrique (TRE).

## **I) Principe de la méthode proposée**

Nous avons choisi de créer une pseudo-section estimée qui corresponde à un dispositif Wenner-Schlumberger. Ce dispositif nous est apparu le plus proche des données dont nous disposons qui sont issues de sondages électriques verticaux acquis avec un dispositif Schlumberger.

Le principe consiste en l'obtention de fichiers avec une configuration semblable à la configuration Wenner-Schlumberger prête pour l'inversion 2D. Avant d'expliquer les différentes étapes, on rappelle le principe d'un sondage électrique vertical en dispositif Schlumberger en 1D et celui d'une tomographie de résistivité avec un dispositif Wenner-Schlumberger acquis en 2D

### I-1) le dispositif Schlumberger des sondages électriques verticaux

C'est un dispositif de mesure géoélectrique symétrique destiné à la réalisation de sondages électriques verticaux

Le principe consiste en l'injection du courant électrique entre deux électrodes appelées A et B ou C1C2 et à la mesure de la différence de potentiel entre deux électrodes appelées M et N ou P1P2. Pour le dispositif Schlumberger il faut que :

$L \gg a$  Dans ce dispositif la distance entre les électrodes MN est supposée infiniment petite par rapport à la distance entre AB.

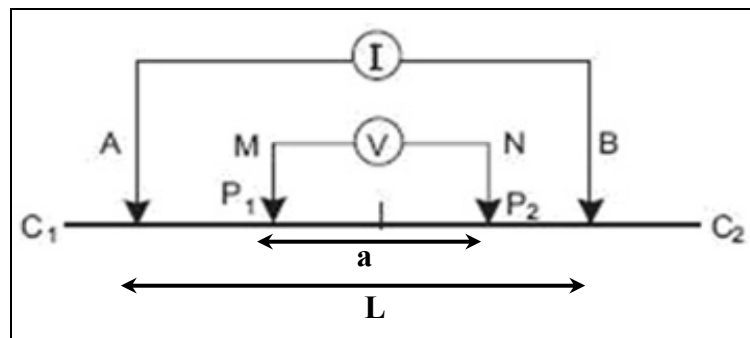


Figure 67: Mode de placement des électrodes selon la configuration Schlumberger

Dans le dispositif Schlumberger (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), les électrodes de mesure (M et N) sont immobiles au centre du dispositif et on fait varier l'écart entre les électrodes d'injection; avec un écartement croissant la profondeur d'investigation augmente. On obtient ainsi des valeurs de résistivité apparente en fonction de la profondeur à la verticale du centre du dispositif.

Les travaux d'Edwards (1977) montrent que la profondeur efficace  $z_e$  (qui correspond à la profondeur médiane), pour un SEV idéal c'est-à-dire pour des électrodes de courant très éloignées des électrodes de potentiel ( $L > 10 a$ ), est égale à  $0,19 * L$ . C'est cette profondeur efficace que nous comparerons à celle du dispositif Wenner-Schlumberger utilisé en 2D.

### I-2) La configuration Wenner-Schlumberger des pseudo-sections pour des inversions 2D

La tomographie des résistivités électriques aussi appelée imagerie de résistivité électrique ou panneau de résistivité électrique peut être assimilée à la combinaison de sondages électriques verticaux et de trainés électriques. Cette technique est utilisée pour la réalisation d'une coupe des résistivités du sous-sol, qui tient compte des variations verticales et horizontales de la résistivité électrique, cette propriété électrique étant elle-même liée aux variations lithologiques, de teneur en argile ou hydrique de la zone étudiée.

Avant d'inverser les données pour obtenir un modèle de résistivité du terrain, une image appelée pseudo-section est construite au moyen de mesures acquises sur le terrain. Elle doit ici être construite à partir des données 1D de SEV krigées.

Sur le terrain, la construction d'une pseudo-section se base sur la mesure de la différence de potentiel entre les électrodes MN (P1P2) suite à l'injection d'un courant électrique émis entre les électrodes de courant A et B (C1C2). La différence de potentiel mesurée est produite par le passage du courant dans la formation investiguée. En augmentant la distance entre les électrodes AB on obtient une investigation plus profonde sur le même axe vertical (Marescot, 2006) (Figure 68)

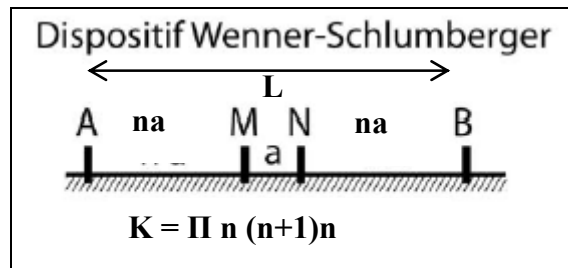


Figure 68: Les dispositifs Wenner-Schlumberger en imagerie électrique d'après MARESCOT.L, 2006

(Avec K : facteur géométrique pour chaque verticale de mesures)

A la différence d'un dispositif Schlumberger, l'écartement entre les électrodes de courant et les électrodes de mesure ( $n \cdot a$ ) augmente en proportion entière d'un facteur  $n$  nommé niveau ; cela correspond sur le terrain à la mise en place d'électrodes avec un espacement  $a$  régulier. (Figure 69)

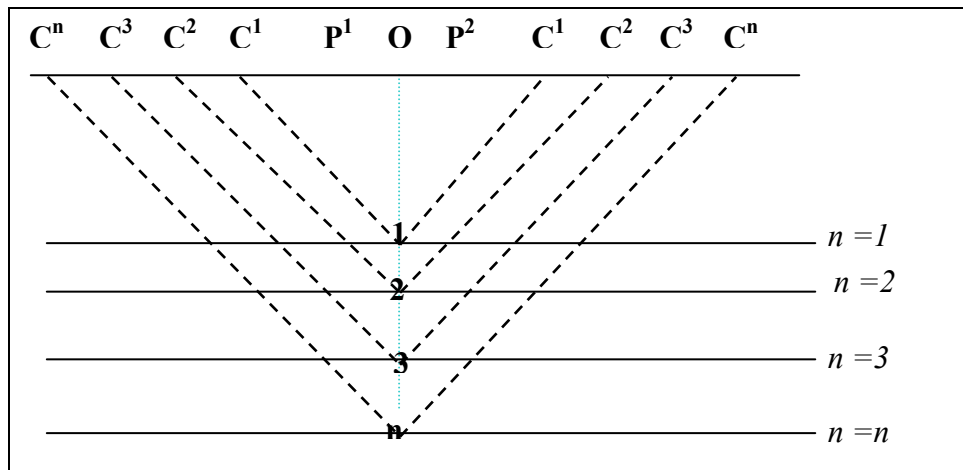
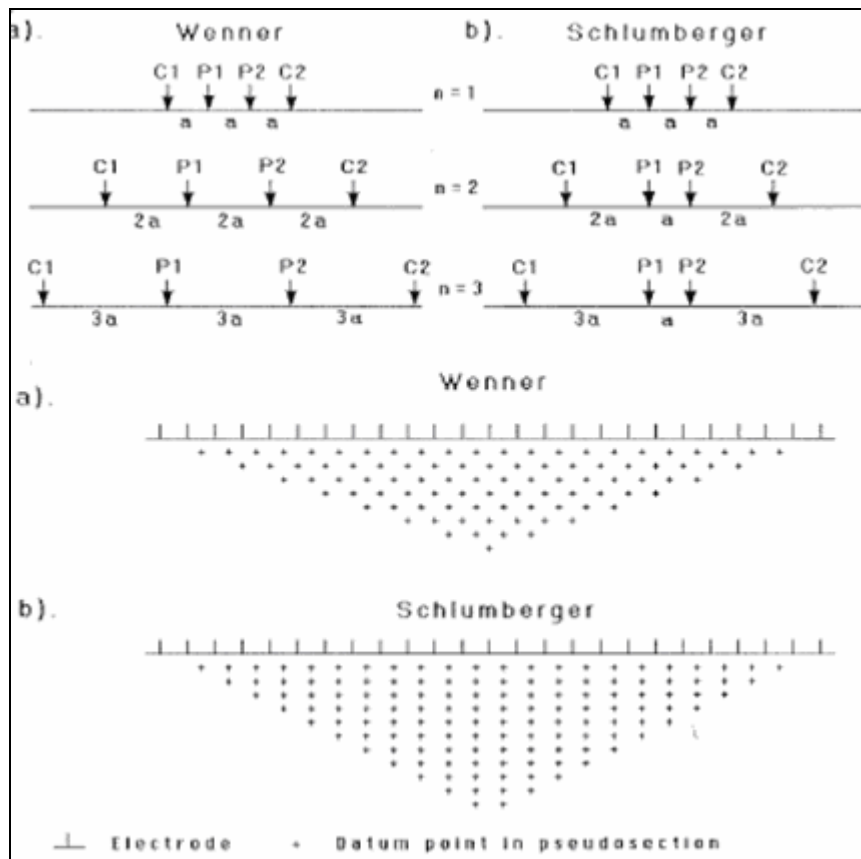


Figure 69 : Schéma de la profondeur  $Z_e$  en fonction de l'écartement des électrodes pour un dispositif Wenner-Schlumberger

Afin d'étudier la distribution spatiale des valeurs de résistivité apparente dans un axe vertical, il est nécessaire de réitérer le processus de mesure en translatant le dispositif le long du profil (Figure 70)



**Figure 70: Construction d'une pseudo-section électrique avec les dispositifs Wenner et Wenner-Schlumberger (manuel d'utilisation de RES2DINV) modifié**

L'attribution de la position des points de mesure se fait à la verticale du centre du dispositif selon les pseudo-profondeurs définies par Edwards 4. (Tableau 12). On notera que l'on passe progressivement d'un dispositif de type Wenner quand  $n=1$  à un Schlumberger à partir de  $n=4$

Chaque mesure de résistivité apparente est ainsi reportée en un point d'une pseudo-section d'abscisse X centre du dispositif et d'ordonnée (Y) égale à la pseudo-profondeur  $Z_e$  proportionnelle à l'écartement des électrodes. Sur le terrain, les appareils de mesure permettent d'acquérir automatiquement ces informations 2D. La Figure 70 présente des séquences de mesure effectuée pour construire une pseudo-section électrique avec un dispositif de type Wenner ou un dispositif Wenner-Schlumberger.

En pratique, une série d'électrode est plantée dans le sol. L'espaceur 'a' entre deux électrodes consécutives est déterminé en fonction de la taille du profil à réaliser et de la définition recherchée. Le nombre des niveaux (n) est déterminé en fonction de la profondeur d'investigation que l'on envisage d'atteindre dans la limite de la différence de potentiel mesurable.

**Tableau 12: Synthèse des différents rapports permettant de déduire la profondeur efficace ( $Z_e$ ) pour différents dispositifs en fonction de l'écartement  $L$ , d'après Edwards 1977 et Loke 2004**

Dispositif	n	$Z_e/a$	$Z_e/L$
Wenner		0.519	0.173
<b>Schlumberger</b>			
* Ideal, $a \rightarrow 0$		-	0.192
* $L = 40a$		7.66	0.192
* $L = 20a$		3.82	0.191
* $L = 10a$		1.90	0.190
<b>Wenner-Schlumberger</b>			
	1	0.520	0.173
	2	0.930	0.186
	3	1.320	0.189
	4	1.710	0.190
	5	2.090	0.190
	6	2.480	0.190

## I-2) La méthodologie

Après le rappel du principe du sondage électrique vertical de type Schlumberger ainsi que celui de la tomographie électrique de type Wenner-Schlumberger, le paragraphe suivant est consacré à la méthode de sélection des données compatibles avec une configuration Wenner-Schlumberger compatible avec le code RES2Dinv@. Cette technique consiste à la sélection des points sur la carte krigeés dont la position sur un même niveau de profondeur est la plus proche de celle d'un pseudo section de type Wenner-Schlumberger. De plus, nous devons judicieusement définir le nombre de niveau et leur position verticale de façon à atteindre la profondeur désirée et à être cohérent avec des mesures de type Schlumberger.

La différence entre une tomographie de type Wenner-Schlumberger et un SEV Schlumberger est liée au fait que l'écartement entre M et A et N et B est à pas régulier pour la tomographie ( $n \cdot a$ ) et peut donc être plus faible que pour un Schlumberger ainsi que pour  $n = 1$  on a une configuration Wenner.

Dans le cas du dispositif Schlumberger idéal, l'écartement entre les électrodes de potentiel ( $MN = a$ ) doit être très petit vis-à-vis de l'écartement entre les électrodes de courant  $AB = L$ . Ainsi la profondeur efficace définie par Edwards, 1977 est égale à  $0,192L$  pour  $L$  tendant vers l'infini, et pour  $L = 10 \cdot a$  alors la profondeur efficace est égale à  $0,190L$ . Nous considérerons que pour les SEV réalisés sur le site du Bassin de Saïss, la géométrie du dispositif de mesure est plutôt voisine de  $L=10a$ . Dans le cas de la tomographie 2D, pour les premiers écartements  $AB$ , on est plus proche d'un dispositif Wenner et la profondeur efficace est égale à  $0,173L$  pour  $n = 1$  ;  $0,186L$  pour  $n = 2$  ;  $0,189L$  pour  $n = 3$  et à partir de  $n = 4$  on retrouve  $0,19L$  (Tableau 13) c'est-à-dire que l'on se retrouve dans les hypothèses précédentes d'un dispositif de type Schlumberger.

Nous devons donc extraire des cartes krigeés pour des profondeurs estimées à  $0.19L$ , des valeurs de résistivité apparente qui correspondent à des pseudo-sections de type Wenner-Schlumberger dont les profondeurs sont différentes pour les premiers niveaux. Sur le Tableau 13 sont reportées les profondeurs efficaces des SEV (notées  $Z_e$  VES) et des tomographies (notées  $Z_e$ WS). Dans le cas d'une maille de krigeage de 50m, on calcule l'erreur relative entre les pseudo-profondeurs (colonne dite de relative error). On ne retient que les résistivités apparentes pour une profondeur dont l'erreur relative est inférieure ou égale à une valeur décidée a priori.

**Tableau 13: synthèse des profondeurs retenues pour construire les pseudo-sections estimées (Riss et al 2010, soumis)**

$Z_e$ (m)	$Z_e$ VES	$Z_e$ WS	$L = (2k + 1) qa$ $a = 50m$	Relative error
			$P1P2 = qa$	$\frac{z_{e,v\text{es}} - z_{e,w\text{s}}}{z_{e,v\text{es}}}$
0	♦ 19			
	♦ 38			
50	♦ 57	■ 51.9	■ $(2k+1) = 3 q = 2$	■ 8.90%
	♦ 76			
100	♦ 95	■ 92.5	■ $(2k+1) = 5 q = 2$	■ 2.60%
	♦ 114	■ 103.8	■ $(2k+1) = 3 q = 4$	■ 8.90%
	♦ 133	■ 131.8	■ $(2k+1) = 7 q = 2$	■ 0.90%
150	♦ 152			
	♦ 171	■ 170.6	■ $(2k+1) = 9 q = 2$	■ 0.20%
	♦ 190	■ 185.0	■ $(2k+1) = 5 q = 4$	■ 2.60%
200	♦ 209	■ 209.3	■ $(2k+1) = 11 q = 2$	■ -0.10%
	♦ 228			
250	♦ 247	■ 247.8	■ $(2k+1) = 13 q = 2$	■ -0.30%
	♦ 266	■ 263.6	■ $(2k+1) = 7 q = 4$	■ 0.90%
	♦ 285	■ 286.3	■ $(2k+1) = 15 q = 2$	■ -0.50%
300	♦ 304			
	♦ 323	■ 324.7	■ $(2k+1) = 17 q = 2$	■ -0.50%
350	♦ 342	■ 341.2	■ $(2k+1) = 9 q = 4$	■ 0.20%

Par ailleurs, on augmente aussi la distance entre électrodes de potentiel (MN ou P1P2) dans notre cas on les augmentera d'un rapport  $q$  ( $q = 1$  à  $q = j$ ) ( $q*a$ ). Ces nouvelles profondeurs sont aussi synthétisées sur le tableau ci dessus

## I-2-1) Sélection des données destinées à établir un fichier prêt pour l'inversion

La première étape consiste à la préparation des fichiers compatibles avec la configuration Wenner-Schlumberger. Le modèle pour le programme d'inversion 2D de la résistivité est basé sur un maillage en blocs rectangulaire (LOKE ; 2004) (Voir fig. annexe) le maillage est construit de telle sorte que la base des blocs corresponde en profondeur aux profondeurs efficaces  $Z_e$ . On notera que plus la distance initiale entre les électrodes de potentiel  $qa$  (avec  $q = 1$  et  $a$  est la taille du maillage) est faible, plus le modèle déduit de l'inversion est précis pour la partie superficielle.

Par conséquent, le nombre de nœuds de la grille (valeurs de résistivités apparentes estimées), ainsi que les électrodes virtuelles dépendent de la longueur du profil ainsi que de la profondeur que l'on désire avoir

pour le modèle de résistivité. On note que le nombre d'électrodes virtuelles augmente avec la diminution de  $a$  pour  $L$  fixe. Pour obtenir un modèle par inversion 2D de la subsurface du bassin on a besoin d'une valeur de  $a$  la plus petite possible, en plus la distance maximale  $L$  doit être réduite afin que le nombre de nœuds de la grille ne soit pas trop élevé compte tenu de la taille de la mémoire demandée par le programme d'inversion. Un compromis doit être trouvé entre la résolution souhaitée et le nombre de points (Riss et al, 2010 soumis).

La conception de l'échantillonnage pour la création d'un fichier de données utilisable pour l'inversion est donnée par l'algorithme suivant :

-a1) Choix de la position  $X$  sur le profil

Calculer pour chaque valeur de  $L/2$  (valeur initiale  $L/2 = a$ ) du fichier des résistivités apparentes, la profondeur efficace  $z_e$  correspond à  $z_e = 0,19L$

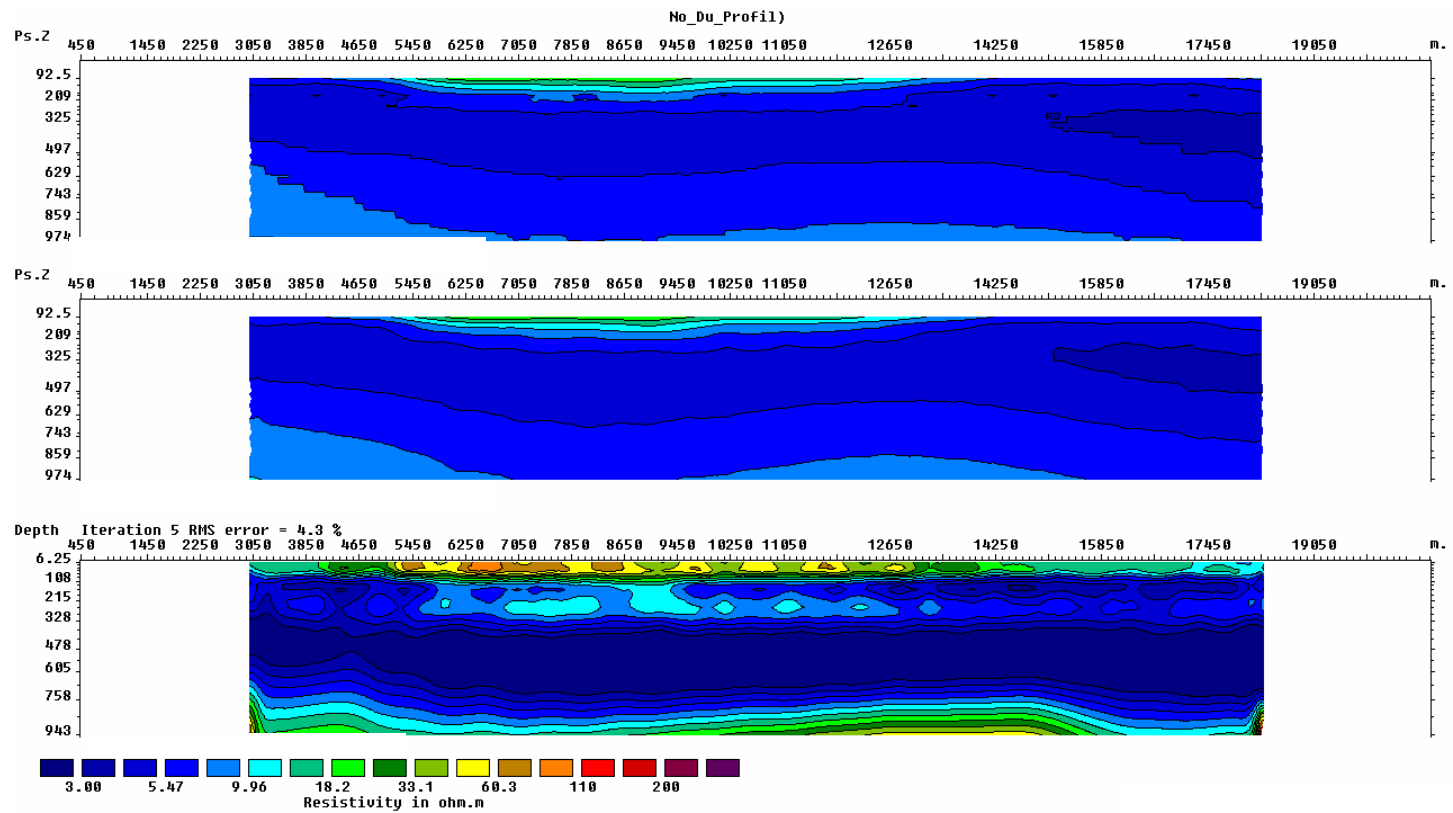
Trouver les valeurs de  $(2n+1)$  et  $q$  pour déterminer la profondeur efficace équivalente  $z_e$  dans la configuration Wenner-Schlumberger. En pratique, dans des sondages actuels sur le terrain, la valeur maximale du facteur  $n$  de l'interdistance entre électrodes est de 8 environ, on a décidé alors ne pas avoir une valeur maximale de  $n$  supérieur à 8 ( $2k+1 \leq 17$ ). En plus pour avoir des profondeurs d'investigation plus importantes,  $q$  doit prendre les valeurs entre 1 et 6.

-a2) Répéter la tâche pour les positions  $X$  suivantes.

## 1-2-2) INVERSION DES PSEUDO-SECTIONS ESTIMEES

Les mesures de résistivité apparente ne peuvent pas être interprétées directement, en raison de la non unicité de la réponse en milieu hétérogène et de leurs dépendances vis à vis du dispositif utilisé. En effet, on peut très bien calculer, au moyen de la loi d'Ohm et des équations de Laplace, la résistivité apparente à partir de la résistivité réelle (ou modèle de résistivité) c'est ce que l'on appelle la modélisation directe Figure 71 qui est stable numériquement. Par contre, pour passer des résistivités apparentes au modèle de résistivité nous sommes obligés d'utiliser une procédure dite d'inversion (Figure 71). L'inversion est une méthode itérative automatique qui peut fournir un modèle de résistivité (résistivité vraie en fonction de la profondeur). La solution mathématique n'est pas unique.

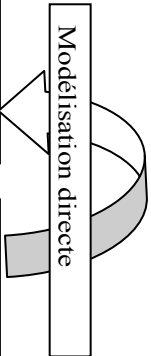
Dans le cadre de cette étude, comme nous l'avons déjà mentionné, nous avons choisi d'inverser les données de résistivité apparente estimée, au moyen du logiciel RES2DINV commercialisé par GEOTOMO et développé par Loke, avec la version 3.57.07.



Pseudo-section :  
Résistivités apparentes  
mesurées ou estimées en  
fonction de la pseudo-  
profondeur  $z_e$ .

Résistivités apparentes  
calculés en fonction de la  
pseudo-profondeur

Modèle de  
la résistivité (Résistivités  
vrais en fonction de la  
profondeur



-Avec Itération 5 : Nombre d'itérations

-RMS error = 4,3 %: Root mean square

**Figure 71: les modalités d'inversion sur RES2Dinv**



Ce logiciel permet par méthode itérative de calculer un modèle de résistivité optimal correspondant le mieux aux structures électriques du terrain étudié. La méthode d'inversion utilisée est appelée « smoothness-constrained least square » que l'on pourrait traduire par méthode de lissage par les moindres carrés ; on l'appelle aussi méthode d'inversion de norme L2 (Loke et Barker, 1996). C'est une méthode d'optimisation dont la fonction objectif tend à minimiser la somme des carrés (norme L2) des écarts entre les valeurs de résistivité apparente mesurée, dans notre cas ce sera les résistivités apparentes estimées, et les résistivités apparentes déduites du modèle (pour chaque itération) de résistivité électrique, rapporté à la moyenne des résistivités apparentes ; le Root mean square affiché par le logiciel représente la racine carré de cette valeur (Figure 71). De plus les itérations se font aussi en minimisant la somme des carrés des écarts entre les résistivités de deux modèles issus de deux itérations successives (entre l'itération  $i$  et  $i+1$ ). Le calcul est conduit sur les valeurs logarithmiques des résistivités. Compte tenu du nombre important de données, la méthode utilisée est celle dite « incomplète Gauss-Newton » proposée par Loke, (2004). Cette méthode est un peu moins précis numériquement (Loke, 2004) mais suffira à inverser nos données à l'échelle du Bassin.

## **II) Résultats : Les images 2D des inversions des profils dans le bassin de saïss.**

La représentation des résultats sous forme des images 2D de résistivités électrique est fonctionnelle. Les inversions proposées ci-dessous sont faites avec le logiciel RES2DINV. La première étape pour la présentation des images 2D, est la construction des pseudo-sections comme cela a été expliqué au début de ce chapitre, l'étape suivante consiste à déduire, par inversion, un modèle 2D de résistivités. On propose dans notre étude d'analyser deux types de modèle, le premier modèle à petite échelle est construit avec une maille de la grille de krigeage égale à 50 m ( $a = 50$  m) ; on rappelle, que cette maille correspond à la distance minimale entre les électrodes de mesures de potentiel (MN). Ce modèle montrera les grands traits de la structure géoélectrique de la totalité du bassin. Le deuxième modèle est conçu avec un maille de 20 m ( $a = 20$  m) ; il permet d'établir la structure géoélectrique détaillée de la partie de subsurface du bassin essentiellement des formations plio-quadernaires.

Pour la totalité du Bassin, les données d'origine sont des résistivités apparentes pour des valeurs d' $AB/2$  allant de 3 à 3 000 m par pas de 50 m ; après la préparation des fichiers prêts pour l'inversion par RES2DINV, le nombre des niveaux obtenus est égal à 23. La profondeur d'investigation obtenue, dans ce cas, est de 943 m.

Pour le détail de la partie de subsurface la valeur de  $a$  est 20 m avec 8 niveaux ; ceci permet d'investiguer une profondeur de 108 m.

Les failles sont indiquées à titre indicatif en se fondant sur les données structurales générales et sur les profils sismiques réalisés dans la région (Annexe 1).

Les inversions réalisées avec le logiciel RES2DINV reposent sur le principe qui consiste à minimiser l'erreur entre les résistivités apparentes estimées (ici issue du krigeage) et celles qui sont déduites de l'inversion par le programme. Ici, on décide de présenter les modèles dont le RMS est inférieur à 5 % et non pour un nombre d'itération fixe.

On présente ci-dessous, profil par profil les résultats des inversions en commençant par le profil A situé le plus au sud pour finir par le profil J situé le plus au nord de la zone étudiée (Figure 54).

Les analyses des profils présentés ci-dessous, sont faites en tenant compte des informations globales déjà présentées au chapitre 1 et rappelées sur la figure présente sur en annexe 3.

### II-1) Les images 2D du profil A

Le profil A, le premier le plus au sud du secteur (Figure 49) présente une longueur horizontale de 15 252 m. Le nombre d'électrodes virtuelles estimé pour la réalisation de ce modèle est égal 800 pour le pas de  $a = 50$  m et 3 080 pour la subsurface avec un pas de  $a = 20$  m. C'est ainsi que pour la totalité du bassin on a défini 23 niveaux ce qui donne 7 038 points de données dans le fichier destiné à l'inversion ainsi que 14 098 blocs ; pour la subsurface, il y a 6 104 points de données avec 8 niveaux et 42 344 blocs.

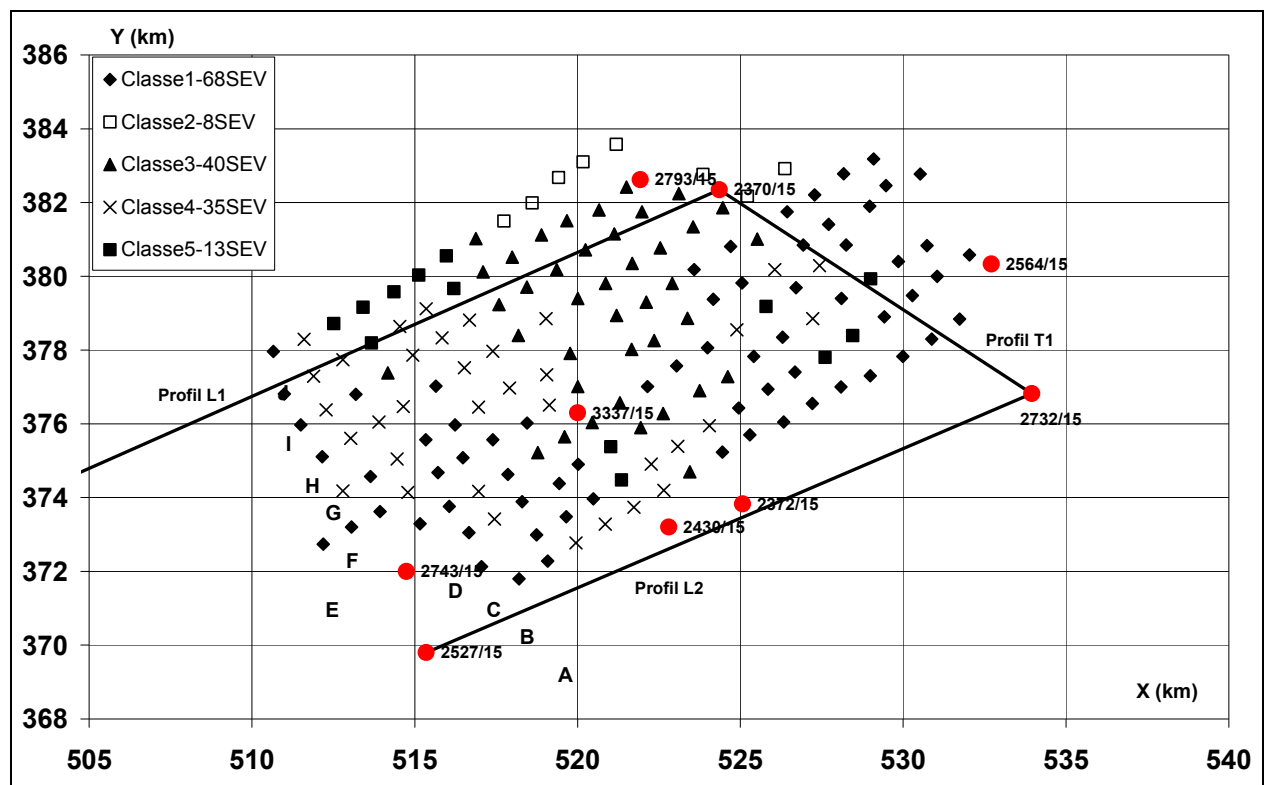


Figure 72a: Situation des profils L1, L2 et T1 sur la carte de la situation géographique des classes des sondages (164 SEV)

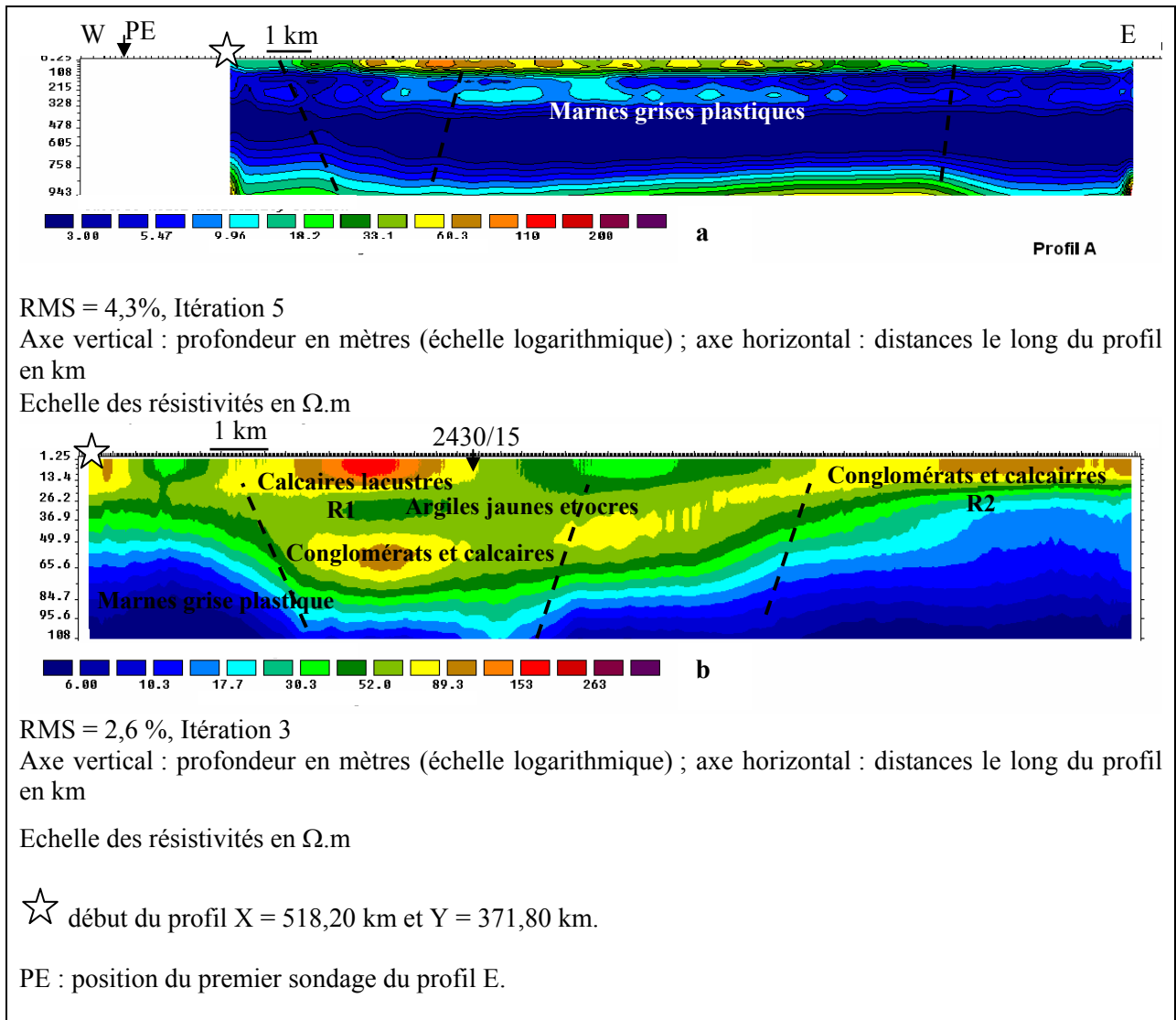
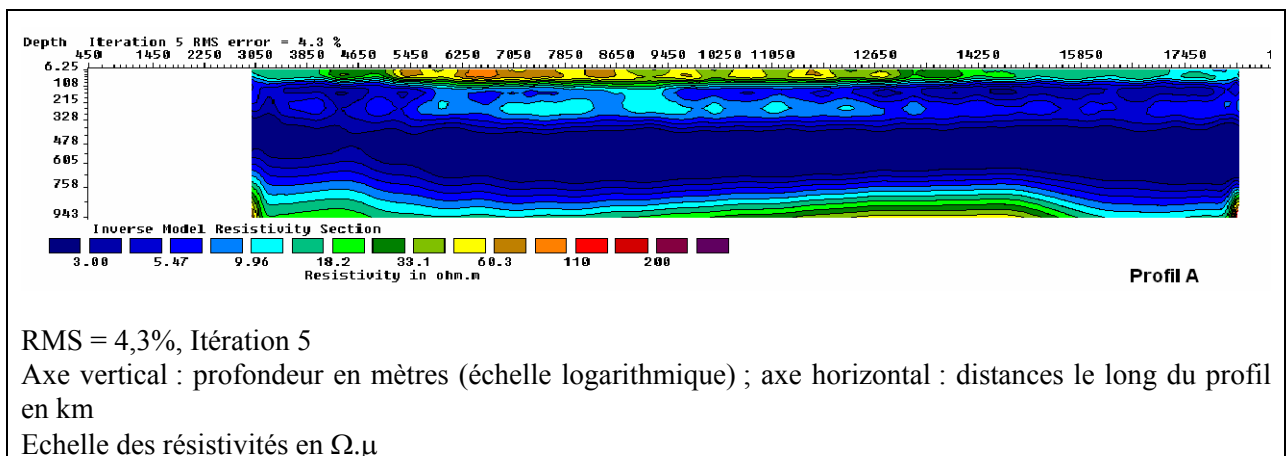


Figure 72b: modèles de résistivité du profil A (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface)

La



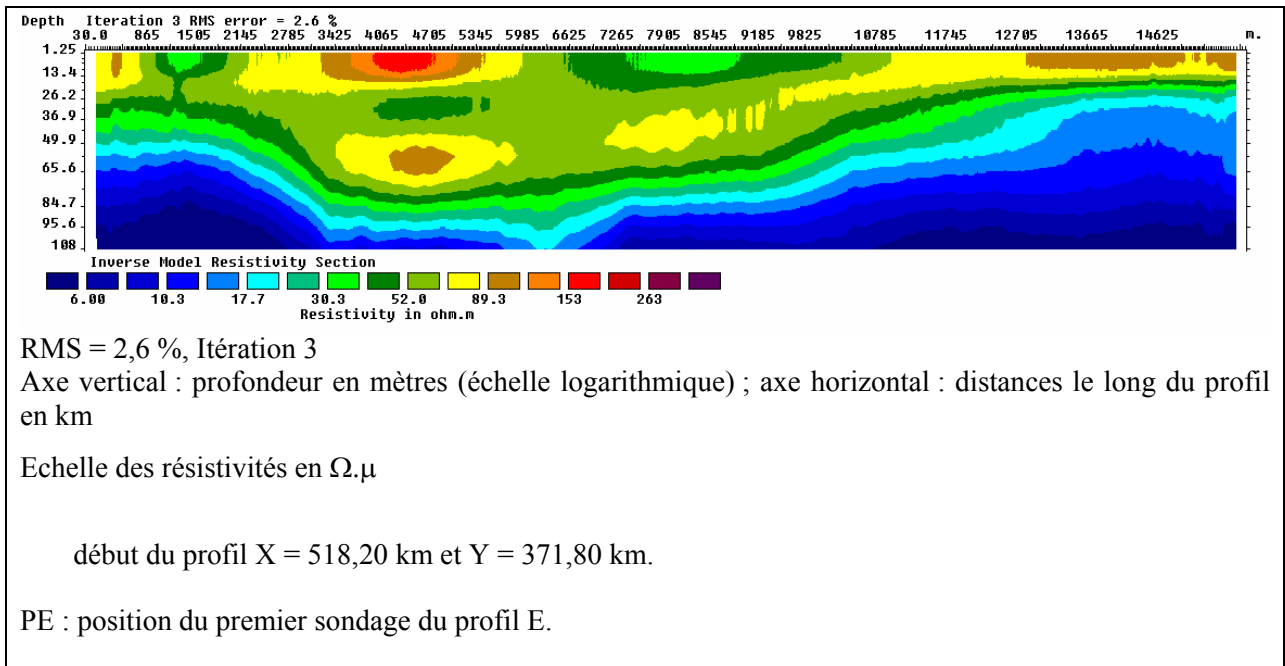
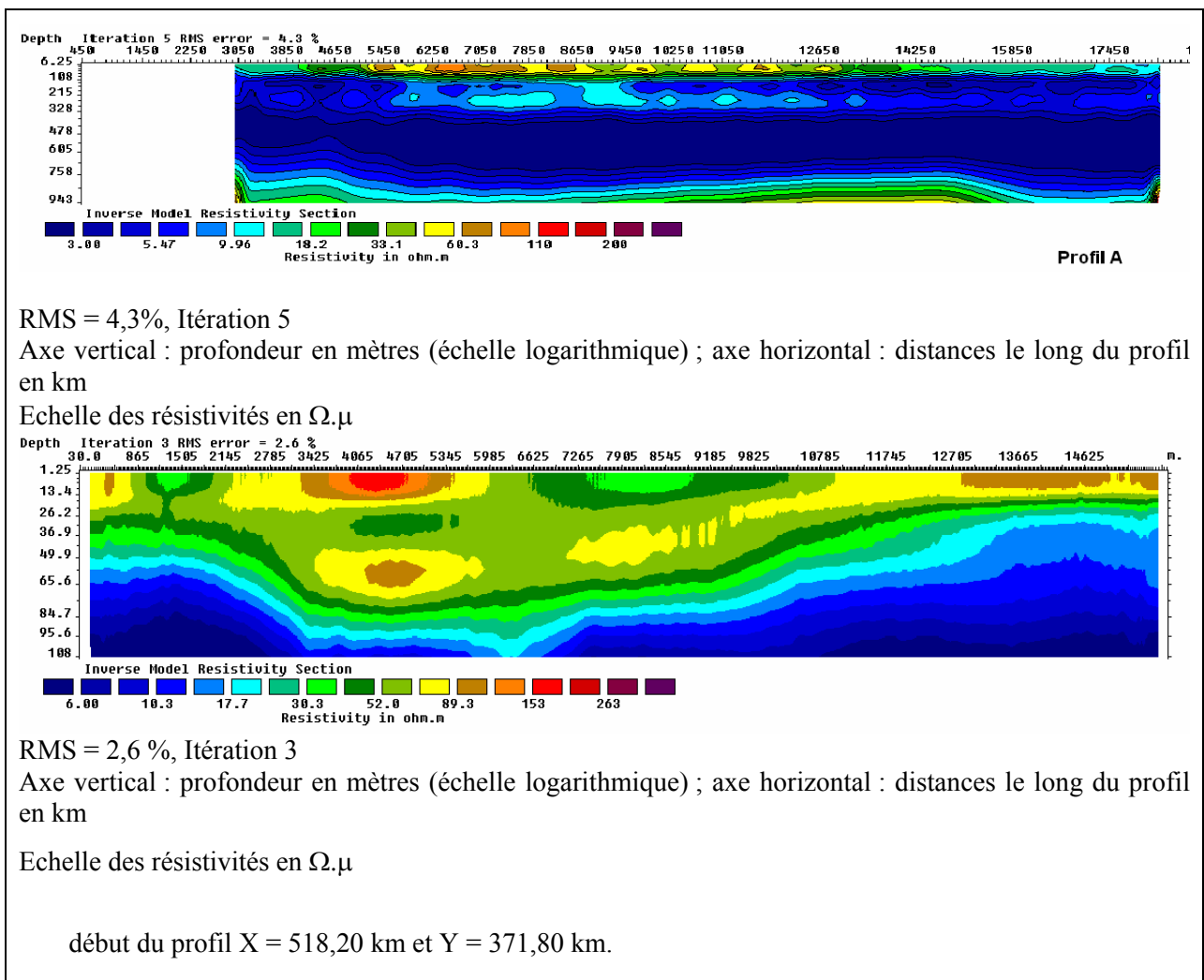


Figure 72a montre le modèle des résistivités de l'ensemble du bassin. Elle permet d'étudier la structure de bassin de la profondeur 6,25 m à 943 m, ensuite avec la



PE : position du premier sondage du profil E.

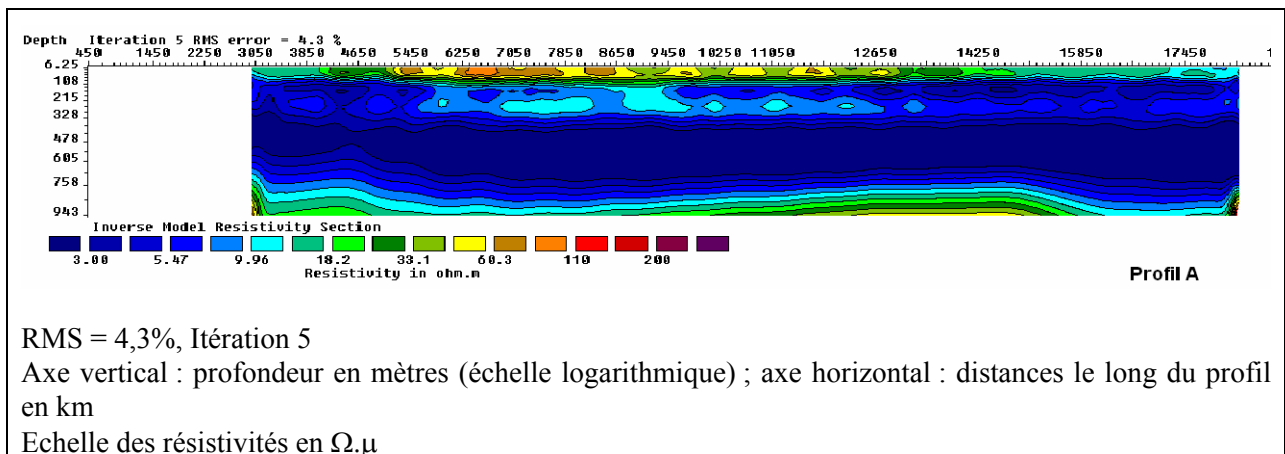
Figure 72b on a le détail de la subsurface en allant de 1,25 m à 108 m. Les deux modèles sont, on le précise ci-dessous, très cohérents avec la géologie de la zone (CF chapitre 1).

Le modèle, pour la totalité du bassin, montre les trois grands ensembles régionalement connus (Cf chapitre 1) qui sont de haut en bas:

- les formations du Plio-Quaternaire dont l'épaisseur inégale atteint au maximum une centaine de mètres,
- l'épaisse couche marneuse du Miocène et, finalement,
- le début des formations présentant une résistivité plus élevée attribuée à la base de Miocène et au sommet du Lias.

La couche profonde est formée de roches ayant des résistivités vraies qui varient dans l'intervalle 18 ohm.m et 60 ohm.m. Elle correspond géologiquement aux conglomérats et aux grès du Miocène inférieur ainsi qu'aux calcaires dolomitiques liasiques sous-jacents comme le montre le Forage, 2430/15 (voir annexe pour la description lithologique et Figure 49 pour sa position). Sur le forage 2430/15 situé légèrement au sud du profil A, cette formation est trouvée à 500 m de profondeur alors que sur le profil c'est à partir de 700 m ; cette différence est expliquée par l'approfondissement connue du bassin vers le nord.

Cette formation relativement résistante est surmontée par la couche la plus homogène et conductrice dont l'épaisseur varie entre 500 m et 600 m. La résistivité de ce niveau est très faible : elle est de l'ordre de 3 ohm.m à 9 ohm.m. Le bassin se termine par les formations plio-quaternaires dont l'épaisseur varie de 65 m à 100 m (



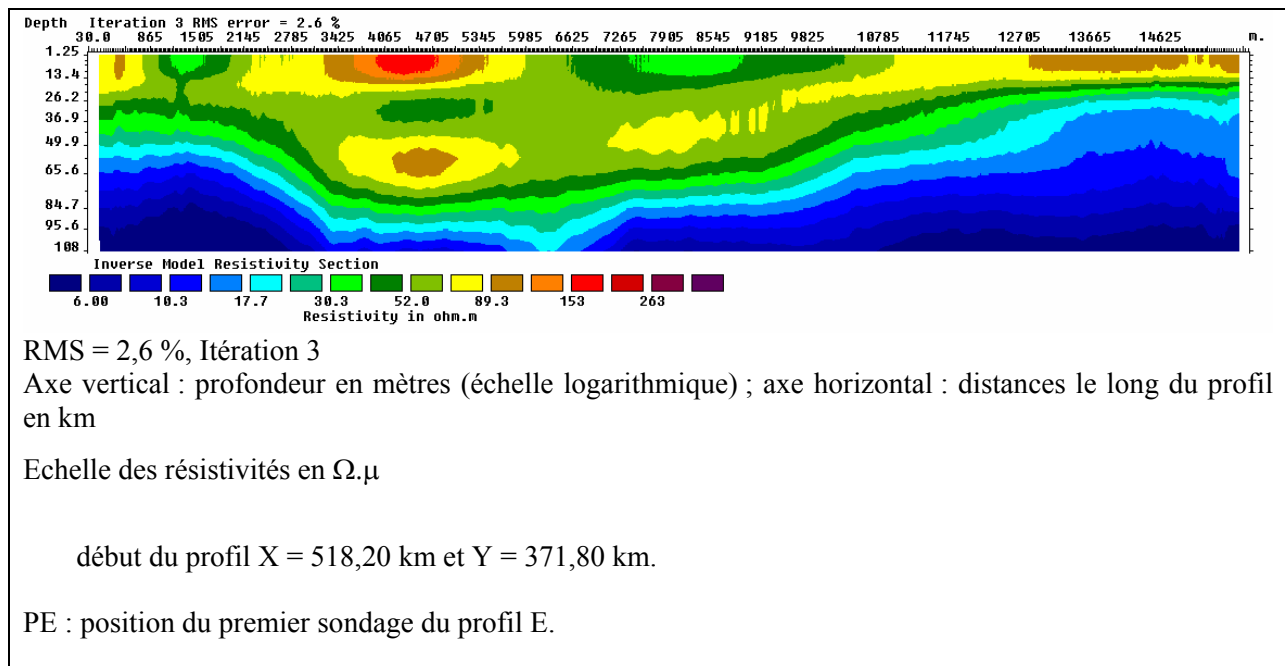


Figure b) au centre du profil.

Les formations plio-quaternaires font l'objet de notre deuxième modèle. Il montre deux structures plus résistantes ( $Rho > 150 \text{ ohm.m}$ ) parallèles et séparées par une couche moins résistante (entre  $30 \text{ ohm.m}$  et  $50 \text{ ohm.m}$ ). Ces deux formations correspondent géologiquement aux calcaires lacustres et aux conglomérats et calcaires tels que décrits pour le forage 2430/15 (annexe). Ces deux zones avaient déjà été bien identifiées sur les cartes de krigeage horizontales (domaines notés R1 et R2 de la Figure 59). Ces deux formations sont délimitées horizontalement et en profondeur par des argiles jaunes et ocres également telles que décrites sur le log du forage 2430/15. La formation constituée des conglomérats et calcaires (R2) s'enfonce du nord-est vers le sud-ouest ; cet approfondissement est à mettre en relation avec les failles proposées par C.A.G (C.A.G 1984). L'organisation spatiale de cette formation permet de confirmer l'existence de failles cohérentes avec la structure en horst et graben du bassin.

## II-2) Les images 2D du profil B

Le profil B est parallèle au premier et lui est distant d'environ 1 km. Sa longueur est de 17 204 m. Le nombre d'électrodes virtuelles estimé pour la réalisation du modèle du bassin dans sa totalité est 878 pour le pas de  $a = 50$  m et 3 472 pour la subsurface avec un pas de  $a = 20$  m. Pour la totalité du bassin on a défini 23 niveaux ce qui donne 7 935 points de données dans le fichier destiné à l'inversion ainsi que 15 892 blocs ; pour la subsurface il y a 6 888 points de données avec 8 niveaux et 46 125 blocs.

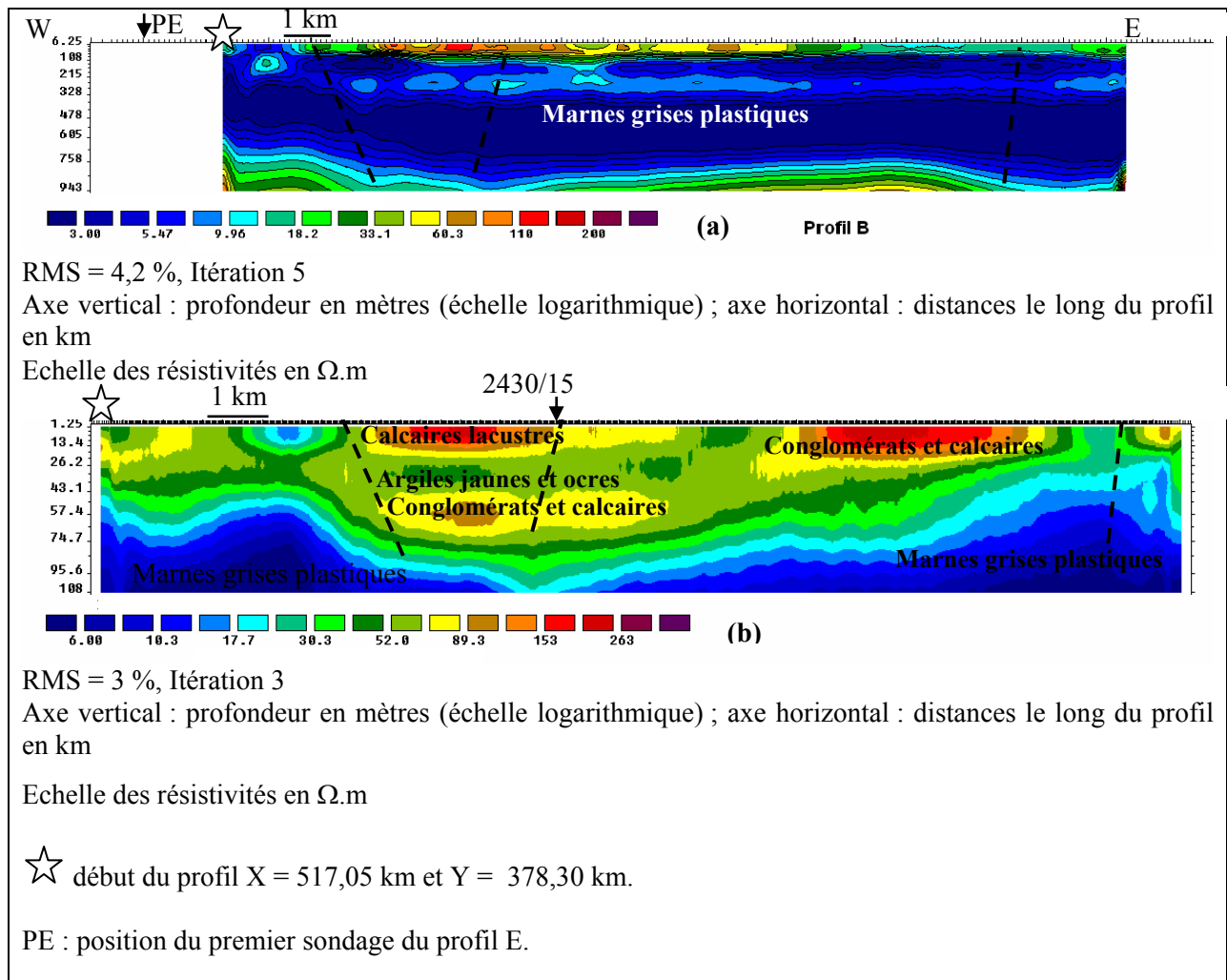


Figure 73: Modèles de résistivité de profil B (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface)

On présente **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** les deux modèles (a totalité du bassin et b le détail de la subsurface). Tout comme pour le profil A, on obtient d'une part une image de la structure de bassin de la profondeur 6,25 m à 943 m et, d'autre part (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**b) une image de la subsurface en allant de 1,25 m à 108 m. Les deux modèles sont très semblables à ceux du profil A et également cohérents avec la géologie de la zone comme détaillé ci-dessous.

Le modèle pour la totalité du bassin montre les trois grands ensembles. Le Plio-Quaternaire avec une centaine de mètres d'épaisseur repose sur la couche marneuse du Miocène sous lequel finalement on

trouve le début des formations plus résistantes de la base de Miocène et du sommet de Lias (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**a) légèrement plus profond que sur le profil A.

La couche inférieure est formée de roches ayant des résistivités vraies qui varient comme précédemment dans l'intervalle 18 ohm.m et 60 ohm.m ; elle correspond, tout comme pour le profil A, aux conglomérats et aux grès du Miocène inférieur ainsi qu'aux calcaires dolomitiques liasiques sous-jacents.

Cette formation relativement résistante est surmontée par les marnes du Miocène homogènes et conductrices, l'épaisseur de cette couche varie entre 600 m et 700 m ; cette épaisseur est donc légèrement plus importante que pour le profil A. La résistivité est très faible, elle est de l'ordre de 3 ohm.m à 9 ohm.m. Le remplissage du bassin se termine par les formations plio-quadernaires dont l'épaisseur varie de 65 m à 100 m (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**b). Cette formation fait l'objet de notre deuxième modèle qui montre, comme dans le cas du profil A, deux structures plus résistantes ( $Rho > 150$  ohm.m), parallèles et séparées par une couche moins résistante qui correspond aux argiles jaunes et ocre.

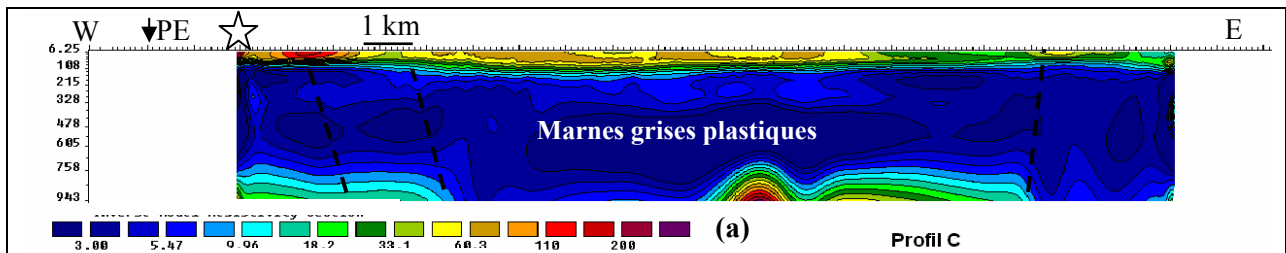
Les deux formations résistantes correspondent géologiquement aux calcaires lacustres et aux conglomérats et calcaires. (Forage, 2430/15). Ces formations sont dans la continuité latérale des formations de même nature du profil A comme nous le prouvent les cartes de krigeage des résistivités apparentes qui montrent pour les faibles pseudo-profondeurs l'extension latérale de l'influence de ces zones résistantes ; ces deux zones sont bien visibles sur les cartes de krigeage où elles sont notées R1 et R2 (Figure 59 a à i). On notera l'augmentation des valeurs de résistivités de la zone résistante située au nord est du profil A au profil B.

Outre les ressemblances présentées ci-dessus, il faut noter l'extension avec élévation des résistivités de la zone de conglomérats et calcaires à l'est du profil ainsi que de la zone plus conductrice à l'ouest déjà perceptible dès les pseudo-profondeurs 7,64 m et 11,46 m sur les cartes de résistivités apparentes (Figure 59 j et h).

### **II-3) Les images 2D du profil C**

Le profil C est parallèle au deuxième profil et lui est distant d'environ 1 km. Sa longueur est de 16 078 m. Le nombre d'électrodes virtuelles estimé pour la réalisation de ce modèle est égale 832 pour le pas de  $a = 50$  m et 3 244 pour la subsurface avec un pas de  $a = 20$  m. C'est ainsi que pour la totalité de bassin on a défini 23 niveaux ce qui donne 7 406 points de données dans le fichier destiné à l'inversion ainsi que 14 834 blocs et pour la subsurface c'est 6 432 points de données avec 8 niveaux et 55 791 blocs.

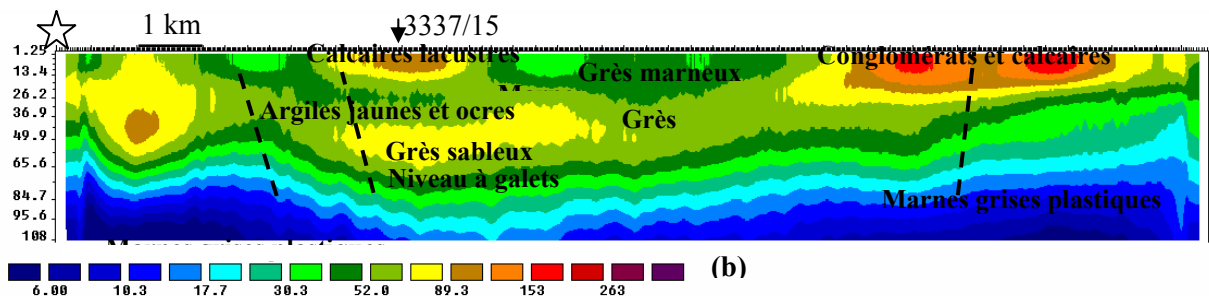




RMS = 3,6 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



RMS = 3,1 %, itération 3

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

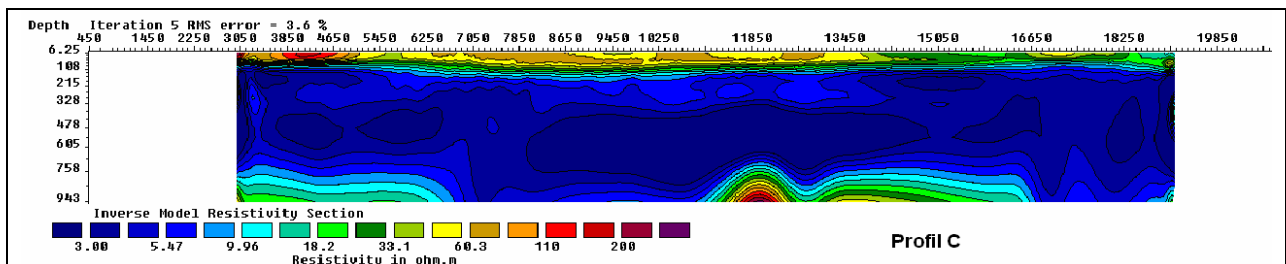
Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

☆ début du profil X = 516,66 km et Y = 373,05 km.

PE : position du premier sondage du profil E.

Figure 74: Modèles de résistivité de profil C (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface)

La



RMS = 3,6 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

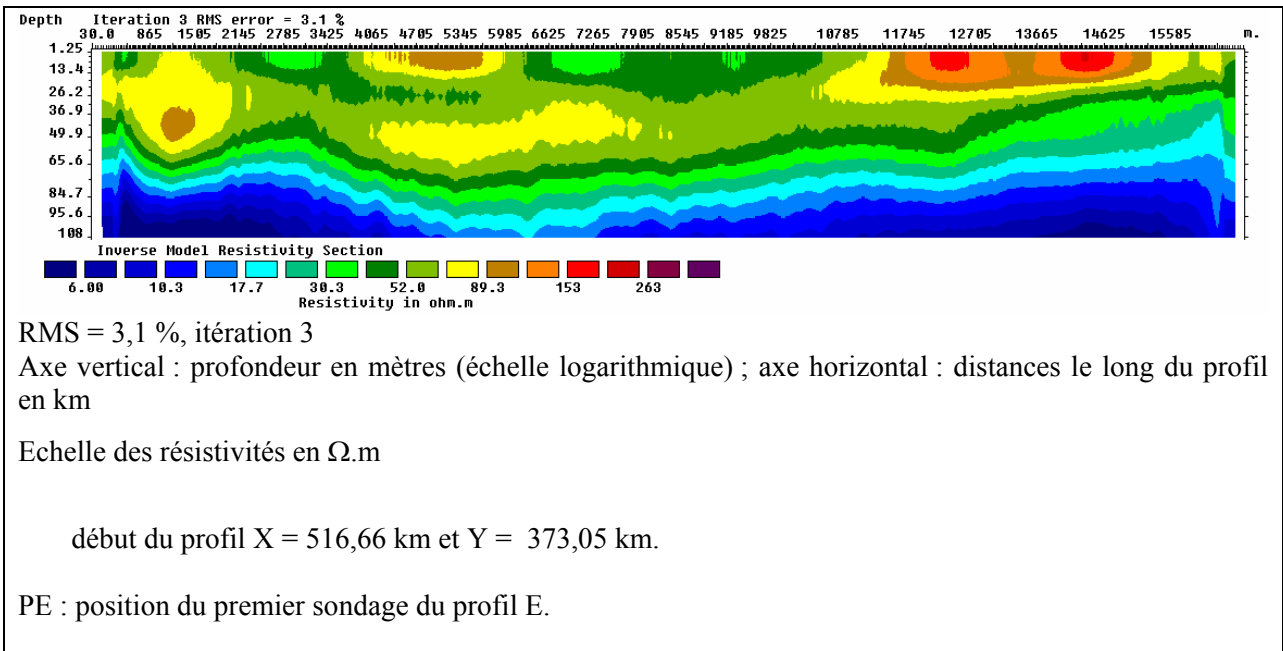
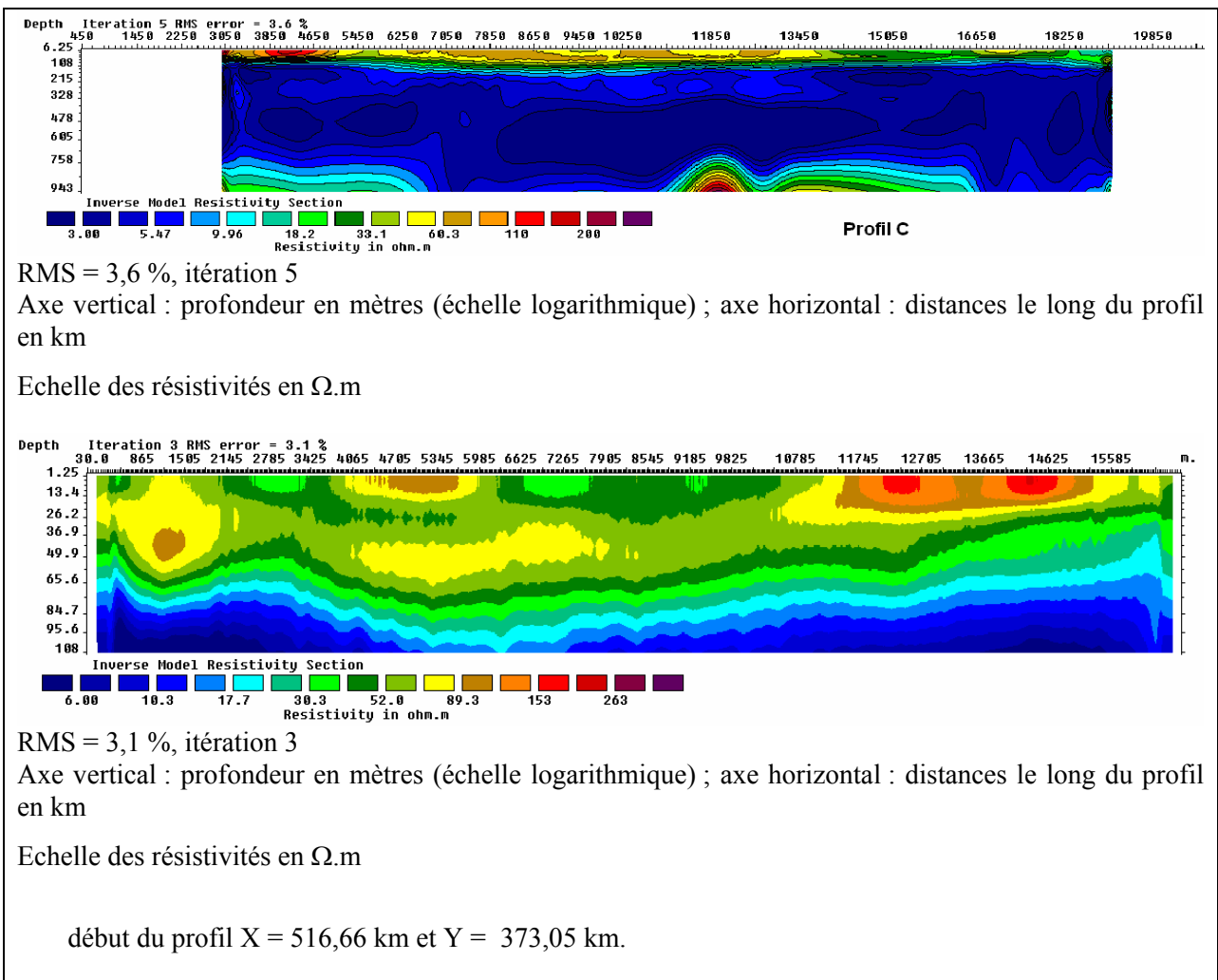


Figure 74a montre le modèle des résistivités de l'ensemble du bassin, les structures étudiées ont une profondeur allant de 6,25 m à 943 m. Avec la



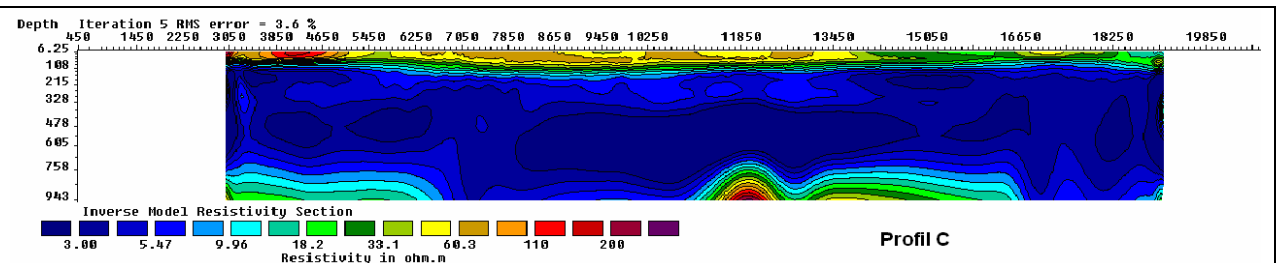
PE : position du premier sondage du profil E.

Figure 74b, on présente le détail des formations de la subsurface allant de 1,25 m à 108 m. Cohérents avec la géologie connue de la zone, ces modèles montrent la continuité des formations déjà identifiées sur les profils A et B.

Le modèle pour la totalité du bassin montre de fait aussi les trois grands ensembles avec en surface et subsurface le Plio-Quaternaire dont l'épaisseur est d'une centaine de mètres au maximum, ils reposent sur la couche marneuse du Miocène. Les formations plus résistantes datées de la base de Miocène et du sommet de Lias apparaissent tout comme elles le faisaient sur les profils A et B.

La couche inférieure est formée de roches ayant des résistivités vraies qui varient dans l'intervalle 18 ohm.m et 110 ohm.m ; soit des valeurs qui s'étalent vers les résistivités élevées principalement vers le centre du profil. L'extension verticale des marnes grises s'accroît dans la partie centrale du profil marquant la suite de l'approfondissement du bassin vers le nord; l'extension verticale apparaît également dans la partie est du profil.

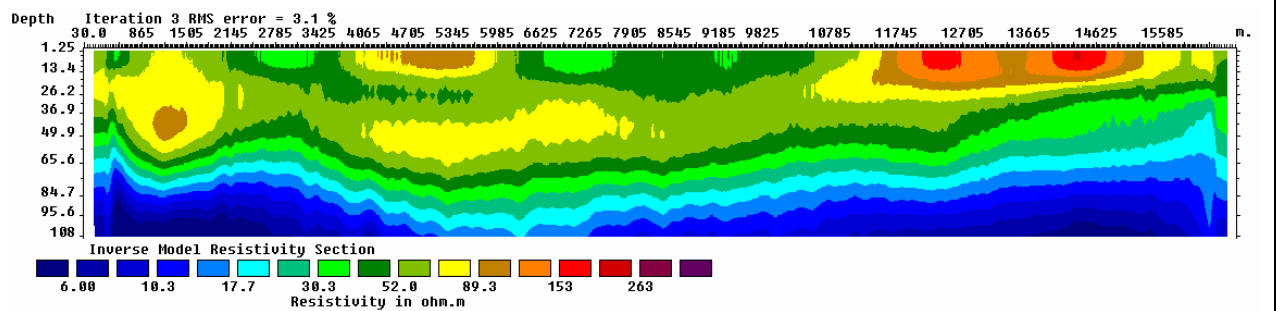
**Cette formation relativement résistante est surmontée par la couche la plus homogène et conductrice déjà identifiée sur les profils A et B. L'épaisseur de cette dernière varie entre 700 m et plus de 900 m au centre et à l'est du profil. La résistivité est très faible, elle varie de 3 ohm.m à 9 ohm.m. Les formations du bassin se terminent par les couches plio-quaternaires dont l'épaisseur varie de 65 m à 100 m (**



RMS = 3,6 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



RMS = 3,1 %, itération 3

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

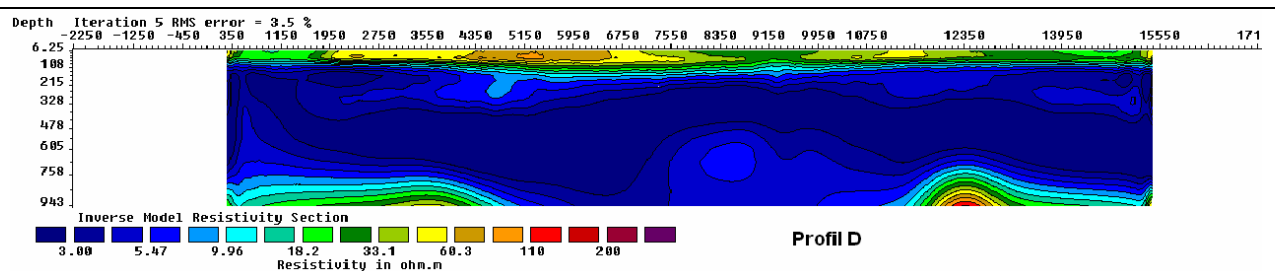
début du profil X = 516,66 km et Y = 373,05 km.

PE : position du premier sondage du profil E.

Figure 74b). Ce modèle montre toujours la continuité des deux structures résistantes ( $Rho > 150 \text{ ohm.m}$ ) identifiées auparavant (profils A et B) avec une extension latérale réduite particulièrement pour les calcaires lacustres et toujours séparées par un niveau moins résistant dont l'extension latérales est plus importante que pour les profils A et B. Cette évolution annonce une modification dans l'agencement des formations du bassin que l'on verra sur le profil D.

#### II-4) Les images 2D du profil D

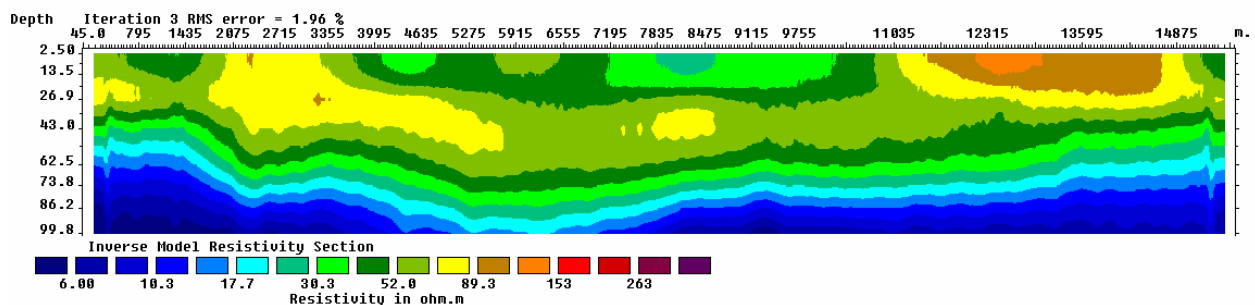
La longueur du profil D est 15 117 m. Le nombre d'électrodes virtuelles estimé pour la réalisation des modèles est 794 pour le pas de  $a = 50 \text{ m}$  et 1 540 pour le la subsurface avec le pas de  $a = 20 \text{ m}$ . Pour la totalité du bassin on a définie 23 niveaux ce qui donne 6 969 points de données dans le fichier destiné à l'inversion ainsi que 13 960 blocs, pour le subsurface il y a 5 292 points de données avec 7 niveaux et 18 132 blocs. Sur la



RMS = 3,5 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



RMS = 1,96 %, Itération 3

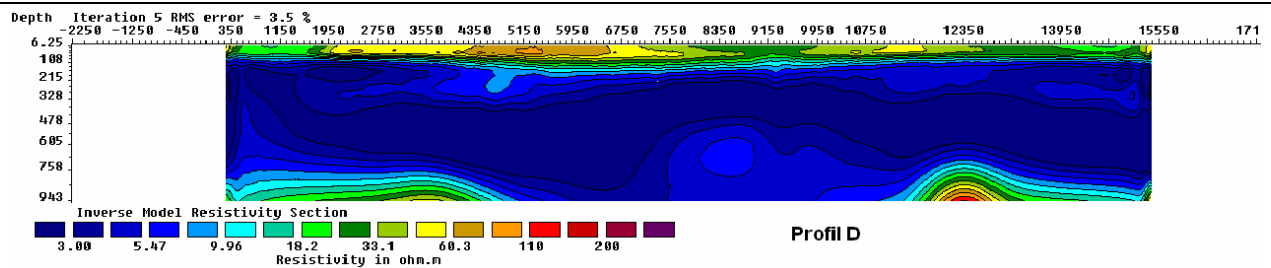
Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

début du profil X = 515,16 km et Y = 373,29km.

PE : position du premier sondage du profil E.

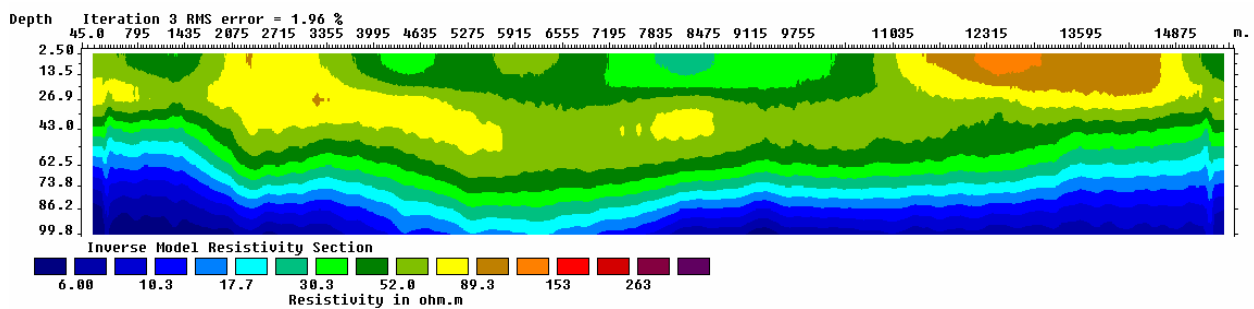
Figure 75a on montre le modèle de résistivité de l'ensemble du bassin. Elle permet d'étudier la structure de bassin de la profondeur 6,25 m à 943 m. ensuite avec la



RMS = 3,5 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



RMS = 1,96 %, Itération 3

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

début du profil X = 515,16 km et Y = 373,29km.

PE : position du premier sondage du profil E.

Figure 75b on a le détail de la subsurface en allant de 1,25 m à 108 m

Le modèle pour la totalité du bassin montre toujours les trois grands ensembles connus, de bas en haut on rencontre :

- le Plio-Quaternaire dont l'épaisseur est toujours au maximum d'une centaine de mètres,
- le Plio-Quaternaire qui repose bien sur toujours sur la couche marneuse la plus épaisse du Miocène et finalement
- le début des formations plus résistantes de la base du Miocène et du sommet du Lias. L'ensemble de ces formations est plus épais au centre du profil.

Les caractéristiques de la couche inférieure sont de même nature que celles observées pour les profils A, B, et C. On remarque que cette couche dont on sait par ailleurs qu'elle est continue dans la zone étudiée n'apparaît plus au centre de profil : elle est donc plus profonde.

Au dessus de cette formation relativement résistante on retrouve la couche la plus homogène et conductrice dont l'épaisseur varie entre 700 m et plus que 900 m au centre de bassin. Les formations plio-quaternaires dont l'épaisseur varie de 65 m à 100 m (

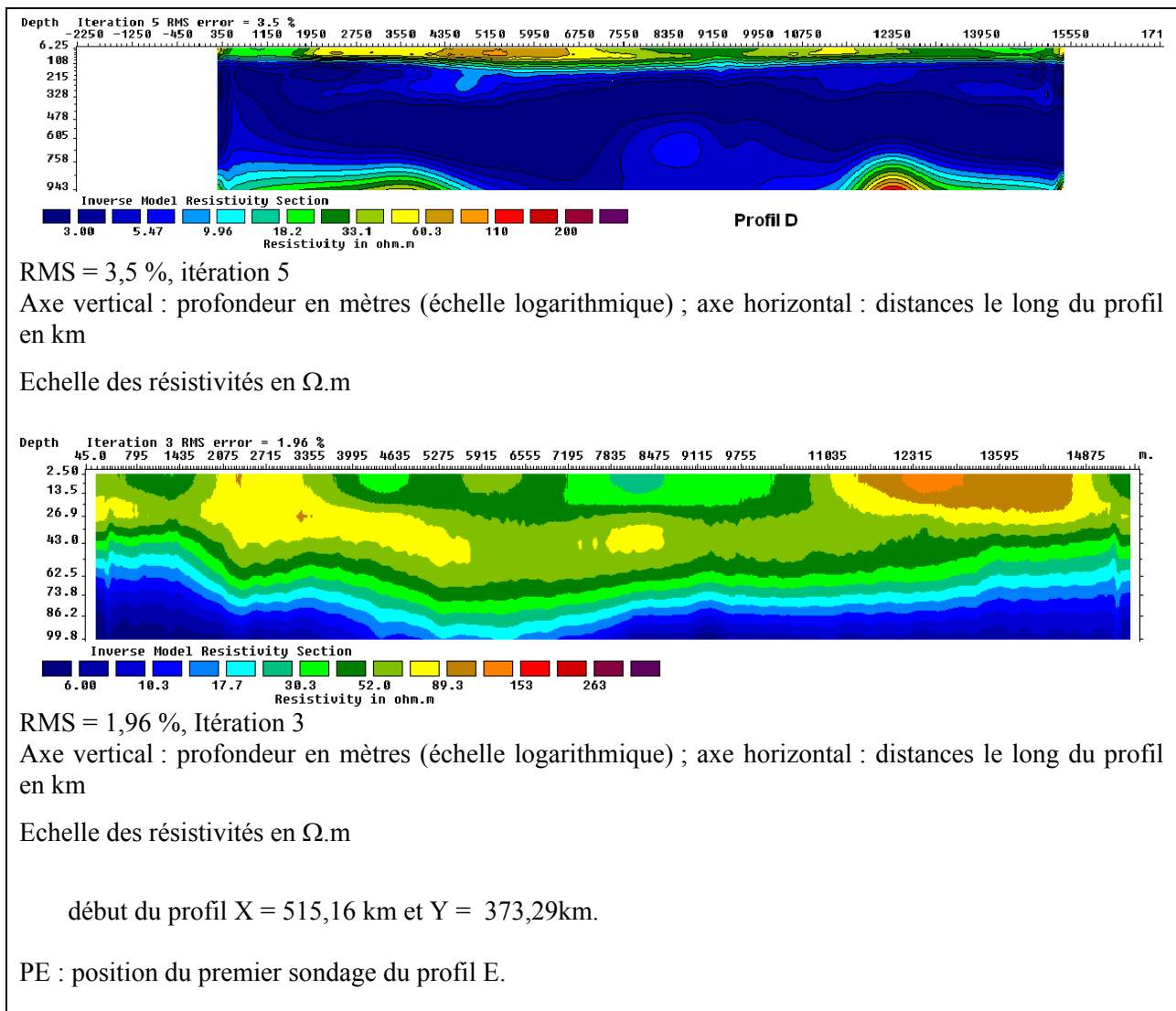
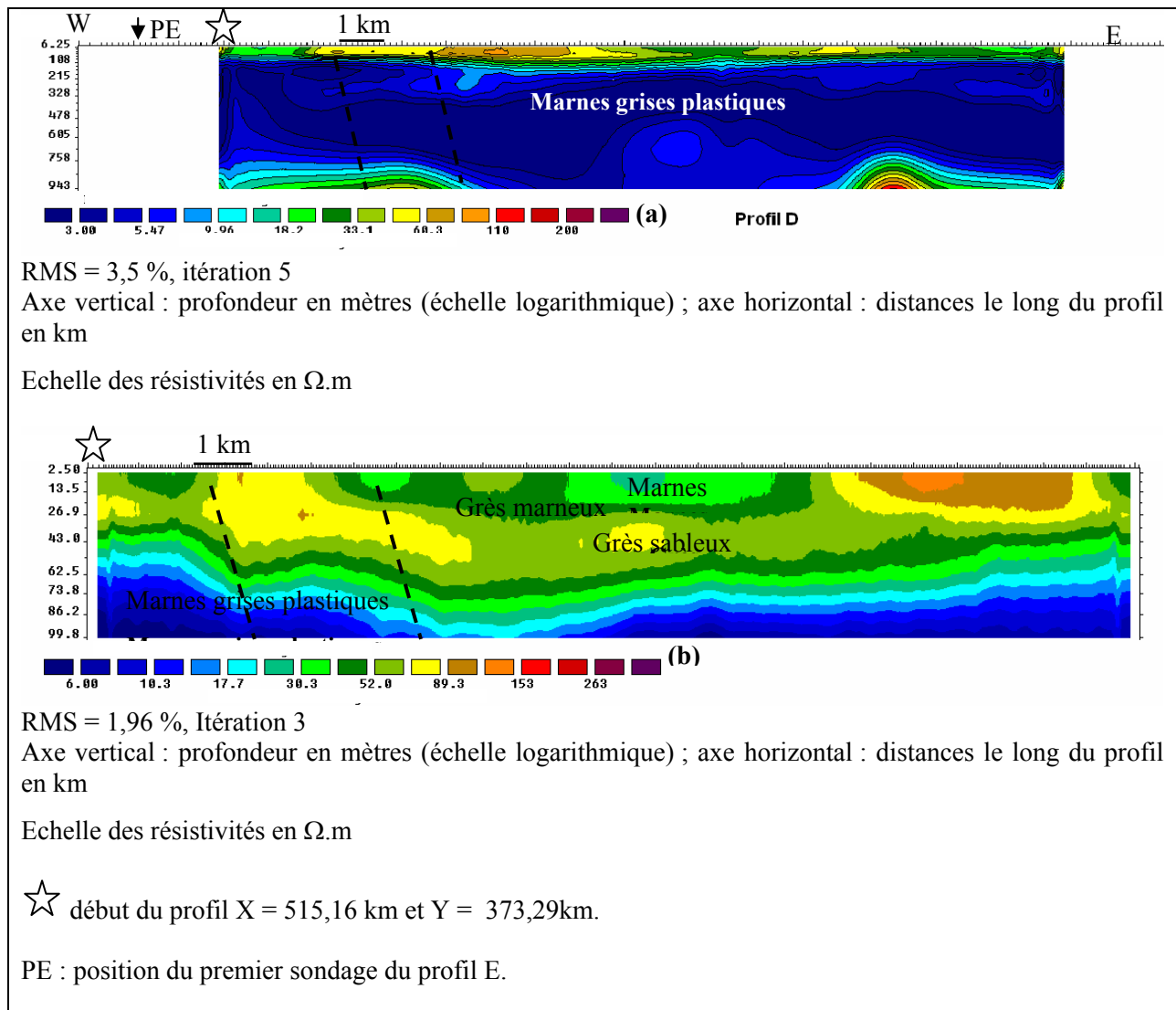


Figure 75b) font l'objet de notre deuxième modèle.

Ce profil (profil D) accuse une légère différence avec le profil C qui s'exprime par la disparition des calcaires lacustres au profit d'une zone dont la résistivité vraie est légèrement inférieure à celle des calcaires lacustres. Le forage 3337/15 situé environ entre 5 et 6 km à l'ouest du profil montre la présence sur 50 m de grès (grès marneux ou sableux) suivie en profondeur d'un niveau à galets d'une dizaine de mètres. Les marnes plastiques sont reconnues à une soixantaine de mètres sur le forage 3337/15, alors qu'elles sont identifiées seulement une trentaine de mètres plus bas au centre du profil.



**Figure 75: Modèles de résistivités de profil D (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface)**

L'augmentation de l'épaisseur de la couche marneuse du bassin de 500 m à plus de 900 m est naturellement à mettre en relation avec l'approfondissement. Il faut noter aussi que le toit de cette couche est plus élevé dans la partie sud-ouest du profil ; cette élévation du toit était déjà présente sur les profils précédents (A, B, et C), et elle est imputable aux failles déjà mentionnées par lors de l'étude du profil A

## II-5) Les images 2D du profil E

Le profil E est le plus long de tout les profil, sa longueur est de 20 895 m. Le nombre d'électrodes virtuelles estimé pour la réalisation de ce modèles sont 1 008 pour le pas de  $a = 50$  m et 4 208 pour la subsurface avec un pas de  $a = 20$  m. Pour la totalité du bassin on a défini 23 niveaux ce qui donne 9 418 points de données dans le fichier destiné à l'inversion ainsi que 18 8982 blocs et pour la subsurface c'est 8 360 points de données avec 8 niveaux et 64 361 blocs.

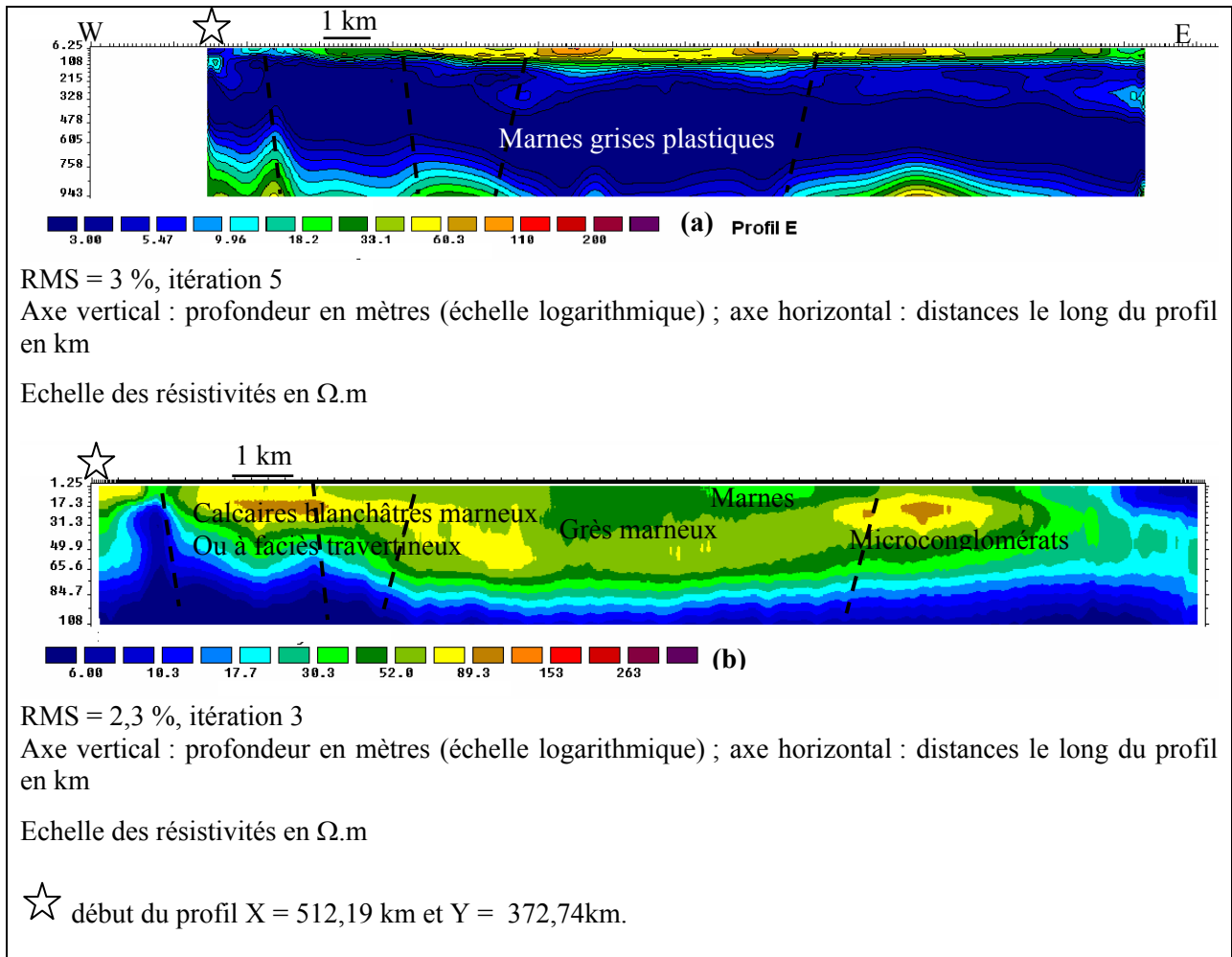
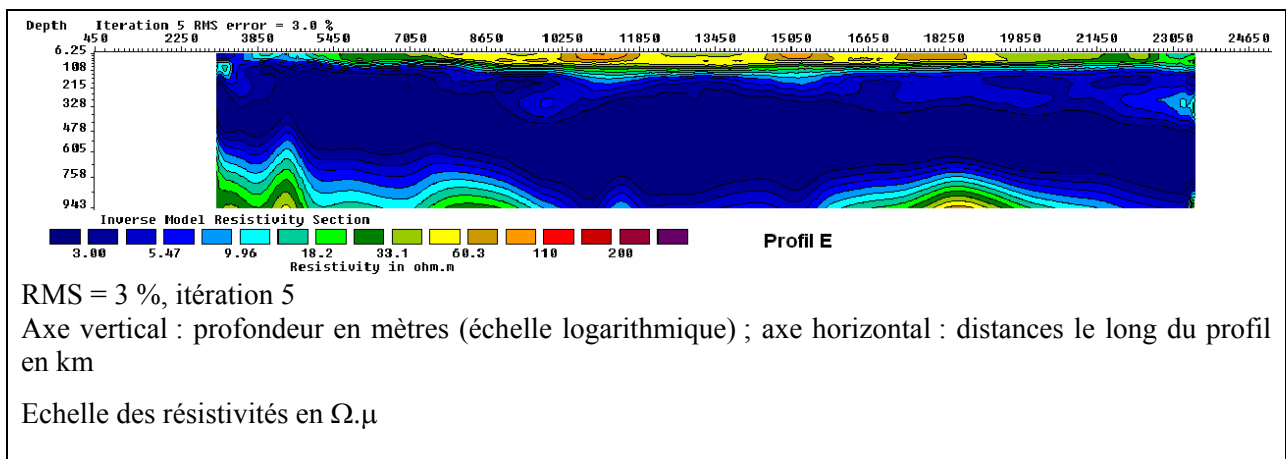


Figure 76 : Les modèles de résistivité de profil E (a : totalité du bassin, b le détail de la subsurface)

La





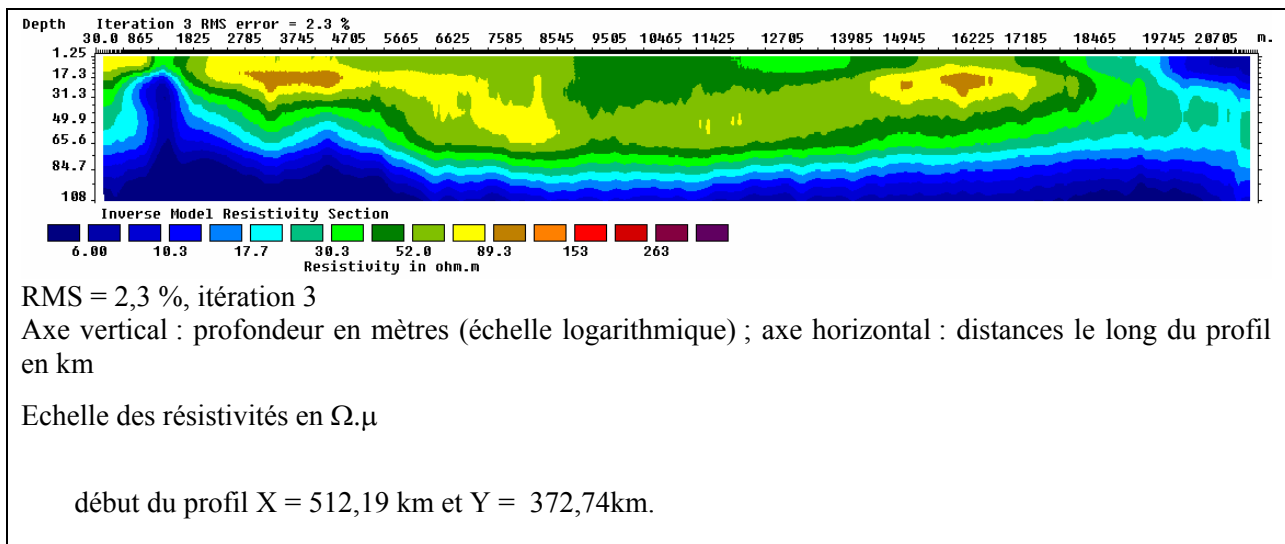


Figure 76 76a présente le modèle des résistivités de l'ensemble du bassin. Elle permet d'étudier la structure du bassin de la profondeur 6,25 m à 943 m. Ensuite avec la

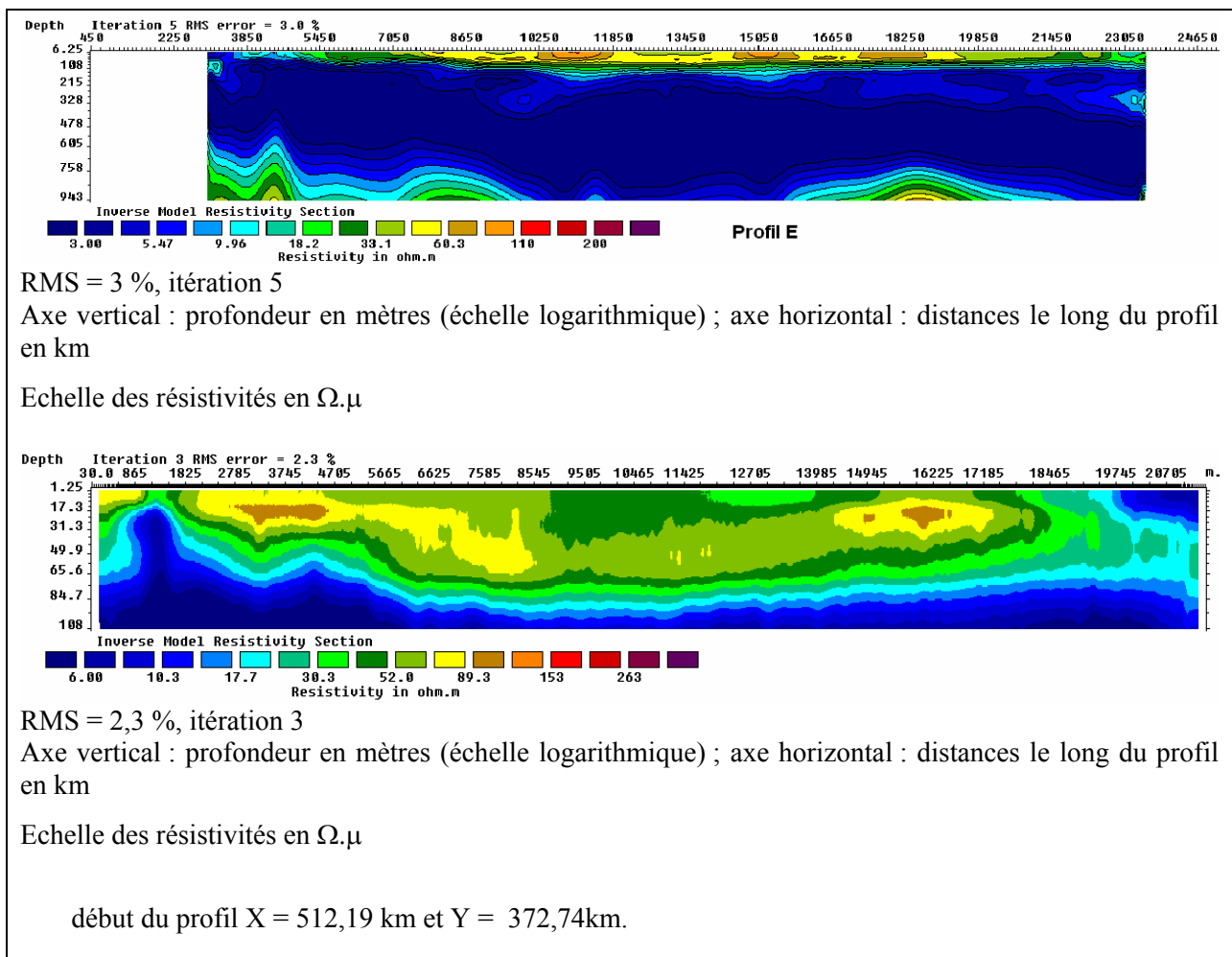


Figure 76 76b on a le détail de la subsurface en allant de 1,25 m à 108 m. En comparant avec les profils situés plus au sud (A, B, C, D), on note des changements essentiellement marqués par la réduction des résistivités des formations de subsurface.

Si l'on tient compte des résultats de la classification hiérarchique (Figure 54, Figure 55) on constate que ce profil est essentiellement constitué à partir des sondages des classes 1 et 3 et, dans une moindre mesure, de la classe 4. La prépondérance des sondages des classes 3 et 4 est constante des profils E à G ce qui se traduit par une relative similitude dans leurs structures (

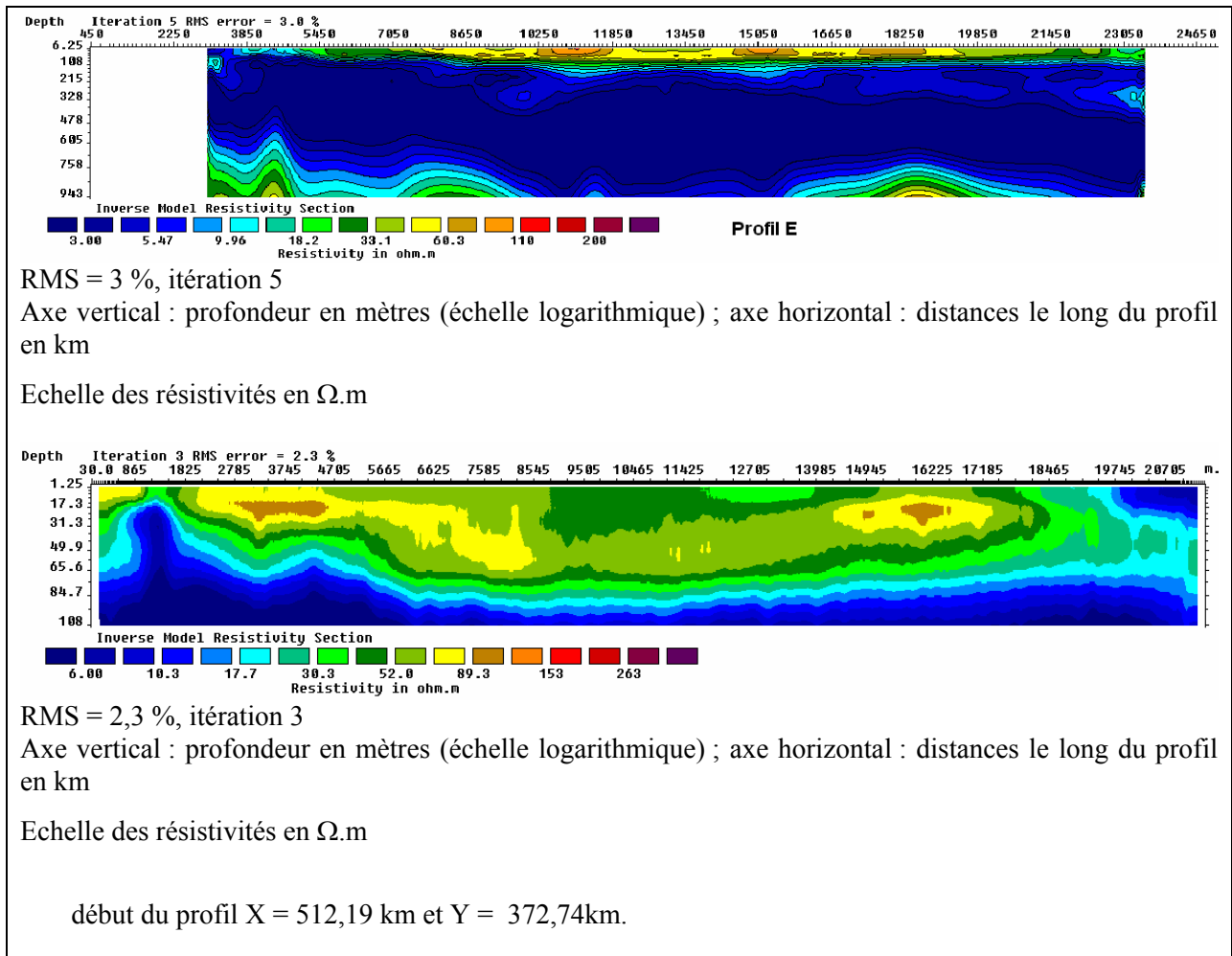
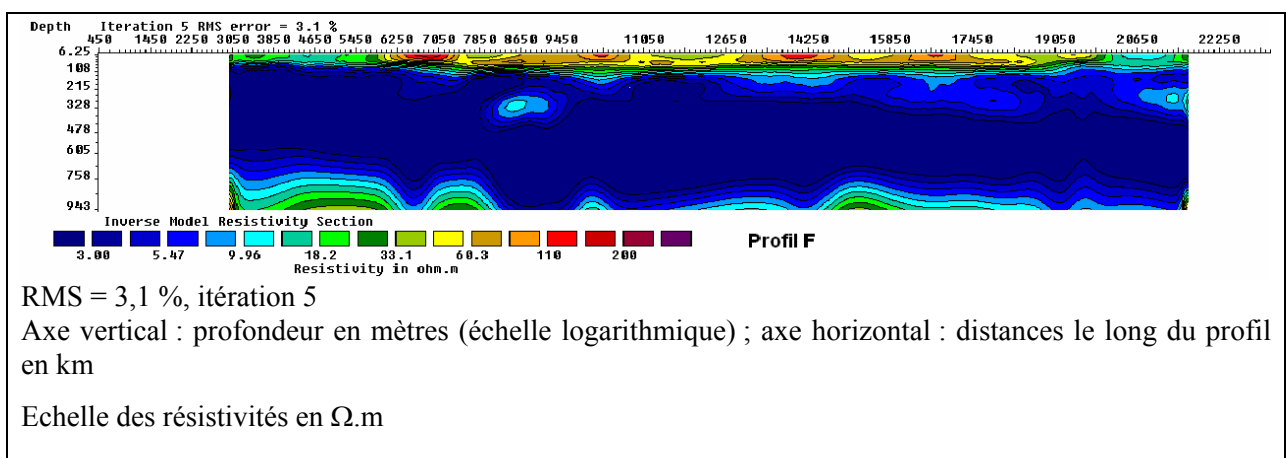


Figure 76b,



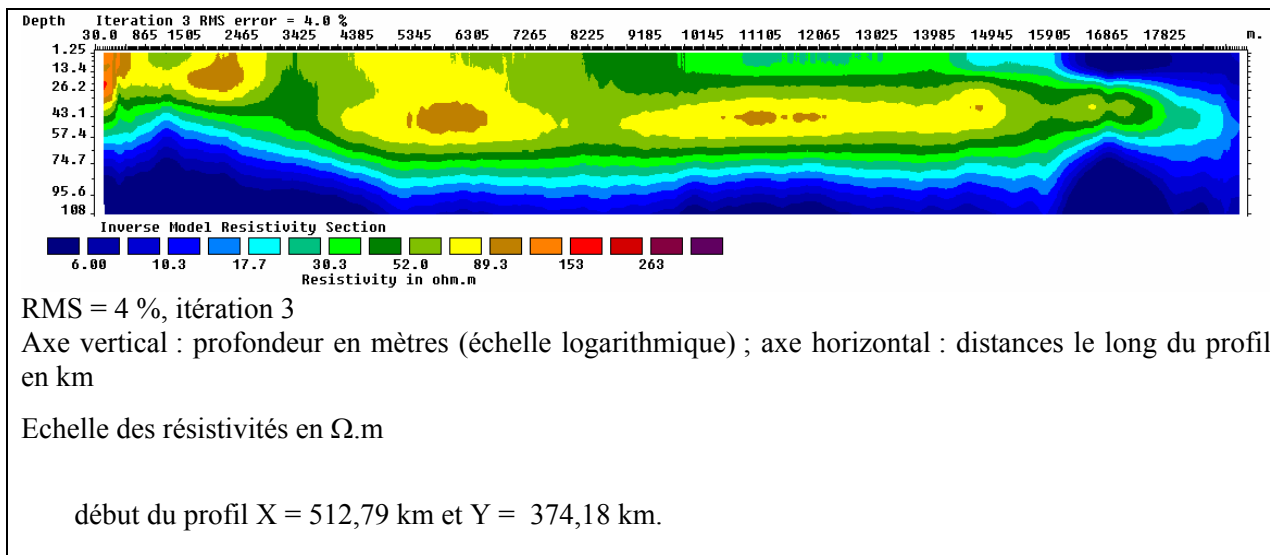
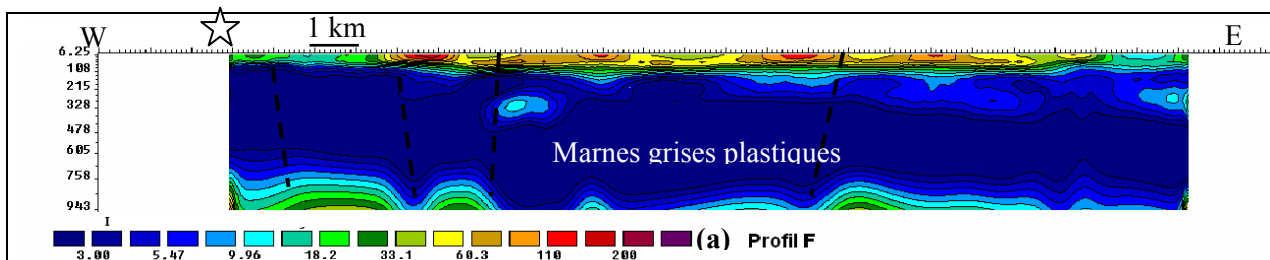
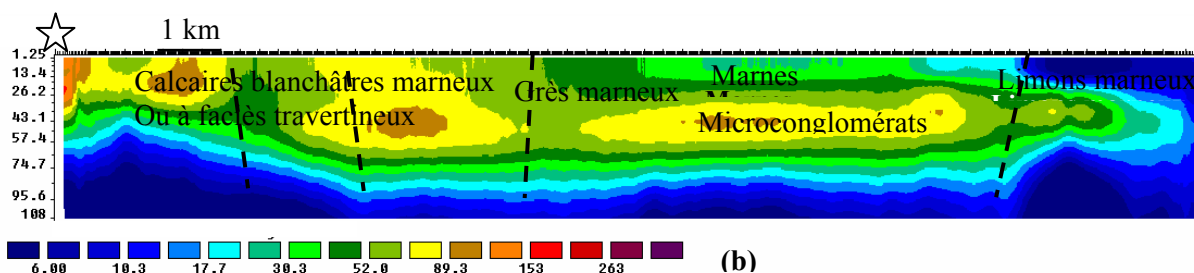


Figure 77b, Figure 78b). La position des sondages de la classe 4 quand à elle marque la différence avec le profil D (disposition des zones de résistivités élevées en subsurface). La description de ce profil sera faite simultanément à celle du profil F et du profil G.

## II-6) Les images 2D du profil F



RMS = 3,1 %, itération 5  
 Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km  
 Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

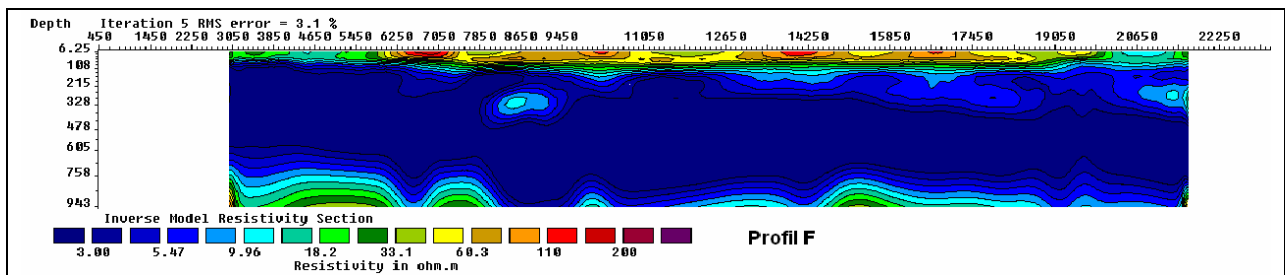


RMS = 4 %, itération 3  
 Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km  
 Echelle des résistivités en  $\Omega.m$   
 ☆ début du profil X = 512,79 km et Y = 374,18 km.

Figure 77: Modèles de résistivité de profil F (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface)

Le profil Fa une longueur de 18 629 m. Le nombre d'électrodes virtuelles estimé pour la réalisation de ce modèle est de 934 pour le pas de  $a = 50$  m et 3 752 pour la subsurface avec un pas de  $a = 20$  m. Pour la totalité du bassin on a défini 23 niveaux ce qui donne 7 448 points de données dans le fichier destiné à l'inversion ainsi que 17 180 blocs ; pour la subsurface il y a 7 448 points de données avec 8 niveaux et 48 058 blocs.

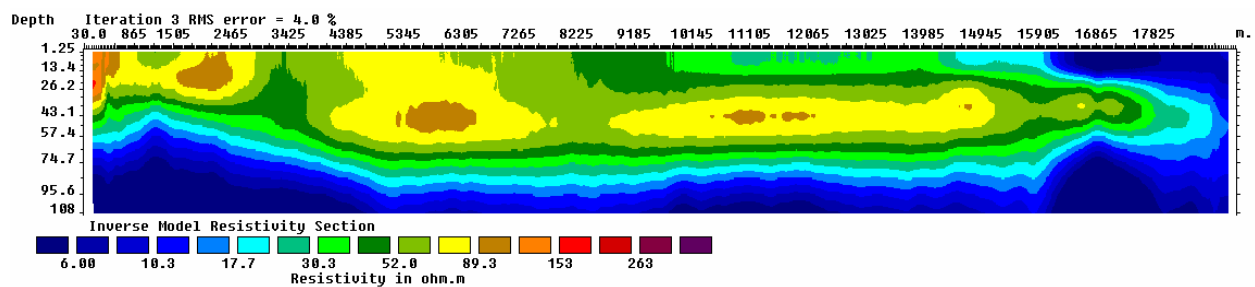
La



RMS = 3,1 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



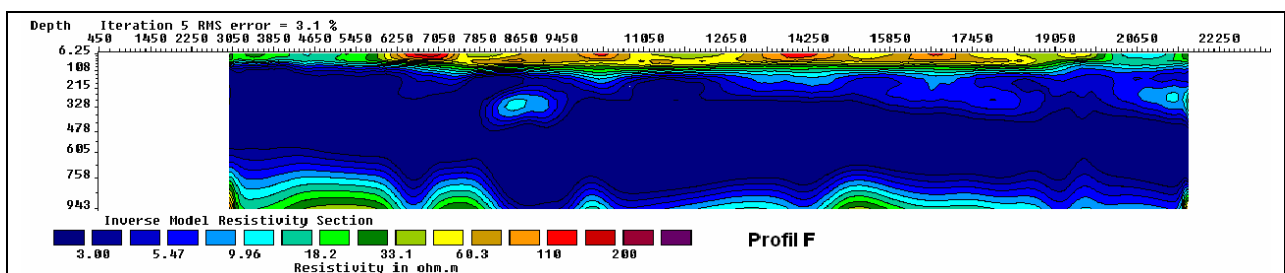
RMS = 4 %, itération 3

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

début du profil X = 512,79 km et Y = 374,18 km.

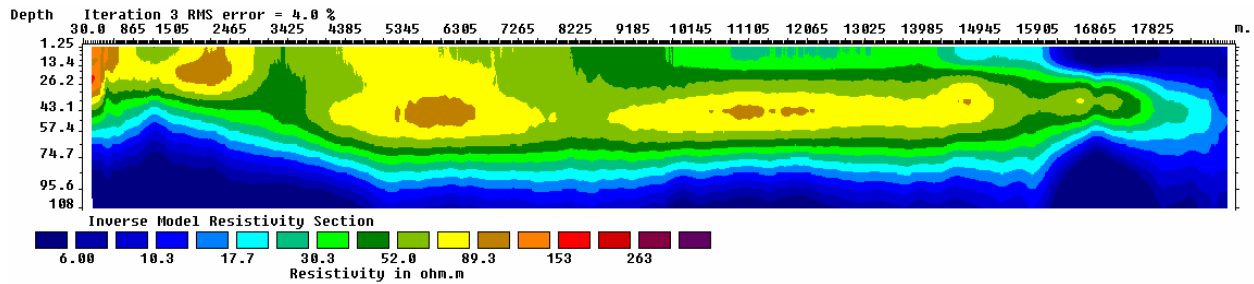
Figure 77a montre le modèle des résistivités de l'ensemble du bassin. Ce modèle nous permet d'étudier la structure du bassin de la profondeur de 6,25 m à 943 m. Ensuite avec la



RMS = 3,1 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



RMS = 4 %, itération 3

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

début du profil X = 512,79 km et Y = 374,18 km.

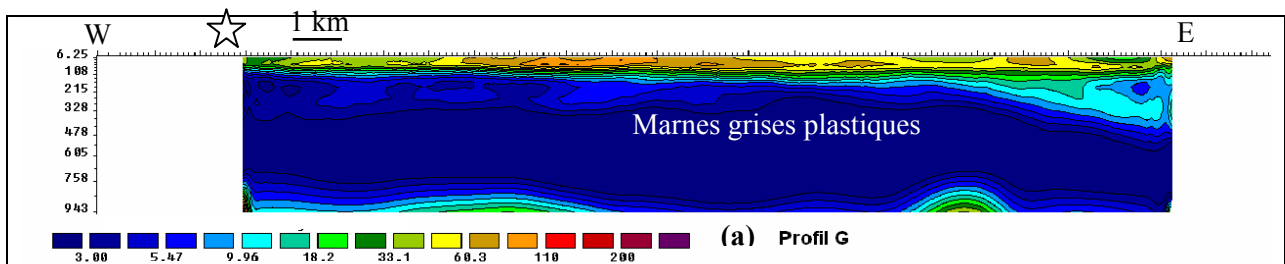
Figure 77b on a le détail de la partie de subsurface en allant de 1,25 m à 108 m.

E

## II-7) Les images 2D du profil G

Le profil G à une longueur de 16 218 m. Le nombre d'électrodes virtuelles estimé pour la réalisation de ces modèles est 838 pour le pas de  $a = 50$  m et 3 272 pour le la subsurface avec un pas de  $a = 20$  m. Pour la totalité du bassin on a définie 23 niveaux ce qui donne 7 475 points de données dans le fichier destiné à inversion ainsi que 14 972 blocs. Pour le modèle de la subsurface il y a 6 488 points de données avec 8 niveaux et 45 032 blocs.

La Figure 78a montre le modèle des résistivités de l'ensemble du bassin. Elle permet d'étudier la structure du bassin de la profondeur 6,25 m à 943 m. Ensuite dans la Figure 78b on a le détail de la subsurface en allant de 1,25 m à 108 m



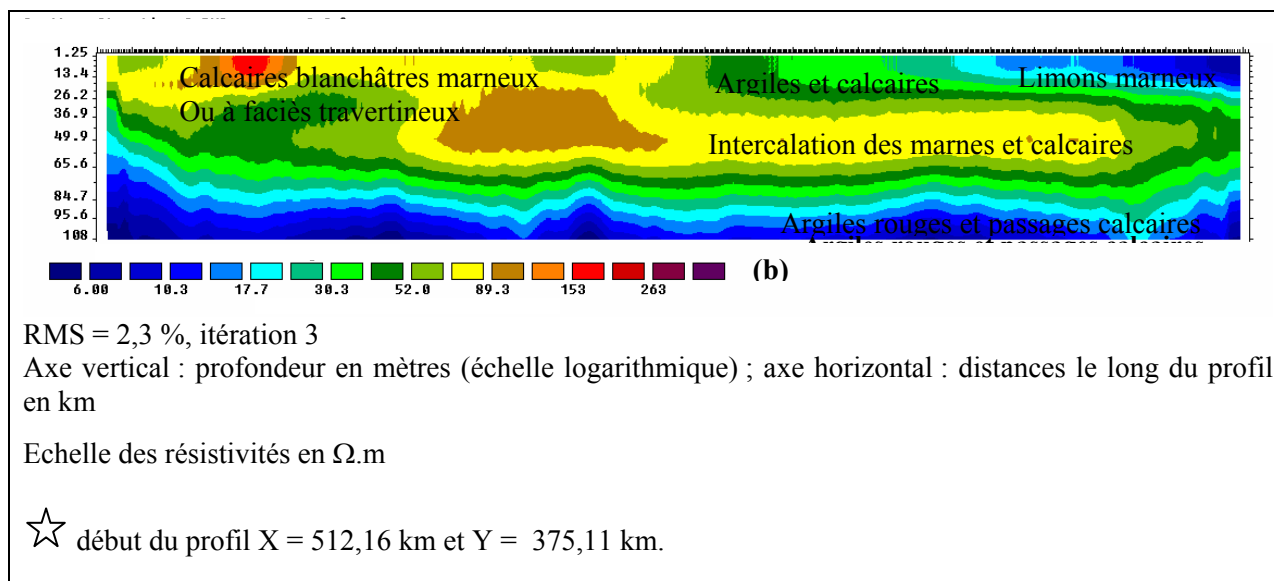
RMS = 3,5 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



1 km



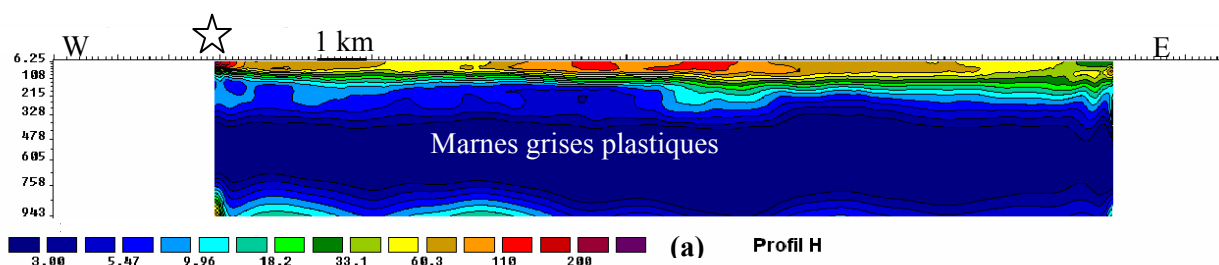
**Figure 78: Modèles de résistivité de profil G (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface)**

La similitude des trois profils E, F et G se marque par la continuité des formations à résistivité électrique moyenne ( $30 \text{ ohm.m} < \rho < 90 \text{ ohm.m}$ ). L'interprétation de ces formations se fait à l'aide du forage 2370/15. Ce forage situé à l'est et entre les profils F et G indique 90 m de calcaires blanchâtres marneux suivis d'une vingtaine de mètres de microconglomérats. Cette succession présente à l'est des profils E et F semble se retrouver à l'ouest. Le centre des profils est occupé par des formations moins résistantes que l'on considère être des marnes et des grès marneux par continuité avec la structure du profil D. Le profil G se distingue de ces deux profils par l'apparition dans sa partie ouest d'un domaine à résistivité élevée et par l'apparition d'un domaine de très faible résistivité situé à l'est en subsurface.

Les marnes grises apparaissent dès 118 m sur le forage 2370/15 alors que sur les profils E, F et G on trouve le toit des marnes grises aux environ de 100 m. Ceci fait une différence d'une vingtaine de mètres, ce qui reste à expliquer.

## II-8) Les images 2D du profil H

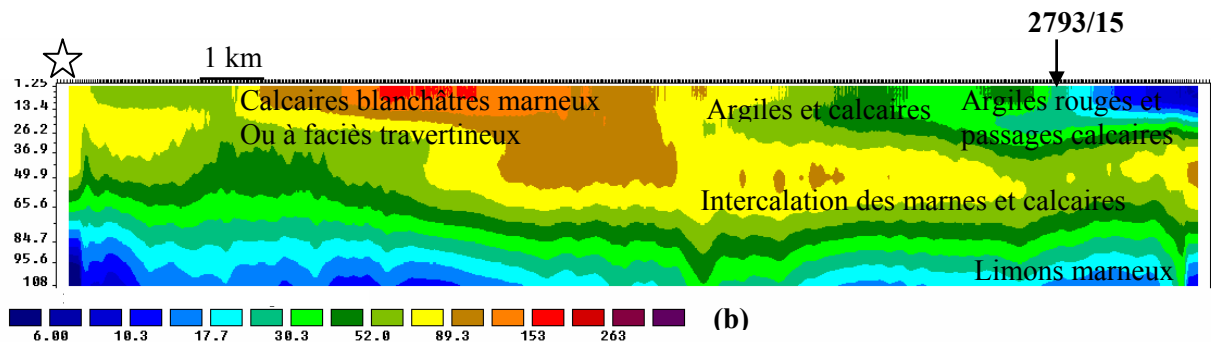
Le profil H a une longueur de 14 096 m. Le nombre d'électrodes virtuelles estimé pour la réalisation de ces modèles est de 752 pour le pas de  $a = 50 \text{ m}$  et 2 848 pour la subsurface avec un pas de  $a = 20 \text{ m}$ . Pour la totalité du bassin on a défini 23 niveaux ce qui donne 6 486 points de données dans le fichier destiné à l'inversion et 12 994 blocs. Pour la subsurface il y a 5 640 points de données avec 8 niveaux et 50 255 blocs.



RMS = 3,4 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



RMS = 2,6 %, itération 3

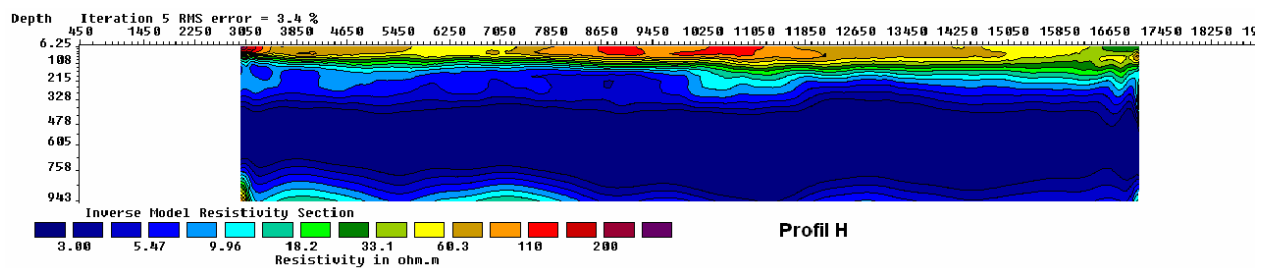
Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

☆ début du profil X = 511,50 km et Y = 375,97 km

Figure 79: Les modèle de résistivité de profil H (a : totalité du bassin, b le détail de la subsurface)

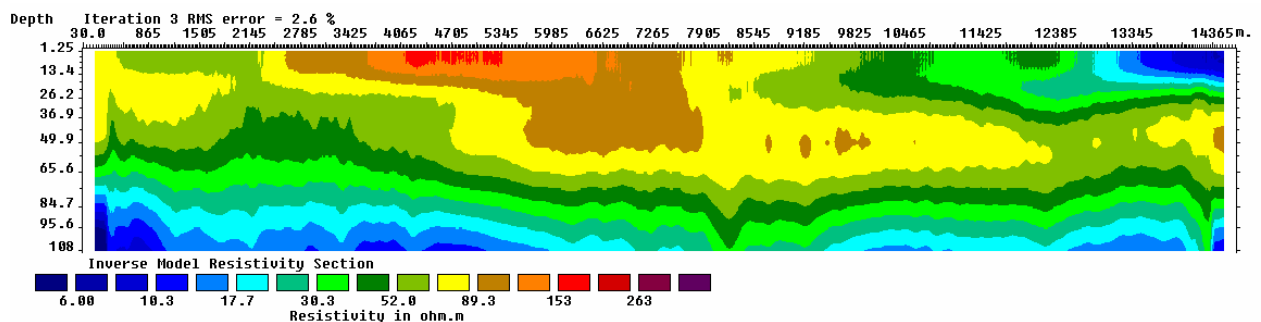
La



RMS = 3,4 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



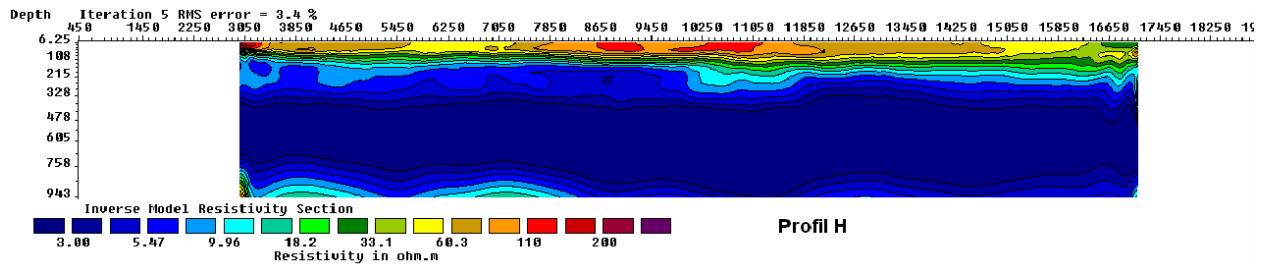
RMS = 2,6 %, itération 3

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

début du profil X = 511,50 km et Y = 375,97 km

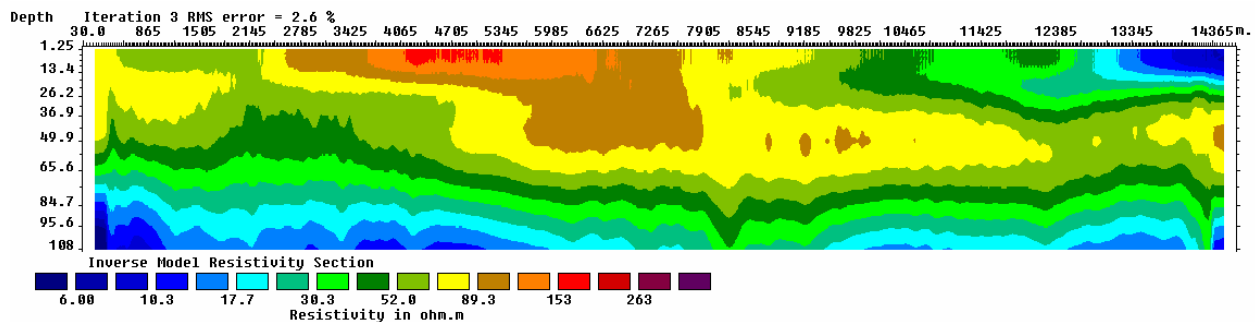
Figure 79a montre le modèle des résistivités de l'ensemble du bassin. Elle permet d'étudier la structure de bassin de la profondeur de 6,25 m à 943 m. Ensuite dans la



RMS = 3,4 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



RMS = 2,6 %, itération 3

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

début du profil X = 511,50 km et Y = 375,97 km

Figure 79b on a le détail de la subsurface en allant de 1,25 m à 108 m.

Le profil H montre une distribution des sondages appartenant aux mêmes classes que celles du profil G (Classe 3 et 4 de la Figure 54). La structure de la partie est est identique du profil G au profil H. L'existence du forage 2793/15 permet d'interpréter les formations comprises entre 10 et 80 m comme des intercalations des marnes et des calcaires et celle qui lui sont supérieur comme des limons marneux. Dans la partie ouest du profil les structures ne diffèrent que par la présence de sondages de la classe 4 à forte résistivité apparente en subsurface ce qui conduit à la coalescence des formations de résistivité supérieure à 90 ohm.m.



## II-9) Les images 2D du profil I

Le profil I a une longueur de 11 921 m. Le nombre d'électrodes virtuelles estimé pour la réalisation de ces modèles est de 666 pour le pas de  $a = 50$  m et 2 420 pour la subsurface avec un pas de  $a = 20$  m. Pour la totalité du bassin on a définie 23 niveaux ce qui donne 5 497 points de données dans le fichier destiné à l'inversion ainsi que 11 016 blocs, pour la subsurface il y a 4 784 points de données avec 8 niveaux et 36 647 blocs.

La

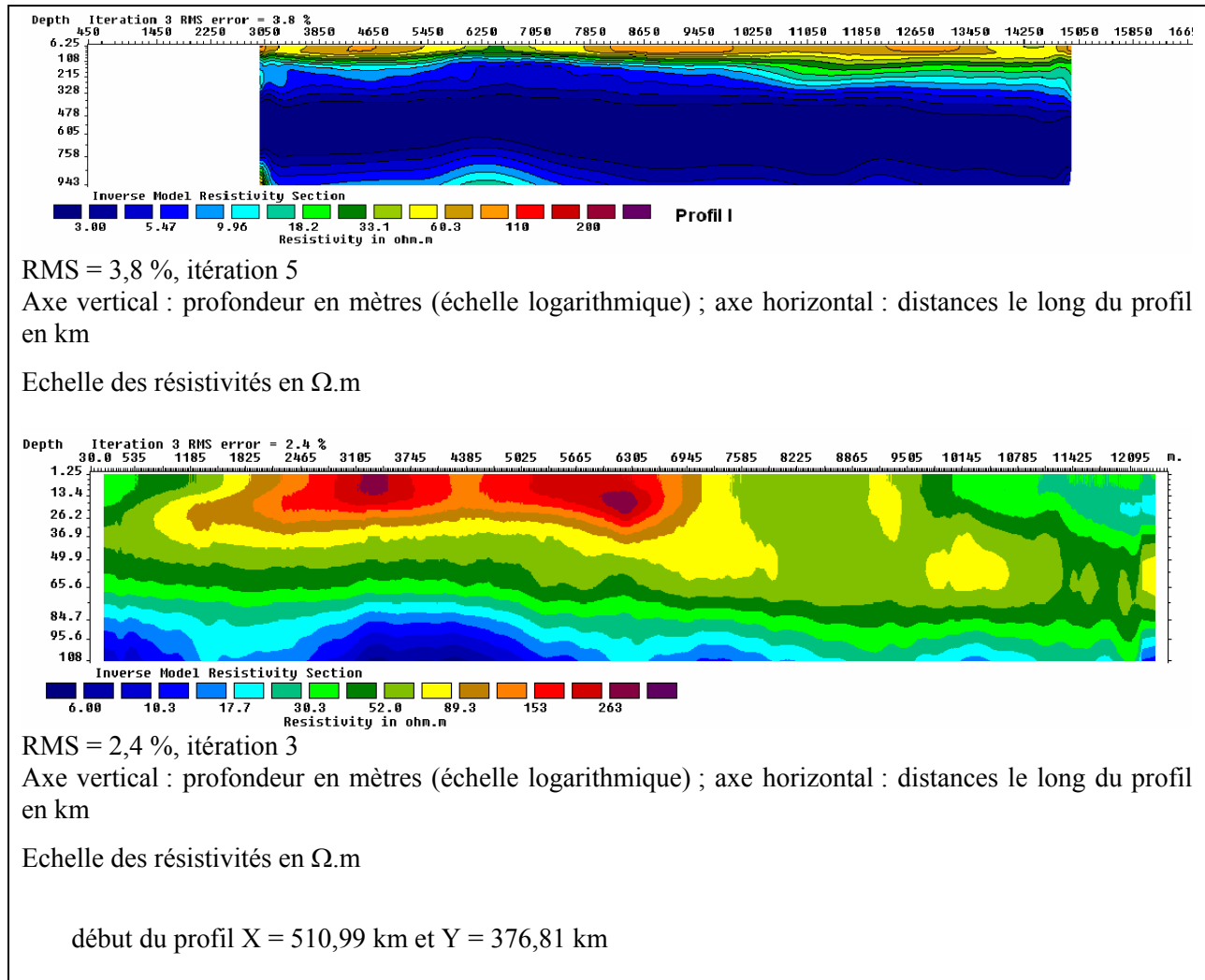
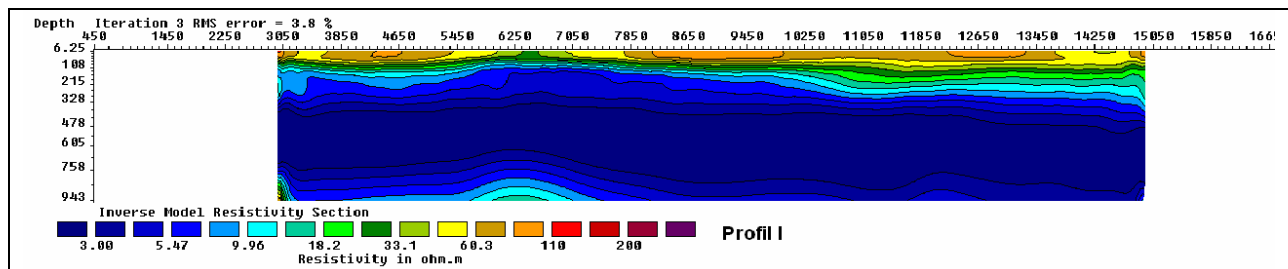


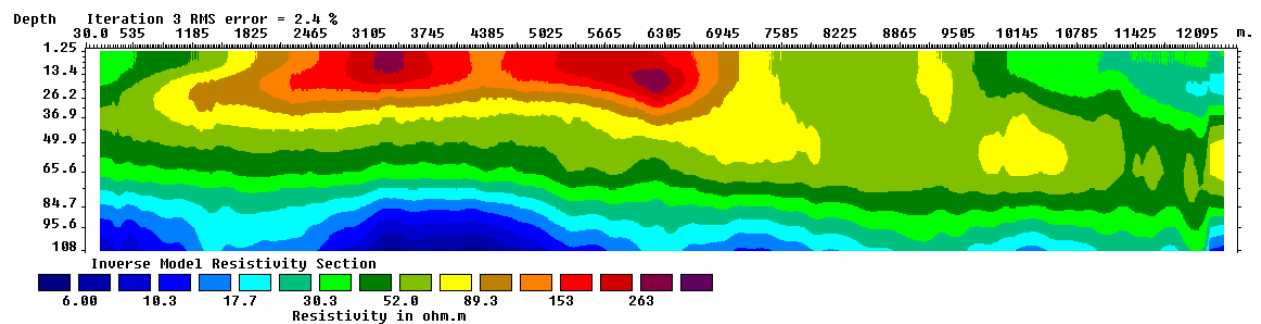
Figure 80a montre le modèle des résistivités de l'ensemble du bassin. Elle permet d'avoir une vision globale sur la structuration de l'ensemble des formations ayant une profondeur varie de 6,25 m à 943 m. Ensuite dans la



RMS = 3,8 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



RMS = 2,4 %, itération 3

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

début du profil X = 510,99 km et Y = 376,81 km

Figure 80b on a le détail de la subsurface pour les formations à une profondeur varie de 1,25 m à 108 m.

Le profil I se distingue du profil H par l'apparition de sondages de la classe 5 et la prépondérance des sondages de la classe 4 dans la partie sud-ouest. Ceci se traduit par une extension latérale des formations résistantes (calcaire blanchâtres). Dans la partie est du profil, les différences ne sont pas significatives.

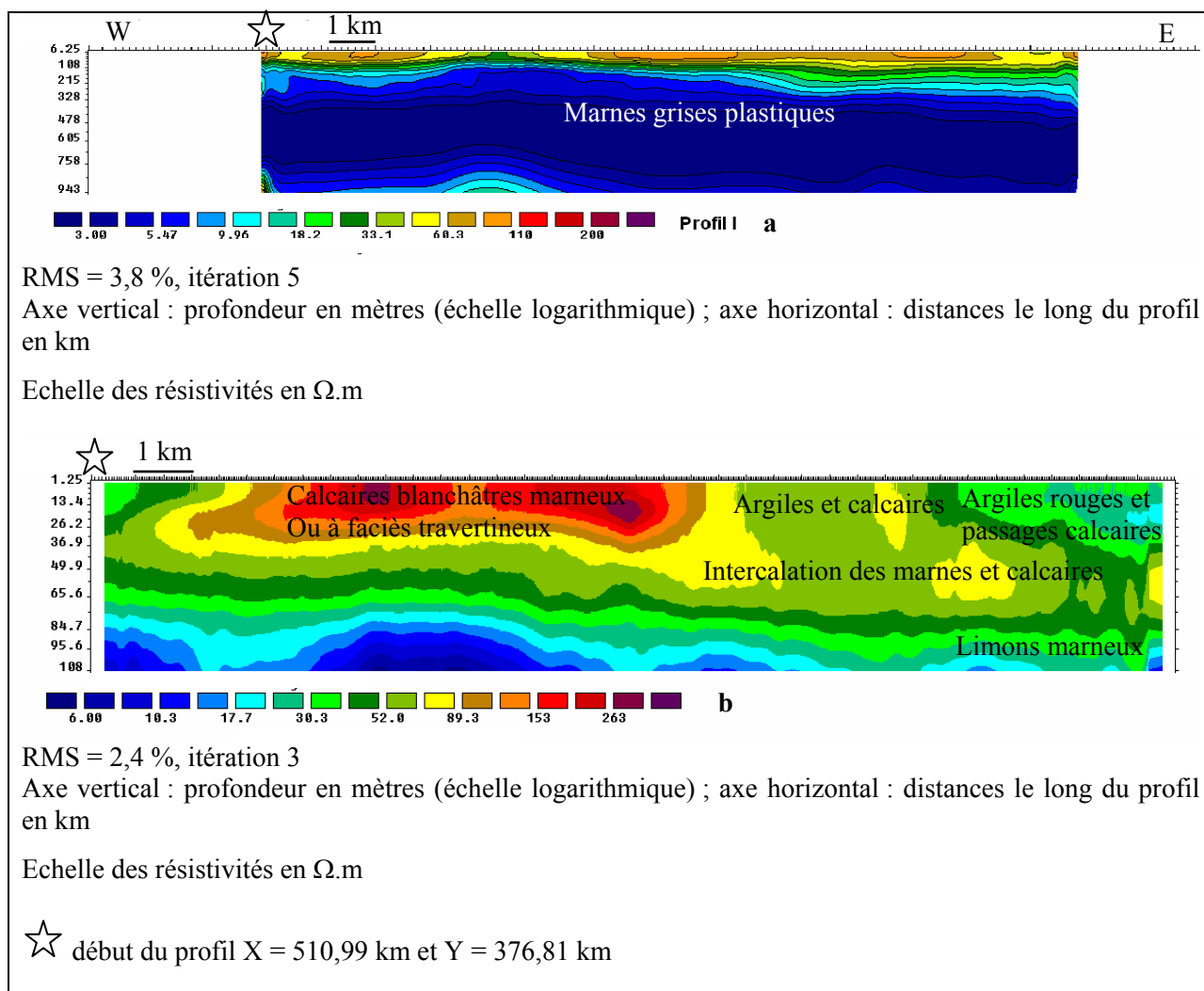
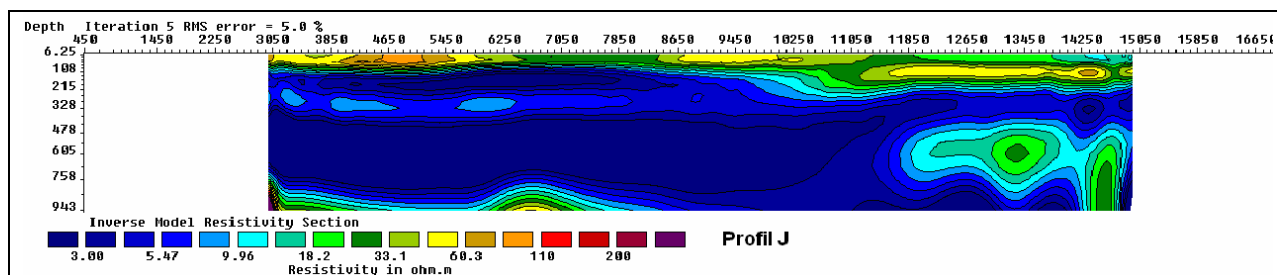


Figure 80: Modèles de résistivité de profil I (a : totalité du bassin, b détail de la subsurface)

## II-10) Les images 2D du profil J

Le profil J est le dernier pour notre série des profils, sa longueur est 14 105 m. Le nombre d'électrodes virtuelles estimé pour la réalisation de ces modèles sont 666 pour le pas de  $a = 50$  m et 2 416 pour la subsurface avec le pas de  $a = 20$  m. Pour la totalité du bassin on a définie 23 niveaux ce qui donne 5 497 points de données dans le fichier destiné à l'inversion ainsi que 11 016 blocs et pour la subsurface il y a 4 776 points de données avec 8 niveaux et 36 585 blocs.

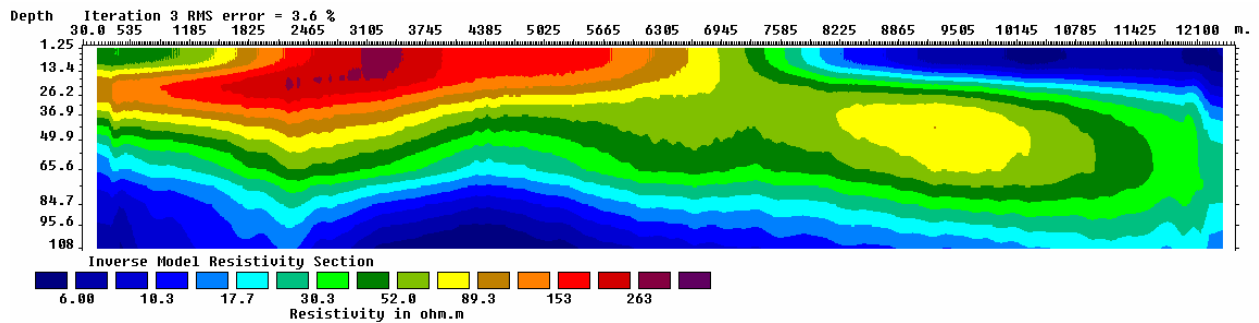
Sur la



RMS = 5 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



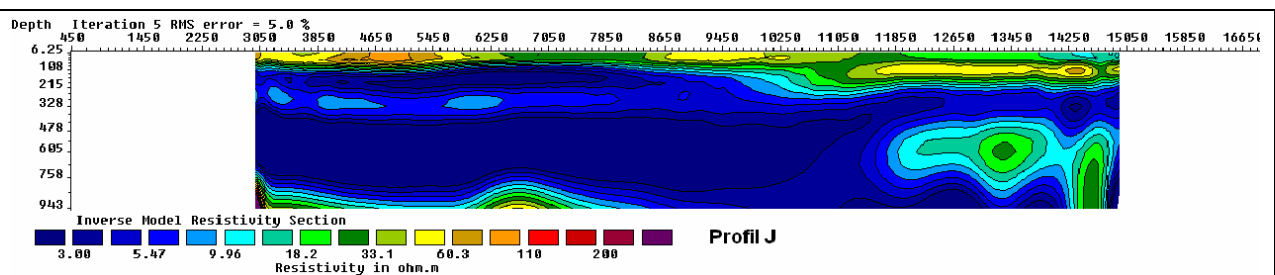
RMS = 3,6 %, itération 3

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

début du profil X = 510,66 km et Y = 377,96 km

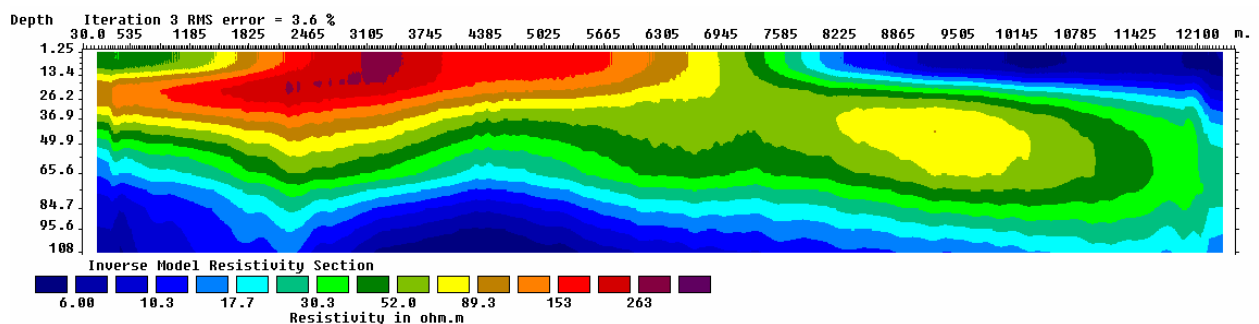
Figure 81a présente le modèle des résistivités de l'ensemble de bassin. Elle permet d'étudier la structure de bassin et les formations avec une profondeur varie de 6,25 m à 943 m. Ensuite dans la



RMS = 5 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



RMS = 3,6 %, itération 3

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

début du profil X = 510,66 km et Y = 377,96 km

Figure 81b on a le détail de la subsurface en allant de 1,25 m à 108 m.

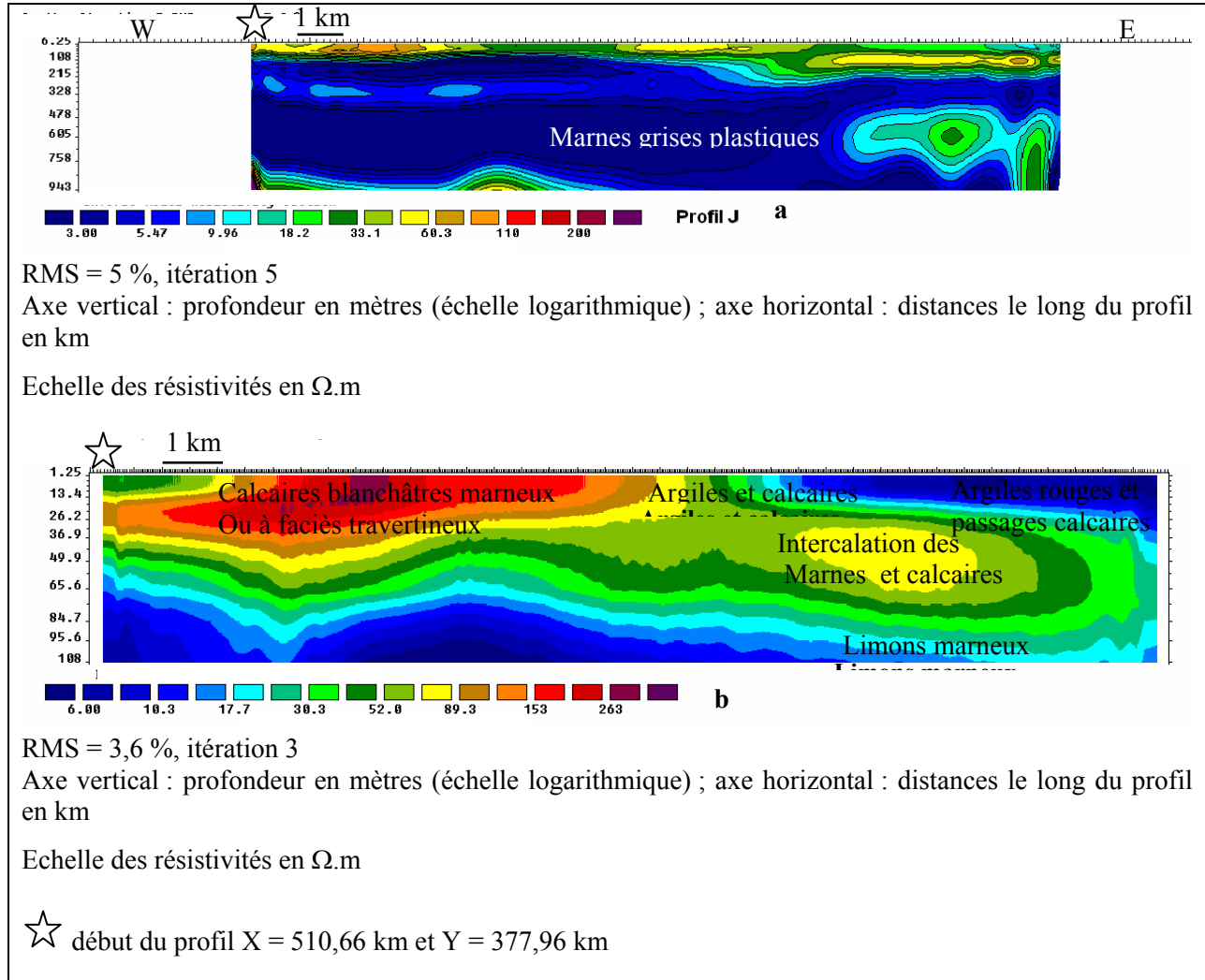


Figure 81: Les modèles de résistivité de profil J (a : totalité du bassin, b le détail de la subsurface)

Cette formation relativement résistante est suivie par la couche la plus homogène et conductrice, l'épaisseur varie entre 600 m à plus que 900 m. la résistivité est très faible, elle est de l'ordre de 3 ohm.m à Cette formation fait l'objet de notre deuxième modèle et montre la continuité des formations définies à l'ouest sur le profil I. L'existence de la large zone conductrice (zone C2 sur les cartes de Figure 59) à l'est du profil est due au sondage de la classe 2 qui n'existe pas sur le profil I.

### III) Corrélation des résultats de la classification des résistivités apparentes et les modèles des résistivités issues des inversions

Après l'obtention des modèles de résistivités vraies du terrain issu de l'inversion, on a corrélé ces résultats avec ceux de la classification hiérarchique, comme le montre la Figure 82. Sur cette figure on a décidé de

ne présenter que deux profils afin de laisser apparent les SEV et leur appartenance à l'une ou l'autre des classes.

L'analyse de cette figure montre que la classification hiérarchique est une méthode très intéressante pour extraire des résultats concernant les terrains, essentiellement pour les formations de subsurface ou la succession des classes des sondages est cohérente avec l'extension des zones soit résistante tel que ceux de la classe 5 ou conductrice comme ceux de classe 2

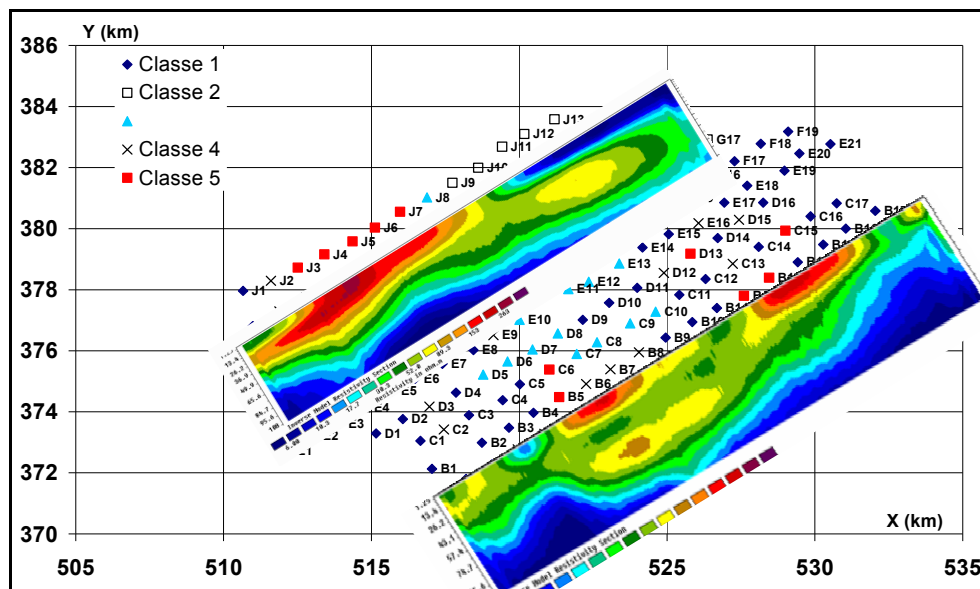


Figure 82: corrélation spatiale entre les résultats de la classification hiérarchiques et les modèles des résistivités des terrains

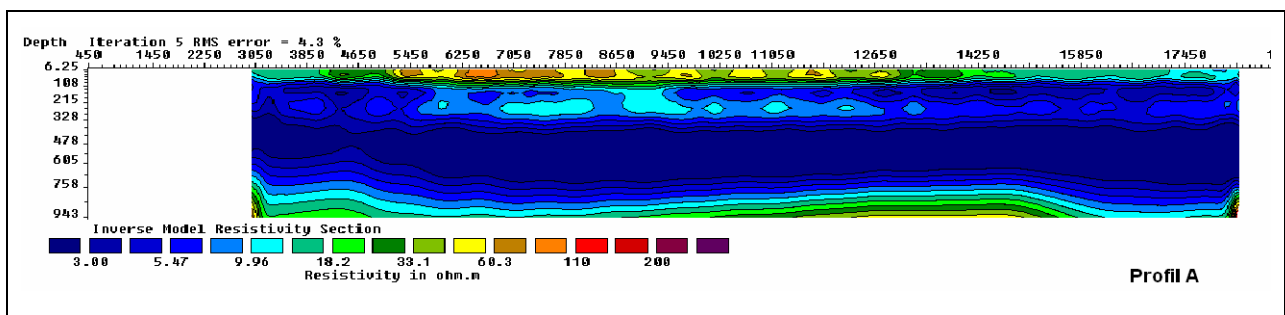
## Conclusion

Les dix profils (A à J) situés dans le bassin montrent tous les trois grandes structures déjà identifiées par l'analyse statistique et géostatistique (Résistant-Conductrice-Résistant), par contre on y note de nombreuses variations intra-formations.

A l'échelle globale du bassin, les formations de subsurface (complexe plio-quadernaire) pour les trois premiers profils les plus au sud (A, B et C) sont les plus épaisses (environ 108 m au centre) par rapport aux autres profils (65 m à environ 90 m); les formations miocènes conductrices constituant le cœur du bassin y sont les moins épaisses (500 m à 900 m, par opposition à plus que 900 m pour les autres profils). Ces résultats mettent bien en évidence l'approfondissement du bassin vers le nord. L'augmentation de l'épaisseur de cette formation est due à subsidence du bassin entretenue par la surcharge sédimentaire qui résulte de son ouverture par extension NW-SE dès le Tortonien (Cf, chapitre I Figure 11 et paragraphe I-2-3 et b). Cette extension atteint son maximum au milieu du Messinien (CIRAC, 1987). Il faut noter la présence d'une formation résistante visible uniquement à l'est du profil J (Rho varie de 18 ohm à 33 ohm.m) que l'on interprète en suivant Cirac (1987) comme étant des sables très fins dus aux apports détritiques conséquence de l'exhaussement des rides pré-rifaines qui débute au Messinien. Par ailleurs l'ouverture en extension par mécanisme de Horst et de Graben se marque bien sur tous les profils par l'élévation à l'est et à l'ouest de chaque profil de la base des formations conductrices du Miocène.

L'étude, à une échelle plus détaillée, des formations de subsurface résistantes a permis de mettre en évidence, sur chacun des dix profils, l'extension des variations lithologiques reconnues en forages mécaniques ; ces formations sont datées du Pliocène au Quaternaire. En effet durant le Pliocène inférieur les contraintes tectoniques s'inversent avec les premières phases de compression (Cirac 1987, Essahlaoui 2000) ce qui a pour effet d'accélérer la remontée des marges du bassin et le passage vers des dépôts sableux et gréseux vers l'est puis finalement par des apports détritiques de type microconglomérats (Zone R2 Figure 59). Ces microconglomérats passe, vers le nord, à des intercalations des marnes et des calcaires (zone C1 et C2 Figure 59) et plus à l'est ils passent à des sables non visibles sur les profils mais décrits par Cirac (1987) comme des dépôts de hauts-fonds et des cordons sableux qui arrive à l'émersion (forage 2564/15 voir annexe 3).

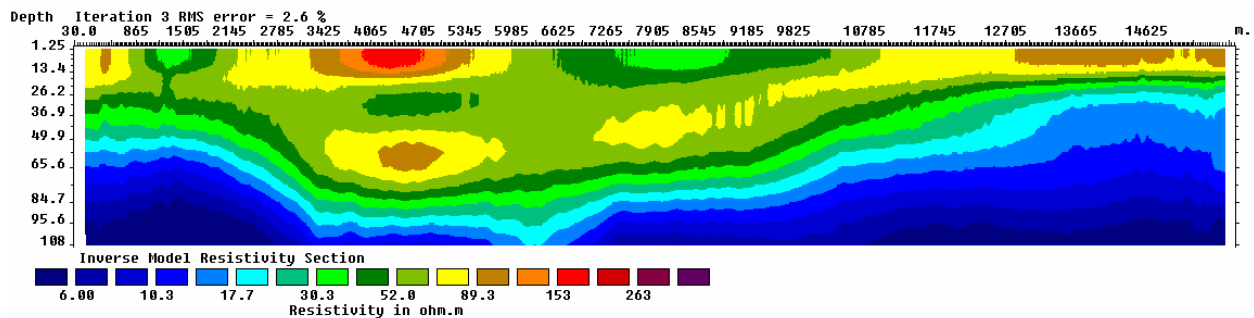
Sur les profils on a noté l'existence d'une formation relativement conductrice séparant les deux zones résistantes R1 et R2 (



RMS = 4,3%, Itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



RMS = 2,6 %, Itération 3

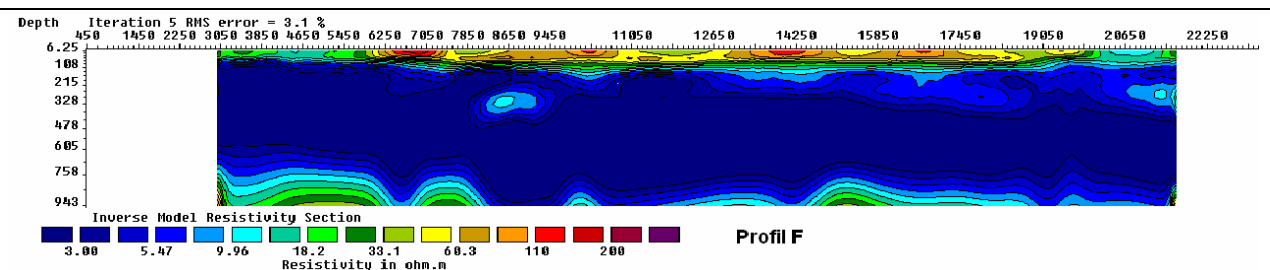
Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

début du profil X = 518,20 km et Y = 371,80 km.

PE : position du premier sondage du profil E.

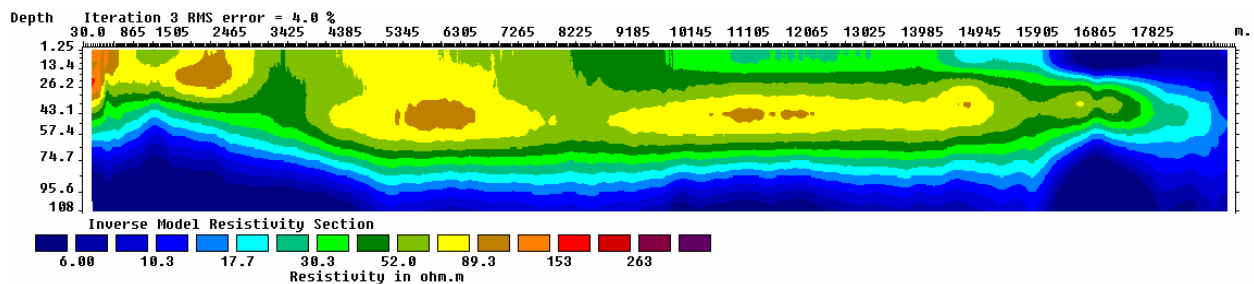
Figure b, par exemple) ; cette tranche de terrain est caractérisée par des résistivités de 30 à 50 ohm.m interprétée comme une formation marneuse et devenant une intercalation de marnes et des grès marneux vers le nord (



RMS = 3,1 %, itération 5

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km

Echelle des résistivités en  $\Omega.m$



RMS = 4 %, itération 3

Axe vertical : profondeur en mètres (échelle logarithmique) ; axe horizontal : distances le long du profil en km



Echelle des résistivités en  $\Omega.m$

début du profil X = 512,79 km et Y = 374,18 km.

Figure 77b). Ceci est interprété comme la reprise de la sédimentation marine mentionnée par Cirac, (1987) qui est ensuite annulée par d'importants apports détritiques au cours de Pliocène supérieur.

Finalement les dernières formations détectées sur nos profils sont les calcaires lacustres datées du Quaternaire. Cette formation passe latéralement vers le nord à des intercalations des calcaires blanchâtres marneux ou à faciès travertineux, et vers le nord-est à des limons et des argiles rouges avec des passages calcaire.



## **CONCLUSION GENERALE**

---



## CONCLUSION GENERALE

---

Le bassin de Saïss encore nommé le bassin de Meknès-Fès, s'allonge d'est en ouest entre le domaine rifain et les rides pré-rifaines au nord et le domaine meseto-atlasique au sud sur une longueur de l'ordre de 80 km. (depuis l'Oued Sebou à l'est jusqu'à la vallée de l'Oued Beht à l'Ouest). Il est subdivisé en deux parties : le plateau de Meknès à l'ouest et le Saïss de Fès à l'est où est situé le secteur d'étude proprement dit (partie Nord). Sa morphologie décroît modérément du sud vers le nord, elle se redresse brutalement au contact des rides pré-rifaines et le pré-rif.

Le Bassin de Saïss, où se localise le secteur d'étude, a attiré l'attention de nombreux géologues et hydrogéologues et géophysiciens d'une part, par sa situation géographique (entre deux domaines structuraux très différents) et, d'autre part, par l'importance du point de vue agricole et des ressources hydriques.

La prospection géoélectrique est largement utilisée au Maroc pour des reconnaissances hydrogéologiques. Ainsi, on retrouve un nombre très important de données de sondages électriques verticaux, établis par plusieurs compagnies, et pour des objectifs divers dans plusieurs bassins comme le cas du Bassin de Saïss. Notre travail a permis de proposer de nouvelles techniques d'interprétation de ces sondages électriques verticaux en un temps réduit, et aussi de bien exploiter cette base de données stockées par l'établissement, entre autre, des images 2D horizontales et verticales de l'estimation de la distribution des résistivités électriques apparentes (modélisation géostatistique, inversion, etc.) et après inversion d'images de tomographie de résistivité électrique.

La synthèse géologique présentée dans le premier chapitre a permis d'établir une distribution lithostratigraphique et une analyse structurale ainsi que l'évolution paléogéographique et les caractéristiques des différents réservoirs.

On résume ci-après les connaissances actuelles sur le bassin qui ont été à l'origine de l'interprétation finale des profils de tomographies électriques (Cf chapitre 4). La lithologie du Bassin montre deux grands ensembles : le premier comprend le substratum avec les schistes paléozoïques, l'ensemble argilo-gypsifère triasique et finalement les formations calcaro-dolomitiques liasiques. Le deuxième ensemble correspond à des formations de remplissage du Néogène au Plio-Quaternaire. Cette deuxième série débute par un Miocène transgressif (Burdigalien) avec à la base des conglomérats miocènes qui marquent le début de la transgression moghrebienne, suivi des marnes d'épaisseur importante (entre 500 m à plus que 900 m) témoignant un milieu marin. Ensuite les formations pliocènes avec des sables à matrice carbonatée, des grès et finalement des sables montrent le passage régressif du milieu marin à un milieu lacustre puis à un milieu purement continental durant le Quaternaire avec des dépôts fluvio-lacustres. Ce

complexe plio-quaternaire présente des variations latérales et horizontales justifiant différent contexte de dépôt selon la position, cette variation se présente principalement par le passage des dépôts des calcaires à des sables ou des grès, et par l'intercalation des niveaux conglomératiques trouver essentiellement à l'est de la zone.

Dans le cadre de ce travail et dans le but de caractériser électriquement le secteur d'étude, une analyse statistique des résistivités apparentes des sondages électriques verticaux a été réalisée. Cette caractérisation a permis d'avoir une vision globale des distributions des résistivités apparentes dans toute la zone. Cette simple analyse descriptive est suivie par une étude statistique multidimensionnelle : analyse en composantes principales (ACP) et par classification hiérarchique ascendante (CHA). Cette analyse a permis de revaloriser la base de données des SEV au nombre de 219. L'analyse est faite d'abord en tenant compte des 22 variables disponibles (Résistivités apparentes pour chaque écartement AB/2) pour étudier la structure du bassin dans sa globalité, ensuite avec les 15 premières variables pour une étude détaillée de la structure de la sub-surface. Ces résultats très encourageants de l'analyse statistique de la base de données (après élimination des SEV atypiques) a mis en évidence l'utilité de telles méthodes comme nouvelle approche d'interprétation d'une masse importante de sondages électriques. Dans le secteur d'étude et suite à cette analyse on a pu redéfinir les trois grands ensembles verticalement superposés et la distribution des classes des sondages électriques verticaux qui concordent avec les différentes sous-zones selon leurs variations géologiques.

De la première étape (Chapitre 2), il en est résulté les principales caractéristiques électriques des ensembles définis dans la zone, de haut en bas :

-le premier ensemble : résistant, avec valeurs des résistivités apparentes très hétérogènes (Figure 27 ; Figure 28 ; Figure 29) qui caractérisent bien les formations Plio-Quaternaires (Calcaire lacustre, conglomérats, sables fauves, etc),

-le deuxième ensemble : conducteur, avec des valeurs des résistivités apparentes quasiment homogènes, il reflète les formations marneuses du Miocène (Figure 27, Figure 28, Figure 29).

-le troisième ensemble : résistant, détecté par la remontée des différents paramètres statistiques (Moyenne, Médiane, et les Quartiles), annonçant les formations liasiques (Calcaire dolomitique).

Les caractéristiques de cet ensemble sont résumées sous la forme de pseudo-sondage (moyen, médian ....)

L'analyse en composantes principales et la classification hiérarchique ascendante viennent confirmer et compléter l'analyse descriptive en agrégeant les sondages électriques en six classes homogènes. C'est ainsi qu'on a délimité les deux classes des sondages situés au nord du secteur où affleurent les formations marneuses du Miocène et les formations argileuses triasique au NW, le reste des sondages occupant la totalité de la surface montrent des variations globalement concentriques (Figure 47). Le dernier cas, ce sont les sondages de la classe 6 qui, jalonnant l'Oued N'ja, montrent des résistivités apparentes en subsurface les plus élevées.

Le troisième chapitre est consacré à l'obtention de cartes des résistivités apparentes. A l'issue de cette partie on a établi l'évolution pseudo-profondeur par pseudo-profondeur des variations des résistivités apparentes en se limitant à la zone du Bassin au sens strict (après élimination des profils K, L, M, N, O, P situés dans un domaine au relief trop accentué). Ces cartes établies horizontalement et verticalement ont été interprétées par inversion (méthode des essais particuliers) des pseudo-sondages électriques moyens et de sondage paragon par classe ; l'interprétation a été calée au moyen des données des forages mécaniques effectués dans la zone. Tous ces résultats ont permis d'obtenir une vision géoélectrique claire et globale de chaque zone du bassin à travers un modèle calculé (Figure 66 ; Tableau 11) : une zone centrale avec un Miocène très épais pouvant largement dépasser 1 000 m et des zones en bordure NE et SW avec un Miocène pouvant atteindre 1 000 m. Les formations plio-quadernaires sont plus épaisses dans la zone centrale que sur les bords.

Les données de résistivités apparentes calculées au cours de chapitre 3 sont à la base, dans le chapitre 4 des inversions 2D conduisant à des images 2D de tomographie de résistivités électriques, on dispose donc de dix images de tomographie qui ont permis une interprétation détaillée de la structure du bassin (

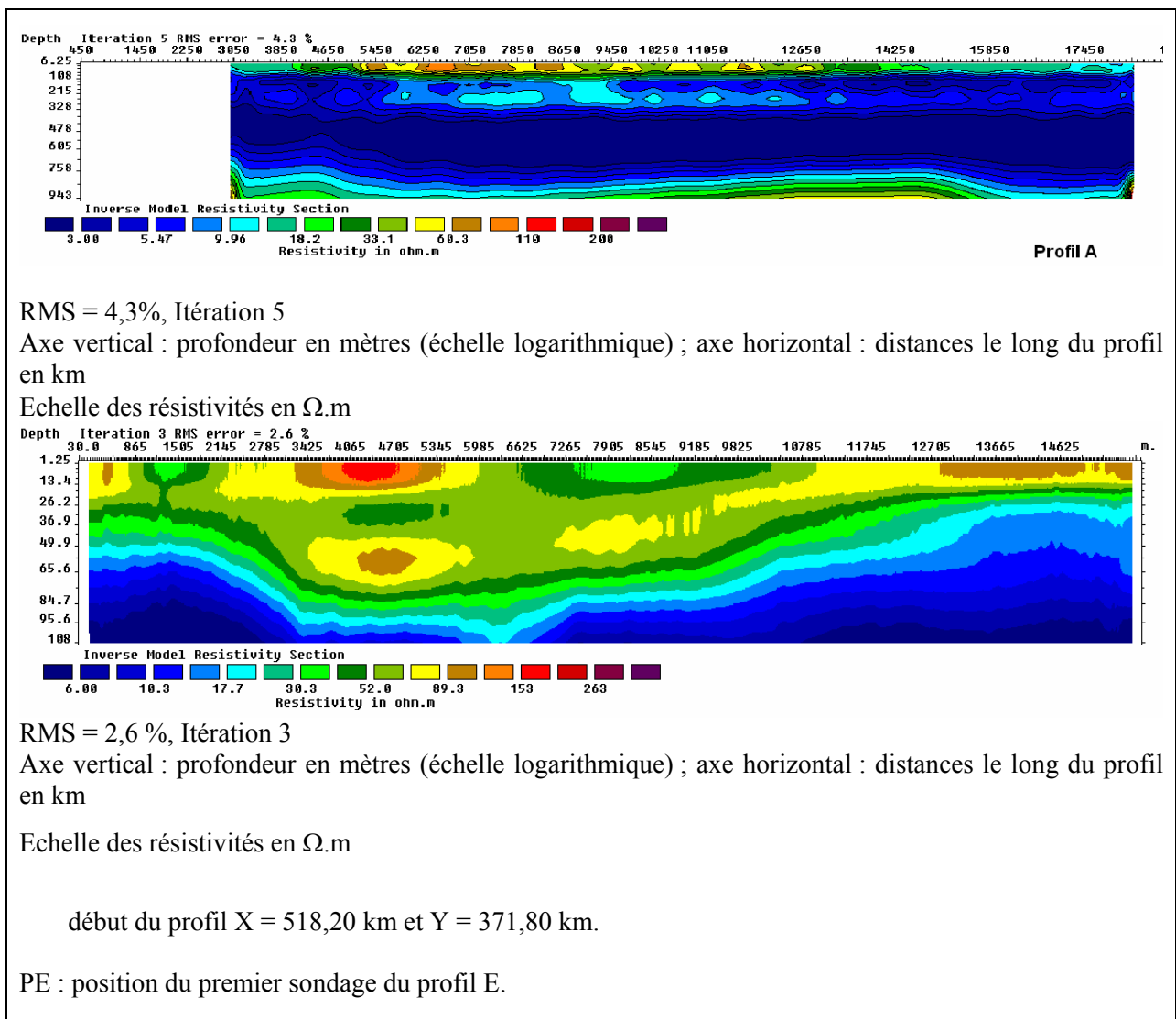


Figure à

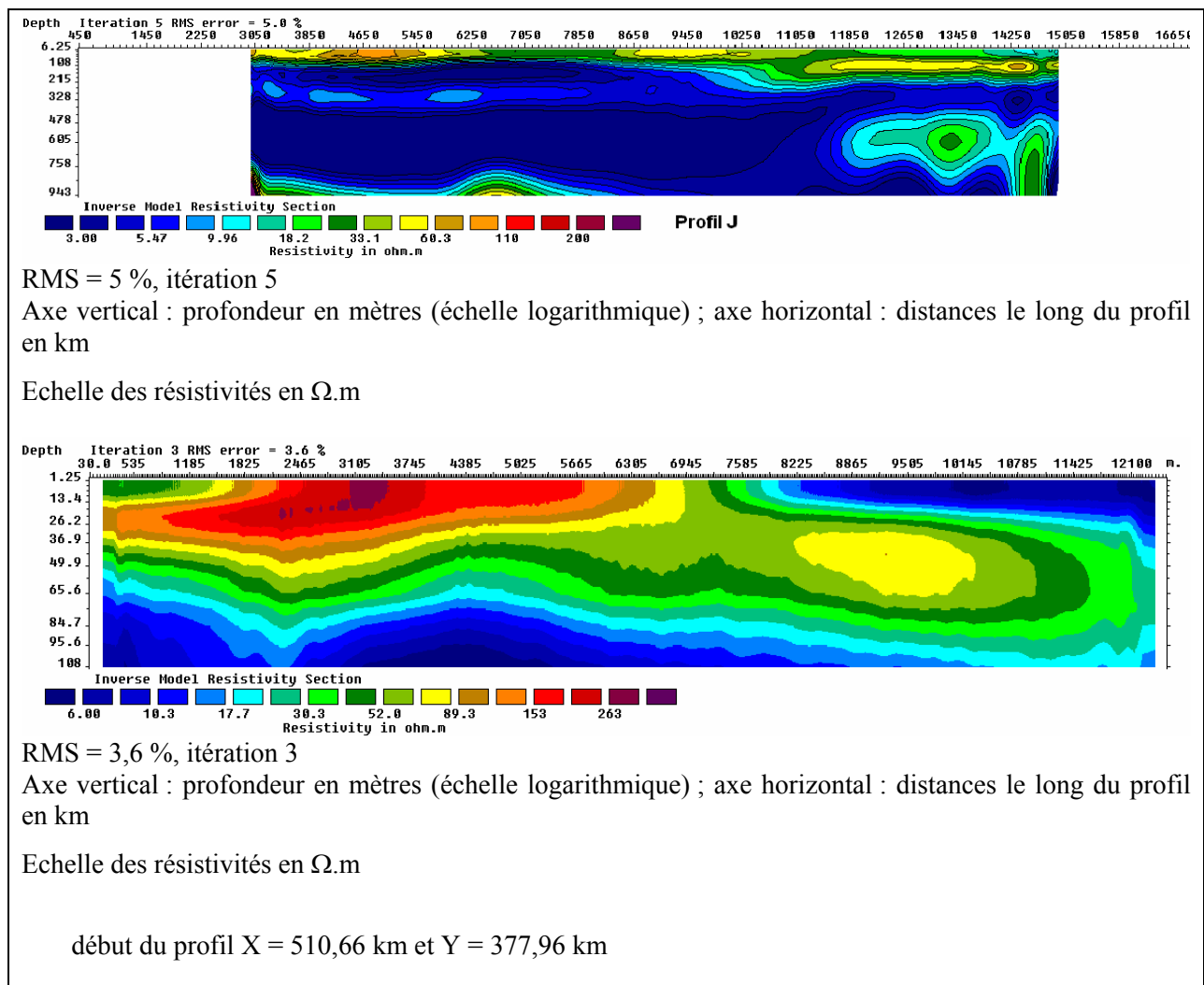


Figure 81).

Les dix profils étudiés et inversés à l'aide du logiciel RES2Dinv montrent tous les trois grands ensembles régionalement connus et définis auparavant (Résistant-Conductrice-Résistant), par contre on note des variations intra-formations. Ces ensembles sont de haut en bas comme suit:

- les formations du Plio-Quaternaire dont l'épaisseur inégale atteint au maximum une centaine de mètres,
- l'épaisse couche marneuse du Miocène ;
- les formations présentant une résistivité plus élevée attribuées soit à la base de Miocène (Burdigalien) soit au sommet du Lias.

De plus, l'organisation spatiale des formations a permis de confirmer l'existence de failles cohérentes avec la structure en Horst et Graben du bassin de Saïss.

Les résultats des analyses statistiques et géostatistiques complétés par les inversions des sondages moyens pas classe, ont mis en évidence la fiabilité de ces techniques pour l'interprétation d'un nombre important



de sondages électriques au lieu de la méthode ordinaire qui se base sur l'inversion des sondages un par un et de leur corrélation ultérieurement pour construire la structure globale du domaine étudié. Avec les techniques qui ont été utilisées, on peut avoir des résultats très satisfaisants en un temps réduit.

Des perspectives à ce travail sont :

- la modélisation 3D géologique et hydrogéologique,
- le krigeage par indicateur afin de définir les zones susceptibles d'être réservoir d'eau souterraine,
- l'établissement d'un modèle en blocs 3D de krigeage de résistivités apparentes,
- l'inversion 3D afin d'avoir un modèle géoélectrique bien détaillé de la zone,
- délimiter les caractéristiques électriques et hydrogéologiques des aquifères.

## **BIBIOGRAPHIE**

---



## BIBLIOGRAPHIE

---

---

A :

- Agence du bassin hydraulique du Sebou, 2006.** Débat Nationale sur l'eau. Rapp., 48p.
- Ahmamou, M, 1987.** Etude sédiemntologique des calcaires lacustres saïssiens (Plio-Quaternaire) du bassin de Fès-Meknès (MAROC). Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Aix Marseille III, 178p.
- Ahmamou, M., et Chalouan, A., 1988.** Distension synsédimentaire Plio-Quaternaire et rotations antihoraires des contraintes au Quaternaires anciens sur la bordure Nord du Bassin de saïss (maroc). Bull. Inst. Scient., Rabat, n° 12, 19-26.
- Amraoui, F., 2005.** Contribution à la connaissance des aquifères karstiques du liais de la plaine du Saïss et du Causse moyen Atlasique Tabulaire (Maroc).249p.
- Aït Brahim, L., 1991.** Tectonique cassante et état de contrainte récente au nord du Maroc. Contribution à l'étude du risque sismo-tectonique, Thèse de doct. Es Sci. Rabat, 223p.
- Aït Brahim, L. et Chotin, p., 1984.** Mise en évidence d'un changement de direction de compression dans l'avant pays rifain au cours du tertiaire et de quaternaire. Bull. Sec. Géol. France, (7), t. 26, N°4 pp. 681-691.
- Aït Brahim, L., 1983.** Étude de la déformation du néogène à l'actuel sur la bordure sud-rifaine dans le contexte du rapprochement de plaques Afrique – Europe. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Rabat, 178p.
- Aster, R. C., Borchers, B., Thurber, C. H. 2005.** Parameter Estimation and Inverse Problems. 301 p. Elsevier Academic Press, Amsterdam.
- Armstrong, M. 1998.** Basic linear geostatistics: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.(B°)154 p

B

- Boumir, kh., 1987.** Nouvelle interprétation du mode de mise en place des sables fauves dans le bassin de saïss (Maroc).b Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Fès, 169p . 55 fig., 5 Tab., 9 Pl.

C

- CAG, 1982.** Compagne africaine de la géophysique, 1982 : Etude par prospection électriques des formations du bassin de Saïss (MAROC), rap,ined

**-Chamayou J., Comb, M., Genetier, B., et Leclerc, C., 1975.** Le bassin de Meknès-Fès, Ressource en eau du Maroc, 41-71.

**-Chilès, J. P., and P. Delfiner, 1999,** Geostatistics: Modelling spatial uncertainty: Wiley-Interscience.

**-Choubert G, Faure-Muret, A. 1962.** Evolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïque. In/ livre mémoire P.FALLOT, Mém. H. sér. Soc. Géol.France.447-527.

**-Cirac, P. 1987.** Le bassin sud-rifain occidental au néogène supérieur. Evolution géodynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours d'une phase de comblement. Thèse 287 p. Université Bordeaux 1, France.

## D

**-Daguin F 1927.** Contribution à l'étude géologique de la region pré-rifaine (Maroc occidental). Notes et Mém. Serv. Géol., Maroc, Rabat, n°1, p., 57fig., 37pl.

**-Durand-Delga, M., Hottinger, L., Marçais, J., Mattauer, M., Milliard, Y. et Suter, G., 1960-62.** Données actuelles sur la structure de rif. In : Livre-mémoire p. Falot, Mém. H. sér. Soc. Géol. Fr., Paris, 1, p. 399-422.

## E

**-Edwards, L.S.1977.** A modified pseudosection for resistivity and IP. Geophysics, Vol.42, n°5 1020-1036.

**-Escofier, B., Pagès, J. :** Analyses factorielles simples et multiples, Objectifs, méthodes et Interprétation (3<sup>ème</sup> édition, DUNOD, PARIS, 1998)

**-Essahlaoui A, Sahbi A, Bahi L, El-Yamine N., 2001,** Preliminary survey of the structure and hydrogeology of the western Saiss Basin, Morocco, using electrical resistivity: Journal of African Earth Sciences, 32, 4, 777-789.

**-Essahlaoui, A. 2000.** Contribution à la reconnaissance des formations aquifères dans le Bassin de Meknès-Fès (Maroc), Prospection géoélectrique, étude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau. Thèse 258p. Université Mohammed VI, Rabat, Maroc.

**-Essahloui A., 1997.** Étude par prospection géoélectrique dans le plateau de Méknès et essai de reconnaissance du bassin hydrogéologique de Saiss., D.E.A., Univ. Mohammed V, Rabat.

**-Essahlaoui, A., et Jaidouri S., 1990.** Reconnaissance d'un substratum par sondage électrique – cas des calcaires liasiques – Plateau de Méknès. Mém. de fin d'étude, Ecol. Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat. Maroc.

## F

**-Fassi, D. 1999.** Les formations superficielles de Saïss de Fès et de Meknès des temps géologiques à l'utilisation actuelles des sols. thèse 527p. Notes et Mém. Serv. Géol. n° 389. Rabat, Maroc.

**-Fougère J.C., 1981 :** Evolution structurale d'un bassin atlantico-mésogéen de la marge Africaine : les rides sud-rifaines (Maroc). Bull.Soc.géo.France.Paris,7, t.XXIII, n° 3, 229-244.

**-Faugères J.C., 1978.** Les Rides sud-rifaines. Evolution sédimentaire et structurale d'un bassin atlantico-mésogéen de la marge africaine. Thèse Doct Etat. Univ. Bordeaux 1, n° 290, Vol., 510 p., 11 tab., 119 fig., 42 pl.

**-Fernández Martínez, J. L., García Gonzalo, E., Fernández Alvarez, J.P. 2008a.** Theoretical analysis of Particle Swarm trajectories through a mechanical analogy. International Journal of Computational Intelligence Research. Special Issue on PSO, vol. 4, no. 2.

**-Fernández Martínez, J. L., García Gonzalo, M. E., Fernández Alvarez, J. P., Kuzma, H. A. 2008b.** Particle Swarm Optimization (PSO): a simple and powerful algorithm family for geophysical inversion. Society of Exploration Geophysics, 2008. Workshop on "Uncertainty analysis in geophysical imaging, estimation and inverse problems". SEG, Las Vegas, Nov. 13 2008.

**-Fernández Martínez, J. L., García Gonzalo, E. 2008.** The generalized PSO: a new door to PSO evolution. Journal of Artificial Evolution and Applications. DOI:10.1155/2008/861275.

## G

**-Gilles, G. J., Pennetier, C., Bitri, .A., Meric, O., Malet, J. P. 2006.** Caractérisation de la structure interne et de l'état hydrique de glissements argilo-marneux par tomographie géophysique, l'exemple du glissement coulée de super-sauze (Alpes du sud, France), C. R. Géoscience 338 (2006) 587-595.

**-Geovariance. 2008.** ISATIS V8: Manuel d'utilisation ISATIS

**-Gouasmia, M., Gasmi, M., Mhamdi, A., Bouri, S., Ben Dhia, H. 2006.** Prospection géoélectrique pour l'étude de l'aquifère thermal des calcaires récifaux Hmeïma-Boujabeur (centre ouest de tunisie). C. R. Geoscience 338 (2006) 1219-1227.

**-GROLIER, J., Riss, J, 1997.** Mathématiques pour les sciences de la terre (Masson, Paris)

## H

**-Haddaoui, Z., El hatimi, N., Hervouet, Y., 1997.** Les rides pré-rifaines (Maroc septentrionale) : influence de la géométrie d'un bassin jurassique sur la propagation des chevauchement néogène. Géologie méditerranéenne, t. XXIV, N° 1-2, 51 – 71.

**-Harmouzi O, Riss J, Essahlaoui A, Marache A, Sirieix C., 2009.** Interprétation de sondages électriques verticaux par combinaison de méthodes statistique, géostatistique et d'inversion : application au bassin de Saïss (Maroc). Africa Geoscience Review, 16, 2, 119-140

**-Harmouzi, O., Sirieix, C., Riss, J., Essahlaoui, A. 2007.** Bassin de saïss (Maroc) : analyse d'un jeu de 153 sondages électriques pour la caractérisation des réservoirs, France. [http://www.sisyphes.jussieu.fr/~geofcan07/pages/gf6\\_auteurs\\_hjk.htm](http://www.sisyphes.jussieu.fr/~geofcan07/pages/gf6_auteurs_hjk.htm) 6ème colloque GEOFCAN Bondy.

J

**-Janvier, M., 1999.** Statistique descriptive avec ou sans tableur, cours et exercices corrigés, (Dunod, Paris)

**-Journel A., 1989.** Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons. American Geophysical Union, Washington, D.C., 40 p.

K

**-Kenafi, J., 2002.** Évolution structurale méso-cénozoïque des rides prérfaines (Maroc) : halocinèse, géométrie et reconstitution géodynamique, apport de données de sismique réflexion et de forages pétrolier. Thèse d'Uni. Ibn Tofail, Kénitra, 350p.

**-Kenafi, J., Toto, E., Dakki, M., Asebriy L., 2001.** Evolution structurale des rides prérfaines (Maroc). Région de Meknès : influence de la distensions mésozoïque sur les chevauchements moi-pliocènes, apports de données de réflexion et de forages. Africa geoscience Review, vol. 8, 3, 337-350.

**-Koefoed, O. 1979.** Geosounding principles, 1, Amsterdam, Elsevier Scientific publishing company.

L

**-Lebart, L., 2006. Piron, M., Morineau, A., 2006 :** Statistique Exploratoire Multidimensionnelle, Visualisation et inférence en fouilles de données. ( 4 ème édition ; DUNOD, Paris, 2006)

**-Leblanc, D., 1986,** Cissaillements plats dans l'avant pays rifains, un modèle pour la structure profonde du prérf (Maroc). Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys., Paris, V. 27, fasc. 1, 37-46.

**-Loke M.H., Barker R.D., 1995,** Least-square deconvolution of apparent Resistivity pseudo-section, geophysics, vol. 60, pp. 1682-1689.

**-Loke, M. H., 2004.** Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys: [www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com), last accessed 11 June 2007.

**-Loke, M. H., and R. D. Barker, 1996,** Rapid least-square inversion of apparent Resistivity pseudosection by a quasi-Newton method: Geophysical Prospecting, 44, 131–152.

M

**-Marcotte, D., 2000.** Traitement statistique des données géologiques, cours Ecole polytechniques, N°GLQ3402, 2000,

**-Marescot., L., 2006 ;** Introduction à l'imagerie électrique du sous-sol. Bull. Soc. Vand. SC. nat. 90.1 : 23-40p.

**-Mhamdi, A., Goussmia, M., Gasmi, M., Bouri, S., Ben dahia, H. 2006.** Evaluation de la qualité de l'eau par application de la méthode géoélectrique : exemple de la plaine d'El Mida-Gabes nord (Sud tunisien). C. R. Géoscience 338 (2006) 1228-1239.

N

-Nguyen F., Kemna A., Antonsson A., Engesgaard P., Kuras O., Ogilvy R., Gisbert S., Jorreto S., Pulido-Bosch A., 2009, Characterization of seawater intrusion using 2D electrical imaging, Near Surface Geophysics, 7, 377-390

P

**-Parasnis, D. S. 1995.** Principles of applied geophysics. 429 p. Fifth edition, Chapman et Hall.

**-Pekeris, C.L. 1940.** Direct method of interpretation in resistivity prospecting. Geophysics, 5, 31-42.

**-Peter-Borie, M. 2008.** Les massifs rocheux du Crétacé supérieur du Labourd occidental: processus d'altération et instabilités littorales. Thèse 344 p. Université de Bordeaux, Bordeaux, France.

**-Pidlisecky A., Haber E., and Knight R., 2007.** RESINVM3D: A 3D resistivity inversion package. Geophysics, 72-2, p H1-H10.

R

**-Remy N., Boucher A. and Wu J. 2009.** Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide. Cambridge University Press, 260 p.

**-Riss. J., Fernandez Martinez, J.L., Sirieix, C., Harmouzi O., Marache, A., Essahlaoui A. 2008.** Reinterpretation of VES data (Saiss basin, Morocco) using Geostatistics and 2D electrical inversion method, SEG LAS VEGAS, November 2008.

**-Ruben Rodriguez Herrera, Danielle salles-le Gac, 2002 :** Initiation à l'Analyse Factorielle Des Données, Fondements Mathématiques et Interprétations, Cours et Exercices Corrigés, (Ellipses )

S

**-Saporta, G. 1990.** Probabilités, Analyse des données et statistiques. 493 p. Editions technip, Paris.

**-SPAD. 1996-2002.** Decisia Bouilding Hoche, 13 rue Auger 93697 Pantin cedex. France.

T

**-Tabyaoui, F., 2005.** Contribution à l'étude hydrogéochimique des eaux de la nappe phréatique du plateau de Meknès (Maroc). Thèse, Doct. Univ. Moulay Ismail Meknès. ??p.

**-Taltasse, P. 1953.** Recherche géologiques et hydrogéologiques dans le bassin lacustre de Fès-Meknès. Notes et Mémoire, n° 115, 300 p. Service de géologie. Rabat, Maroc

**-Tenenhaus, M., 2007** Statistique, méthodes pour décrire, expliquer et prévoir (Dunod, Paris)



## V

**-Vidal, J.C. et Faugères, J.C, 1975**, une nouvelle interprétation de la structure des rides préifaines (Rif Maroc), role des décrochements. C. R. Acad. Sci. Paris, série D, t, 281.

## W

-Wernli, R, 1987. micropaléontologie du Néogène post-nappe du Maroc septentrional et description systématique des foraminifères planctoniques . note et Mém. Serv. Géol., Maroc, n° 331.

## Z

**-Zizi, M.,1996** ; Triassic-jurassic extentional systems and their Neogene reactivation in northern Morocco (the rides préifaines and basin Guercif). Ph. D. Thesis, Rice University, Houston.

## Les annexes

---

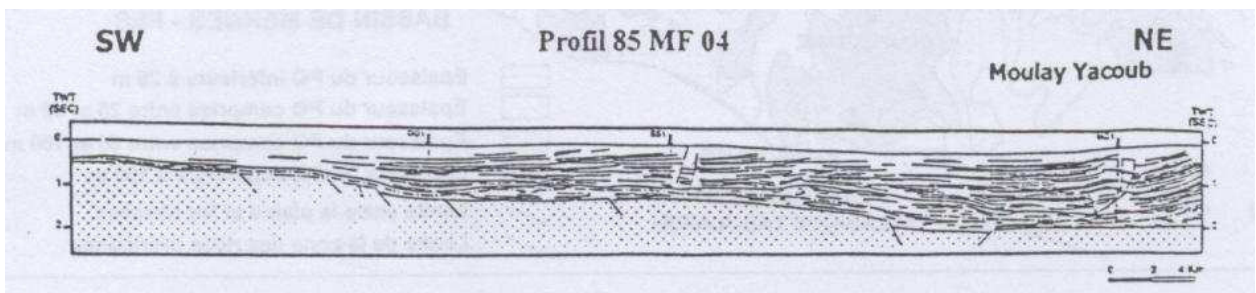
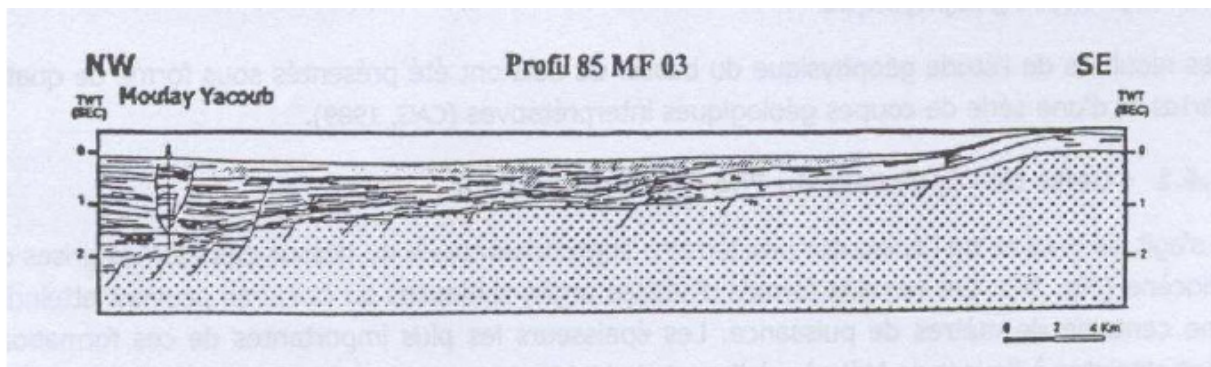
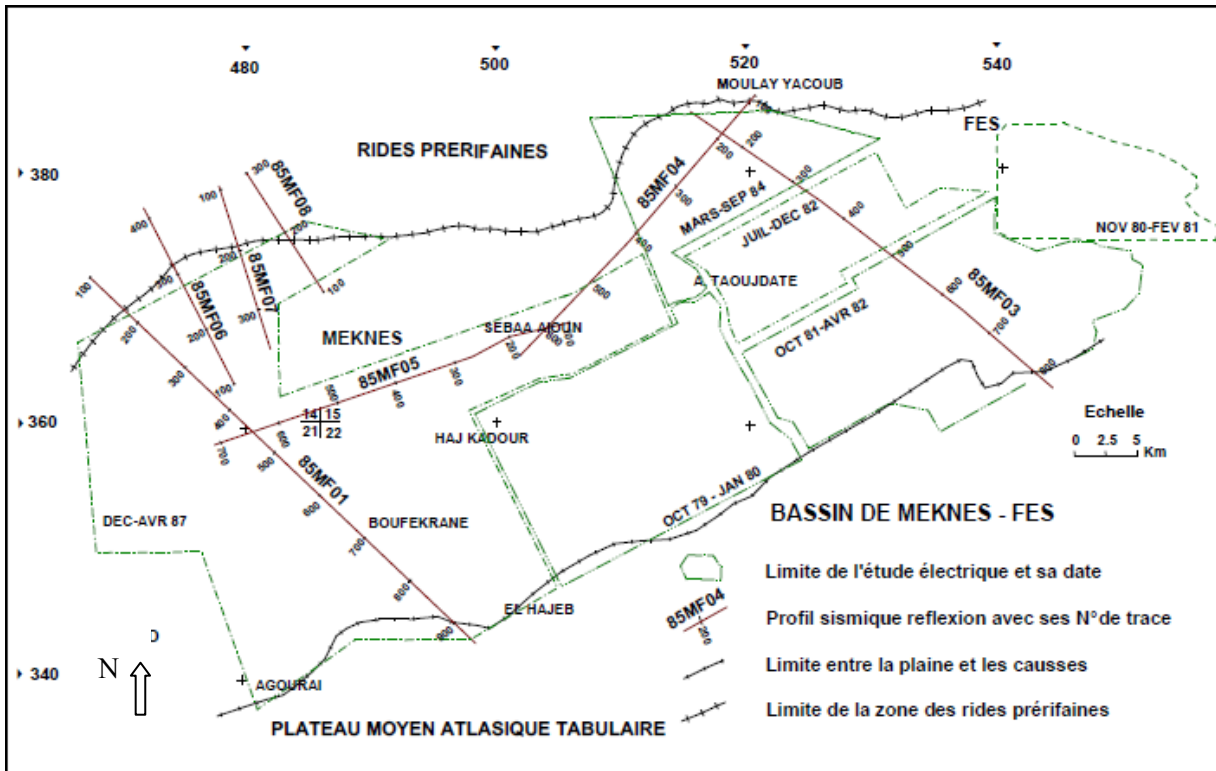


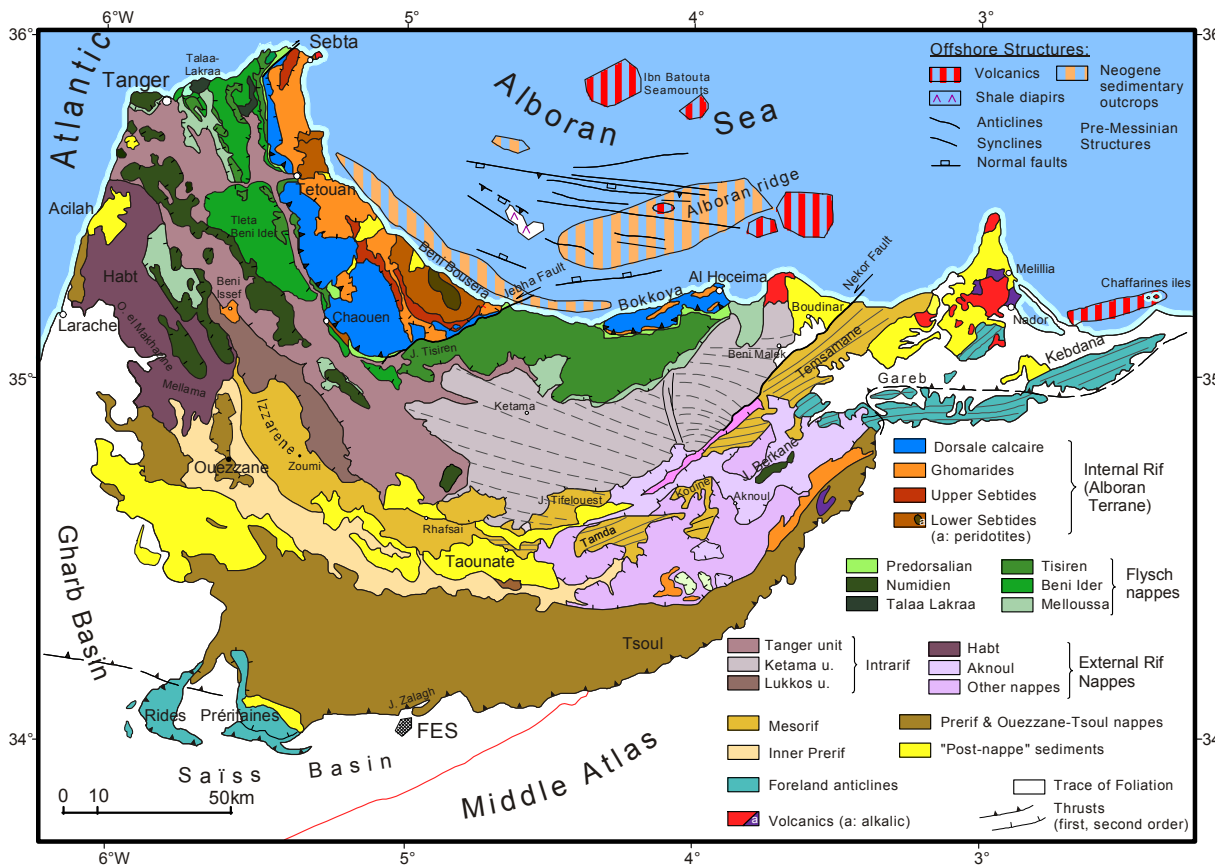
## ANNEXE I : GEOLOGIE DE LA ZONE

---

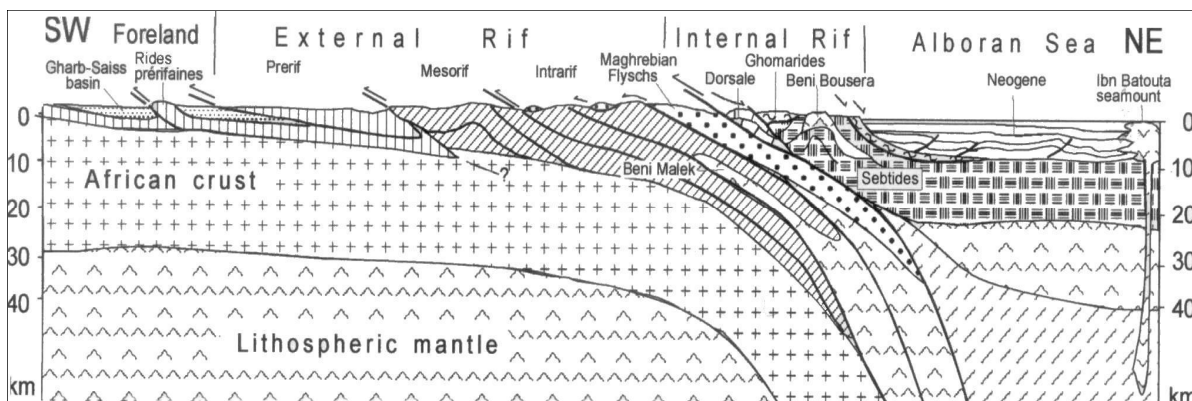


Profils sismiques montrants la structuration du bassin (in Amraoui, 2005)





Carte de situation géographiques des rides pré-rifaines et le bassin du Saïss



Modèle globale interprétative de la chaîne rifaine et le SW du bassin d'Alboran (d'après Chalouan et al, 2001; Michard et al., 2002)

### Référence bibliographique

Chalouan, A.; Michard A., Feinberg H., Montigny R. & Saddiqi O. (2001) - The Rif mountain building (Morocco) : a new tectonic scenario. – *Bull. Soc. géol. France*, 172, 5, 603–616.

Michard A., Chalouan A., Feinberg H., Goffe B & Montigny R. (2002).- How does the Alpine belt end between Spain and Morocco ? – *Bull. Soc. Géol. France*, 2002, t. 173, n° 1, 3-15

## ANNEXE II : STATISTIQUES

---





## Généralité sur la statistique

### A) Paramètres de position

Les paramètres de position d'une série statistique à une dimension permettent de situer les valeurs de la série sur l'intervalle de définition du caractère, plus généralement sur l'axe des réels.

Médiane, quartiles et percentiles (GROLIER, J., et al, 1997)

La médiane, les quartiles et percentiles d'une série statistique, à la différence du mode, se lisent sur l'histogramme des fréquences cumulées.

La médiane est la valeur du caractère qui partage la série statistique en deux ensembles d'égal effectif (N/2).

Les quartiles Q1 et Q3, partagent en trois parties la séries avec :

Le premier quartile Q1 est la valeur pour laquelle 25 % des valeurs lui sont inférieures et 75% supérieures.

Le troisième Quartile Q3 est l'individu ayant 75 % de l'échantillon en dessous de lui et 25 % de l'échantillon au dessus.

Moyenne

La moyenne d'un échantillon est le résumé statistique le plus connu, l'estimation de la moyenne  $\bar{X}$  d'un échantillon de taille N et pour un variable numérique X prenant les valeurs  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , est donnée par la formule suivante :

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

On rappelle les notions suivantes :

X : caractère étudié

N : taille de l'échantillon (nombre d'individus pour lesquels le caractère X est étudié),

$X_i$  : valeur du caractère étudié pris par l'individu n° i ( $M_i$  ; i varie de 1 à N) et

### B) Paramètre de dispersion

Les paramètres de dispersion d'une série statistique à une dimension permettent de définir la plus ou moins grande concentration des données.

L'étendue W

On appelle étendue d'une série statistique, l'intervalle compris entre la plus grande et la plus petite valeur de la série. Plus cet intervalle est grand plus la série est dispersée.

$$W = \text{Maximum}(Xi) - \text{Minimum}(Xi)$$

Variance et Ecart-type

### 2-1) Variance

La variance des valeurs prise par le caractère d'une série statistique est égale à la somme des carrés des écarts de ces valeurs à la moyenne divisée par la taille de l'échantillon. La variance possède la dimension du caractère élevée au carré.

La variance est la mesure de la moyenne des carrés des distances des points  $M_i$  au centre de gravité  $G$  de la série statistique ; en d'autres termes, la variance est la moyenne des normes des vecteurs  $GM_i$  élevées au carré.

La Variance  $\sigma^2$  d'une variable numérique  $X$  prenant les valeurs  $X_1, X_2, \dots, X_N$  sur la population étudiée est donnée par la formule :

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2$$

### 2-2) Ecart-type

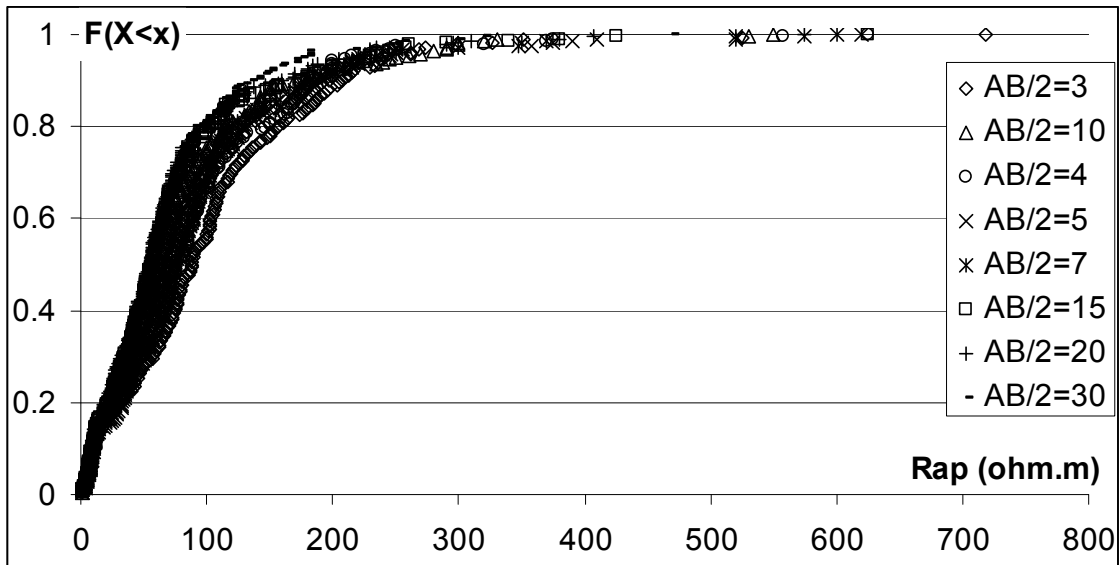
L'écart-type des valeurs prises par le caractère (résistivité électrique) d'une série statistique constituée par à une dimension est égal à la racine carrée de leur variance. L'écart-type qui a donc la dimension de la résistivité électrique est donné en ohm.m alors que la variance est en  $(\text{ohm.m})^2$ .

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}$$

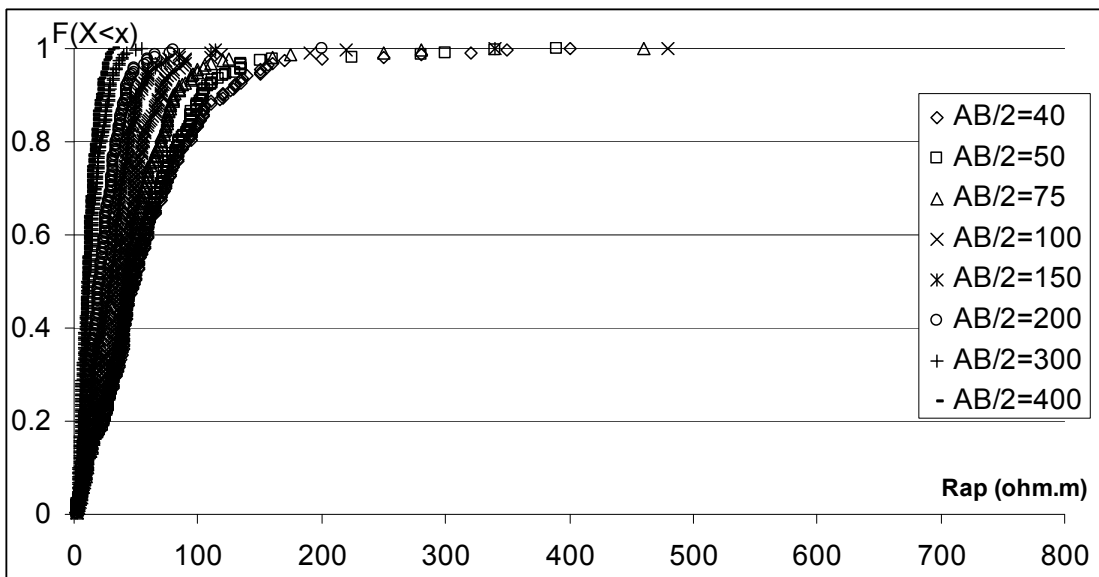
### 3) Le coefficient de variation :

Il est déterminé par la division de l'écart-type par la moyenne, il est déterminé pour l'estimation de la variance par rapport à la moyenne des résistivités. Il traduit la normalisation de l'écart-type par la moyenne et permet de comparer la dispersion de deux séries indépendamment des valeurs de leur moyenne.

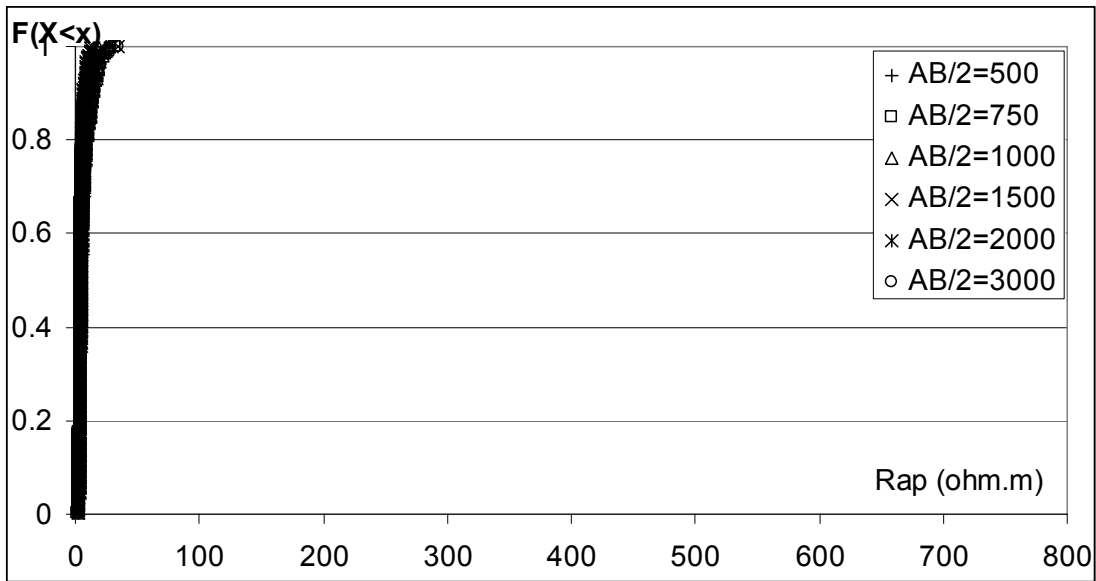
Fonctions de répartition



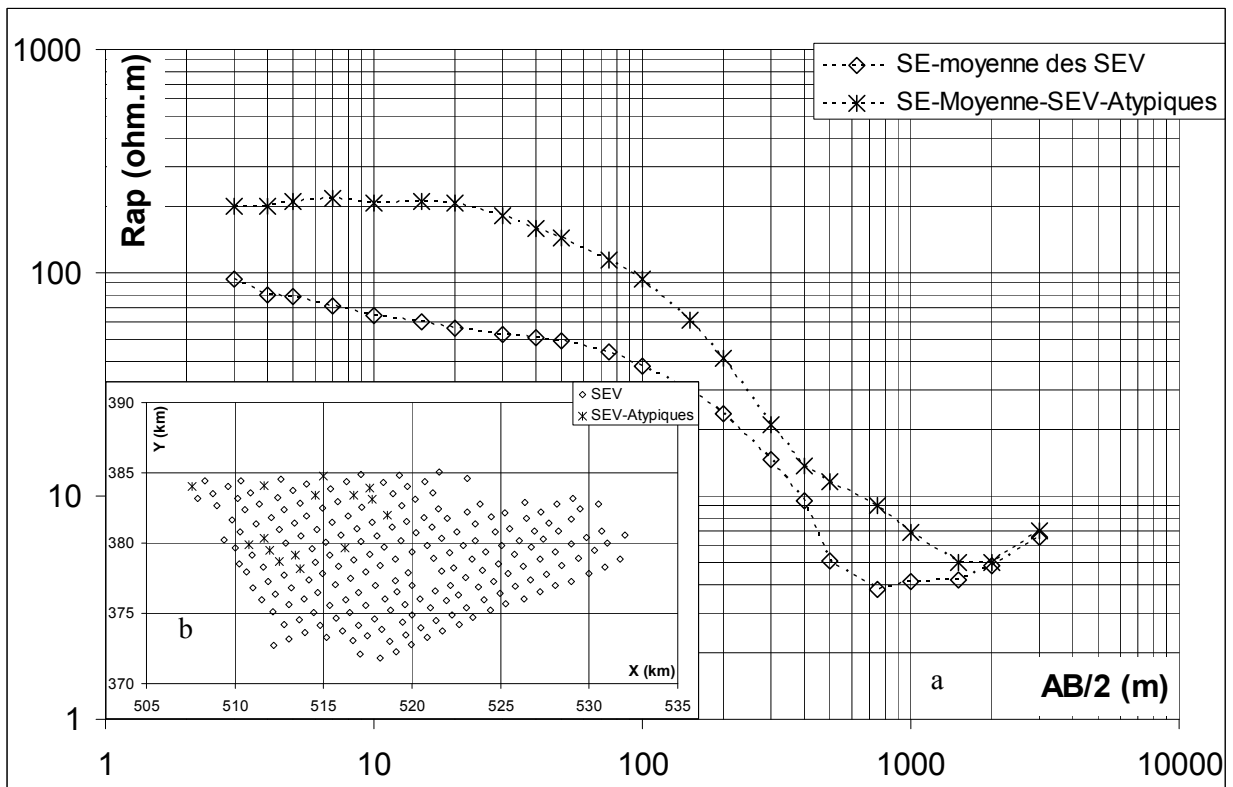
Fonction de répartition pour les écartements  $AB/2 = 3$  à  $AB/2 = 30$



Fonction de répartition pour les écartements  $AB/2 = 40$  à  $AB/2 = 400$



Fonction de répartition pour les écartements  $AB/2 = 500$  à  $AB/2 = 3000$



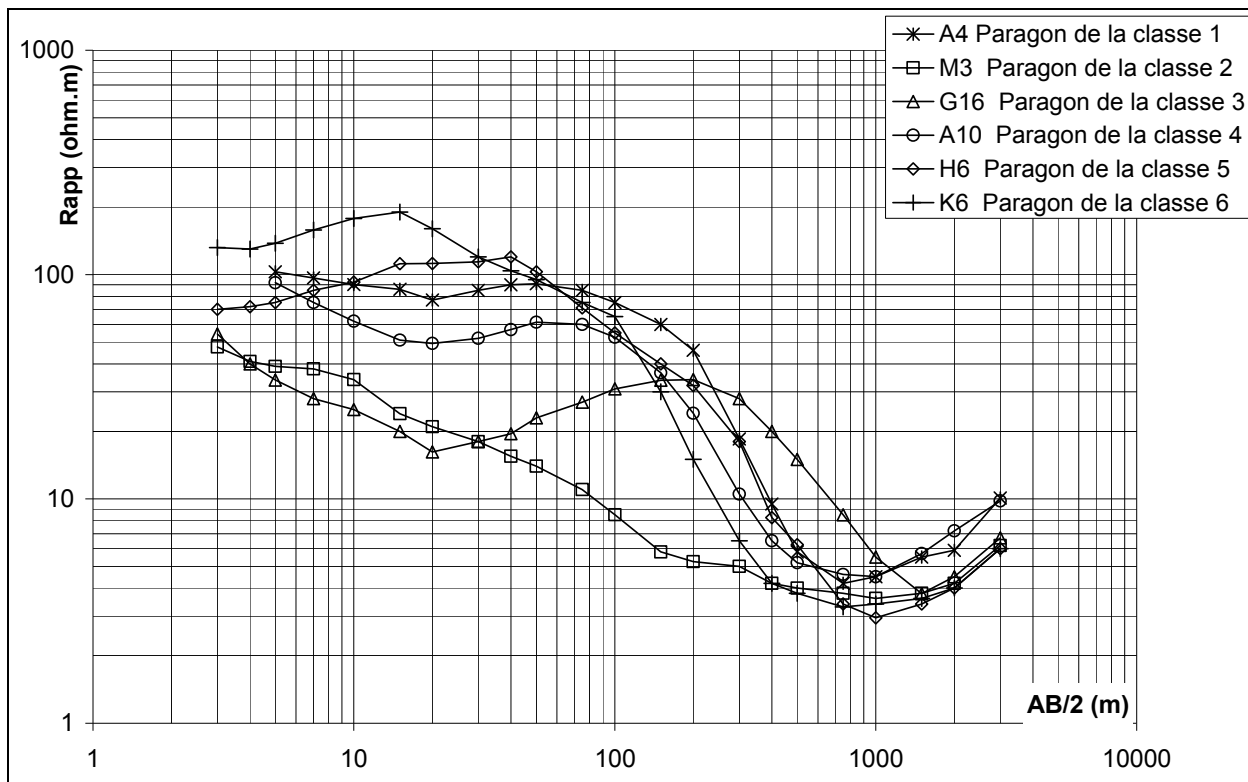
*Sondages moyens de tous les sondages ainsi que le sondage moyen des sondages parangons(a) et leur position sur cartes (b).*

les écartement d'AB/2	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5	Axe 6	Axe 7	Axe 8	Axe 9	Axe 10	Axe 11	Axe 12	Axe 13	Axe 14	Axe 15	Axe 16	Axe 17	Axe 18	Axe 19	Axe 20	Axe 21	Axe 22
AB/2=3	0.38	0.43	0.44	0.68	0.87	0.96	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 4	0.52	0.56	0.57	0.82	0.92	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 5	0.62	0.65	0.65	0.88	0.91	0.91	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 7	0.69	0.71	0.71	0.89	0.89	0.93	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 10	0.74	0.75	0.75	0.86	0.90	0.95	0.95	0.95	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 15	0.83	0.83	0.84	0.87	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 20	0.84	0.85	0.86	0.86	0.97	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 30	0.83	0.85	0.87	0.90	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 40	0.76	0.82	0.84	0.92	0.96	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 50	0.69	0.79	0.81	0.94	0.95	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 75	0.47	0.75	0.75	0.91	0.92	0.95	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 100	0.27	0.78	0.78	0.89	0.95	0.96	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 150	0.07	0.85	0.85	0.87	0.96	0.97	0.97	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 200	0.01	0.87	0.88	0.88	0.94	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 300	0.03	0.79	0.85	0.92	0.93	0.95	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 400	0.14	0.67	0.84	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 500	0.22	0.51	0.82	0.95	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 750	0.20	0.22	0.81	0.88	0.92	0.96	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 1000	0.06	0.11	0.93	0.93	0.94	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 1500	0.02	0.27	0.86	0.91	0.96	0.96	0.96	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 2000	0.06	0.34	0.79	0.87	0.94	0.96	0.96	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 3000	0.12	0.36	0.63	0.74	0.79	0.83	0.88	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Coordonnées des variables sur les nouveaux axes pour les 22 variables

les écartement d'AB/2	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5	Axe 6	Axe 7	Axe 8	Axe 9	Axe 10	Axe 11	Axe 12	Axe 13	Axe 14	Axe 15
AB/2=3	0.33	0.54	0.79	0.93	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 4	0.47	0.69	0.89	0.95	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 5	0.58	0.77	0.91	0.91	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 7	0.66	0.82	0.88	0.91	0.97	0.98	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 10	0.72	0.85	0.85	0.94	0.95	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 15	0.84	0.89	0.89	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 20	0.86	0.87	0.92	0.97	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 30	0.86	0.86	0.96	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 40	0.81	0.84	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 50	0.74	0.83	0.96	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 75	0.55	0.84	0.88	0.96	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 100	0.38	0.89	0.89	0.96	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 150	0.17	0.88	0.96	0.96	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 200	0.07	0.80	0.96	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AB/2 = 300	0.00	0.57	0.80	0.93	0.96	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Coordonnées des variables sur les nouveaux axes pour les 15 variables



Sondage paragon pour chaque classe

## ANNEXE III: GEOSTATISTIQUE

---





## Définitions

-Variogramme : le variogramme est la fonction la plus utilisée en géostatistique pour décrire la continuité des caractéristiques mesurées (résistivité électrique). Le variogramme sert à quantifier la corrélation entre deux mesures des résistivités électriques situées l'une près de l'autre, il est définie par la formule ci-dessous

$$\gamma(x, x + h) = 0.5 * Var(Z(x) - Z(x + h))$$

Où

X : la mesure de la résistivité en un point x

X+h : la mesure de la résistivité en un point distant de h du point X

Le Variogramme  $\gamma(h)$  ne dépend pas de la localisation de notre point de mesure (X), seulement de la distance h entre une paire de points de mesure. La fonction du variogramme est une fonction croissante en fonction de h, et pour les modèles du variogrammes montrant un seuil on distingue :

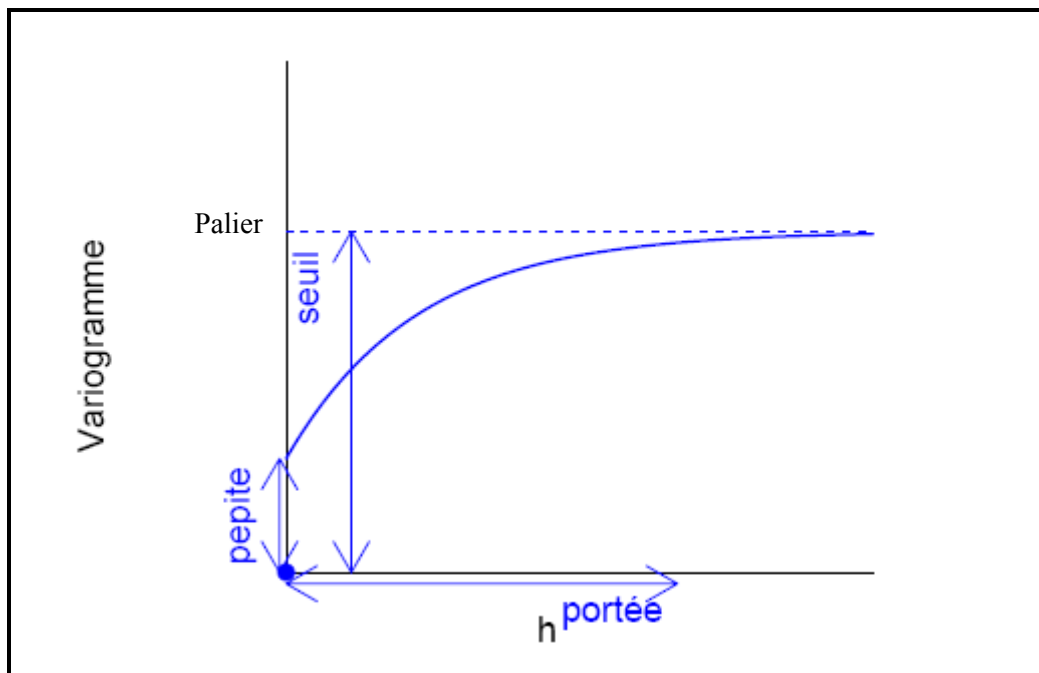


Schéma type d'un variogramme

La portée a : c'est la distance où deux mesures des résistivités ne se ressemblent pas et donc non corrélable ; elle caractérise l'écart entre sites de mesures au-delà duquel les dépendances entre mesures du processus sont nulles et la valeur du variogramme correspond à la variance.

Seuil (Palier) : c'est la variance de la résistivité, il correspond aux écarts les plus grands entre deux mesures différentes. Ce paramètre suscite un intérêt très important dans l'analyse de la régularité des variations locales. En effet, si le palier d'un variogramme est infini, alors le processus des variations locales n'est pas stationnaire.

Effet de pépite : c'est une variation à une faible échelle, et qui peut être due à des erreurs de mesure, à l'erreur de localisation ou même à l'analyse.

La modélisation des variogrammes se base sur le calcul d'un modèle, ce dernier correspond à l'expression analytique que l'on ajuste le mieux possible aux points des variogrammes expérimentales.

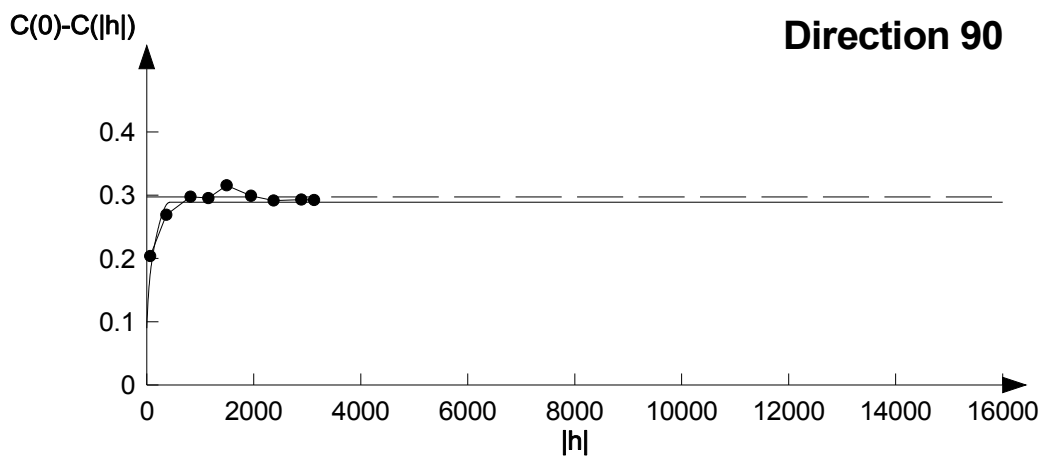
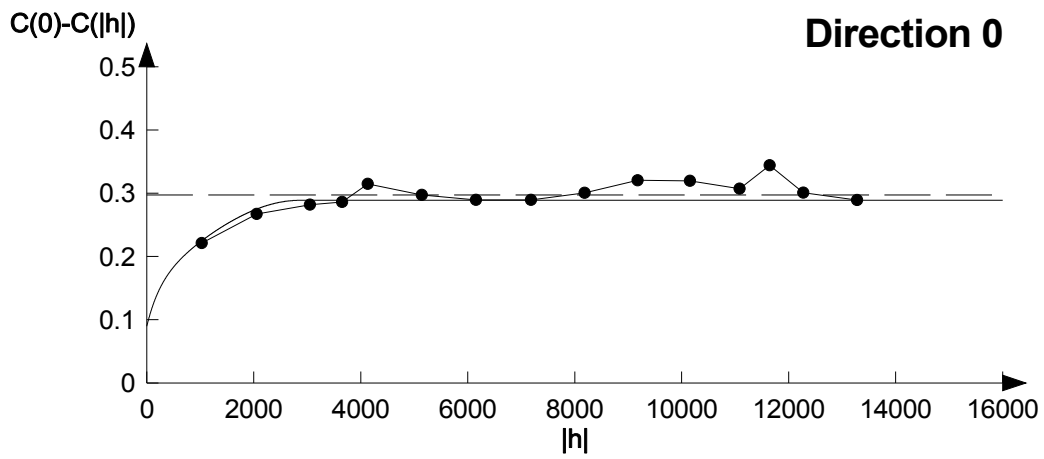
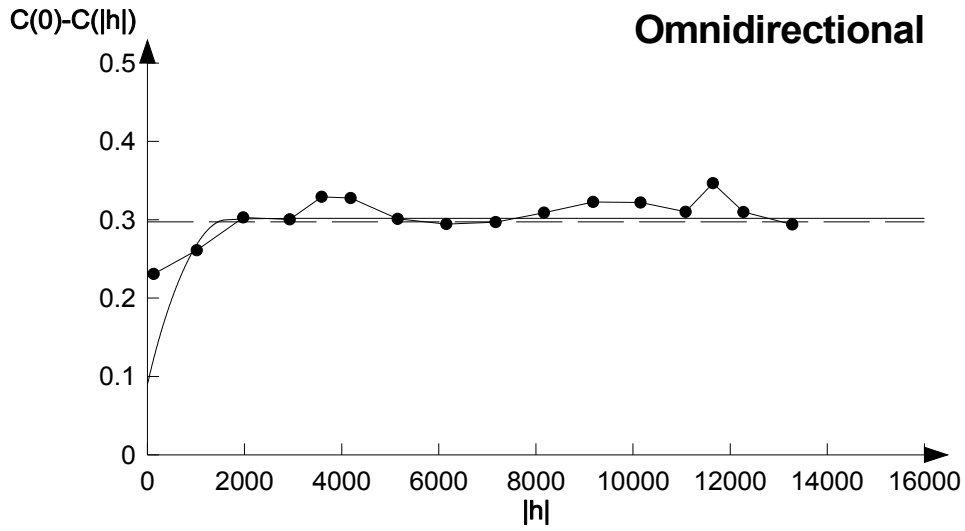
Les modèles les plus utilisés dans notre cas sont

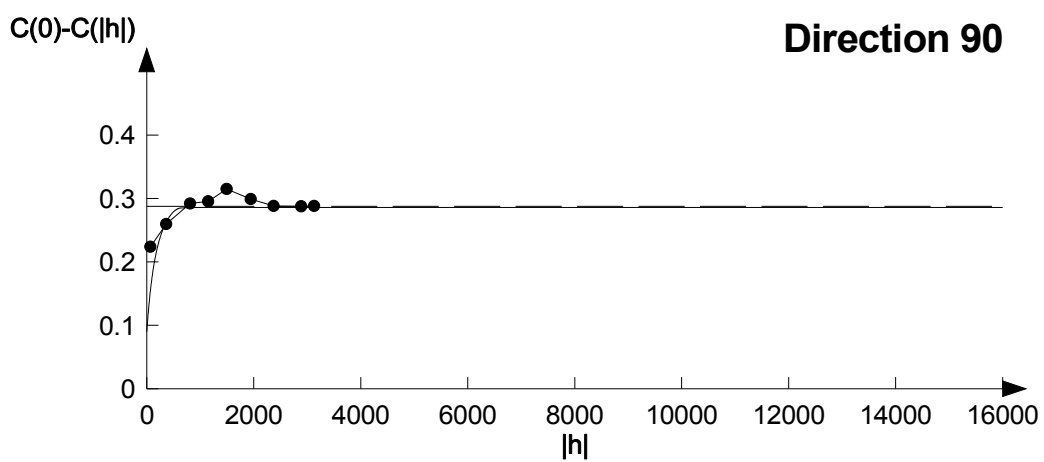
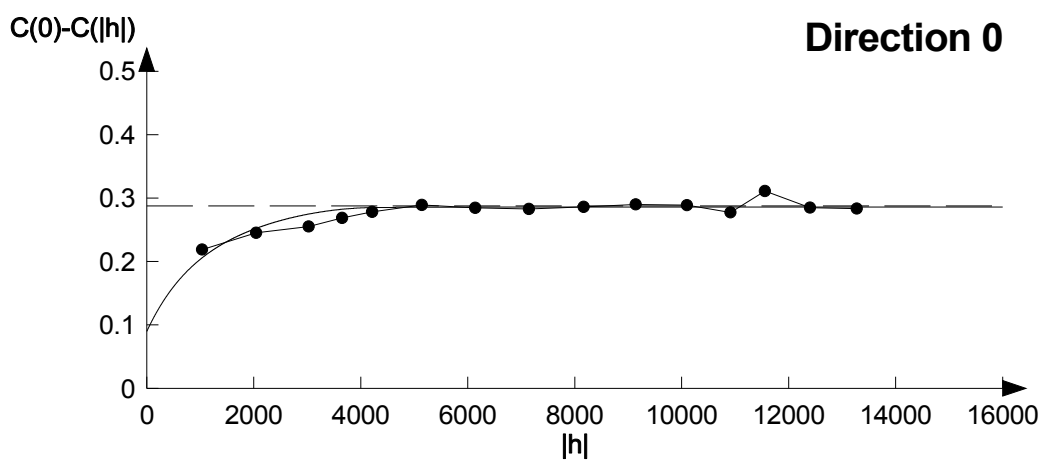
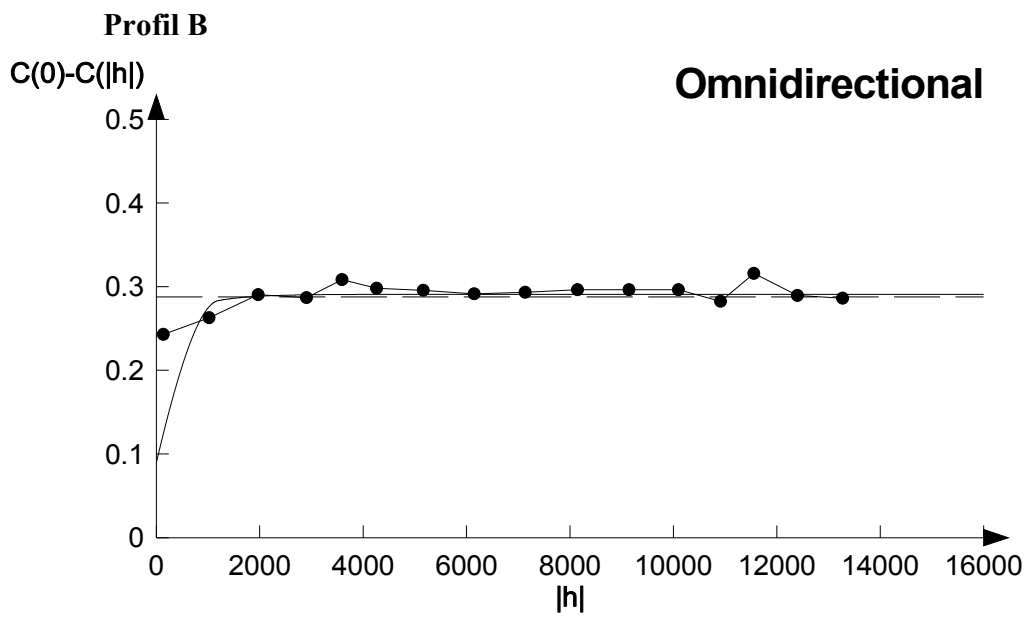
- Effet de pépite
- Modèle sphérique
- Modèle exponentiel
- Modèle gaussien

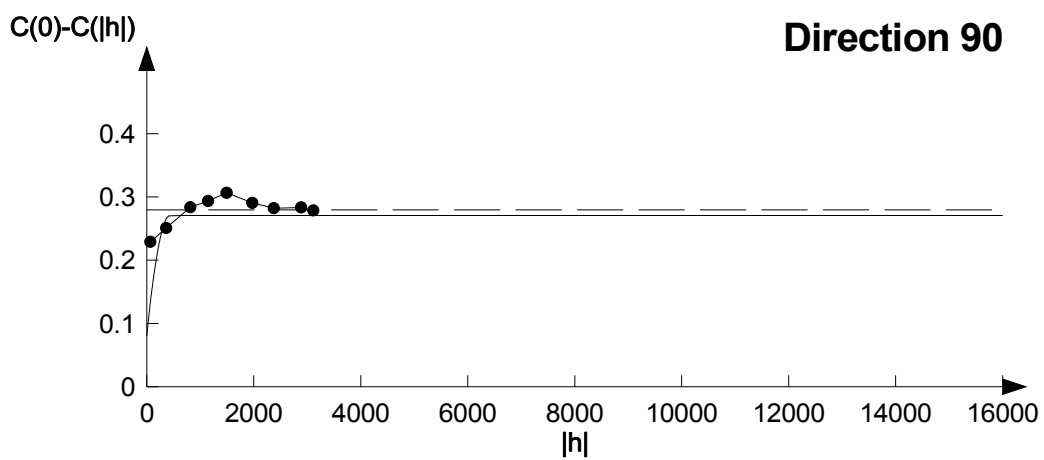
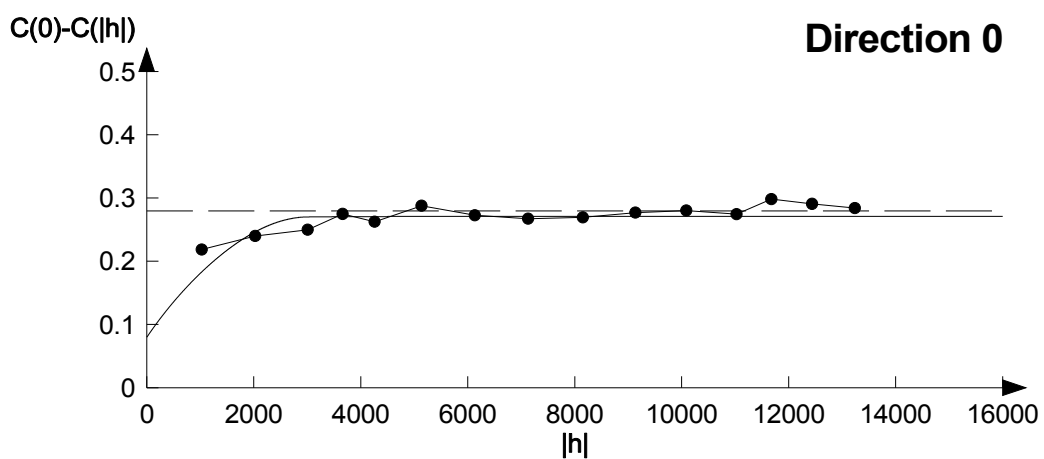
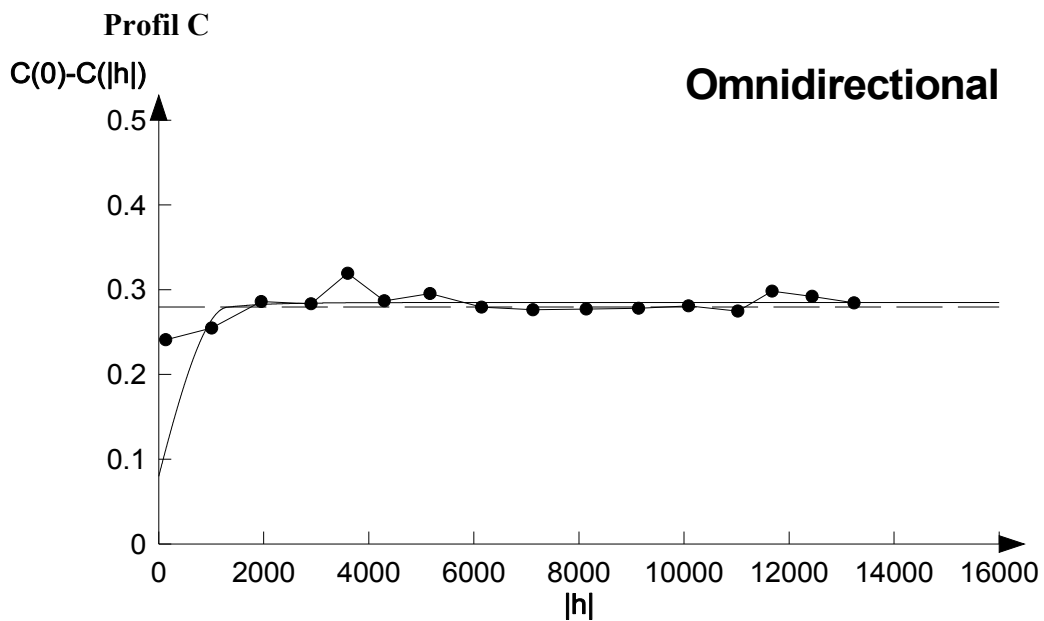
Le Krigeage est

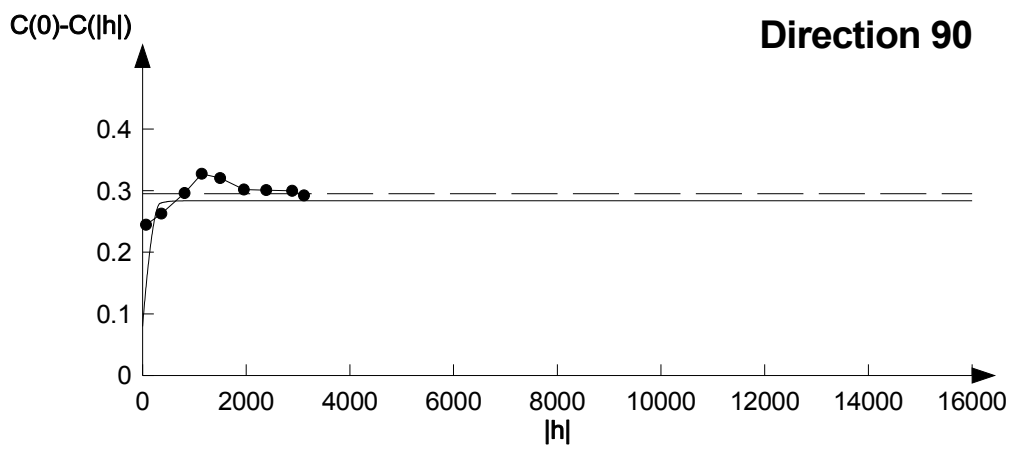
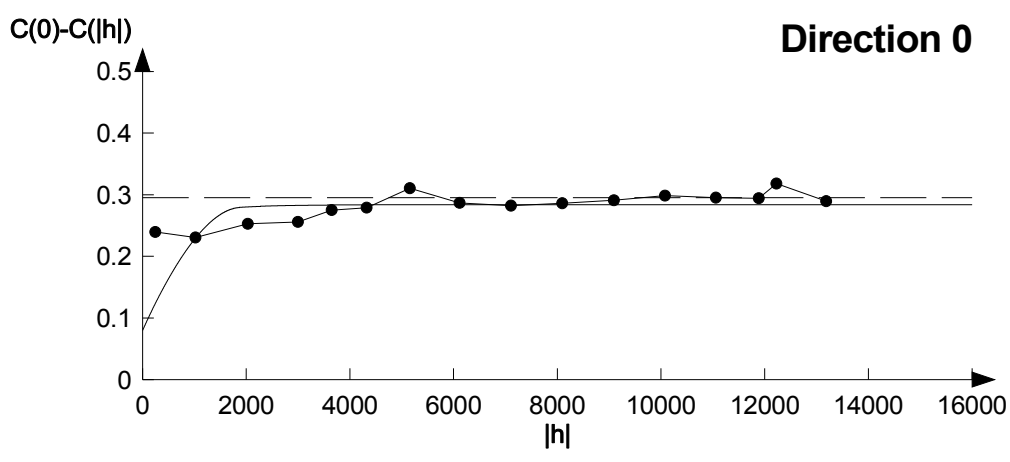
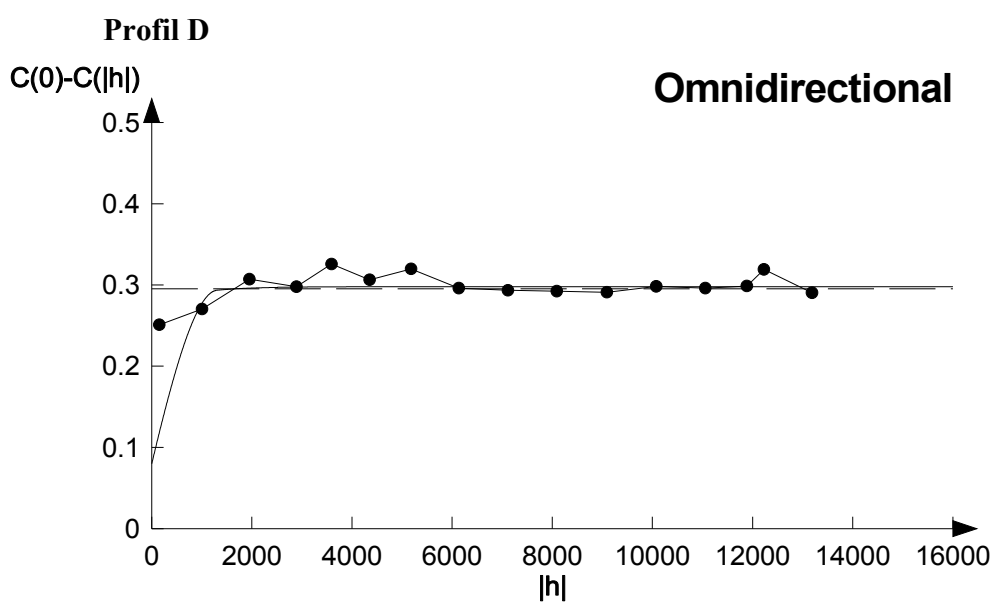
variogrammes expérimentaux des profils

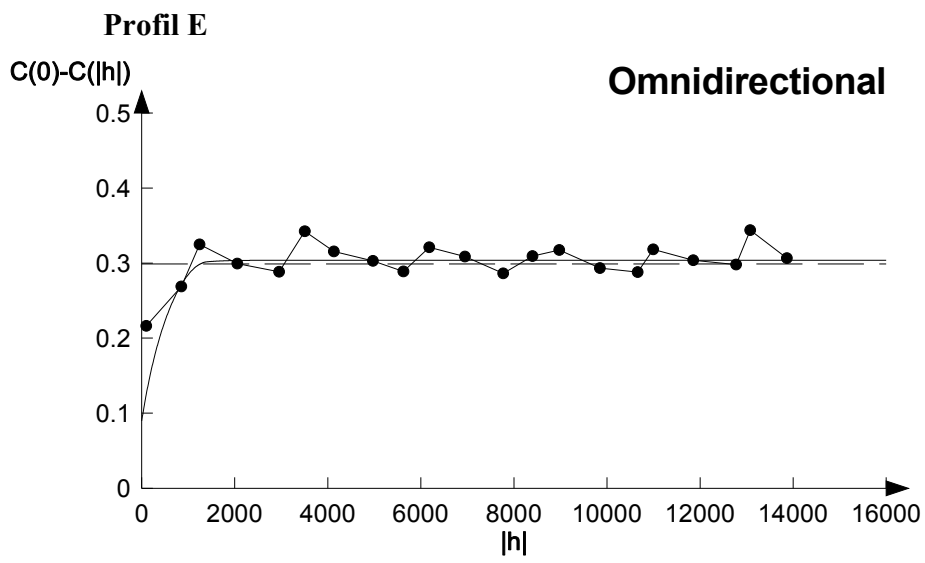
**1) Profil A**



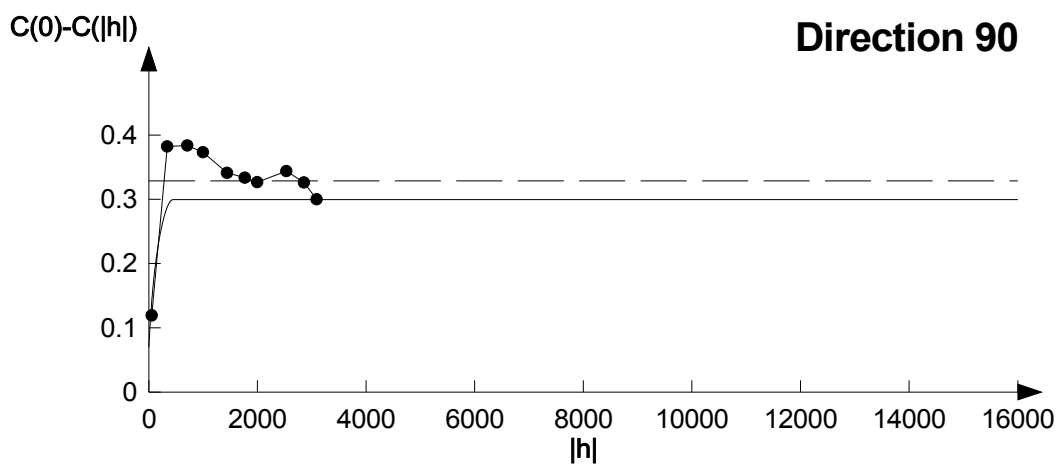
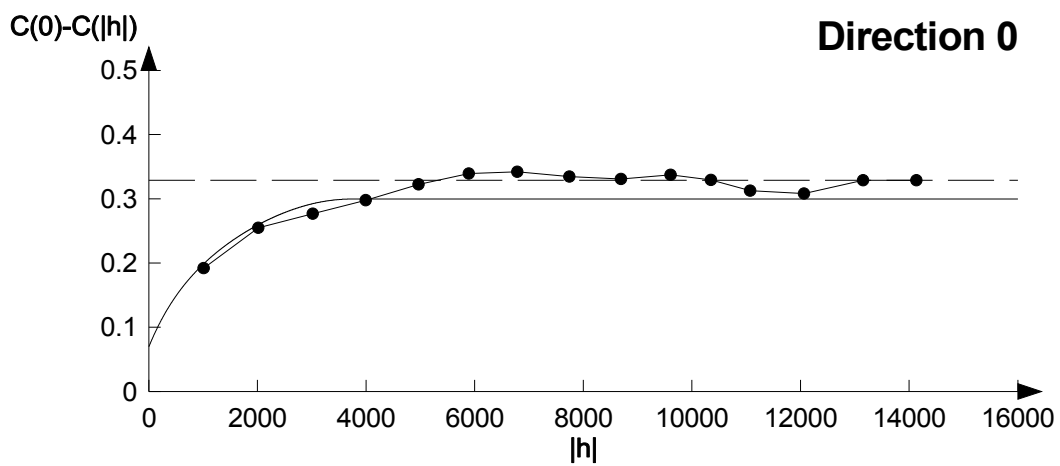
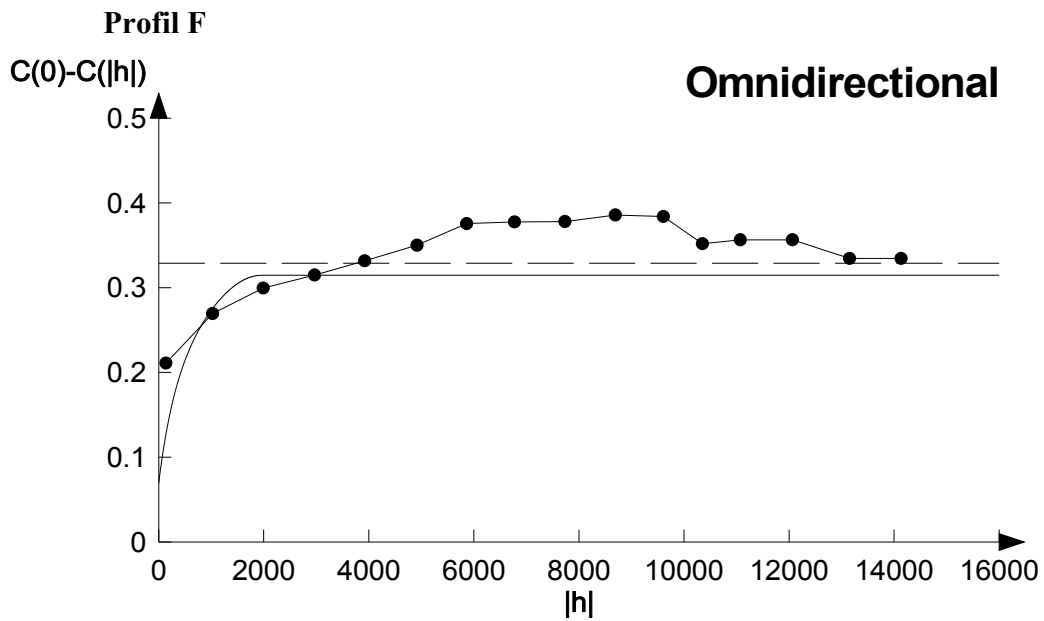


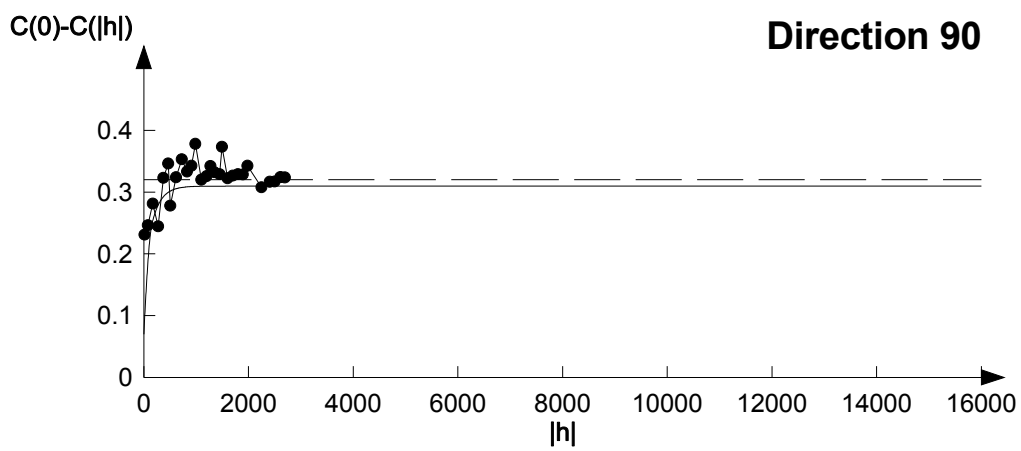
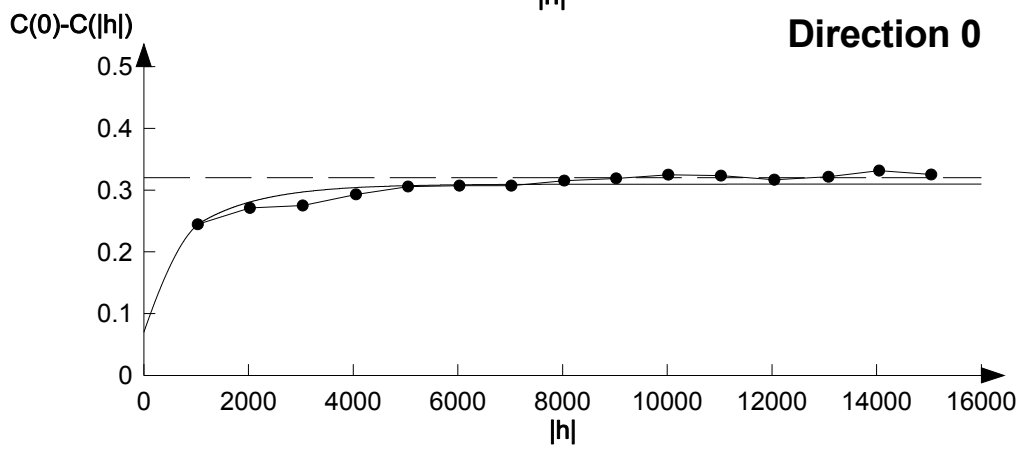
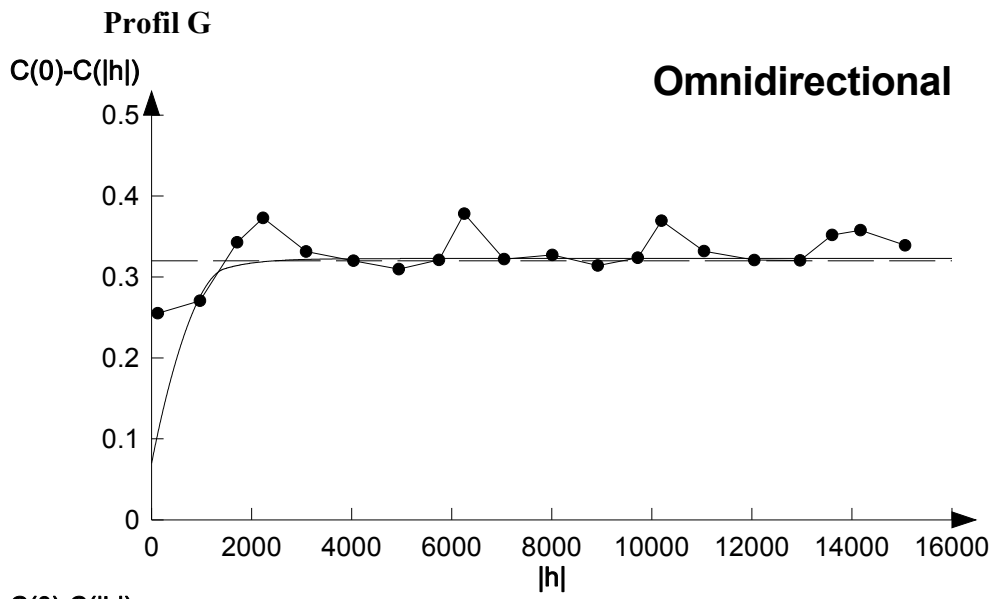


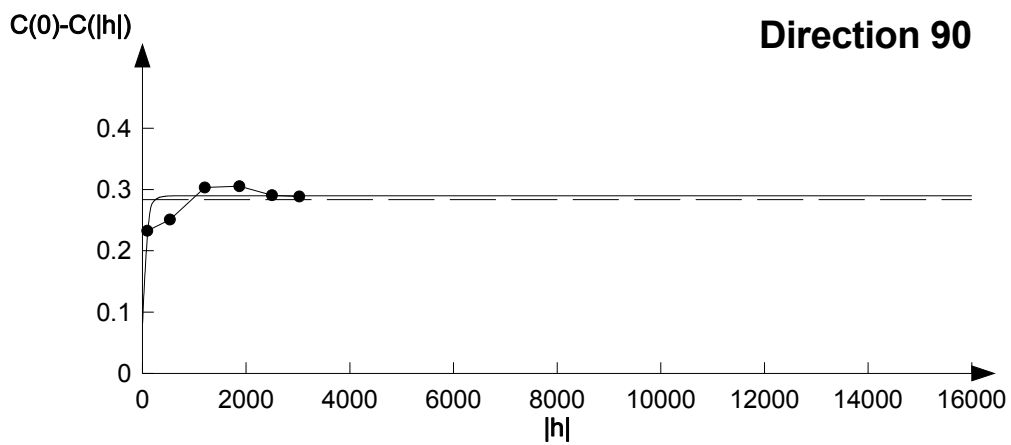
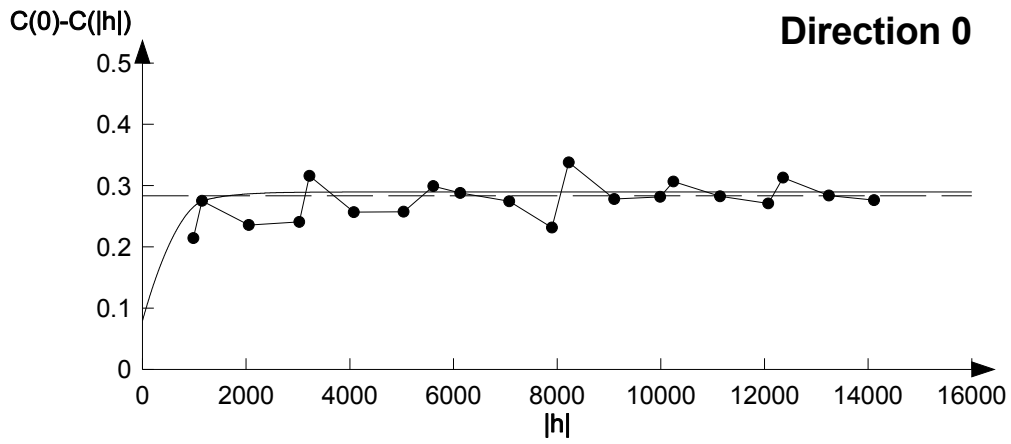
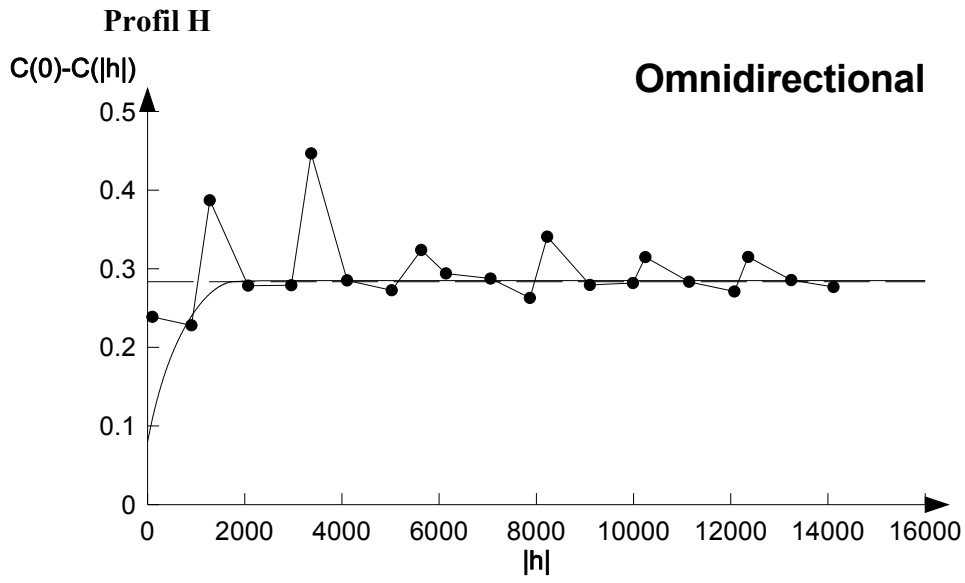


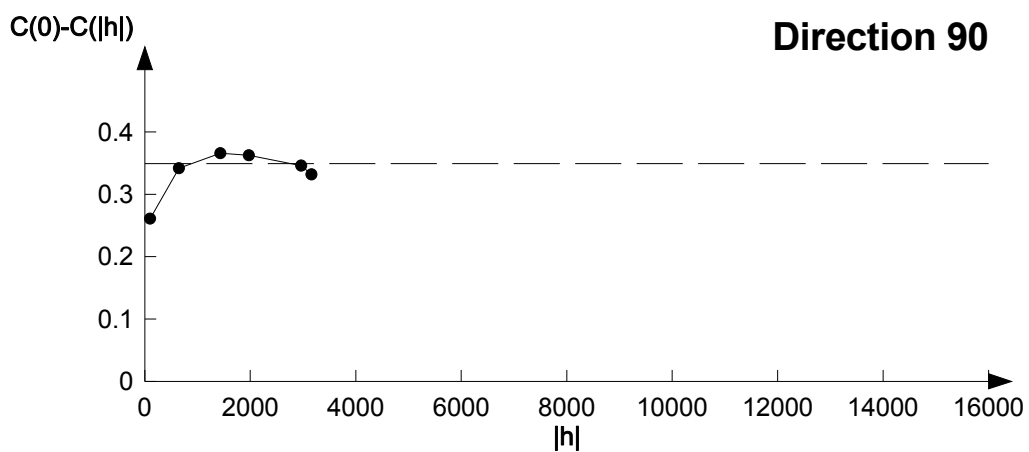
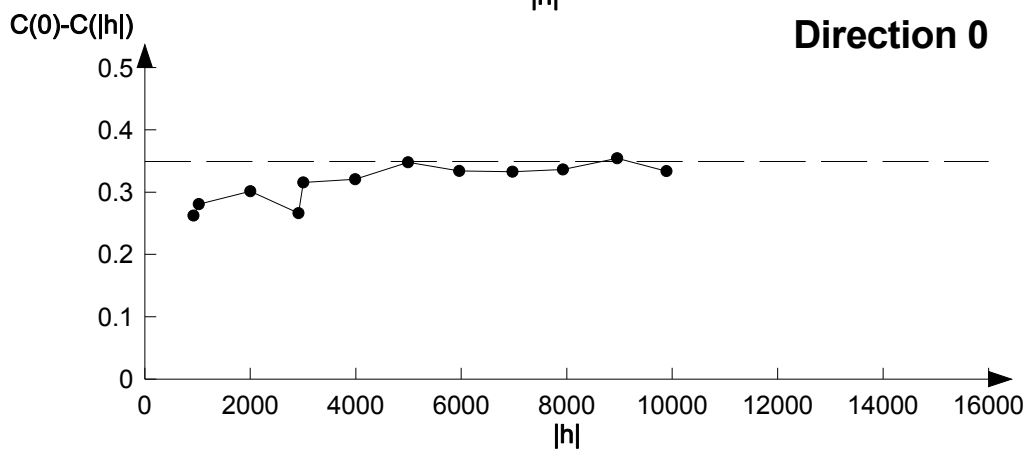
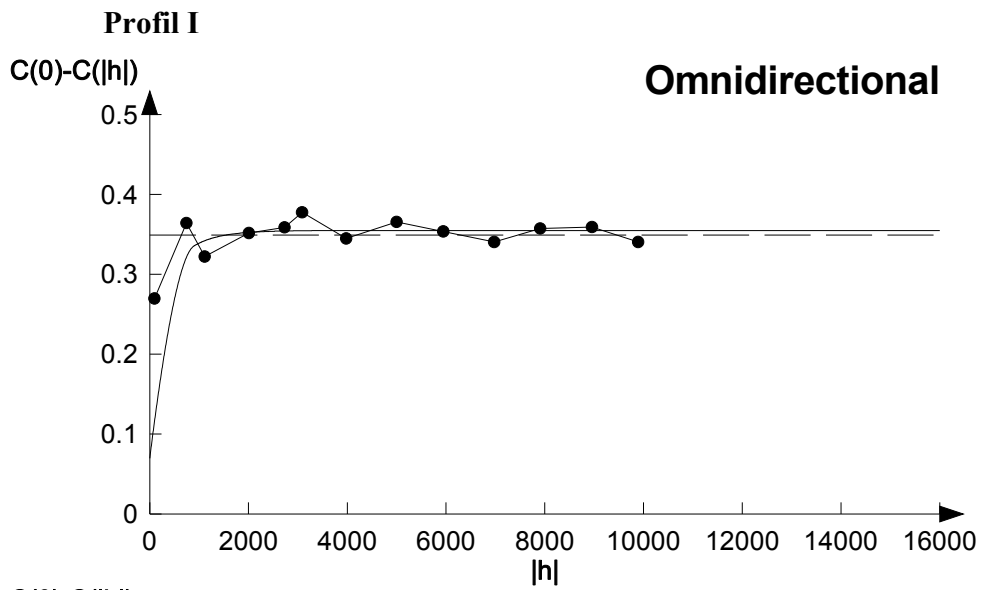


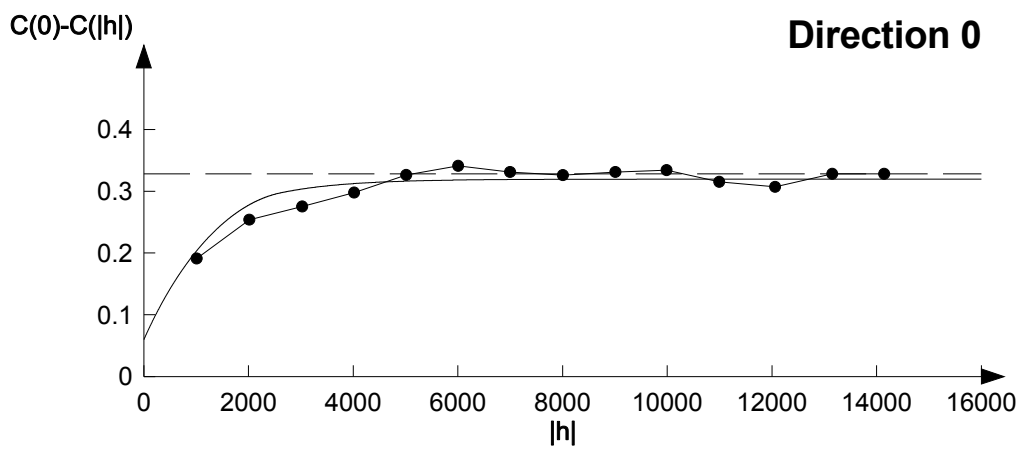
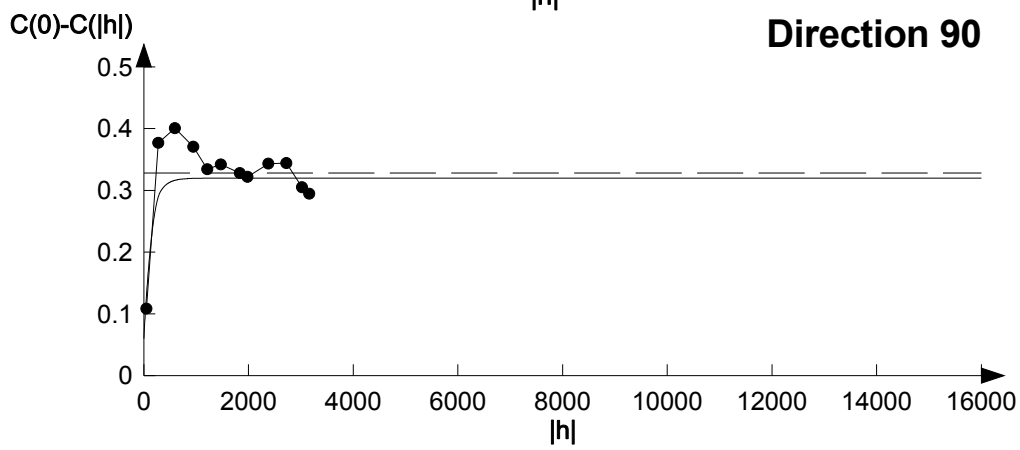
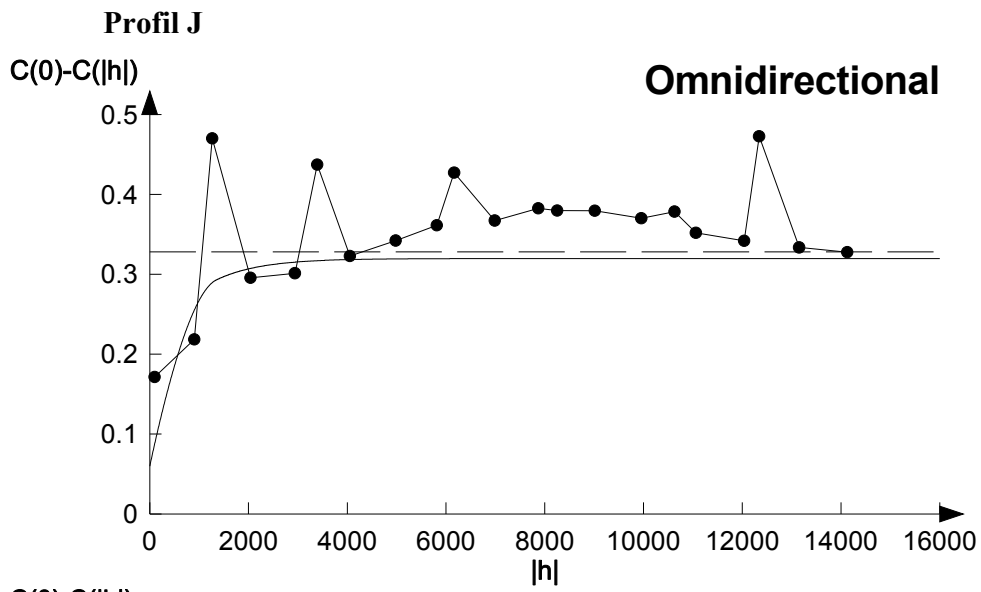




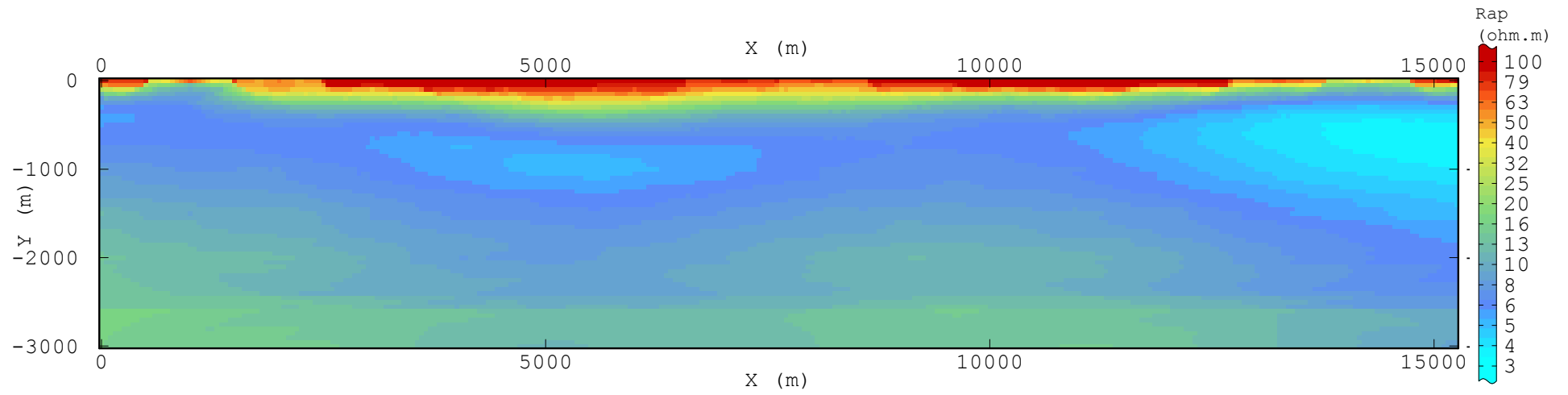




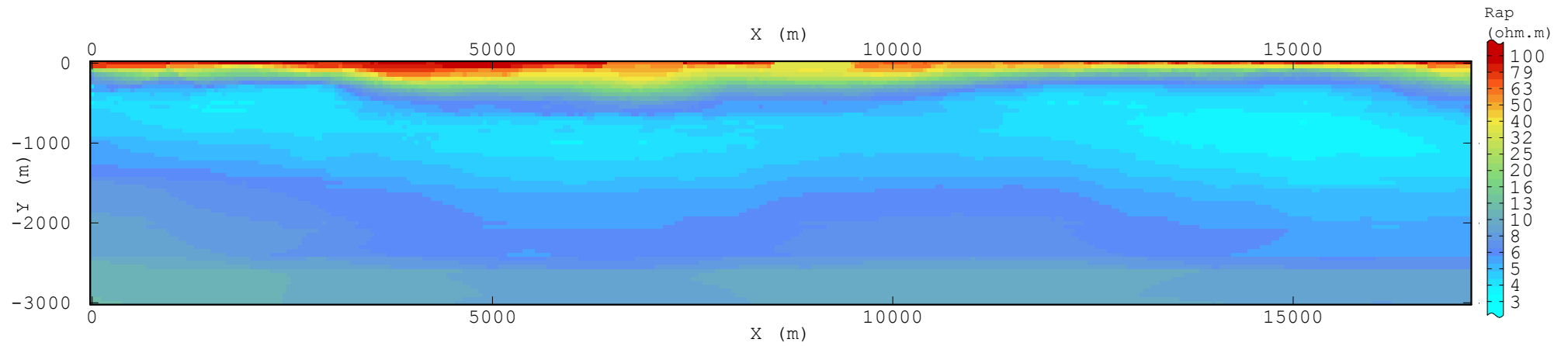




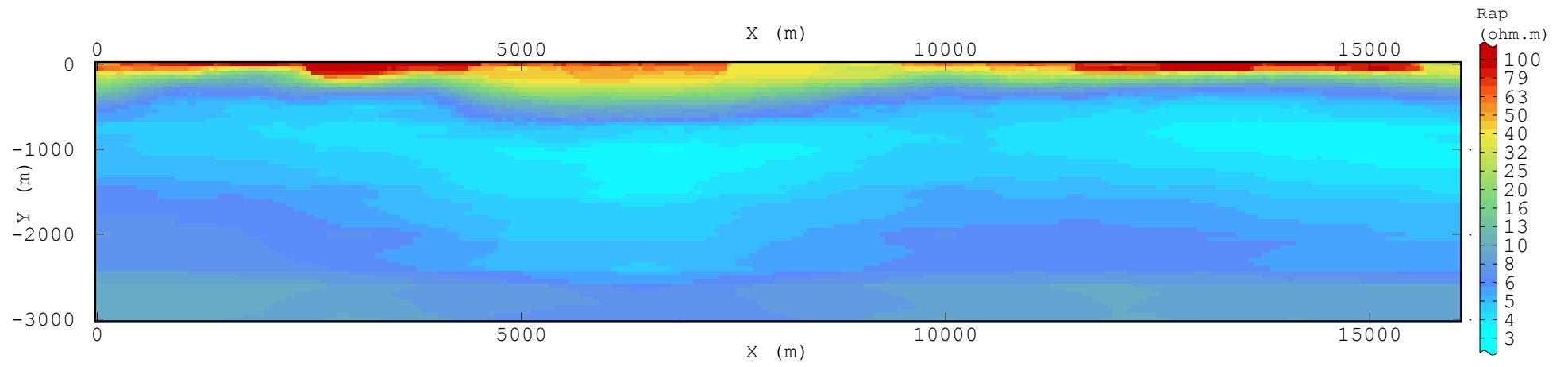
**Profil A**



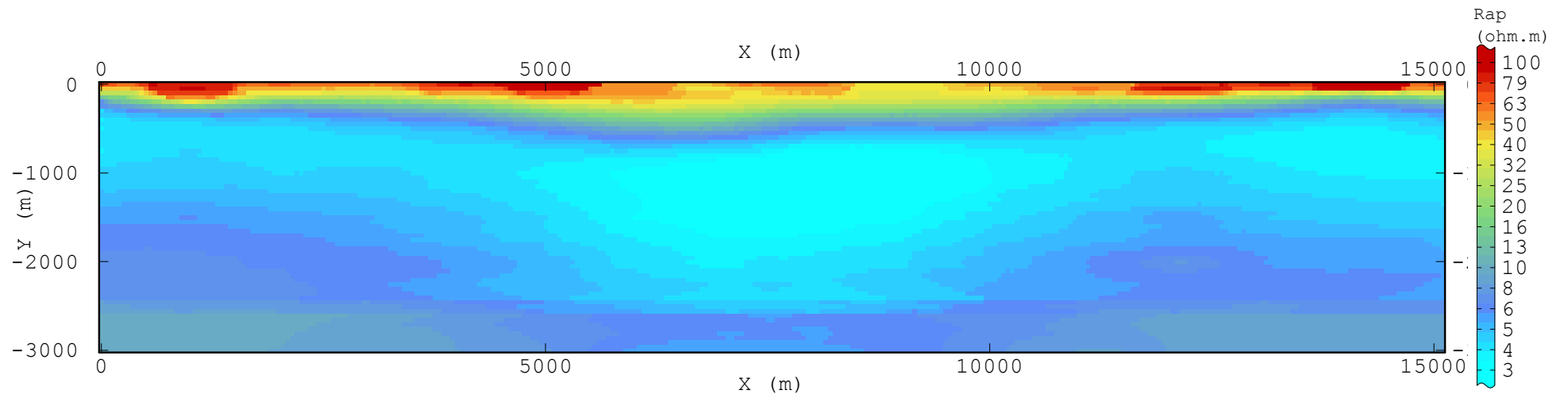
**Profil B**



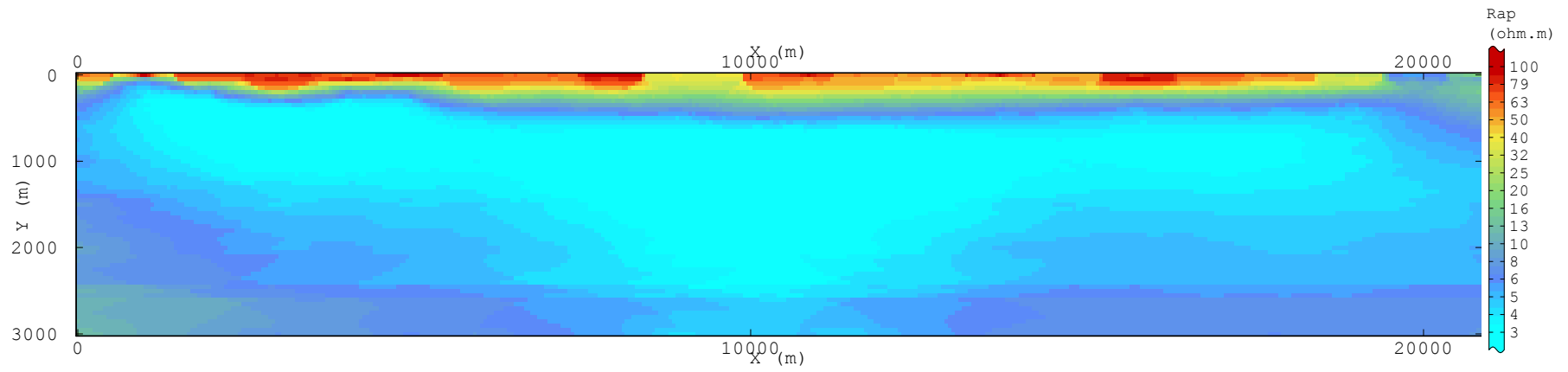
**Profil C**



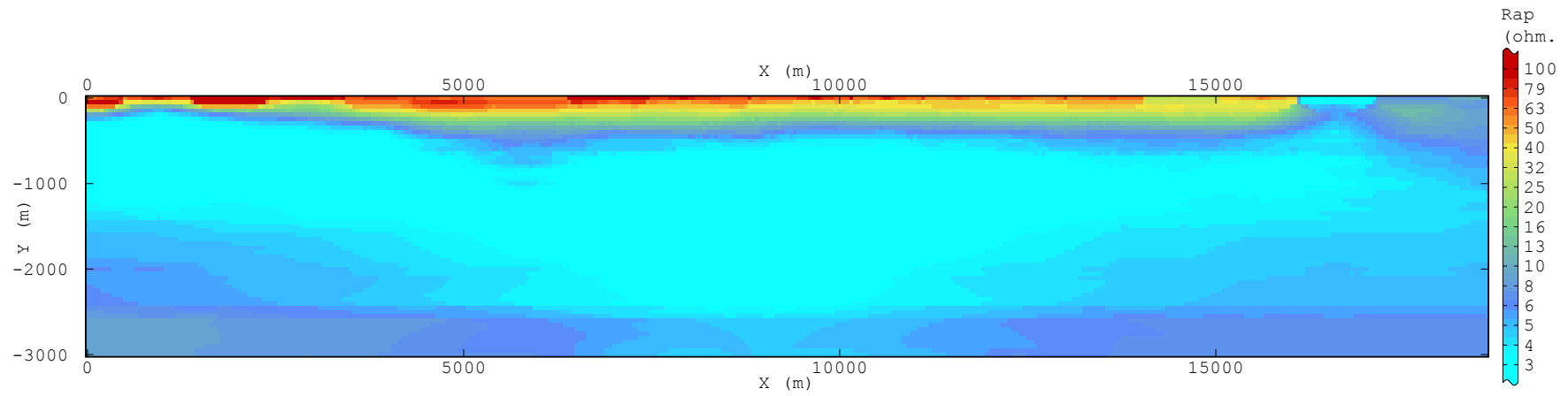
**Profil D**



### Profil E

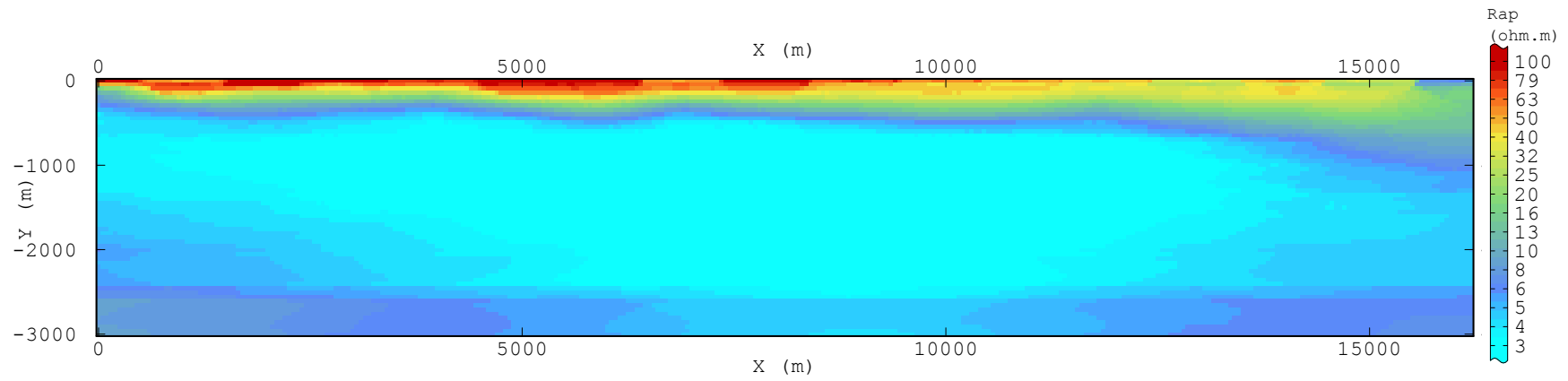


### Profil F

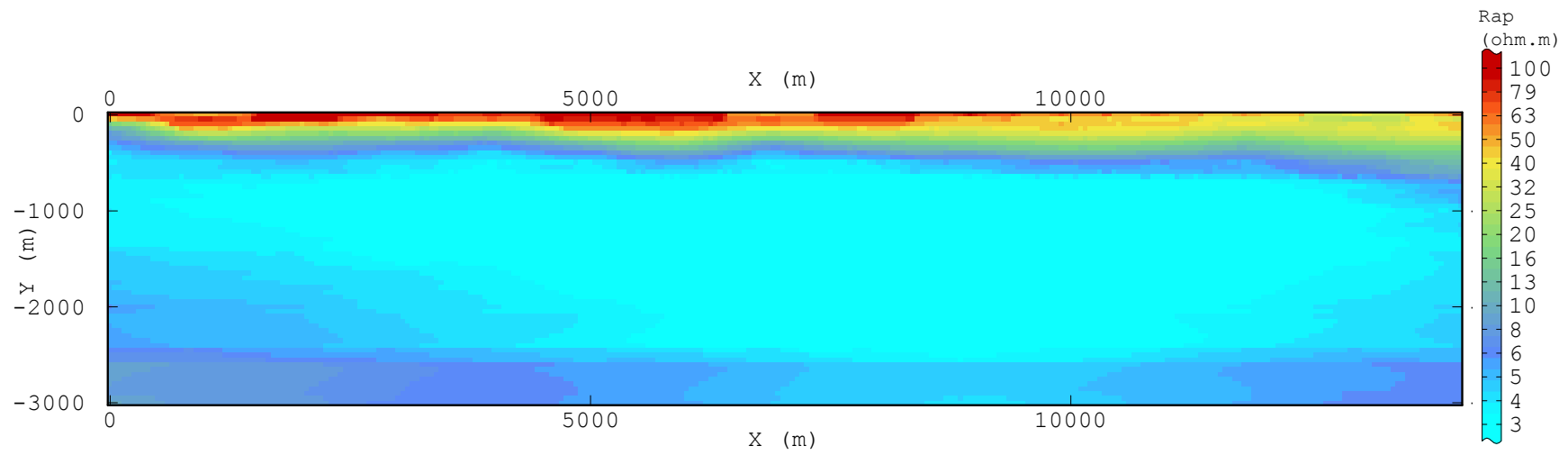




### Profil G



### Profil H



### Profil I

### Profil J

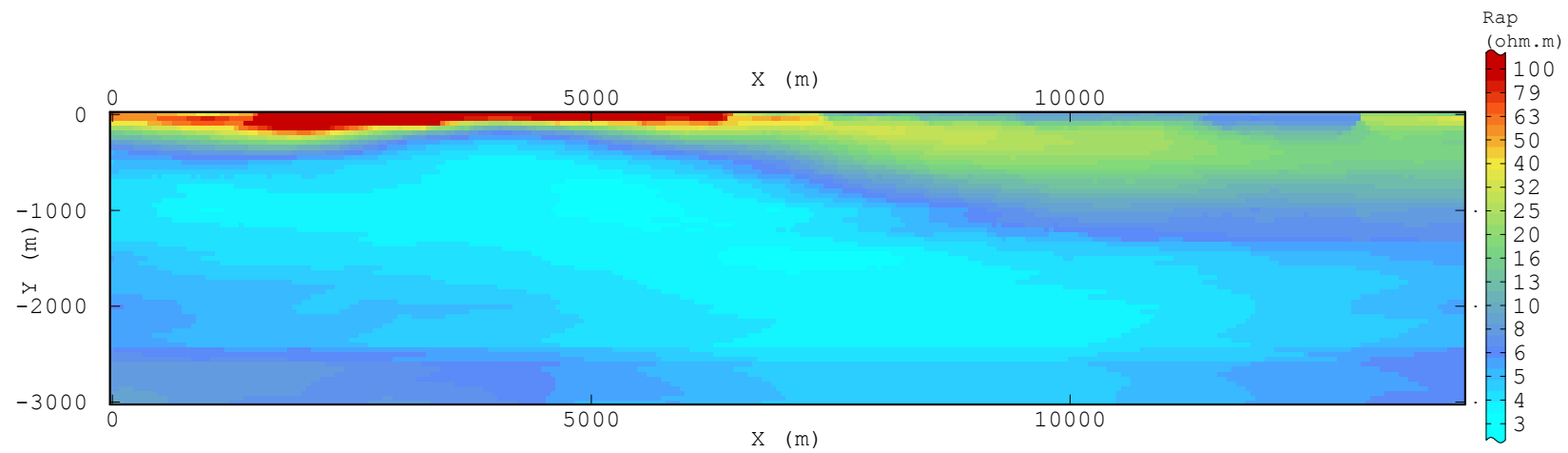
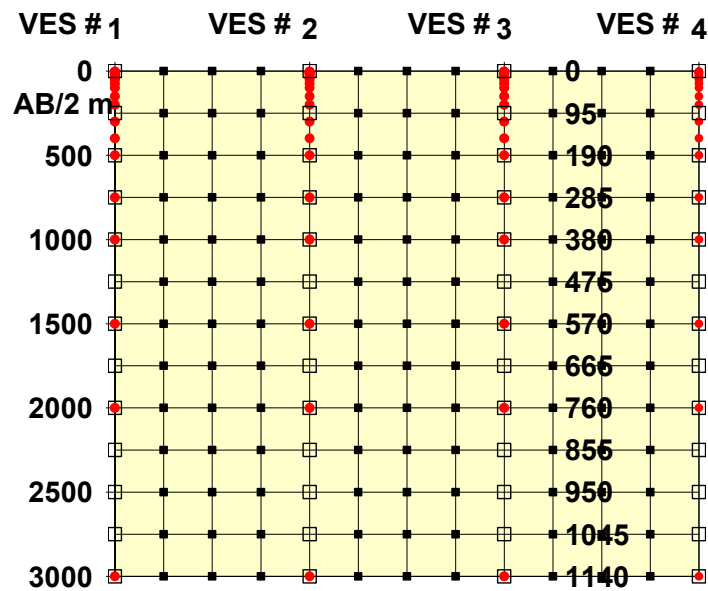


Figure 83: Cartes de krigage des différents profils

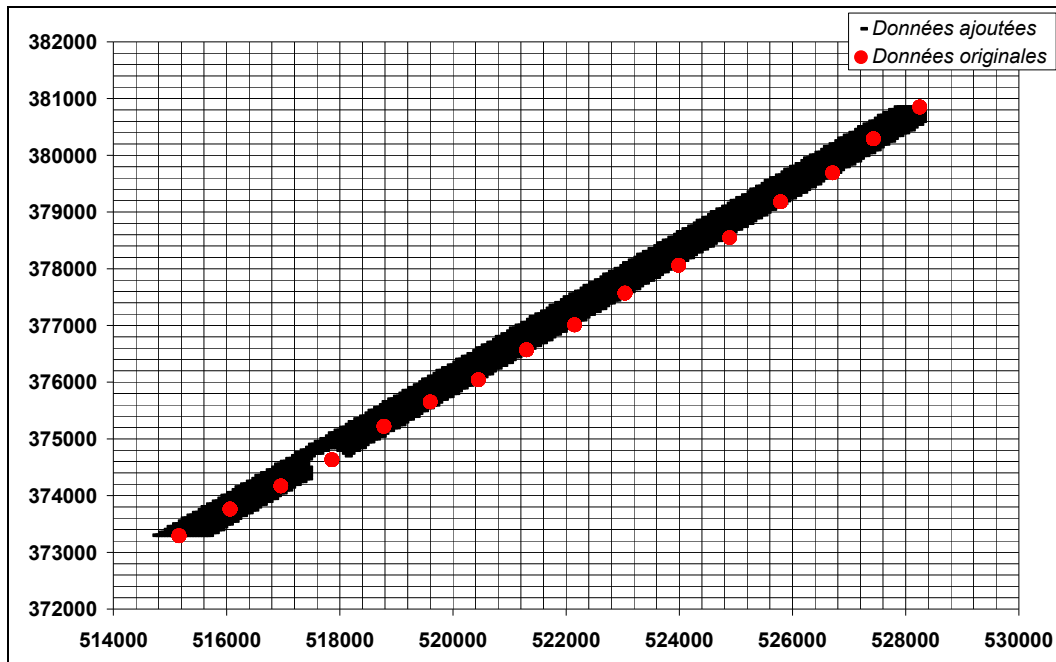
## Estimation des résistivités apparentes

La géostatistique est une étape essentielle, elle permet d'obtenir une estimation des données en tenant compte un principe de corrélation spatiale par krigeage (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Après la calcul et la modélisation des variogrammes, on a obtenue tout les paramètres nécessaires comme modèle pour un krigeage plus fiable. Après l'obtention des images krigeés 2D horizontale pour chaque pseudo-profondeurs étudiées on a sélectionnées a partir des données extrait de ses images en fonction de X et Y les données les plus proches du profil étudiier toute en se basons sur le critère d'une distance varie entre 150 m à 250 m du point de mesure des SEV d'origine (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Une fois cette nouvelle bande de données obtenues on refaire tout les étapes géostatistiques faites auparavant. Ainsi on obtient une nouvelles données extrait de krigeage des carte résultent de l'assemblage des données des profils d'origine et les bandes sélectionnées pour des cartes verticaux.



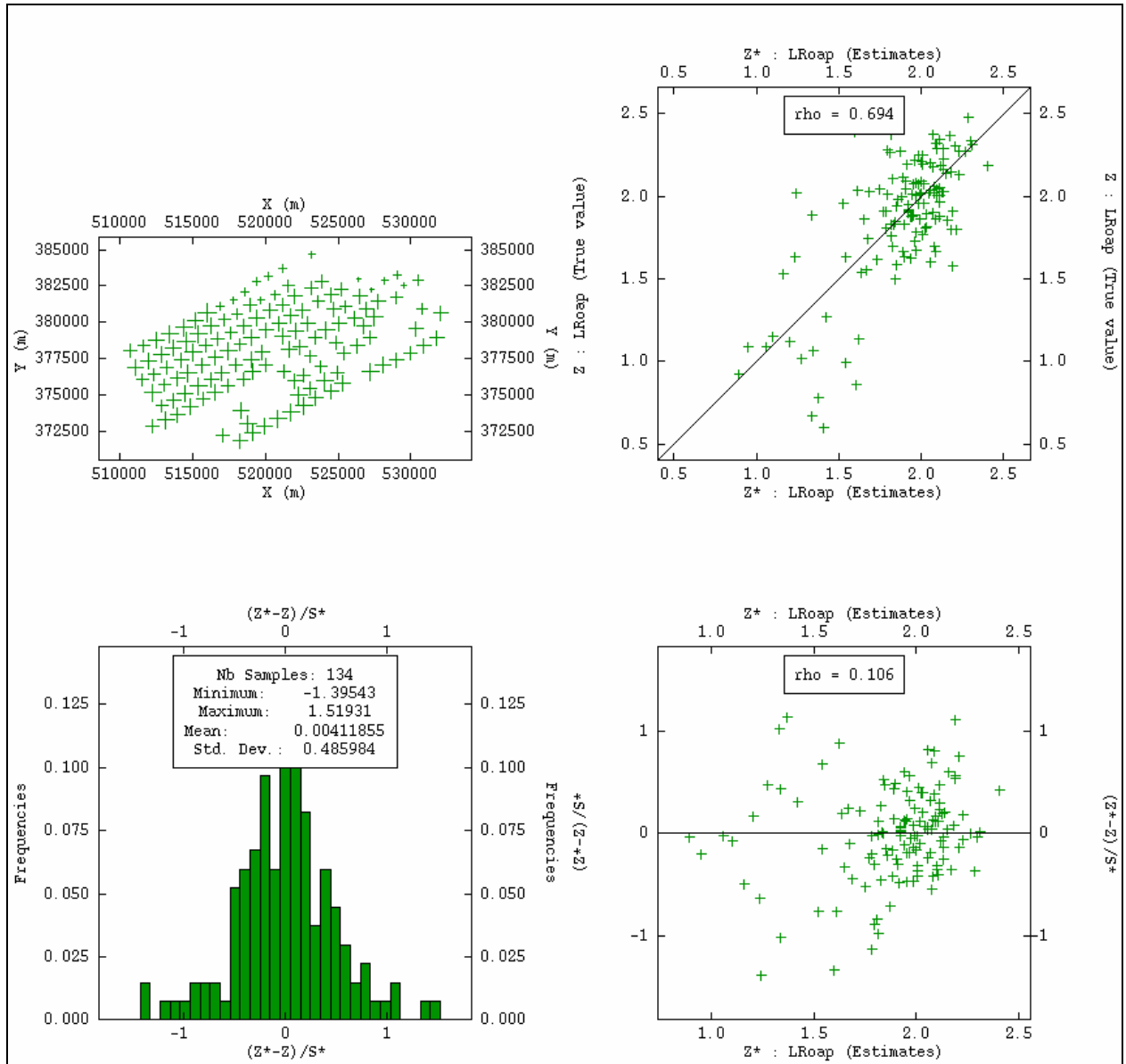
grille montre la mode d'estimation par krigeage des résistivités apparentes pour les profils



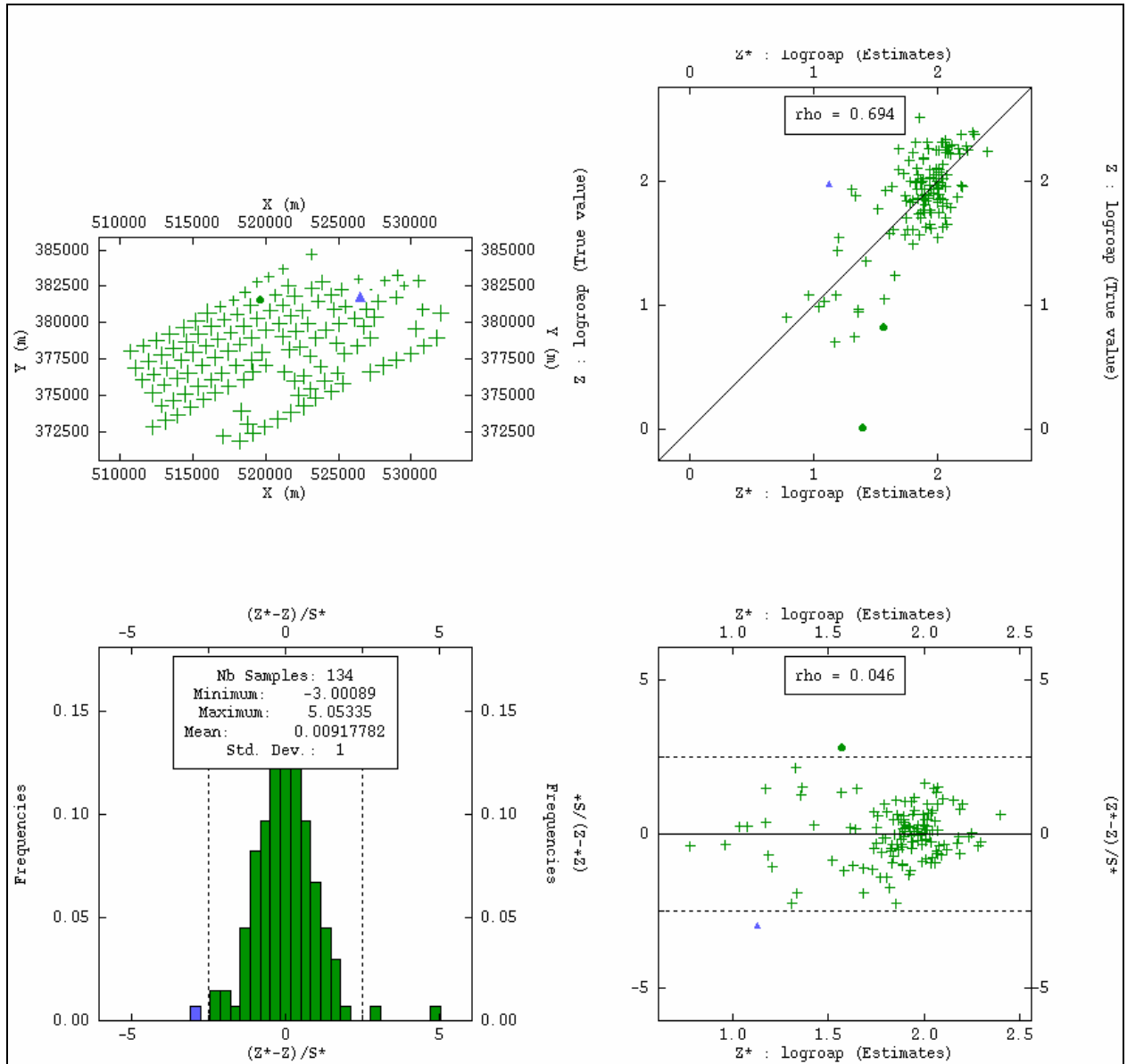
Mode de sélection de données extraites des cartes krigeés pour l'apport des données aux profils

# Validation croisées des cartes horizontales

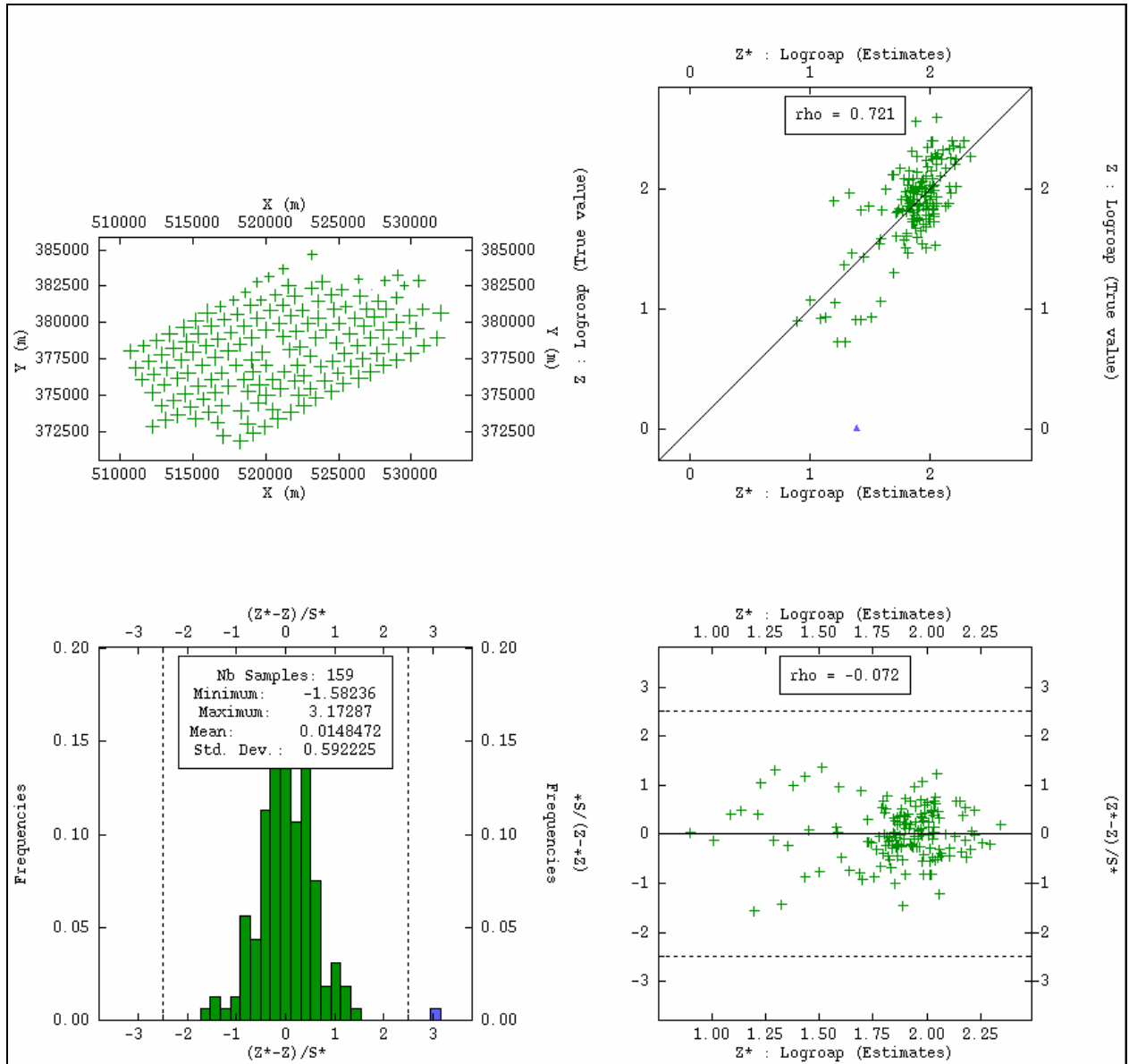
Pour  $AB/2 = 3$  m



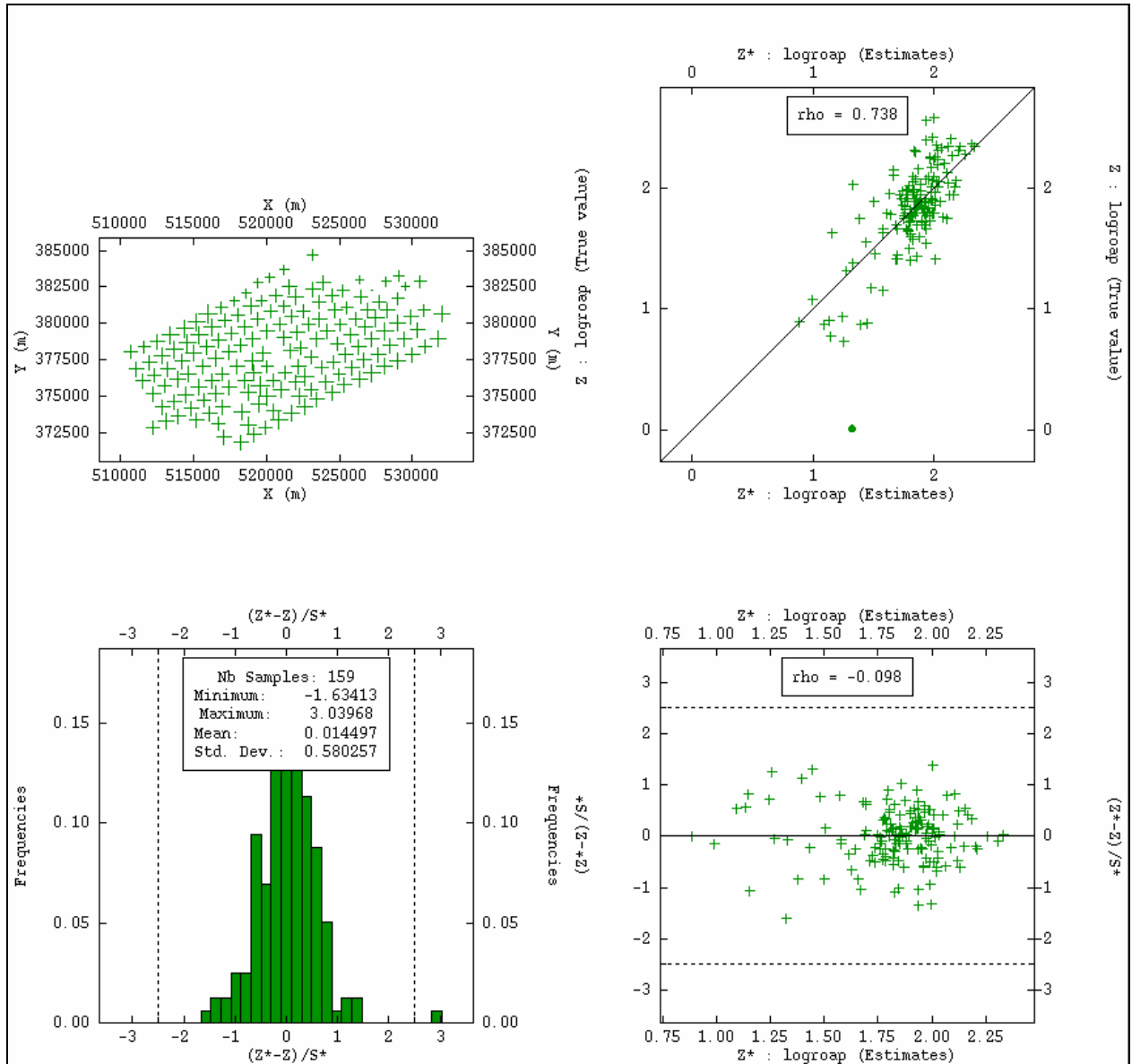
Pour  $AB/2 = 4$  m



Pour  $AB/2 = 5$  m

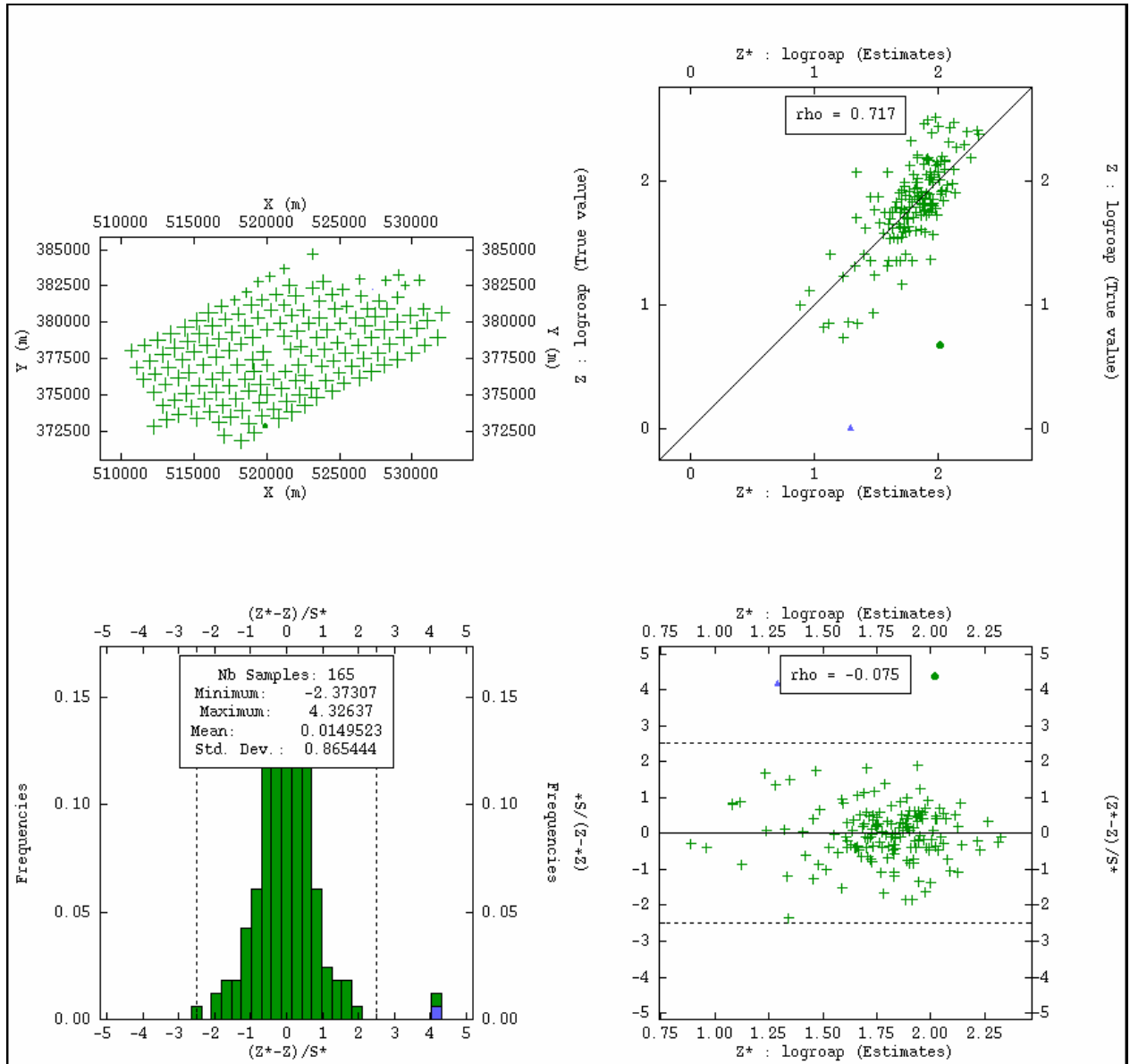


Pour  $AB/2 = 7$  m

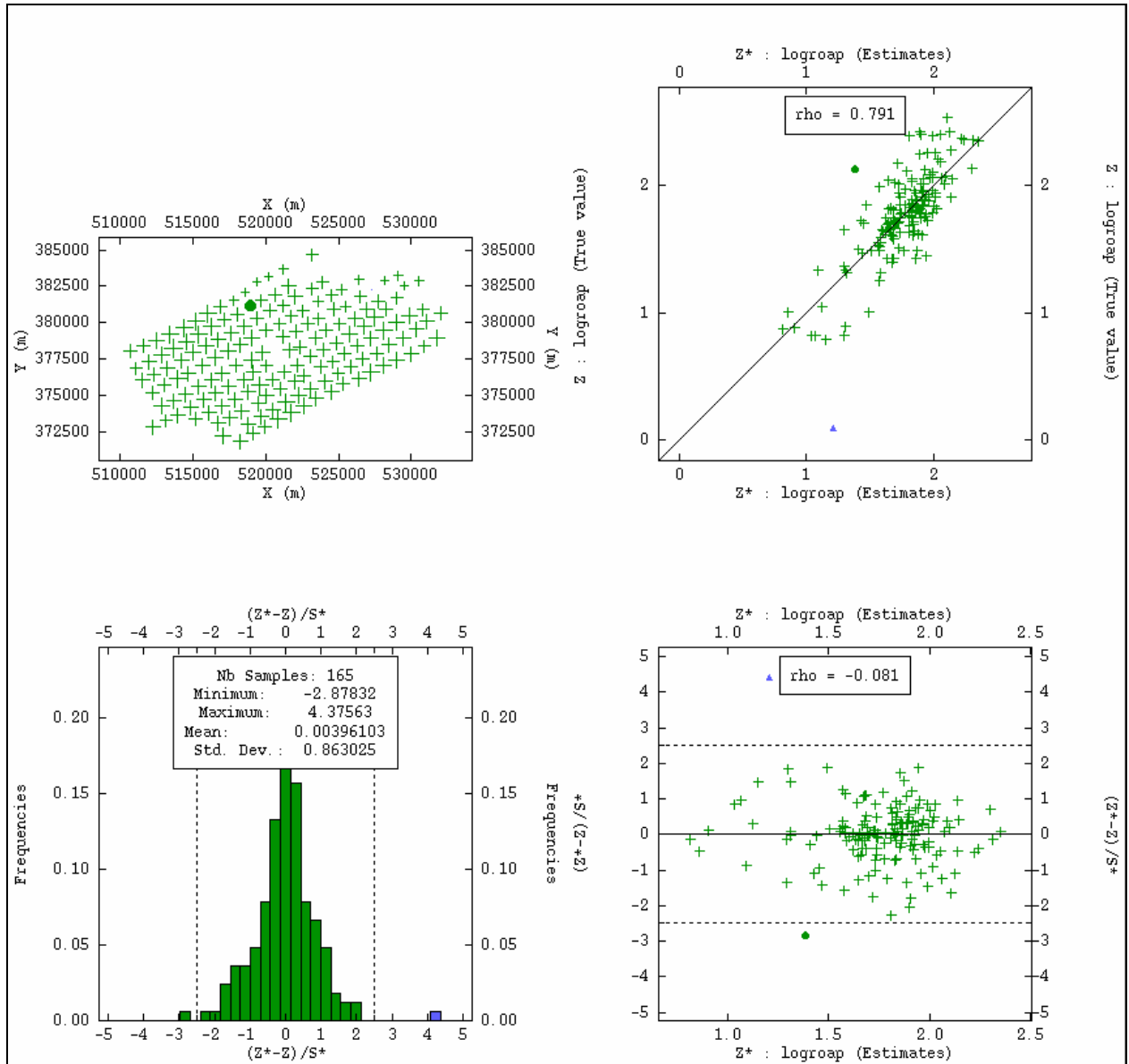




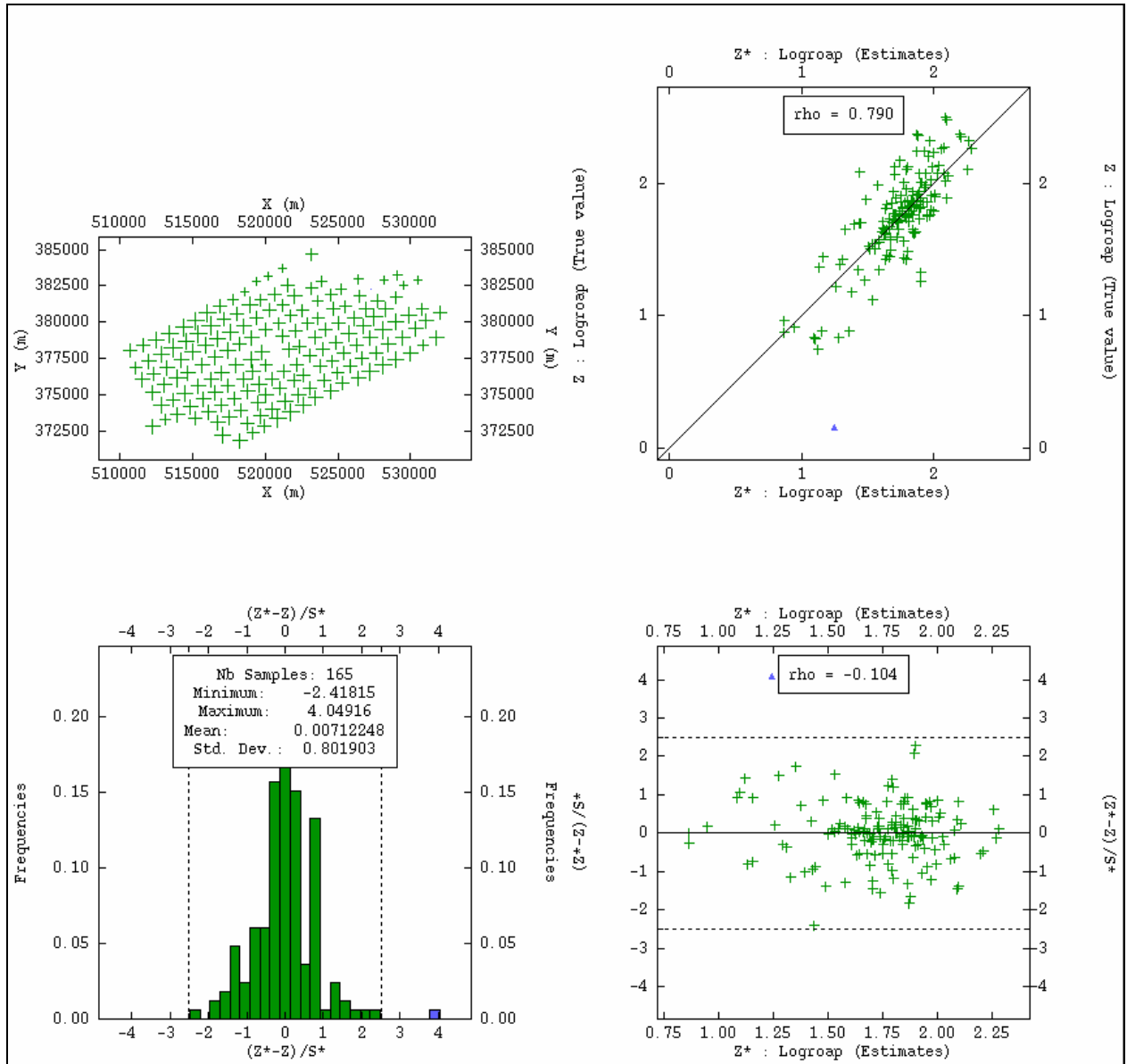
Pour  $AB/2 = 10$  m



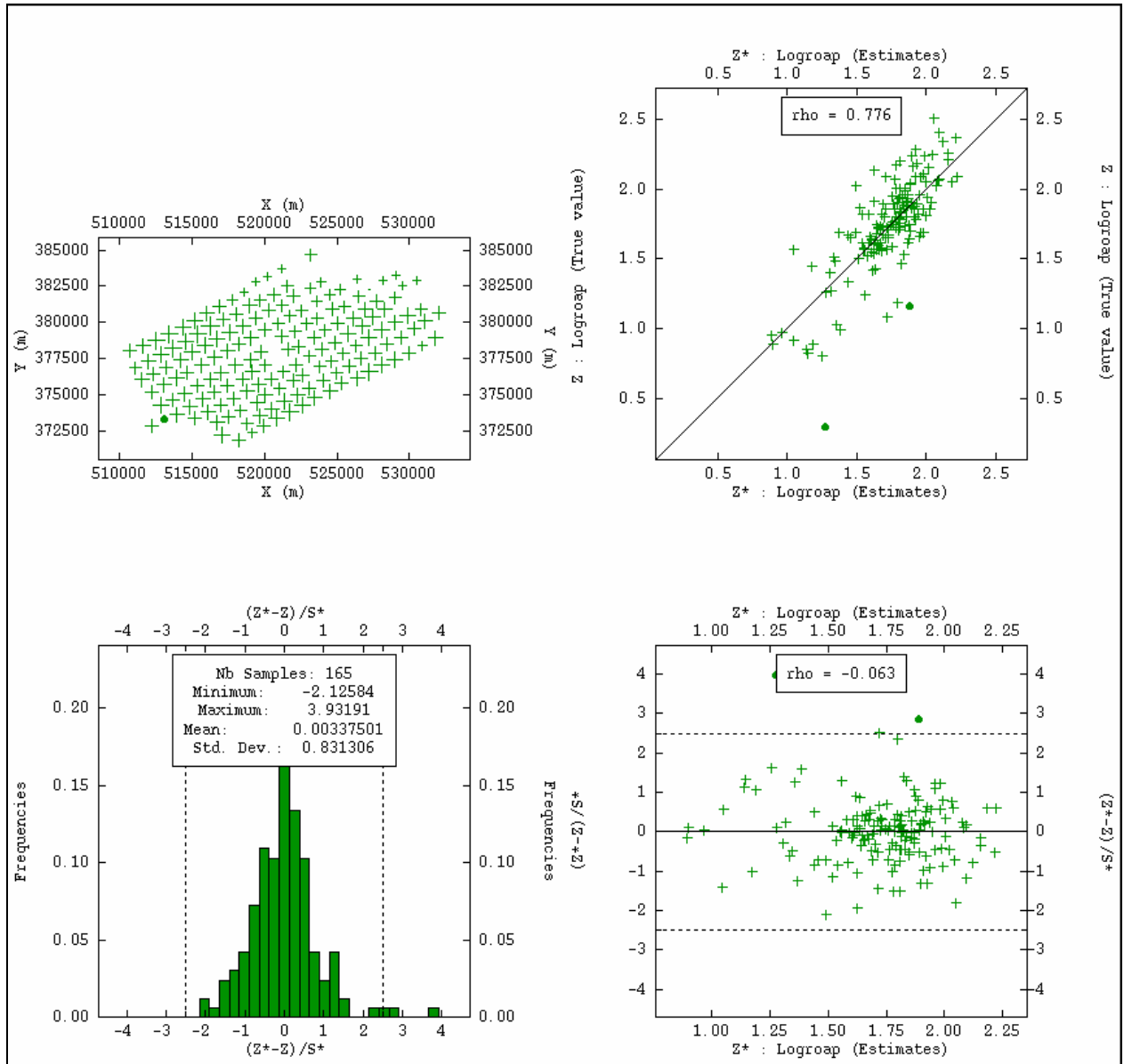
Pour  $AB/2 = 15$  m



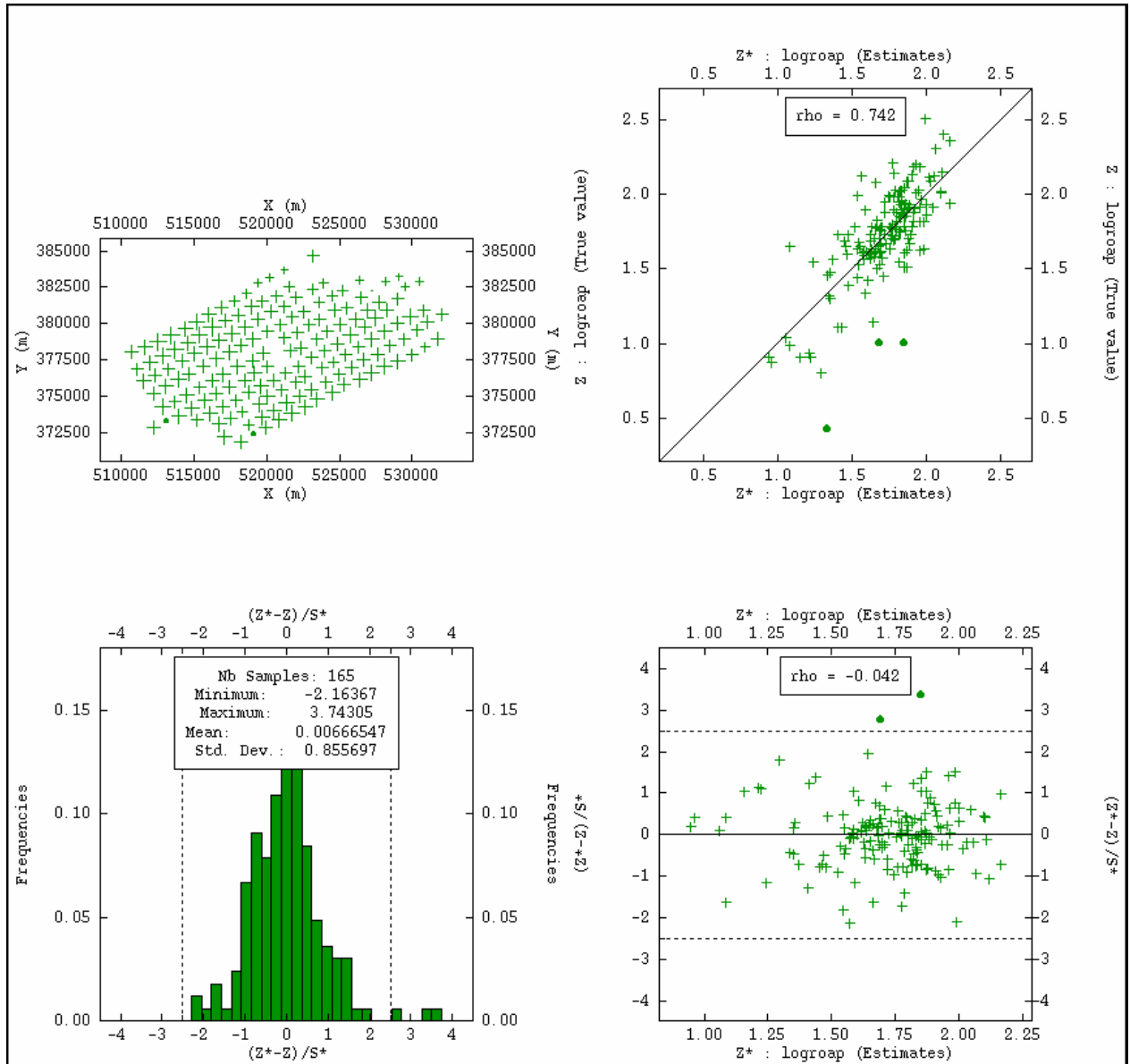
Pour  $AB/2 = 20$  m



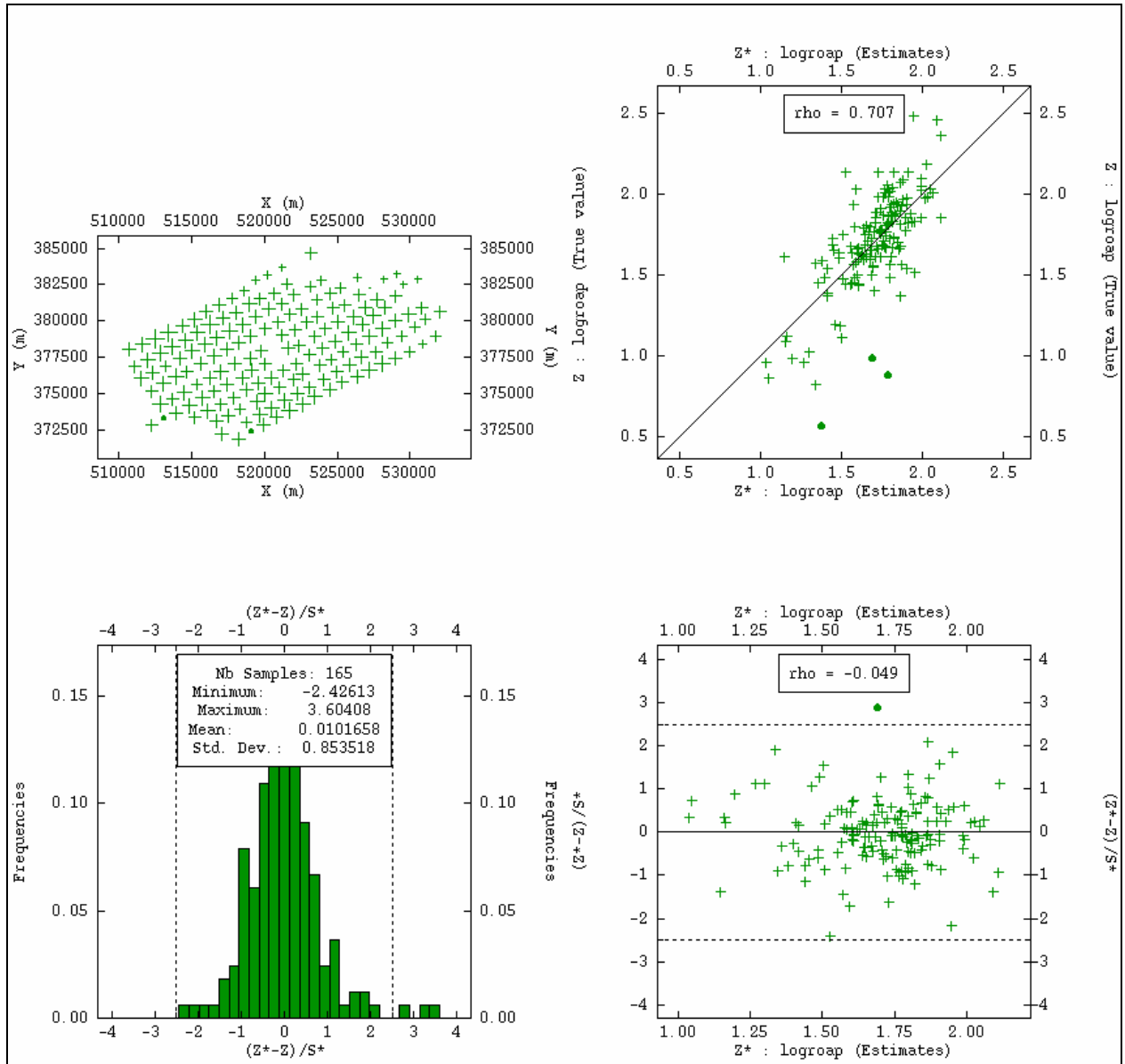
Pour  $AB/2 = 30$  m



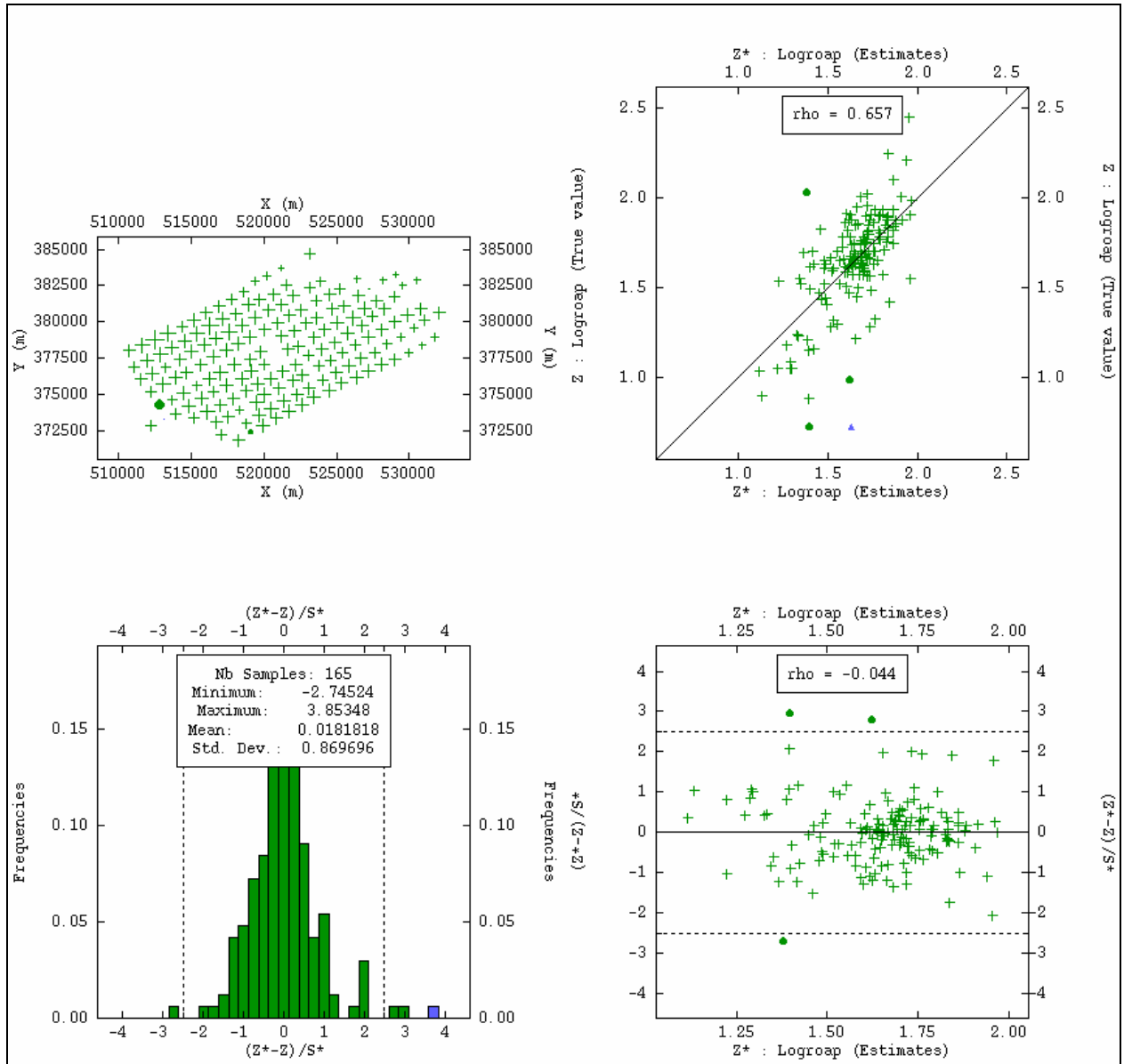
Pour  $AB/2 = 40$  m



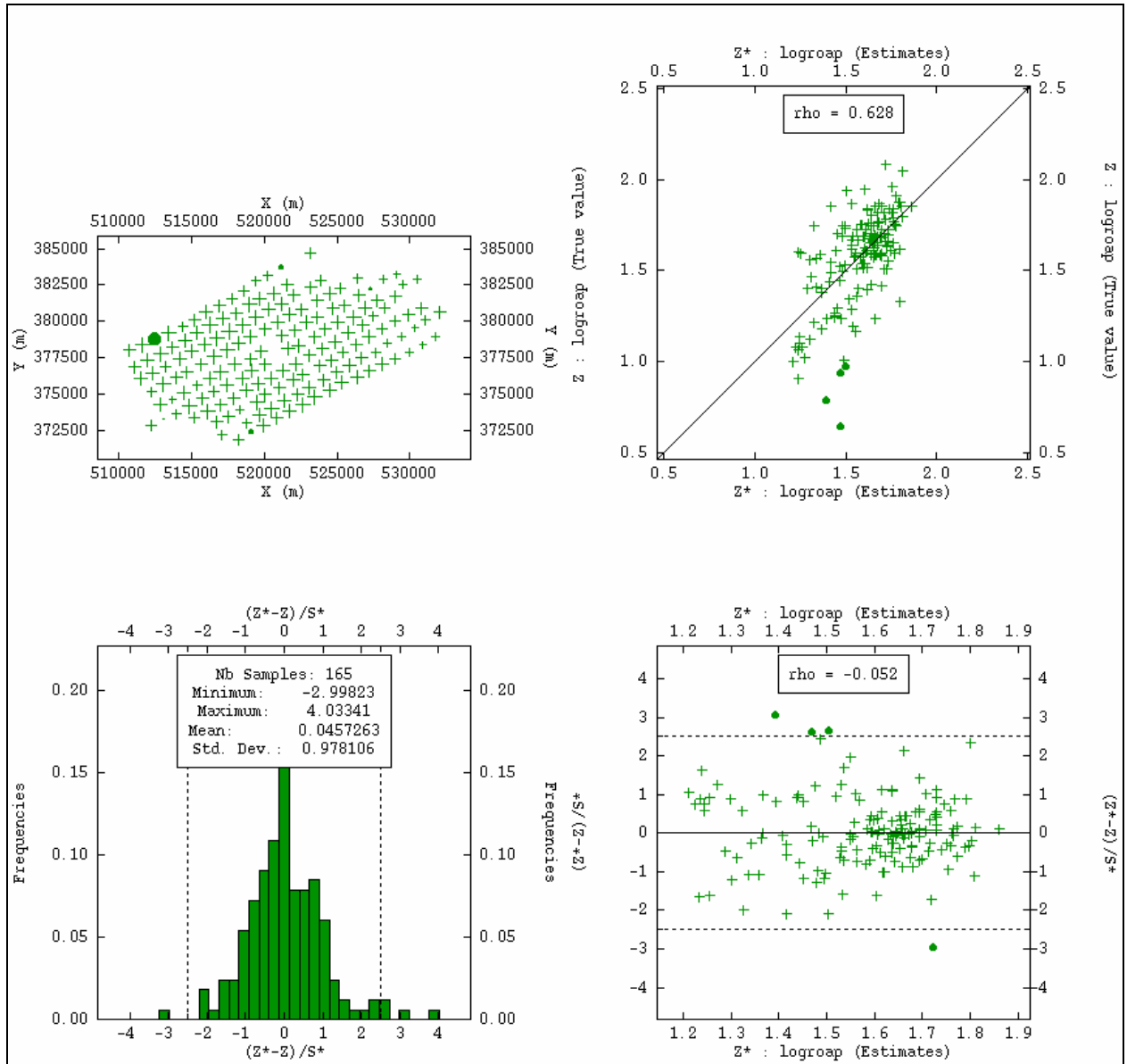
Pour  $AB/2 = 50$  m



Pour  $AB/2 = 75$  m

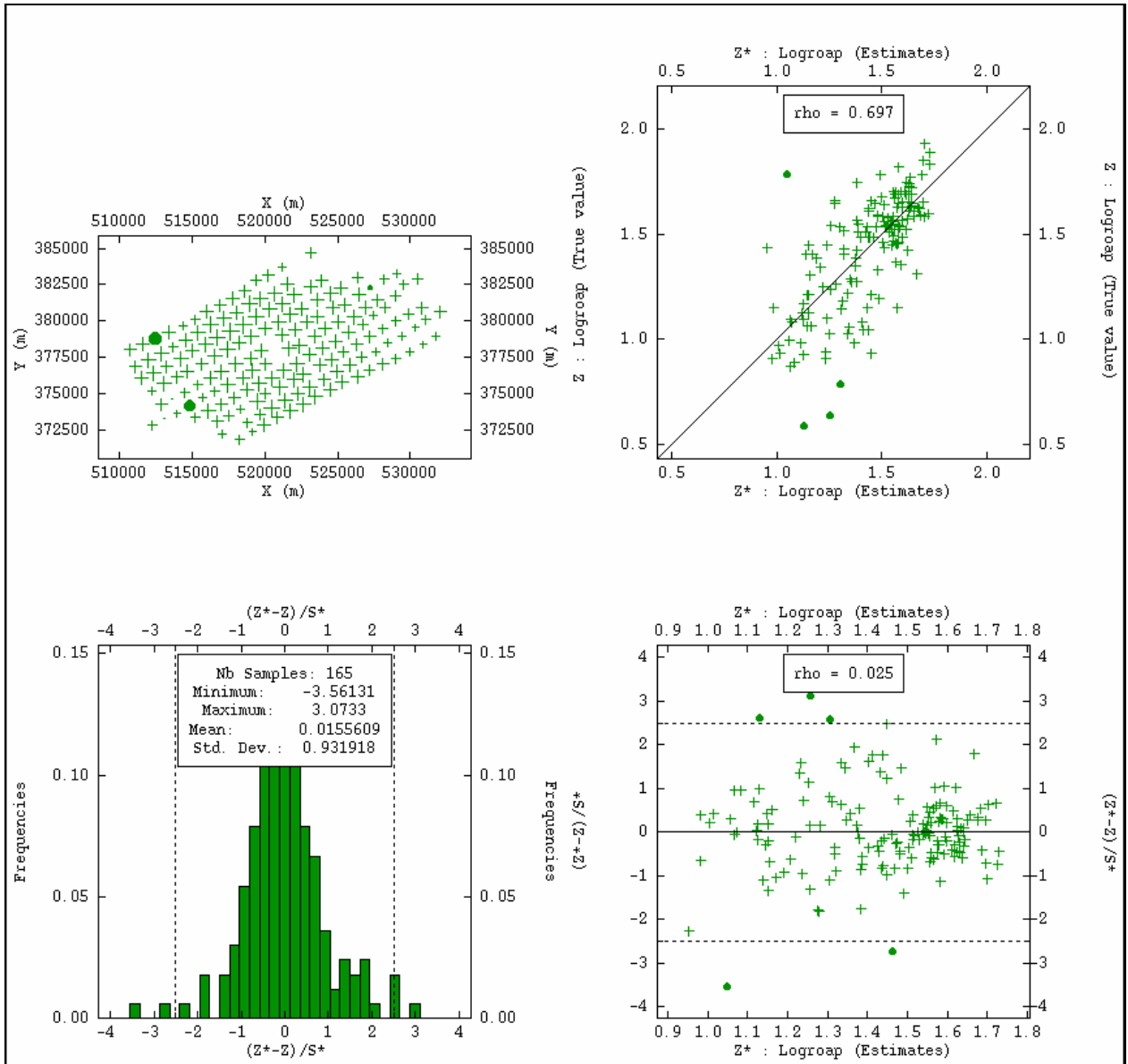


Pour  $AB/2 = 100$  m

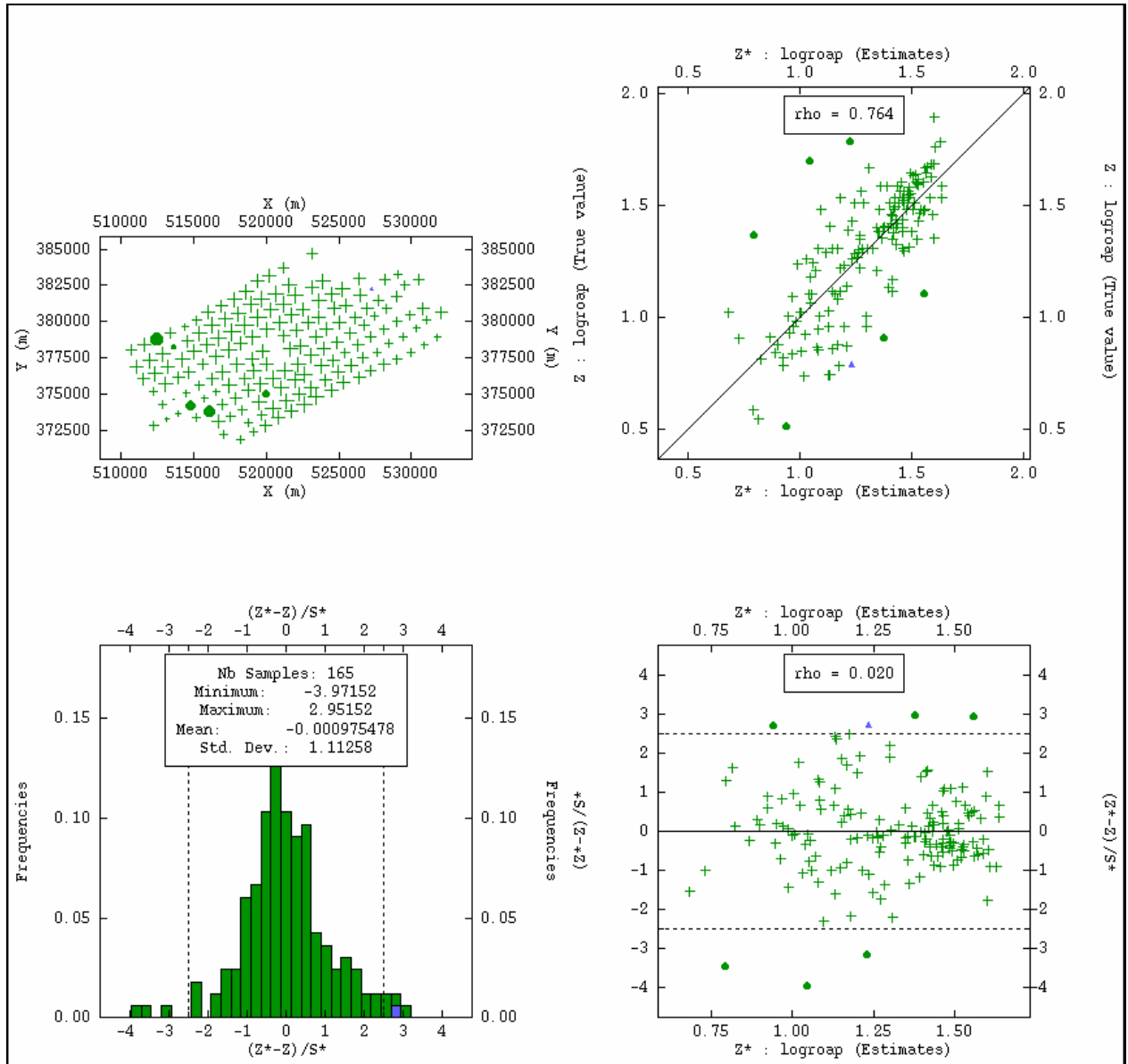




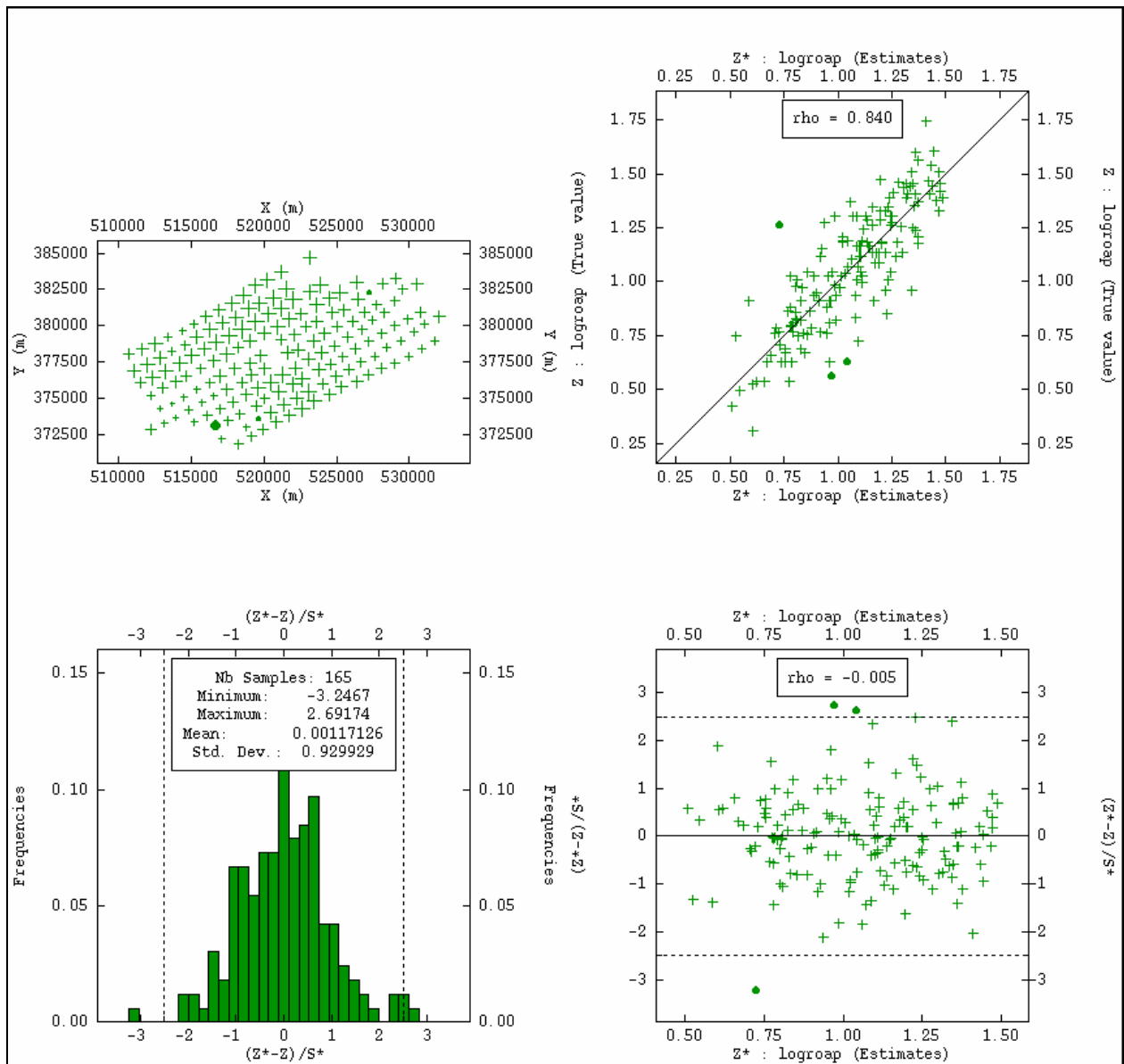
Pour  $AB/2 = 150$  m



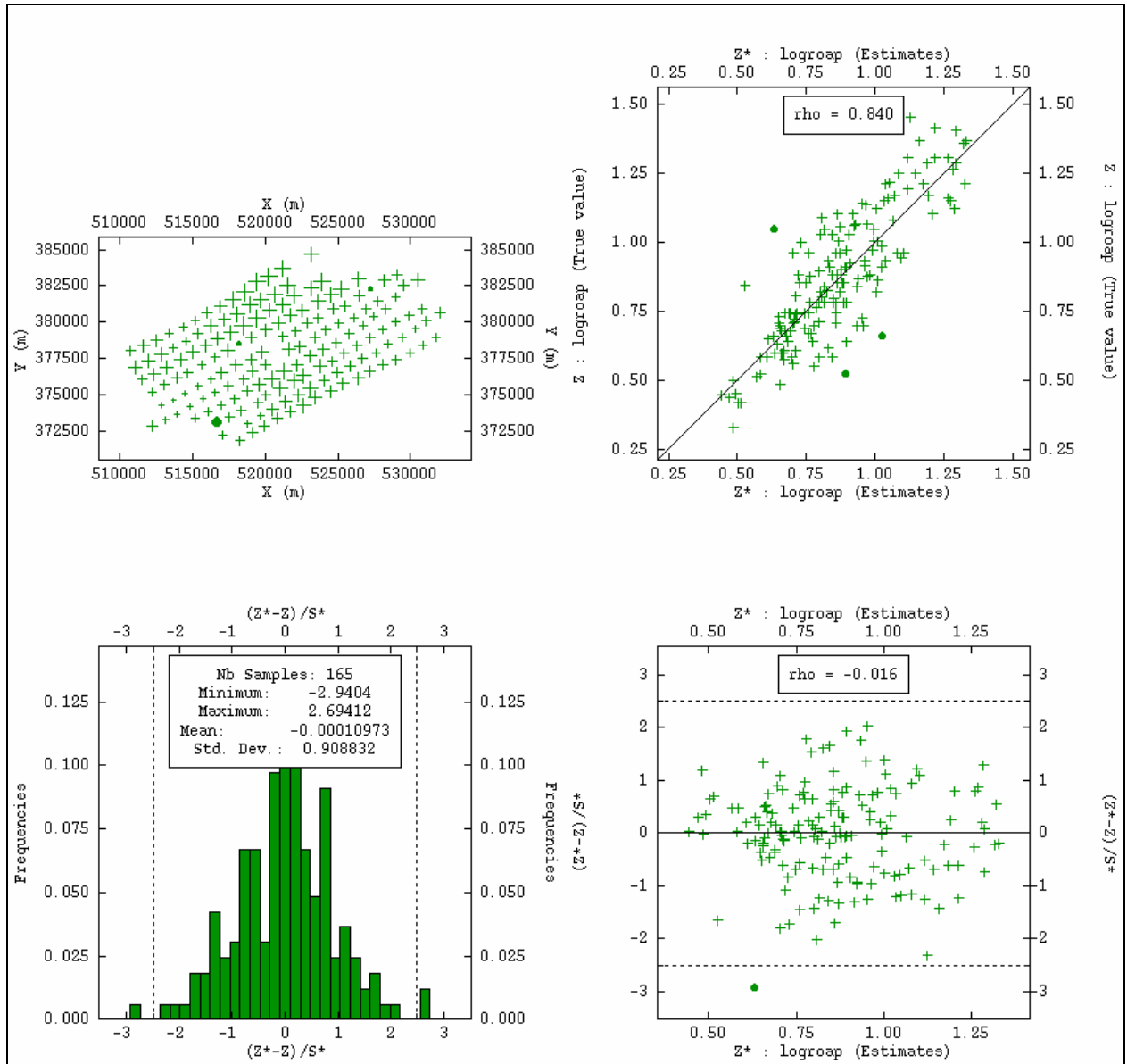
Pour  $AB/2 = 200$  m



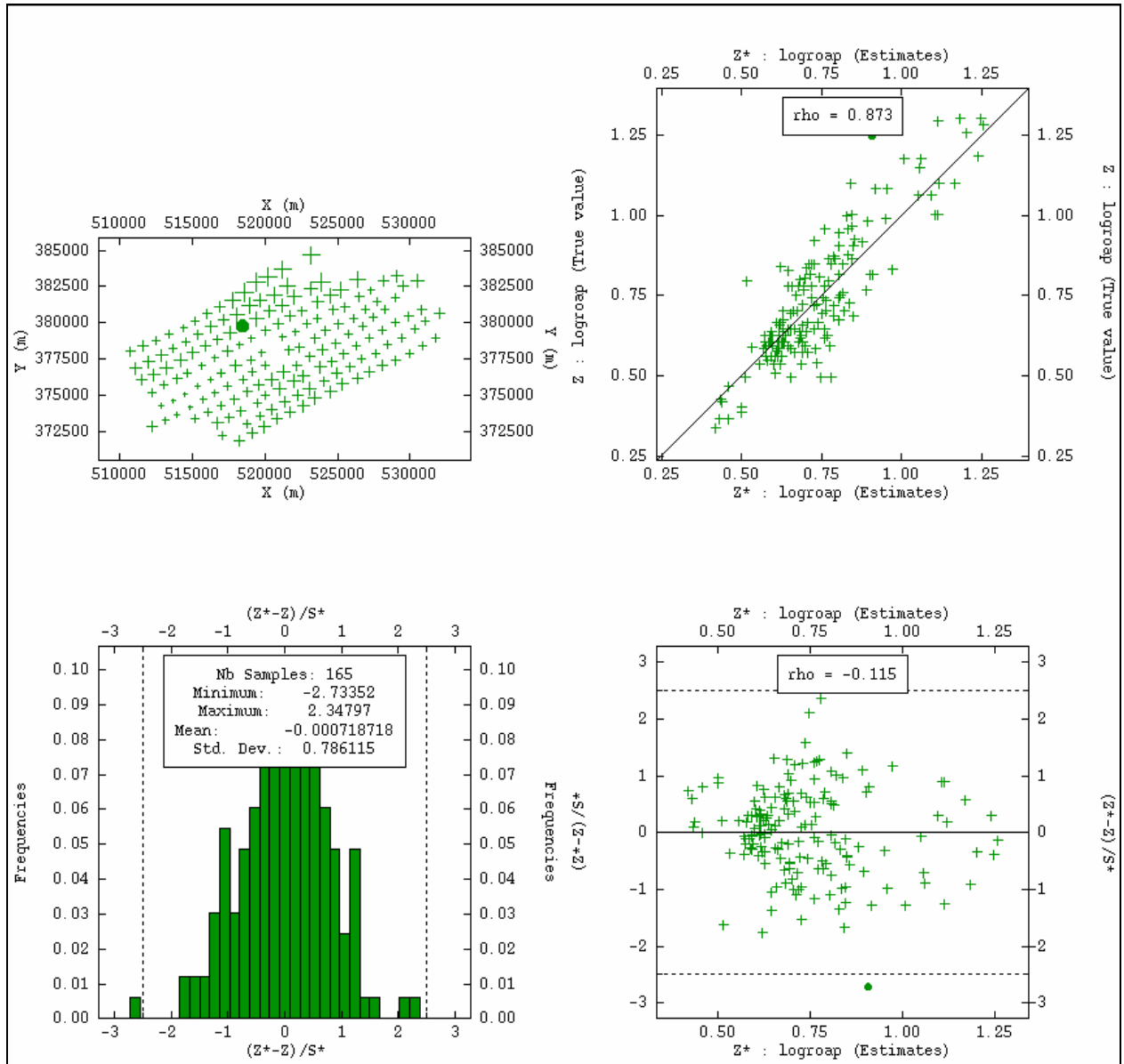
Pour  $AB/2 = 300$  m



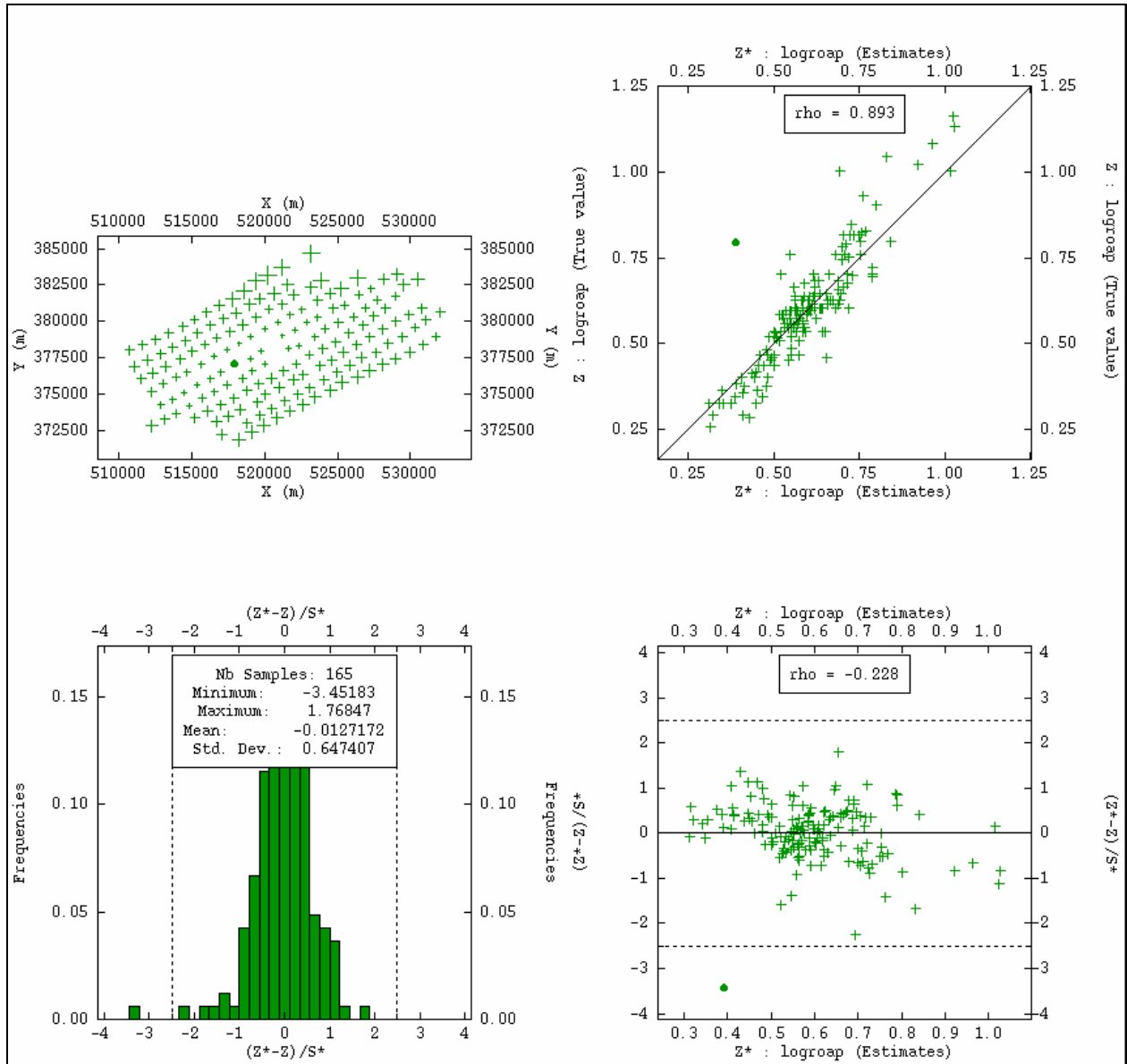
Pour  $AB/2 = 400$  m



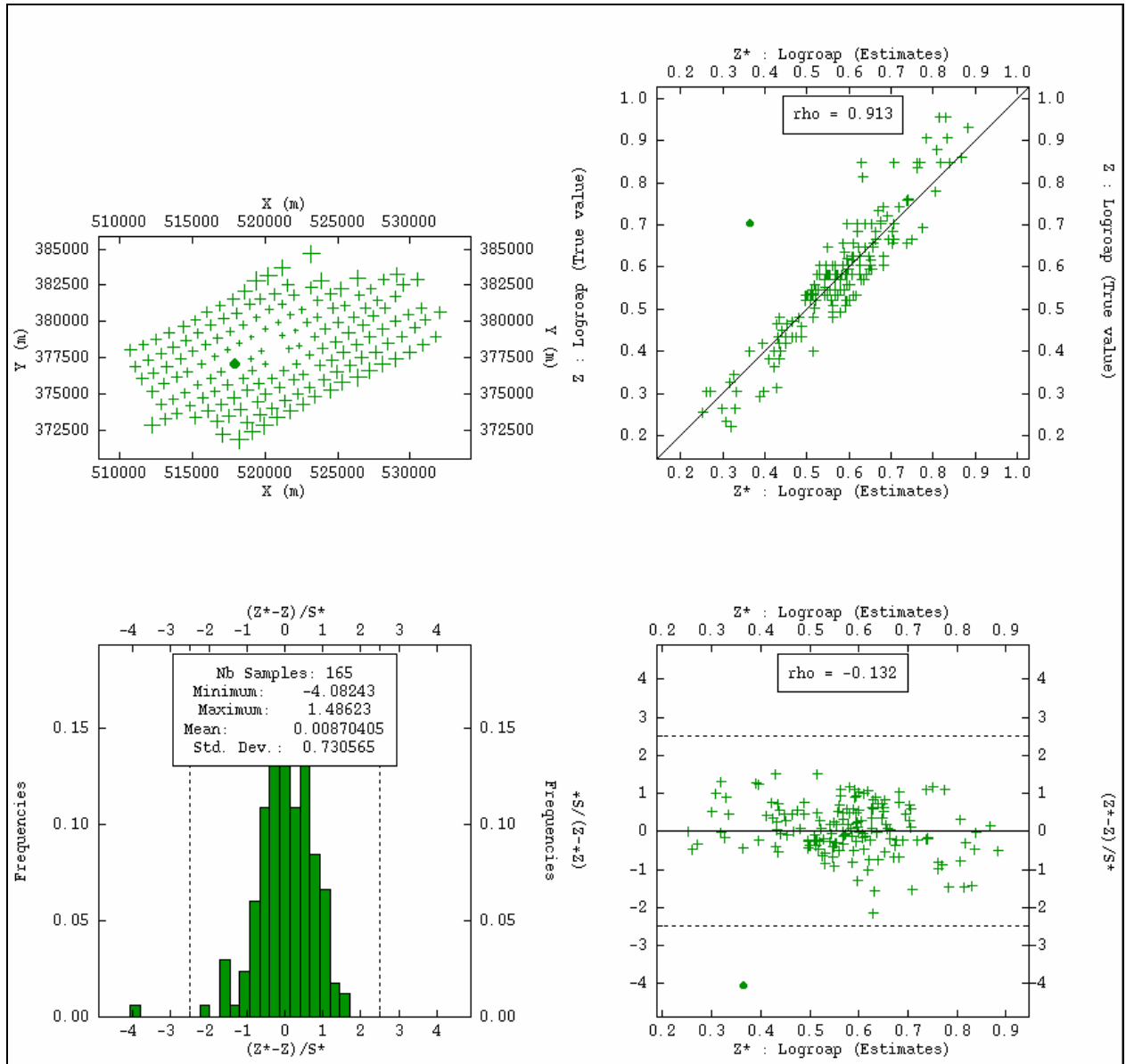
Pour  $AB/2 = 500$  m



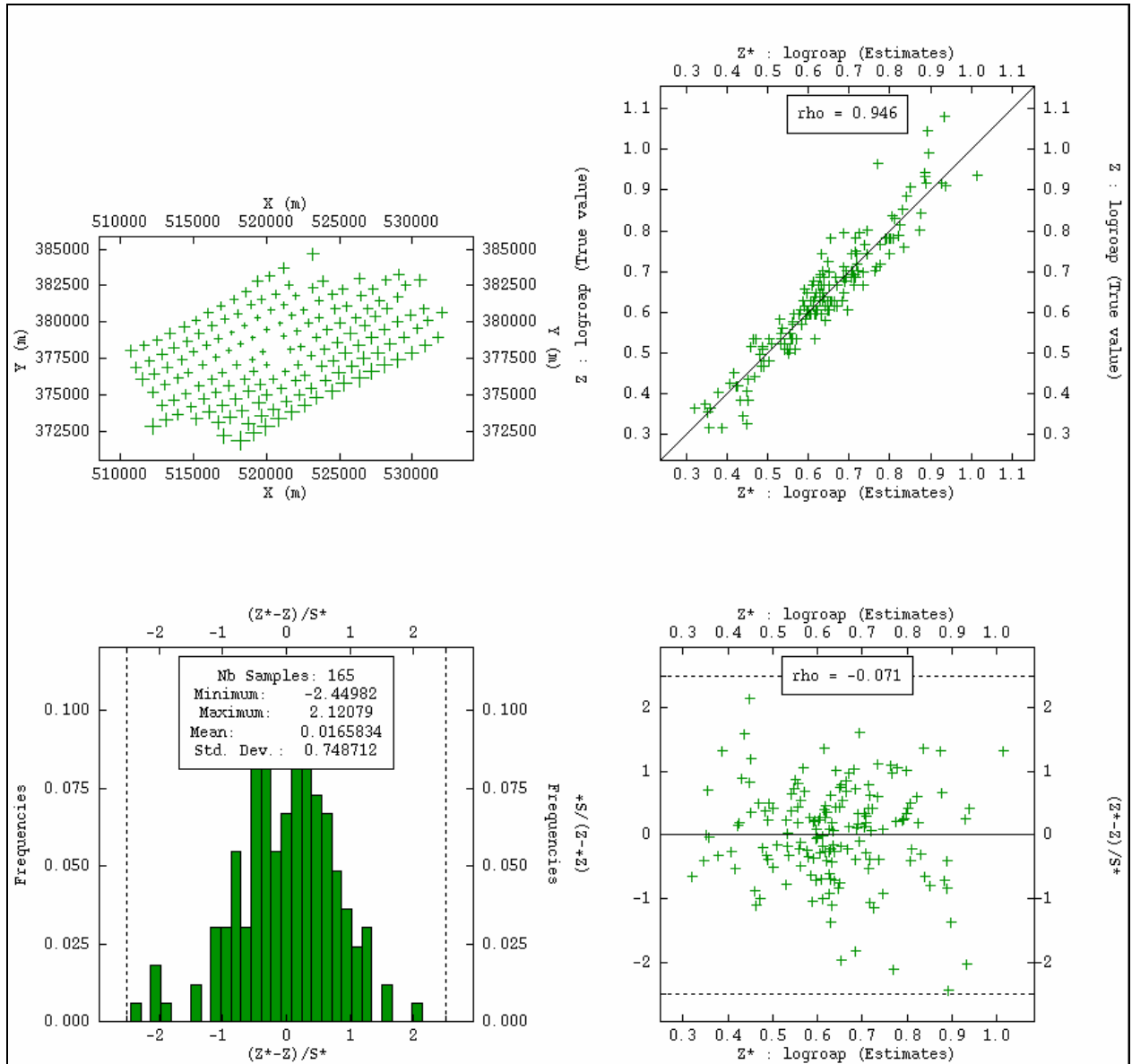
Pour  $AB/2 = 750$  m



Pour  $AB/2 = 1\ 000\ m$

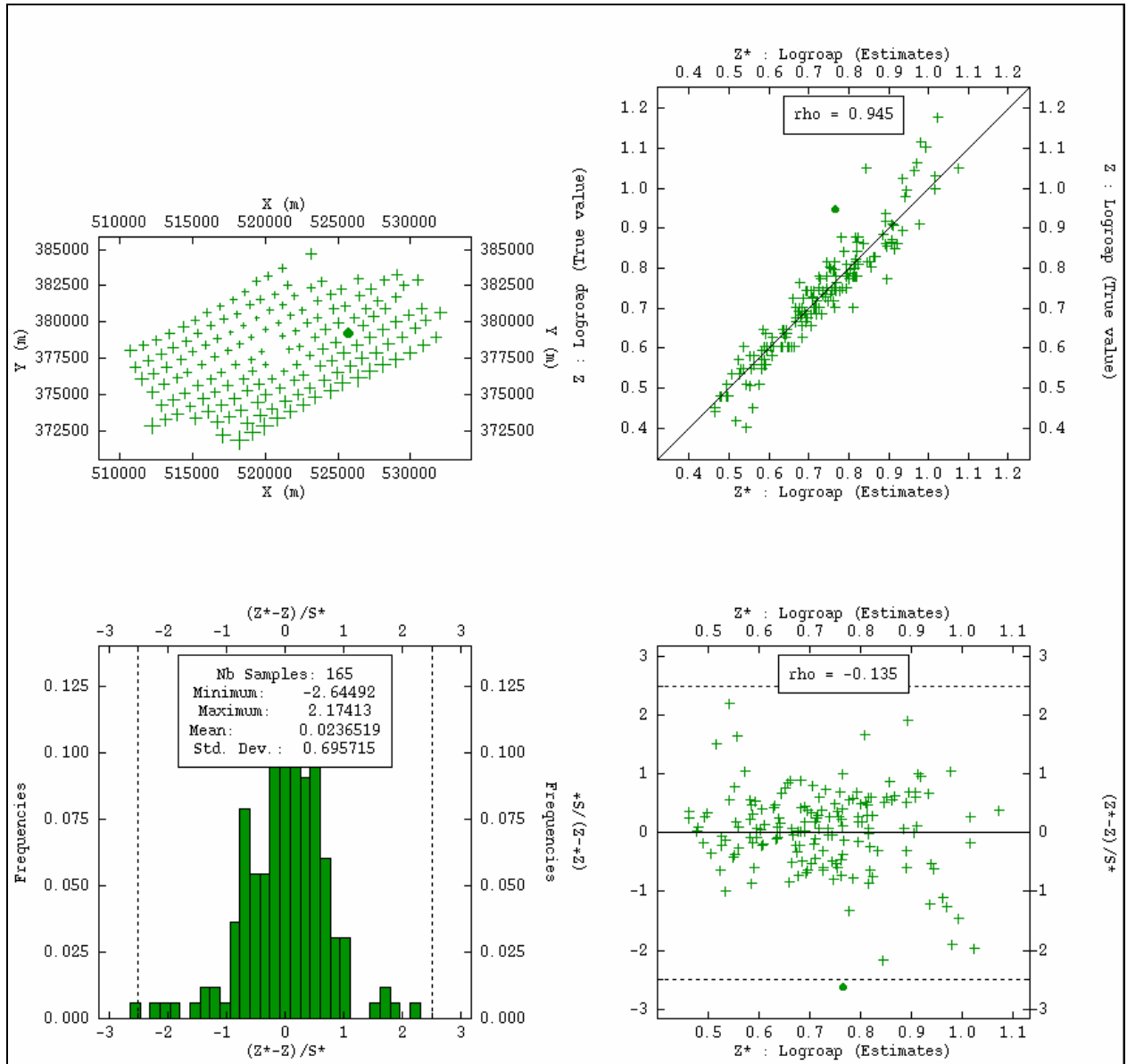


Pour  $AB/2 = 1500$  m

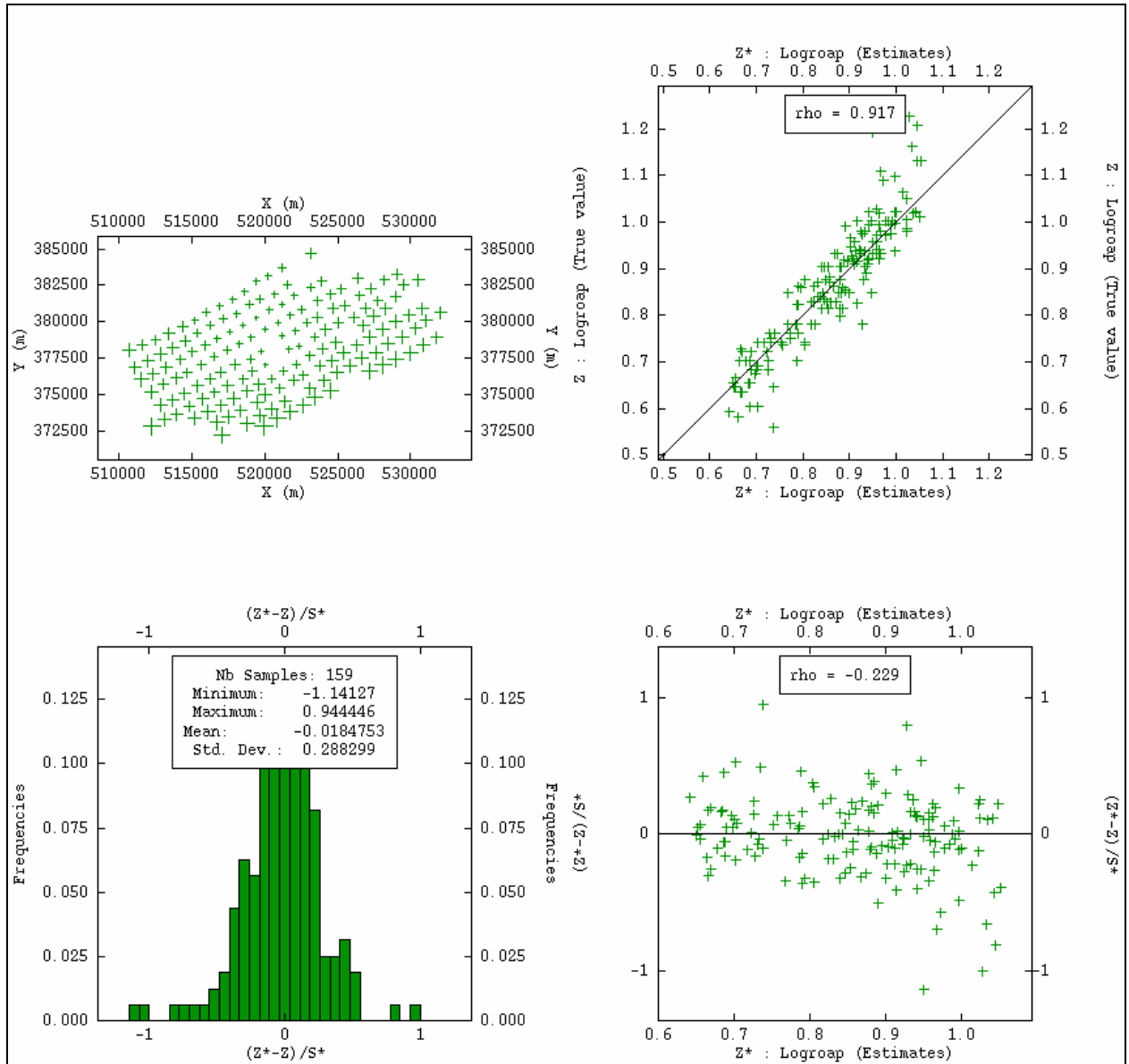




Pour  $AB/2 = 2\,000\text{ m}$

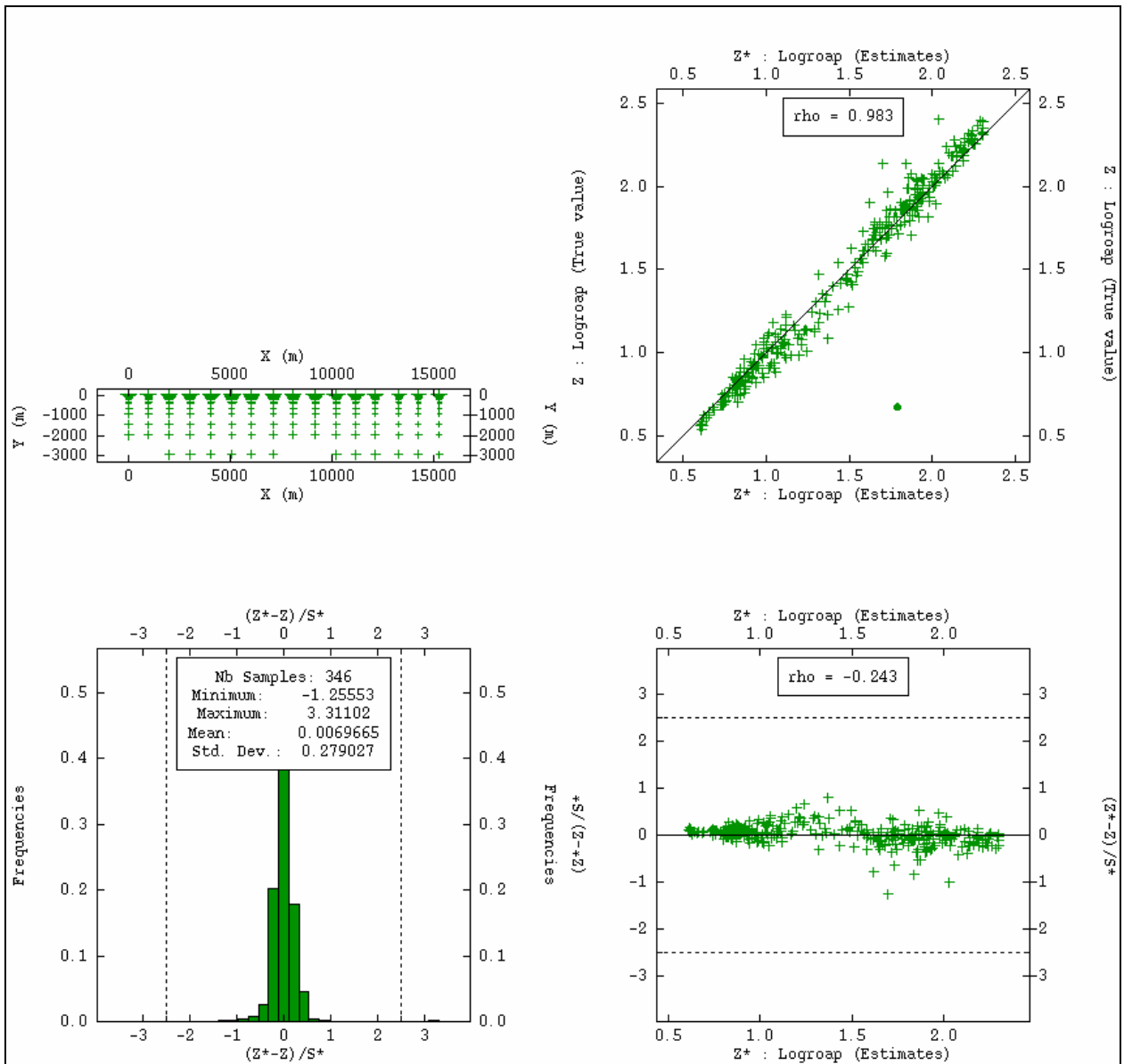


Pour  $AB/2 = 3\,000\text{ m}$

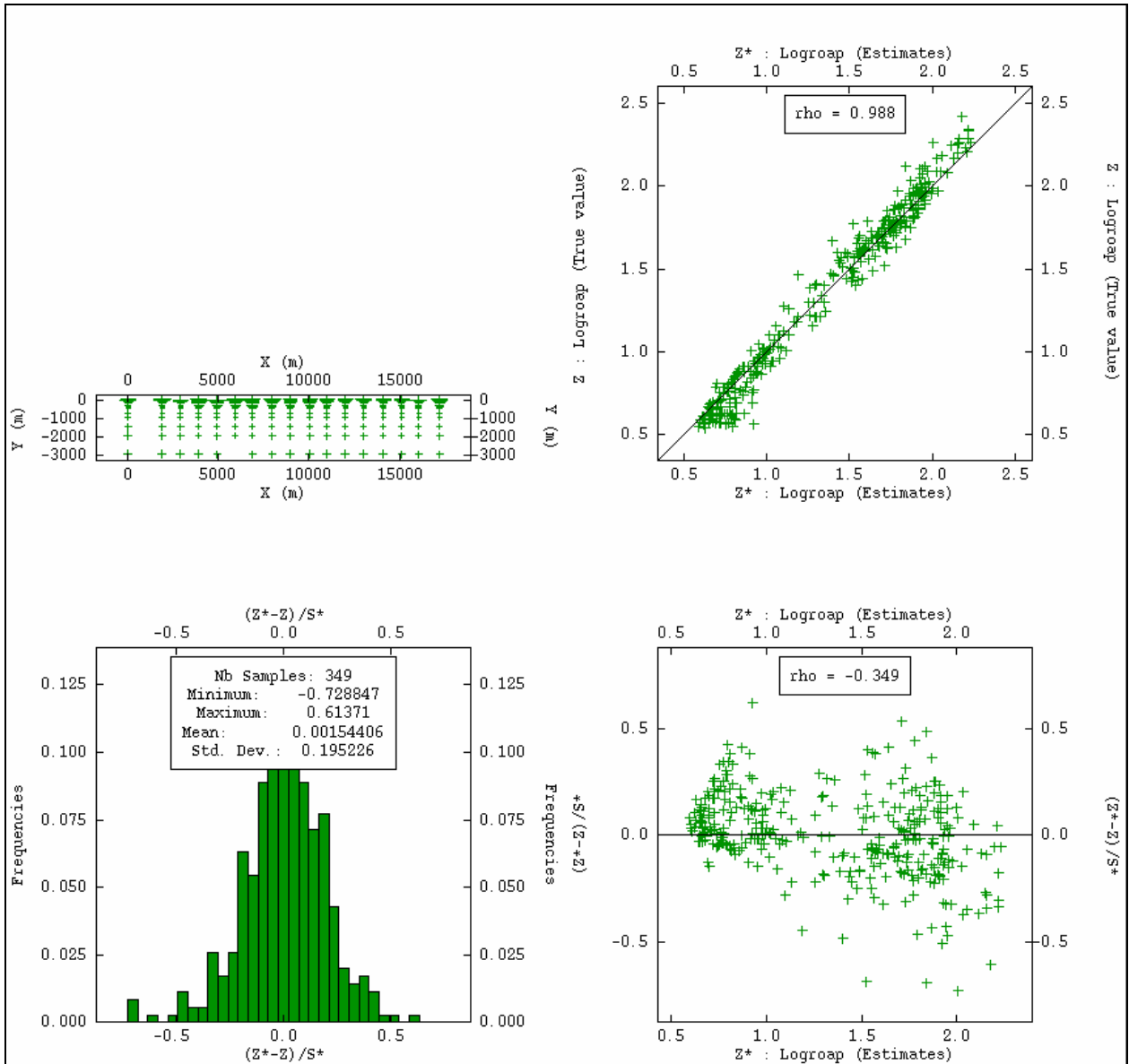


Validation croisées des profils

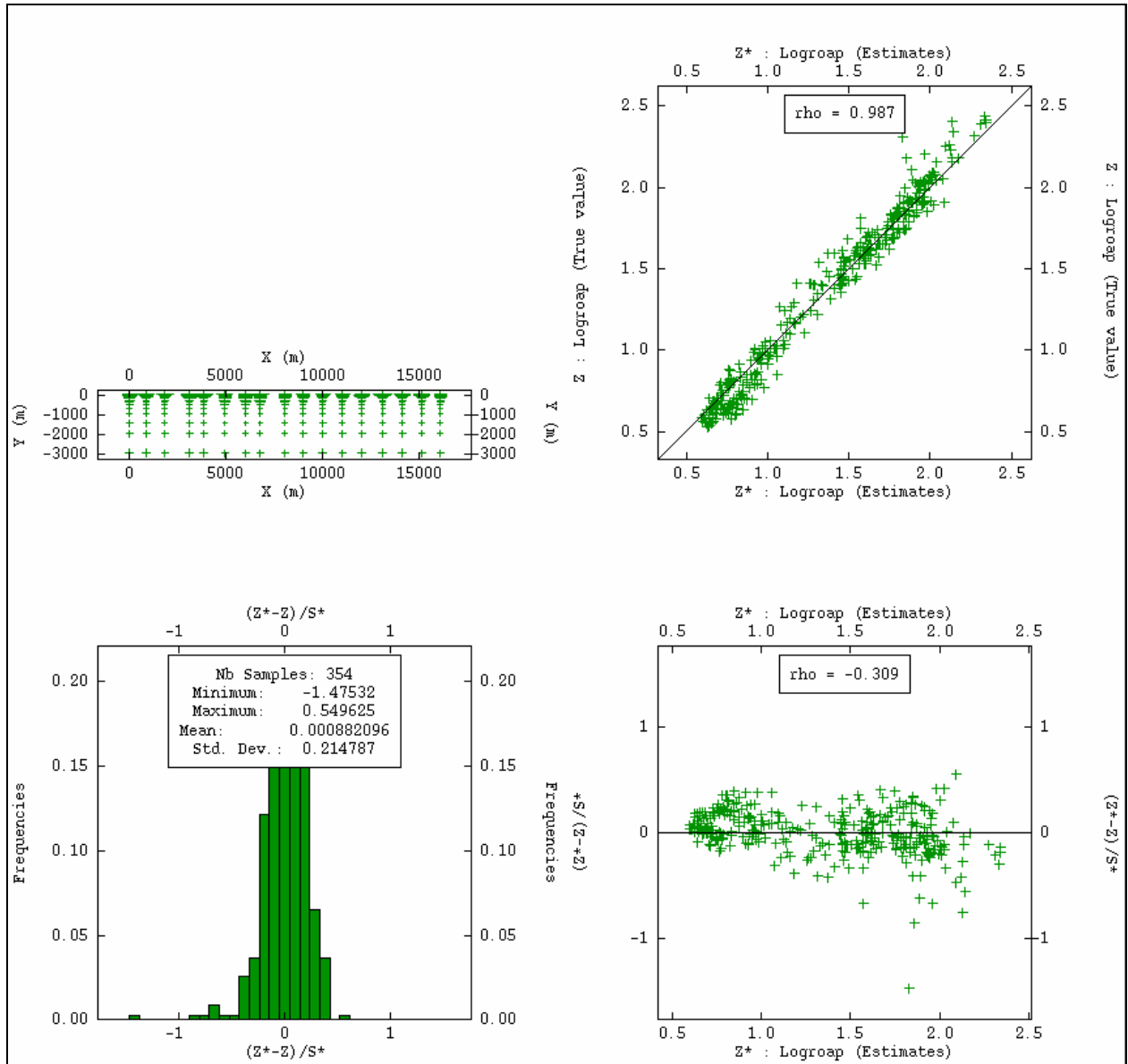
Profil A



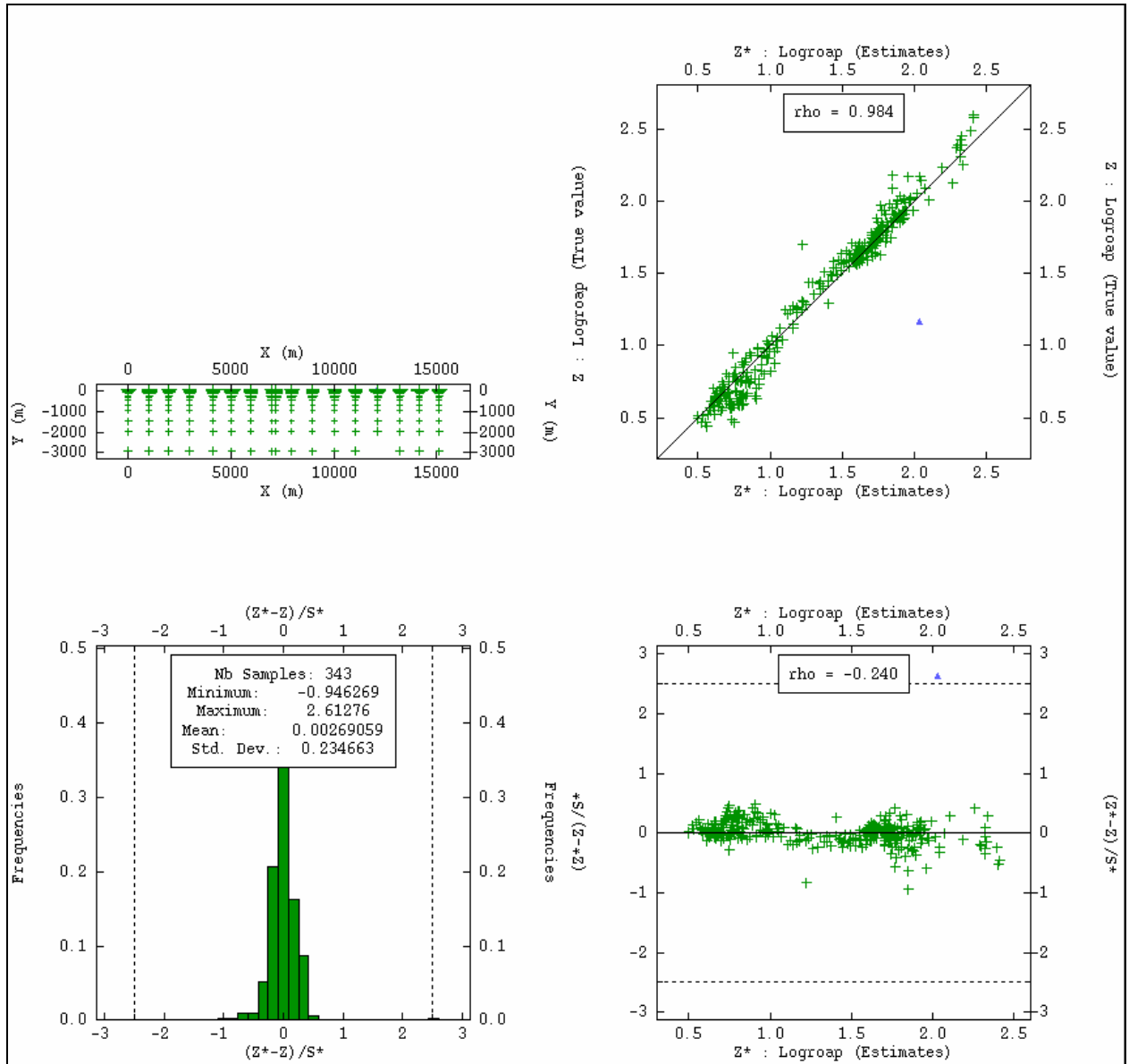
Profil B



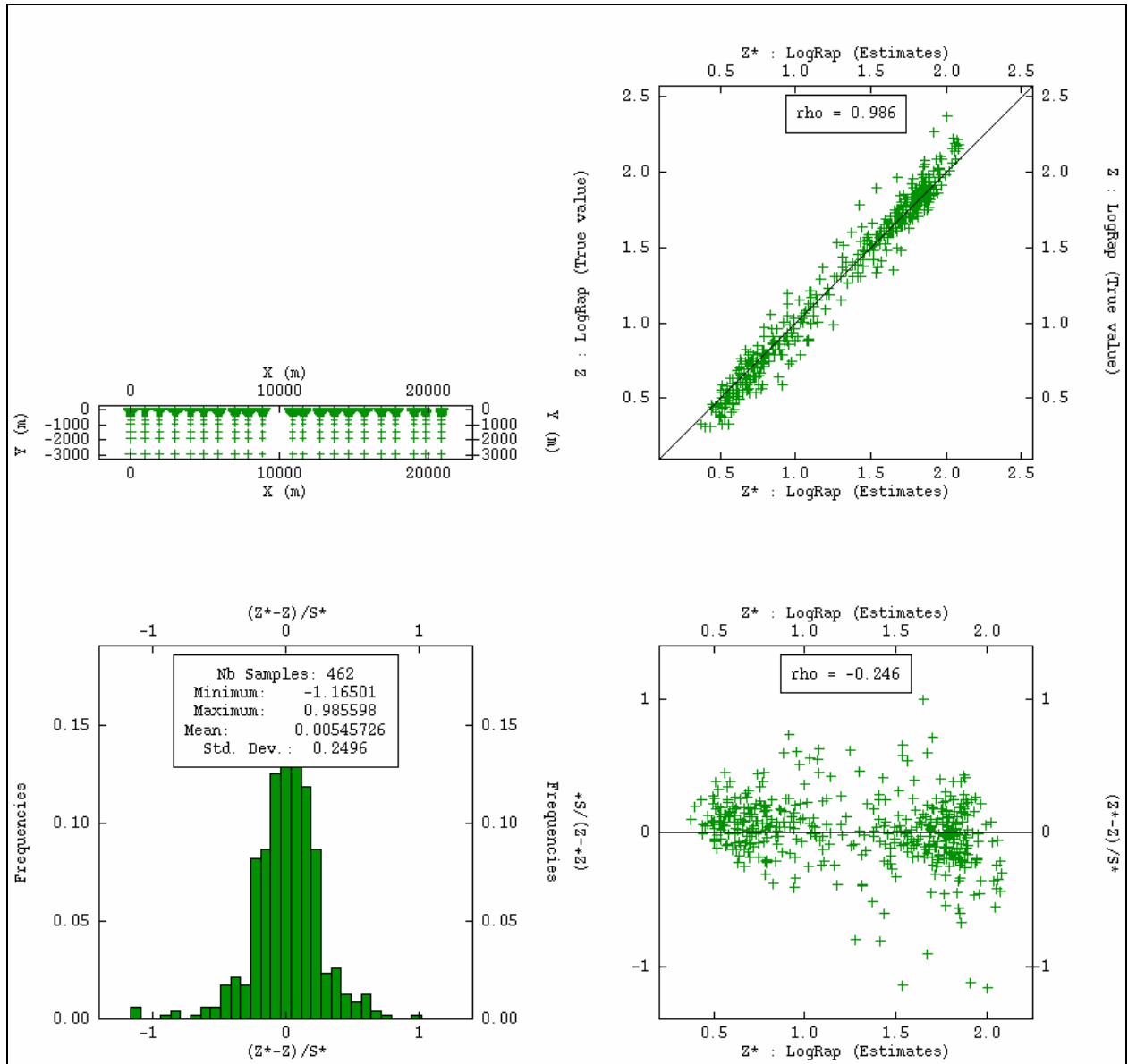
Profil C



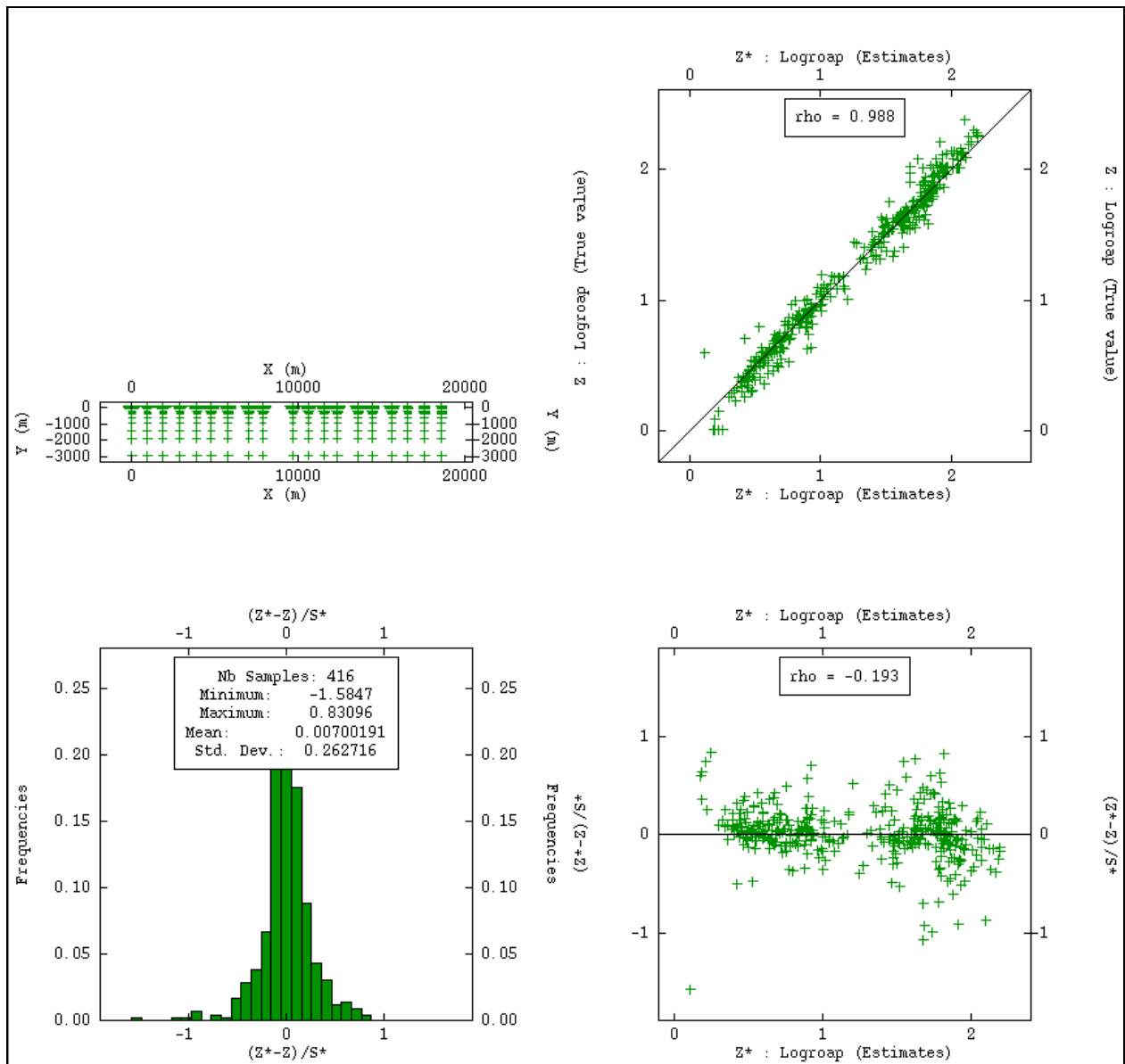
Profil D



Profil E

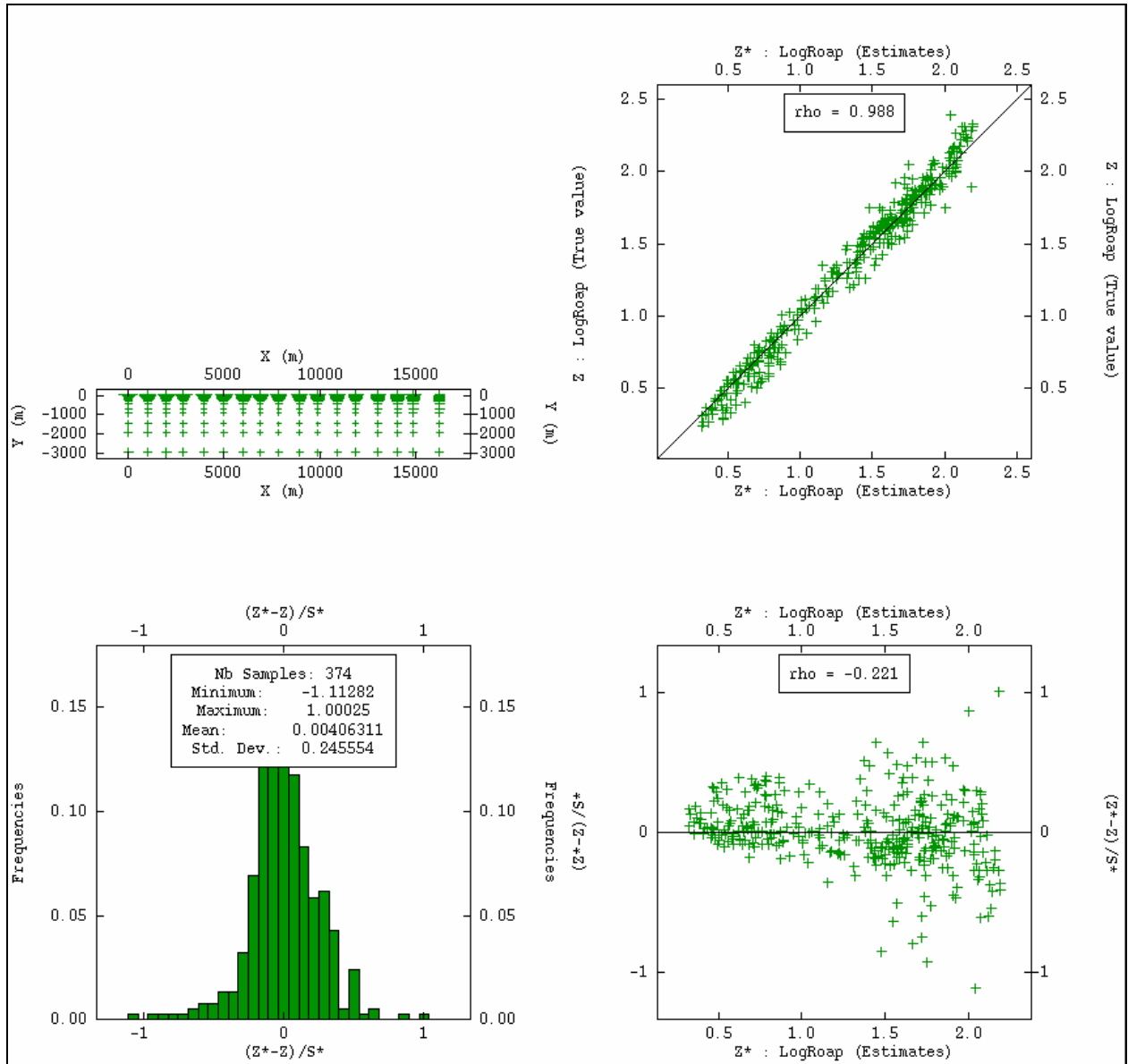


Profil F

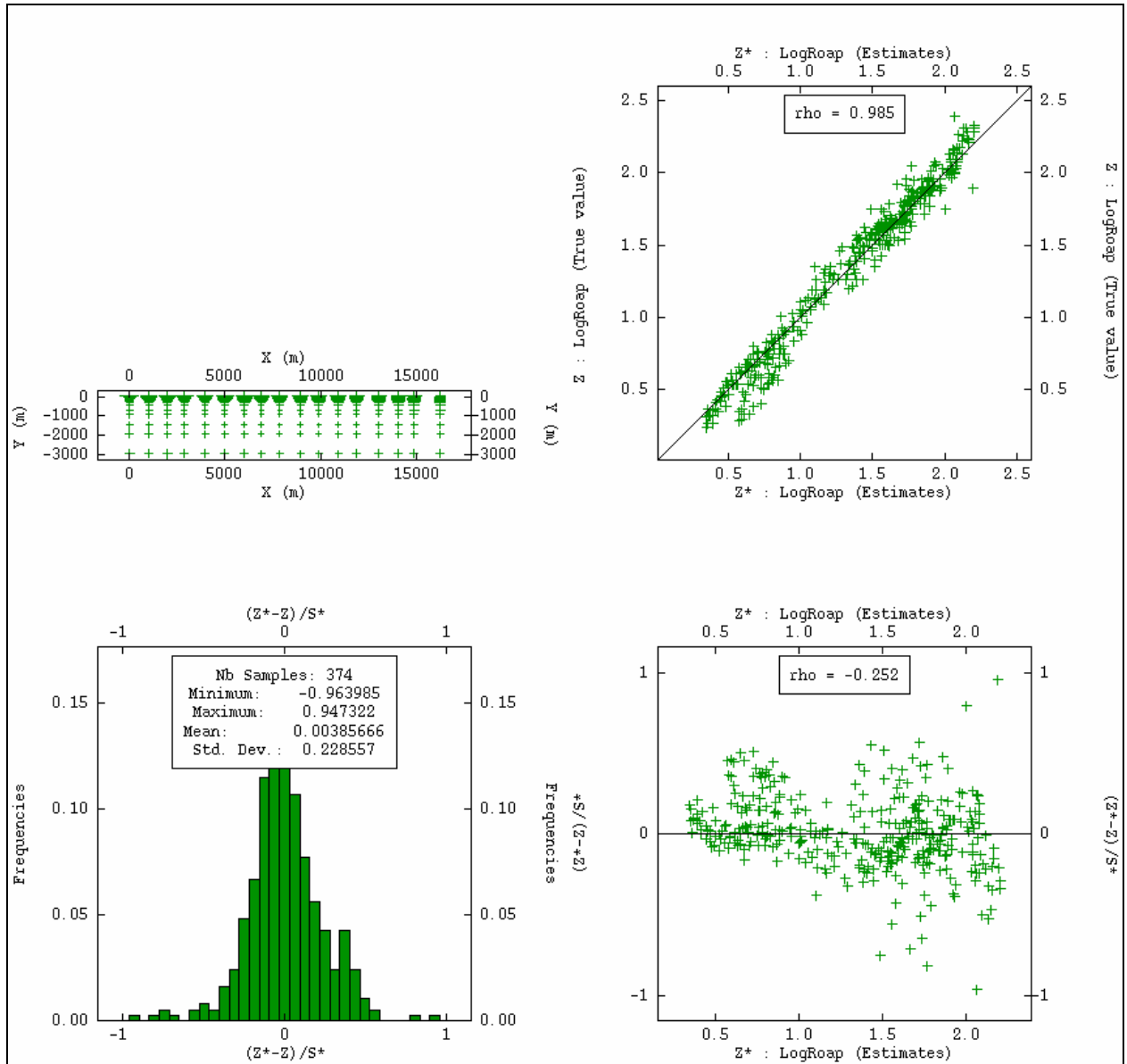




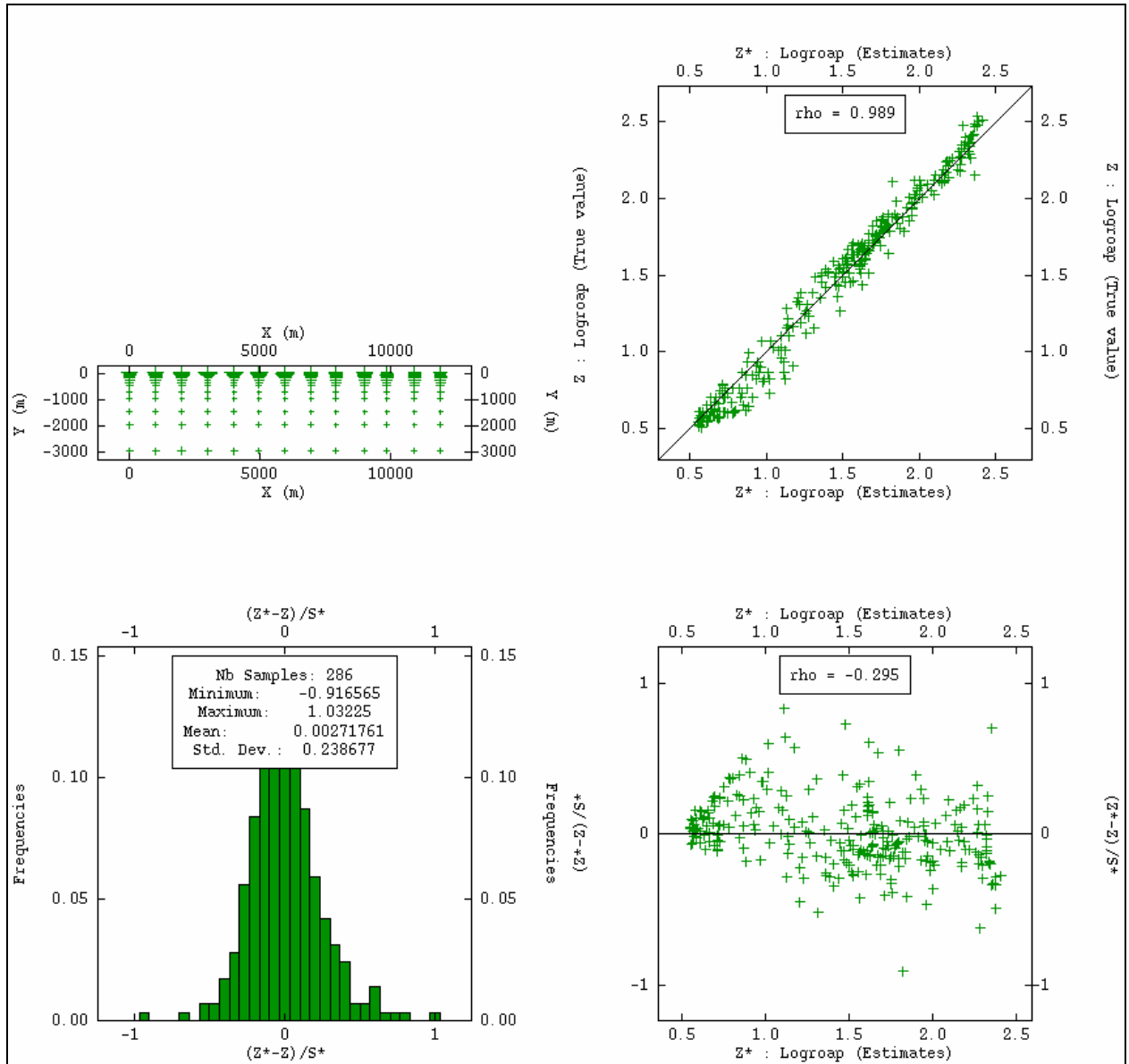
# Profil G



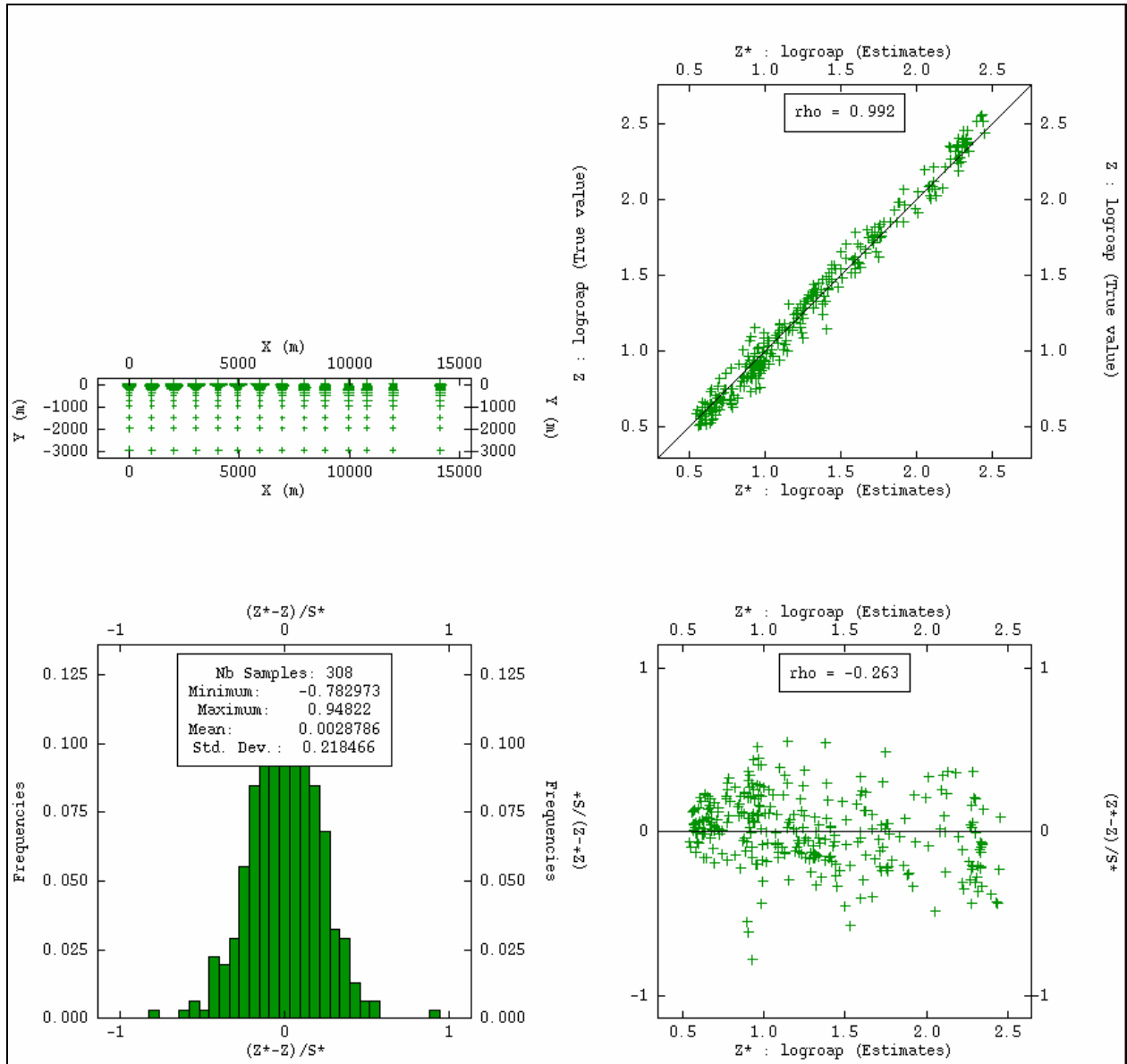
# Profil H



Profil I



Profil J





## ANNEXE IV : GEOPHYSIQUE

---



### Description des configurations Schlumberger et Wenner-Schlumberger

Les sondages électriques verticaux ont été établis sur le terrain par la compagnie africaine de géophysique suivant la configuration Schlumberger, et les inversions ont été faites au laboratoire à l'aide du logiciel RES2DINV. Les données sont organisées selon la configuration de mesure sur le terrain type Wenner-Schlumberger.

Avant d'entamer cette étude, la théorie relative aux différentes techniques géophysiques utilisées est présentée. Notre étude se base sur la méthode électrique, qui consiste à injecter un courant électrique et à mesurer la différence de potentiel électrique générée par le passage du courant dans les formations investiguées. Cette différence de potentiel est fonction de la résistivité des structures sondées et varie aussi en fonction du dispositif de mesure. La différence des résistivités mesurées donne des informations sur la nature, la géométrie ainsi que le contenu en eau des formations traversées par le courant.

Cette mesure de la résistivité se base sur la loi d'Ohm (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), qui s'exprime sous la forme

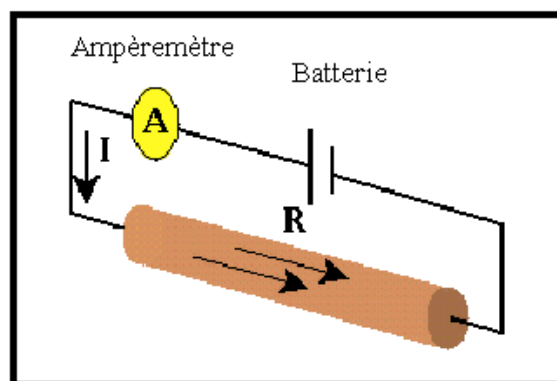
$$V = R.I$$

Avec :

V est la différence de potentiel

R : Résistance électrique

I : Intensité du courant électrique



*Schéma expliquant la loi d'Ohm pour un cylindre de résistance, traversée par un courant d'intensité I.*

*(cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal)*

Il faut noter que la résistance d'un milieu est fortement dépendante de sa géométrie. Les mesures sur le terrain sont ceux de la résistivité dite apparente, cette dernière est définie par la contribution de tous les matériaux traversés par le courant d'injection pour un dispositif d'électrodes donné.



La résistivité apparente est en fonction de la différence de potentiel mesurée entre les deux électrodes de mesure M et N, et d'un facteur géométrique, noté k, qui dépend de la position relative des quatre électrodes A, B, M et N. Dans le cas où les électrodes sont placées à la surface du sol, ce facteur géométrique est défini comme suit (Cours de géophysique G4, Université Moulay Ismail Meknès Maroc)

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

Ainsi, la résistivité apparente est définie telle que :

$$r_a = K * (V_{MN} / I)$$

Avec :  $r_a$  est la résistivité apparente (Wm)

K est un facteur géométrique (m)

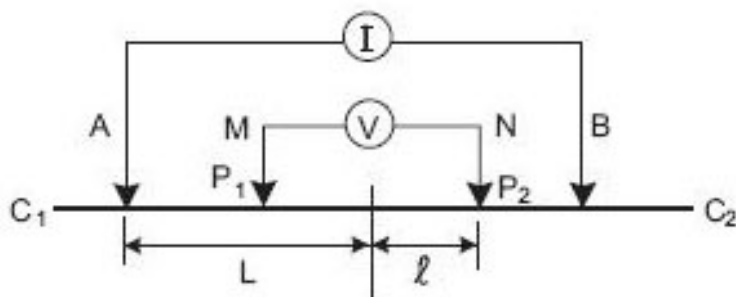
$V_{MN}$  est la différence de potentiel mesurée entre les électrodes M et N (V)

La configuration Schlumberger pour les mesures des SEV

C'est une méthode de mesure géoélectrique destinée à la réalisation des sondages électriques verticaux

Le principe consiste à l'injection du courant électrique par les électrodes A et B, et la mesure de la différence de potentiel par les électrodes M et N. Pour le dispositif Schlumberger il faut que

$L \gg l$ . Dans ce dispositif MN est supposé infiniment petit par rapport AB.



Mode de placement des électrodes selon la configuration Schlumberger

Avec

$$L = \frac{AB}{2} \quad \text{Et} \quad l = \frac{MN}{2}$$

$$r_a = \rho \frac{L^2 - l^2}{2l} \cdot \frac{V}{I}$$

Dans le dispositif Schlumberger les électrodes de mesure (M et N) sont immobiles au centre du dispositif et on fait varier l'écart entre les électrodes d'injection. On obtient ainsi un sondage de la résistivité apparente en fonction de la profondeur sous le centre du dispositif.

Le mode d'emploi de RES2DINV

Pour le profil A on a utilisé un pas de krigeage régulier de 50 m

La première étape c'est la construction du fichier de base (.Dat) construit de 9 lignes qui précède les données.

1 ère ligne : Nom (attribué un nom a notre données)

2 ème ligne : le plus petit espacement entre électrode (50 m dans notre cas)

3 ème ligne : Type de dispositif (11 pour le dispositif générale)

Ligne 4 : type de dispositif (7 pour le schlumberger)

Ligne 5 : titre type of measurement (il faut écrire cette phrase comment il est pour que le programme l'accepte)

Ligne6 : on met 0 si on a que les mesures des résistivités apparentes et, on met 1 si on plus que la résistivité apparente les mesures de PP (Polarisation provoquer)

Ligne7 : Nombre de points qu'on dispose (6860)

Ligne8 : Position de la première électrode (1 si la position est en 1 et 0 si la position est en milieu)

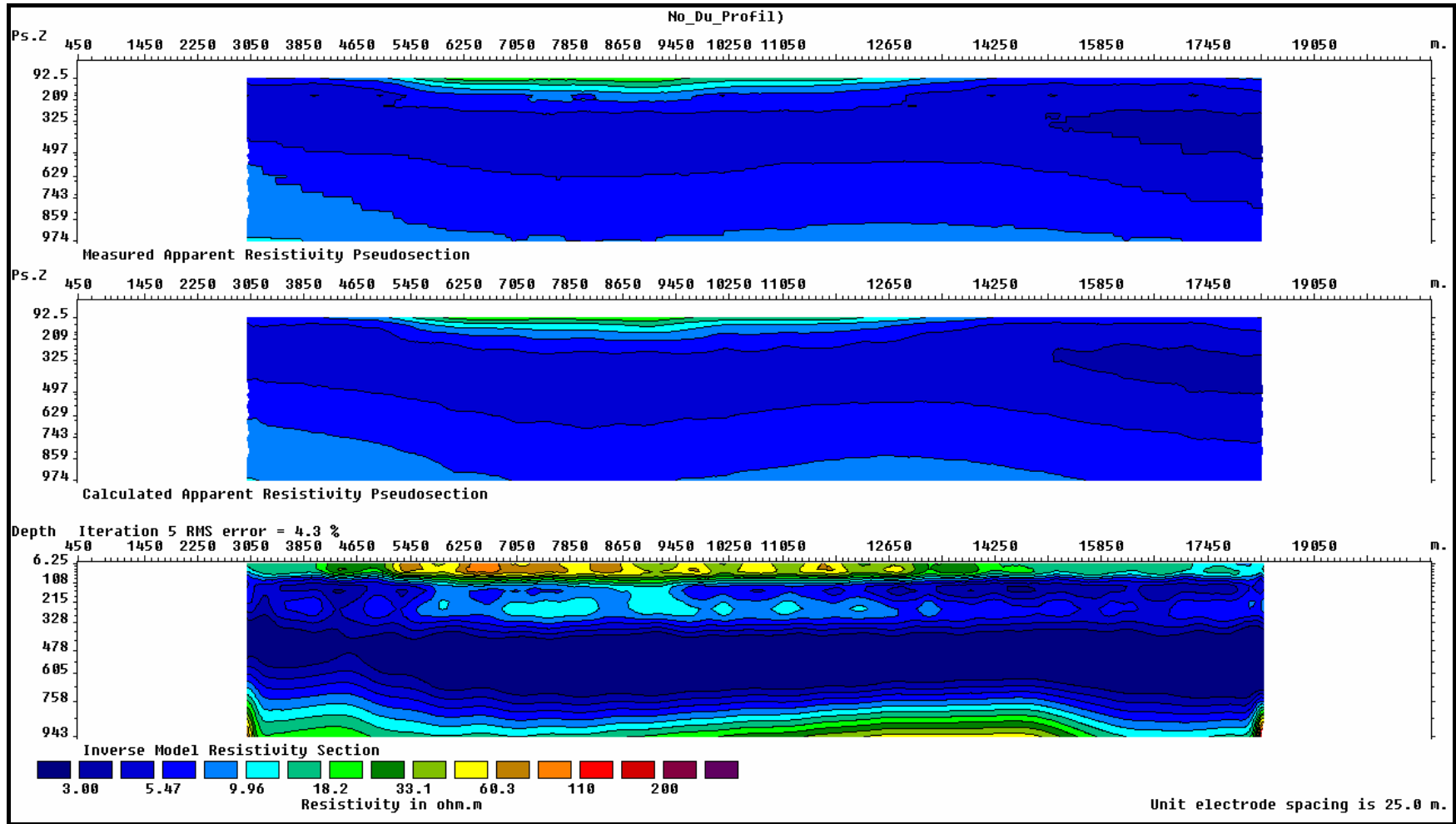
Ligne9 : on met 0 si on n'a rien en topographie, et 1 ou 2 si on va ajouter la topographie.

**Principales caractéristiques généralement admises des résistivités du bassin de Saïss (communication orale A. ESSAHLAOU)**

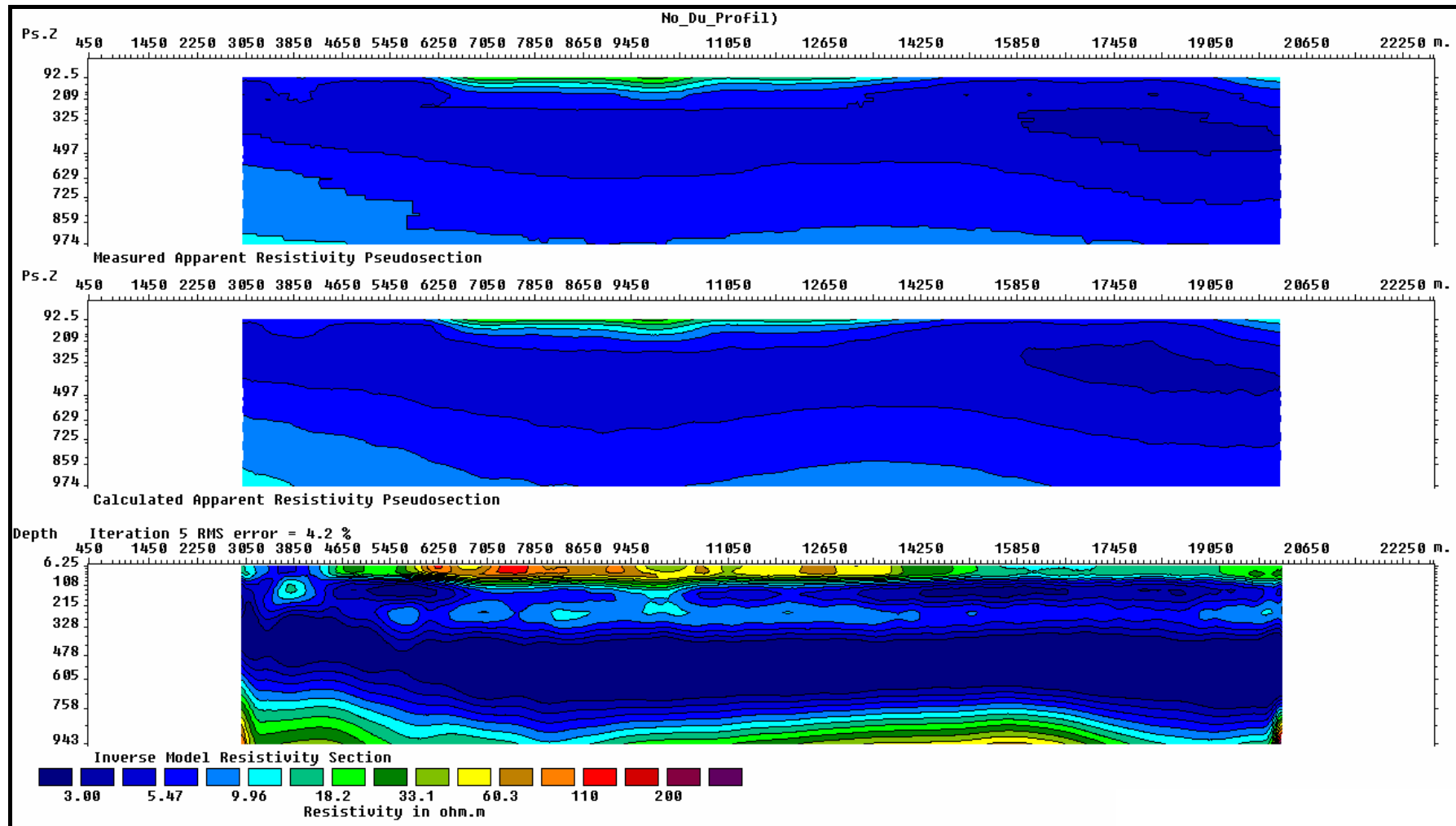
Formation géologique		Résistivité électrique	Propriété électrique
Couverture récente		[20 Ω.m, 40Ω.m]	Niveau assez conducteur
Plio-quaternaire		[50 Ω.m, 200Ω.m] parfois 500 Ω.m et plus	Grande hétérogénéité électrique, Généralement résistant
Miocène		[10 Ω.m, 30Ω.m]	Niveau très conducteur, parfois intercalation de niveaux résistants
Burdigalien		[60 Ω.m, 80Ω.m]	Niveau résistant par rapport au Miocène
Substratum	Lias	[150 Ω.m, 300Ω.m] et parfois plus	Niveau Résistant
	Trias	[25 Ω.m, 40Ω.m]	Niveau conducteur
	Paléo-zoïque	Généralement supérieur à 100 Ω.m	Niveau résistant

# Modèles d'inversion de la partie de la totalité des profils

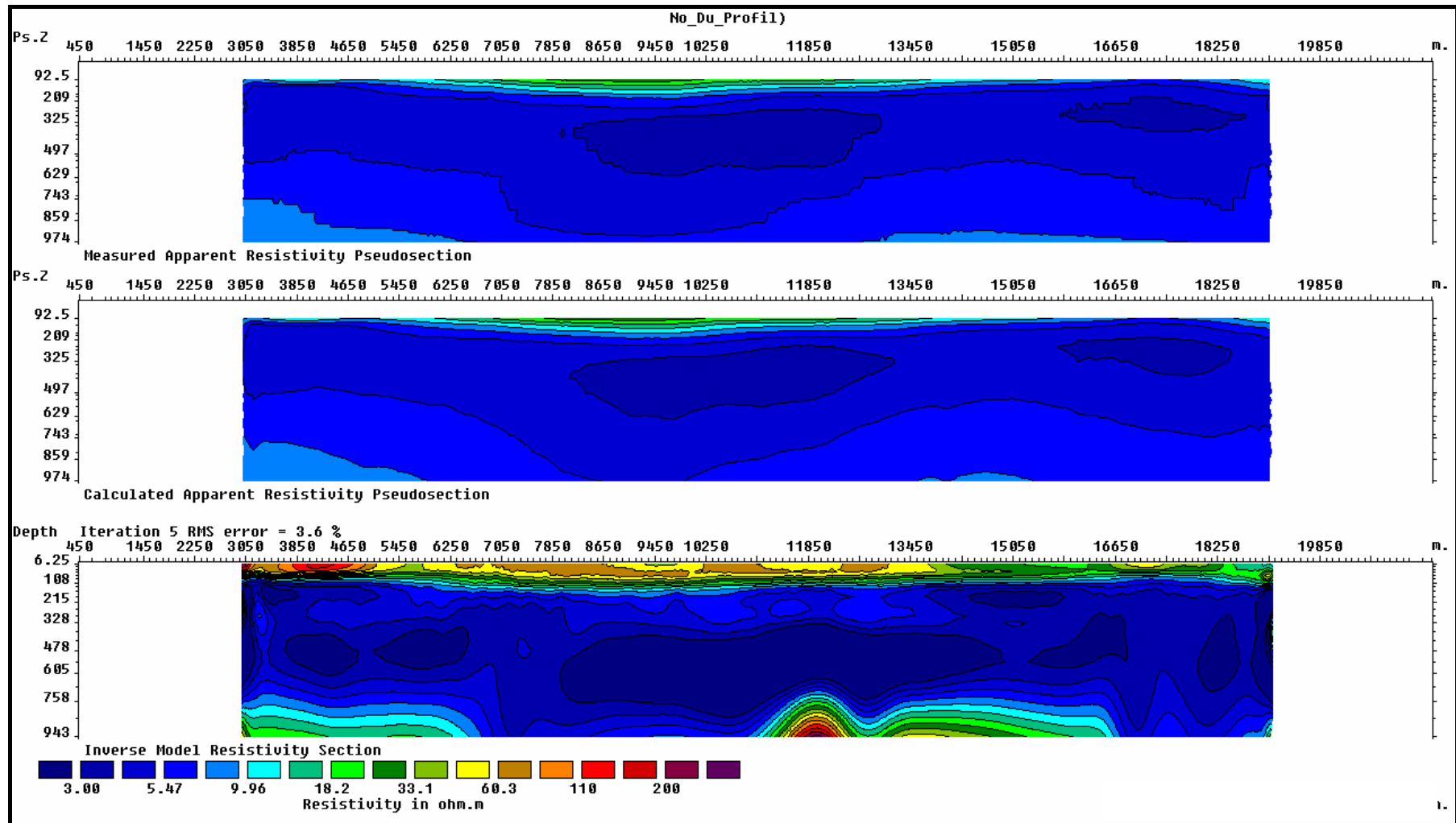
Profil A



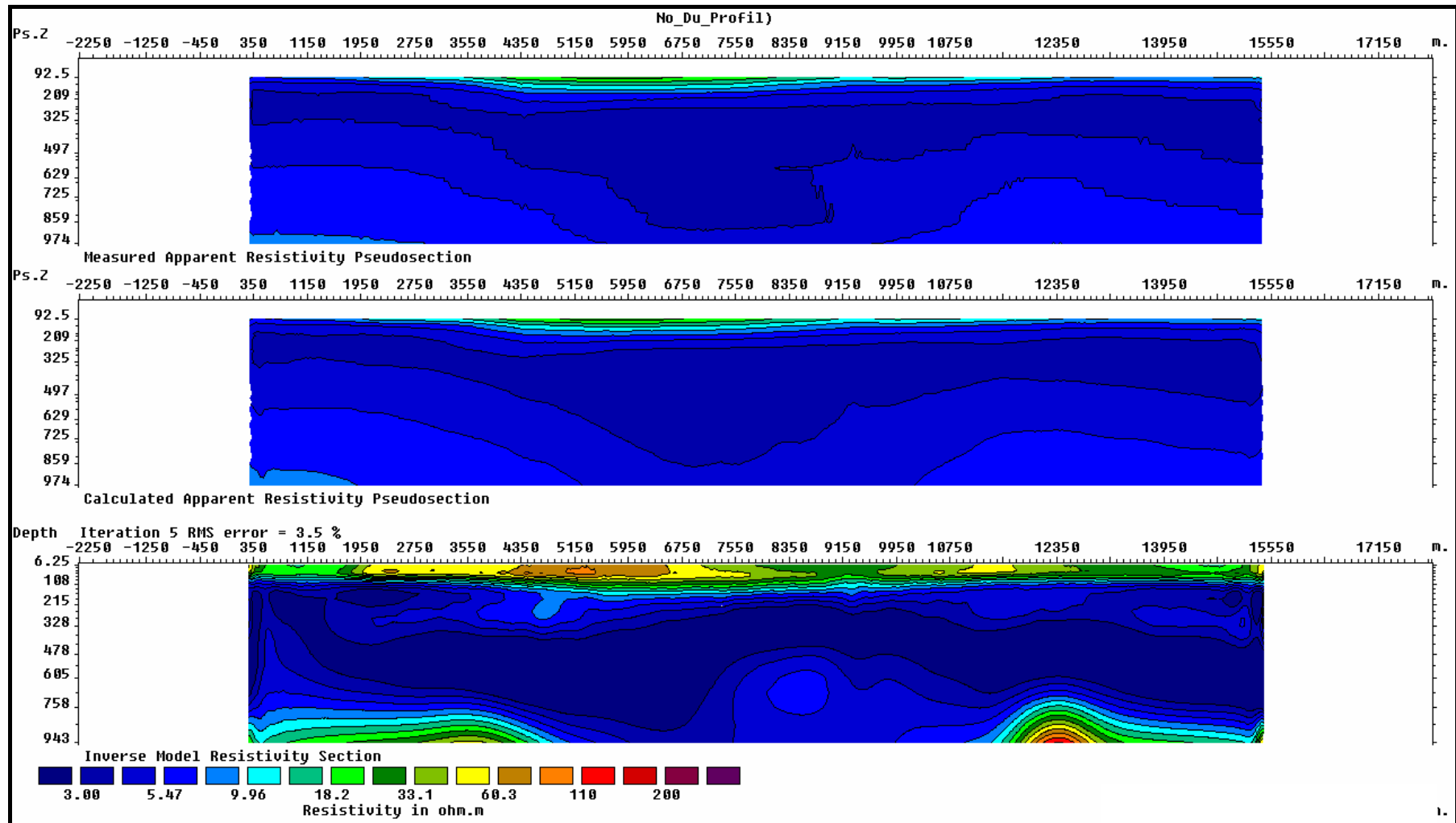
Profil B



Profil C

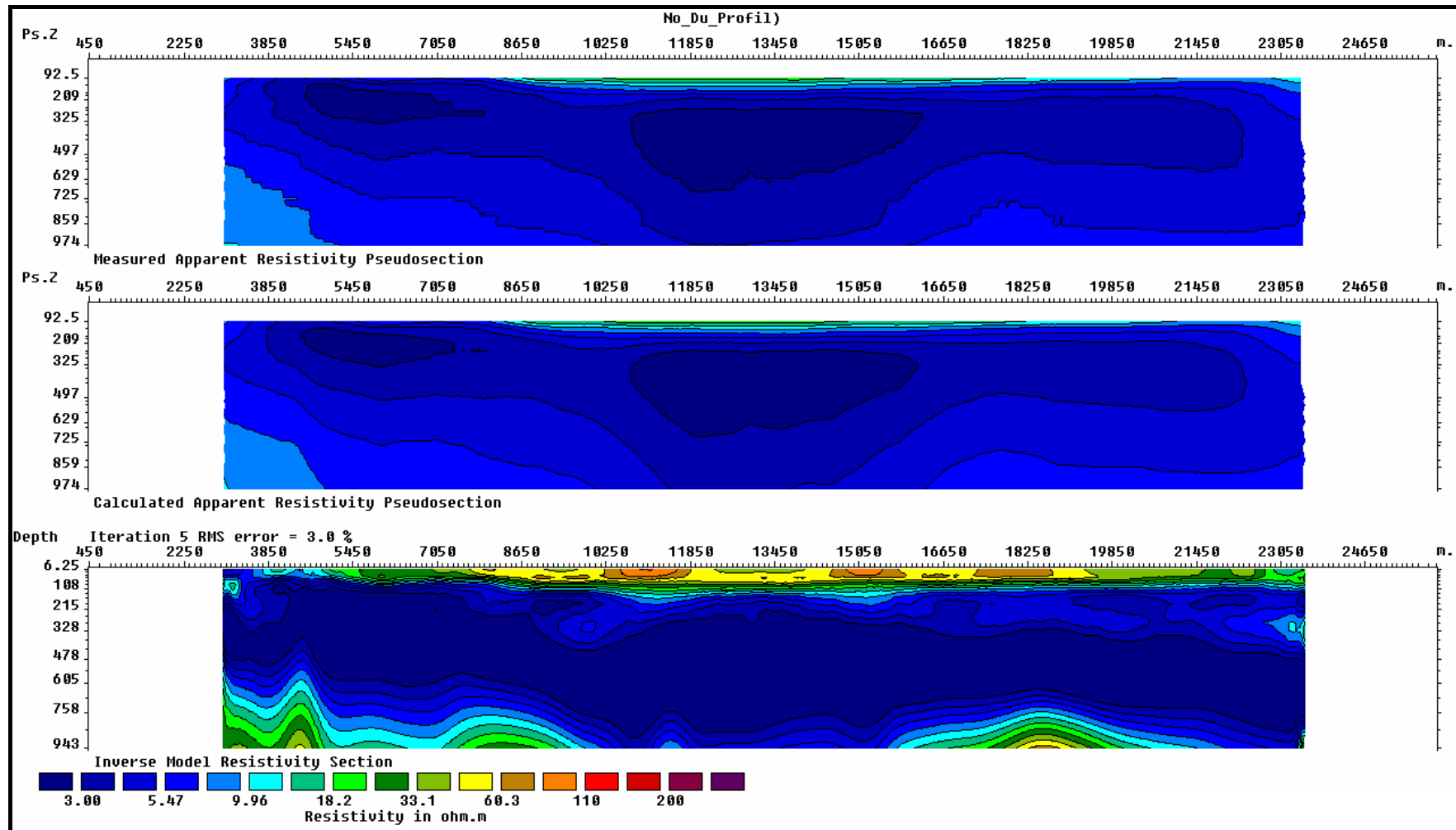


Profil D

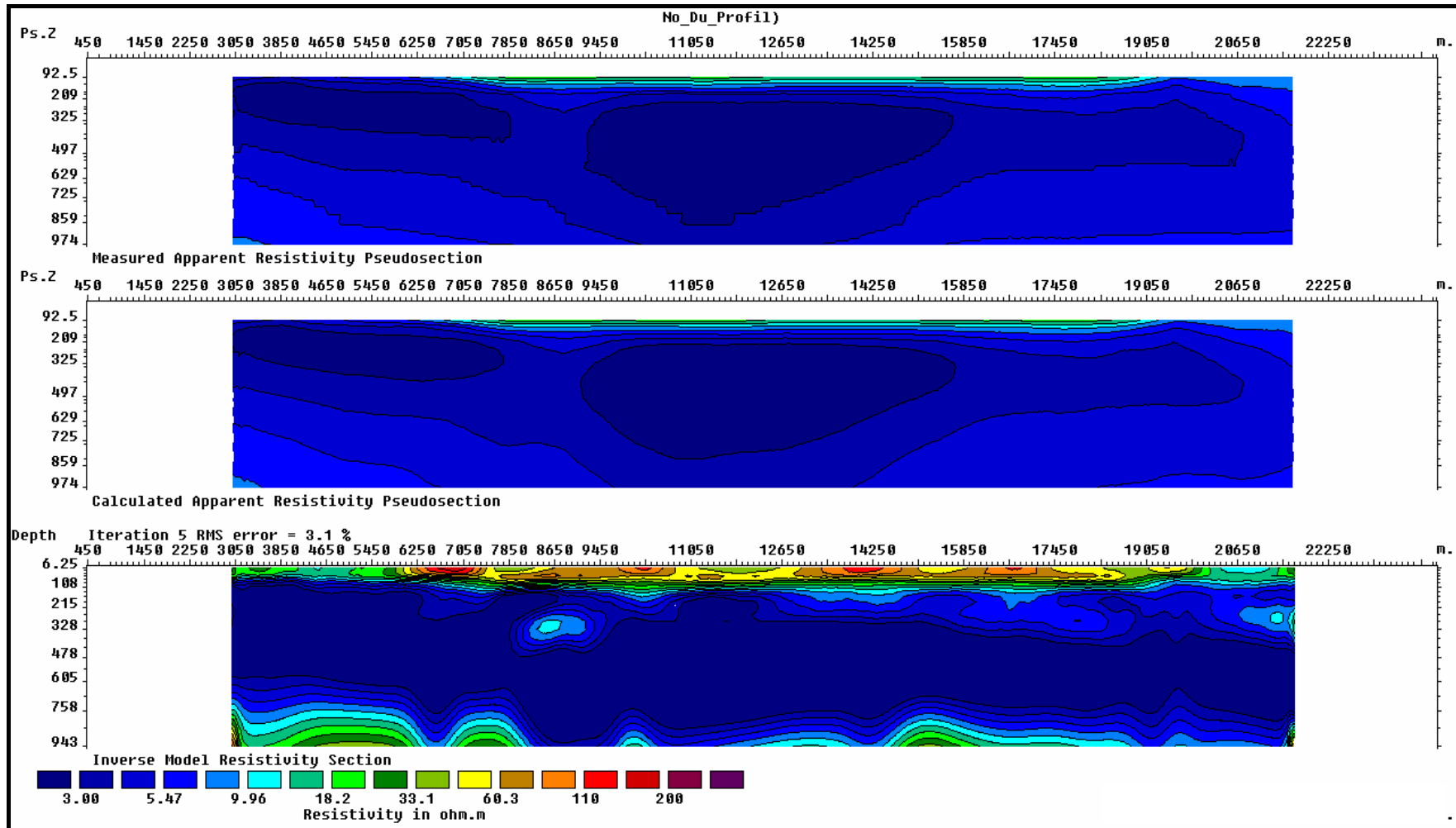




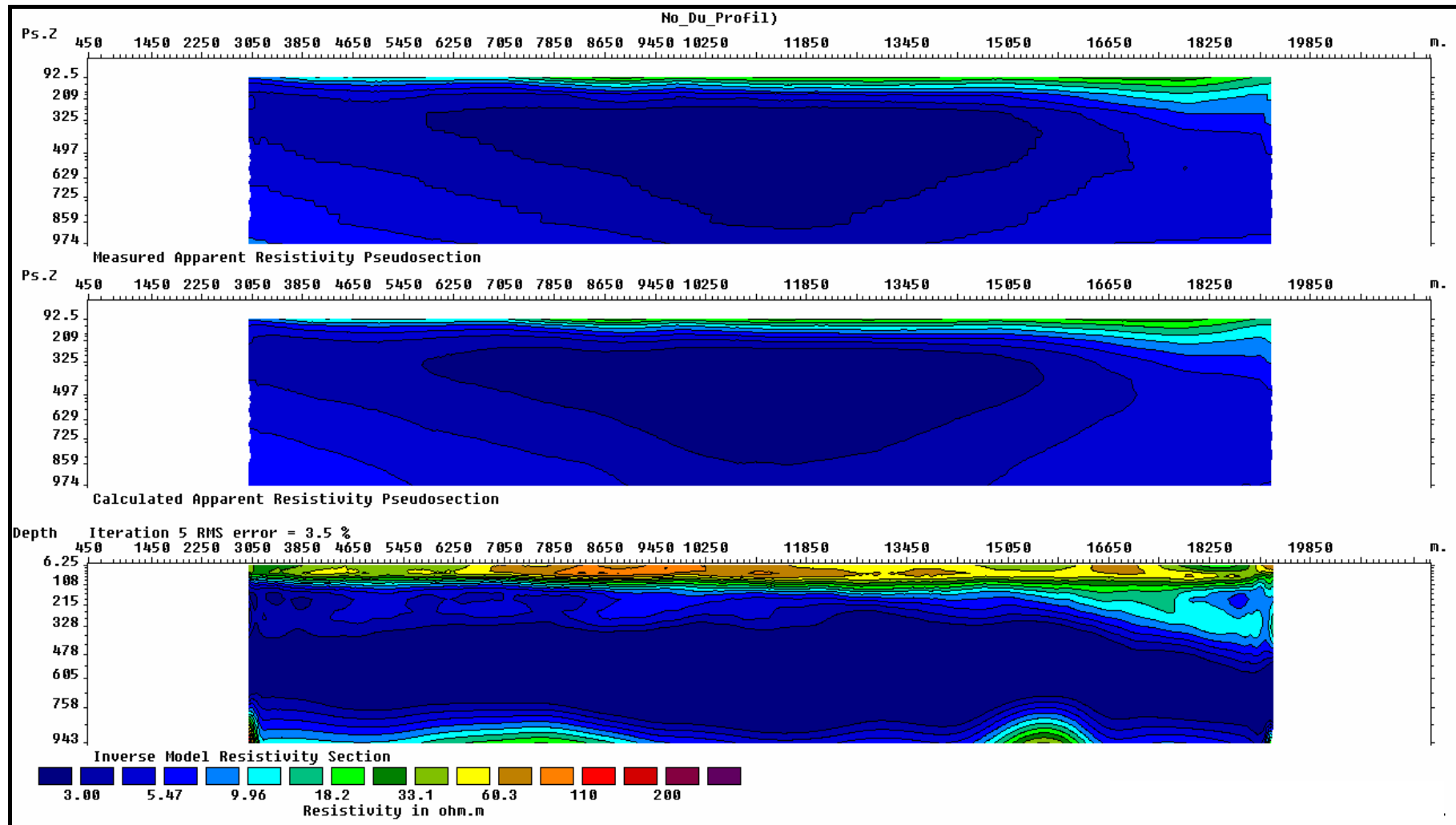
Profil E



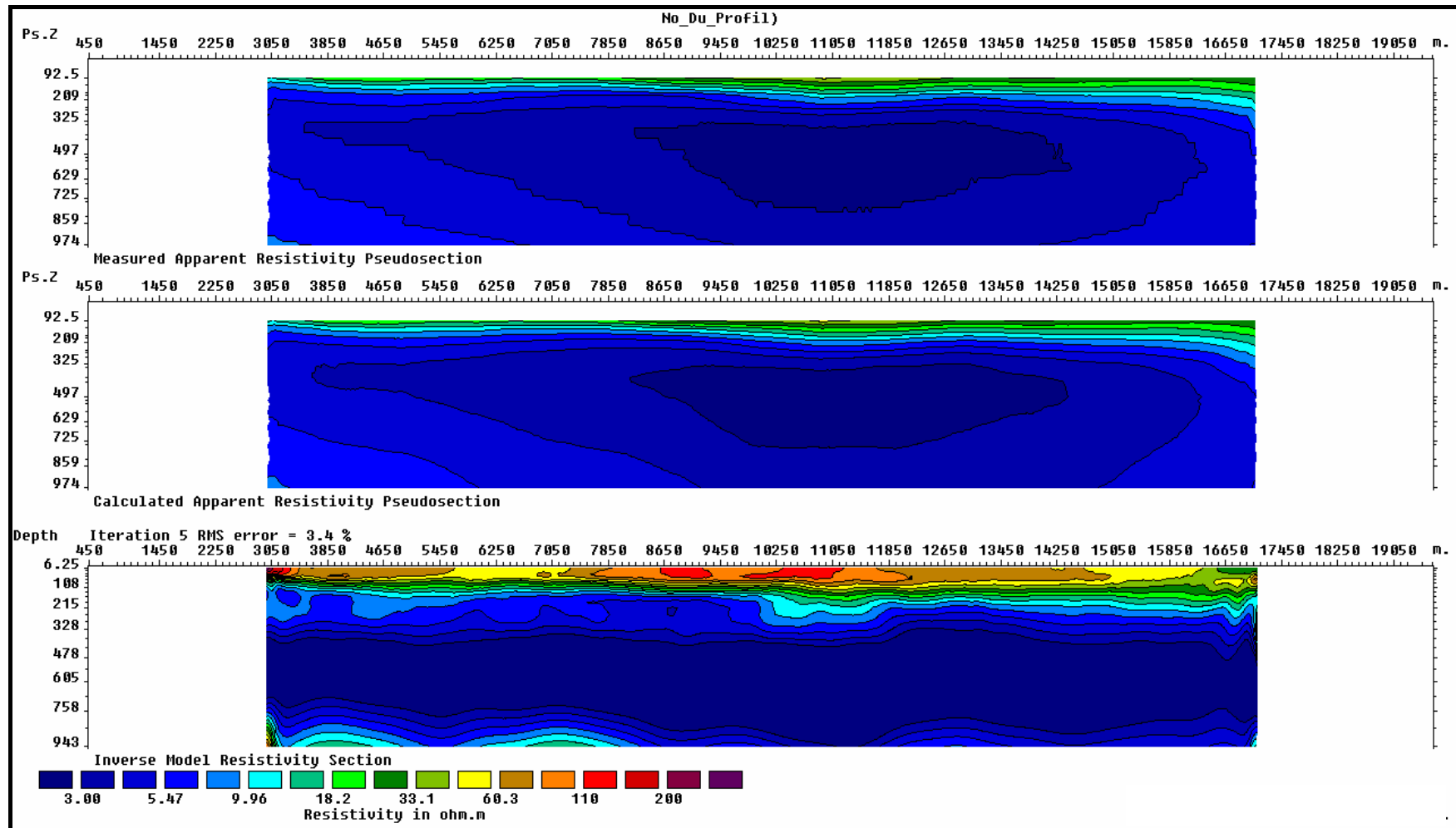
Profil F



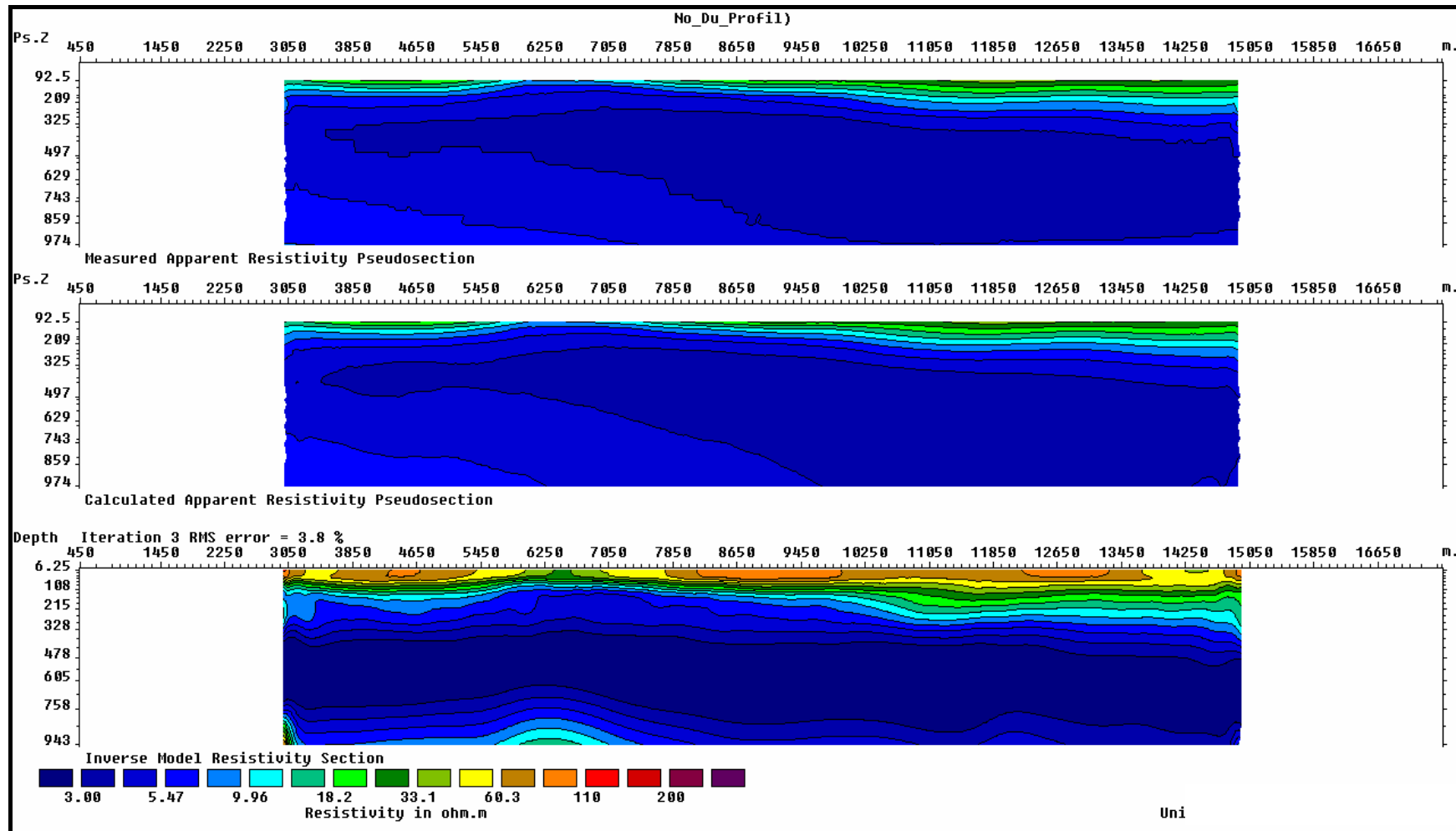
Profil G



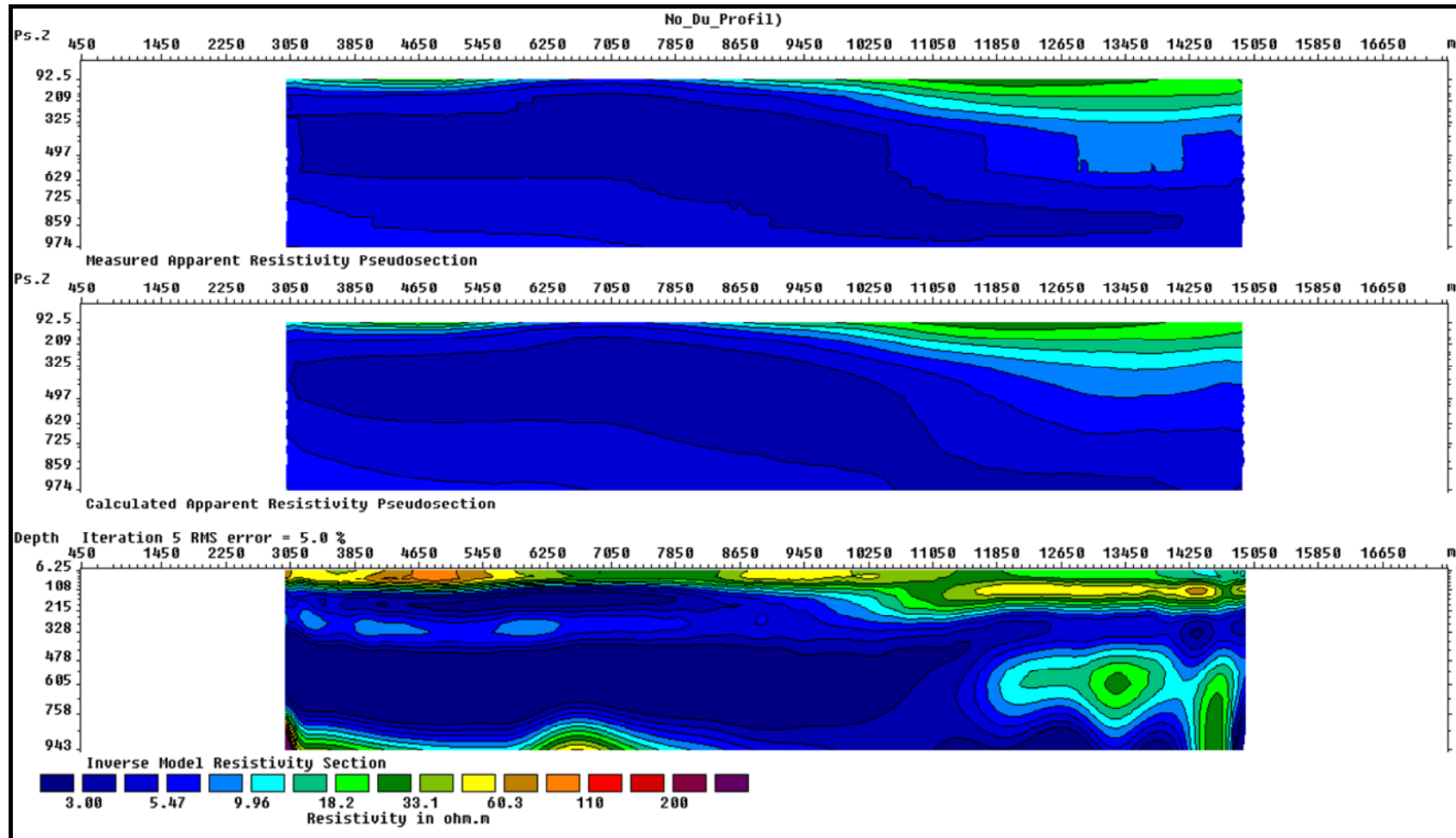
Profil H



Profil I

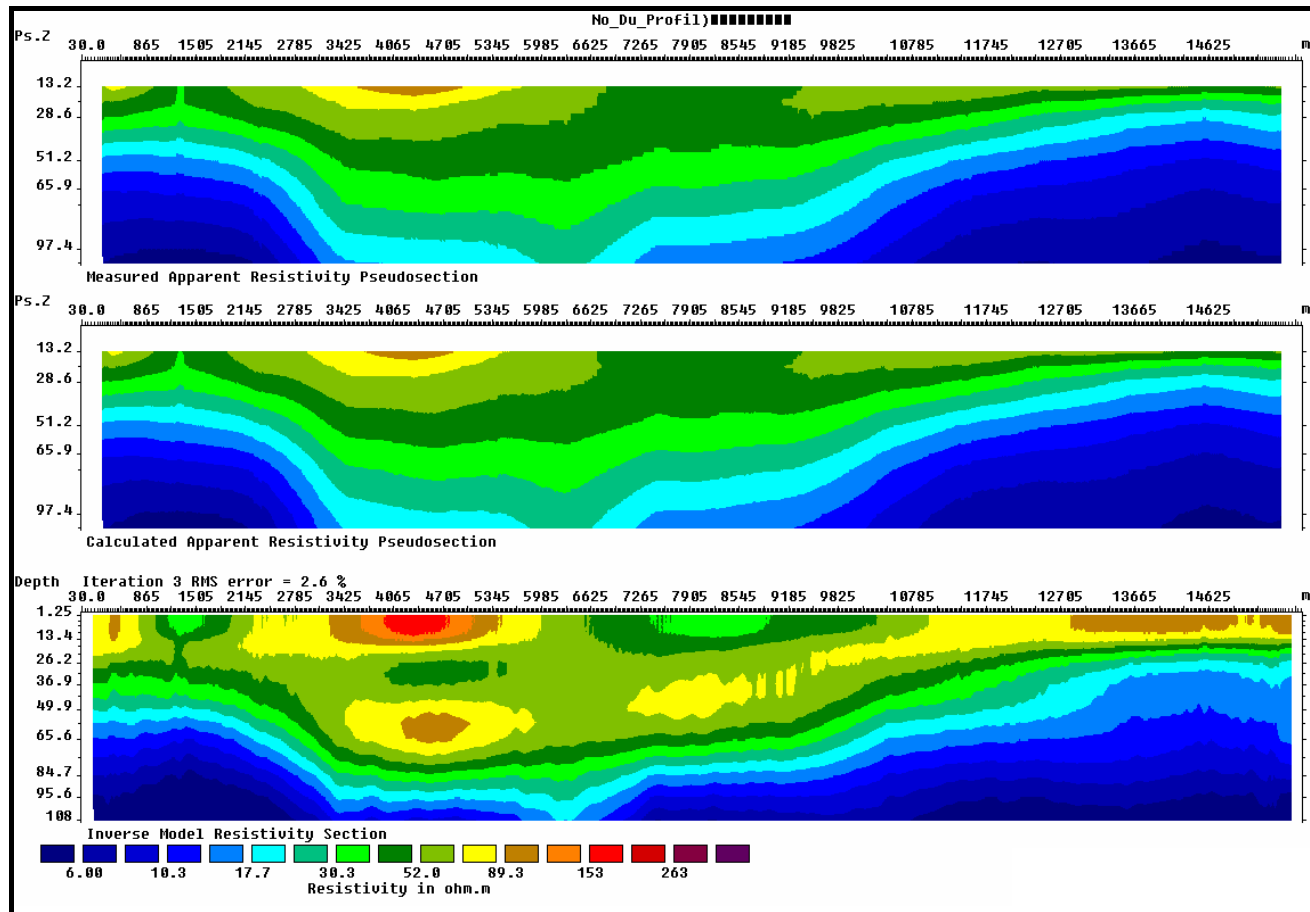


Profil J

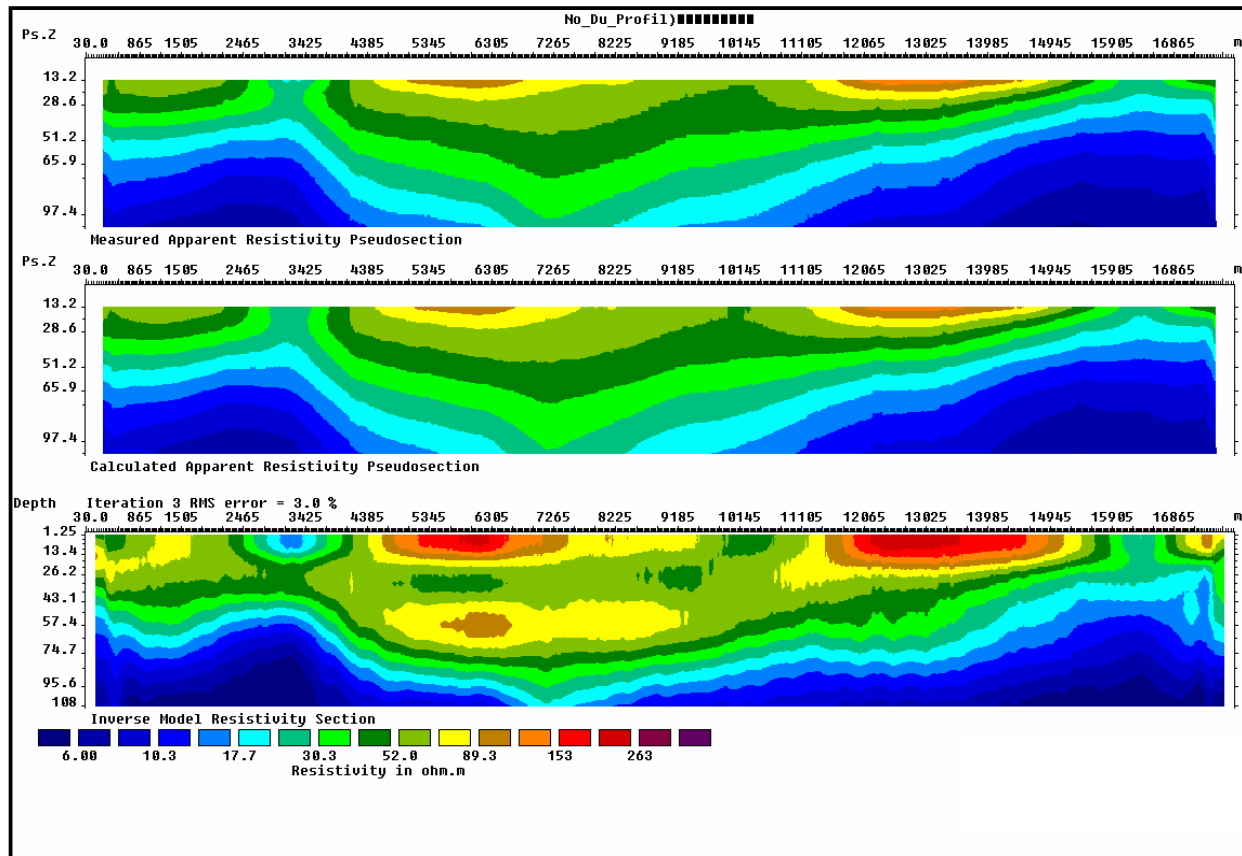


# Modèles d'inversion de la partie subsurface des profils

Profil A subsurface

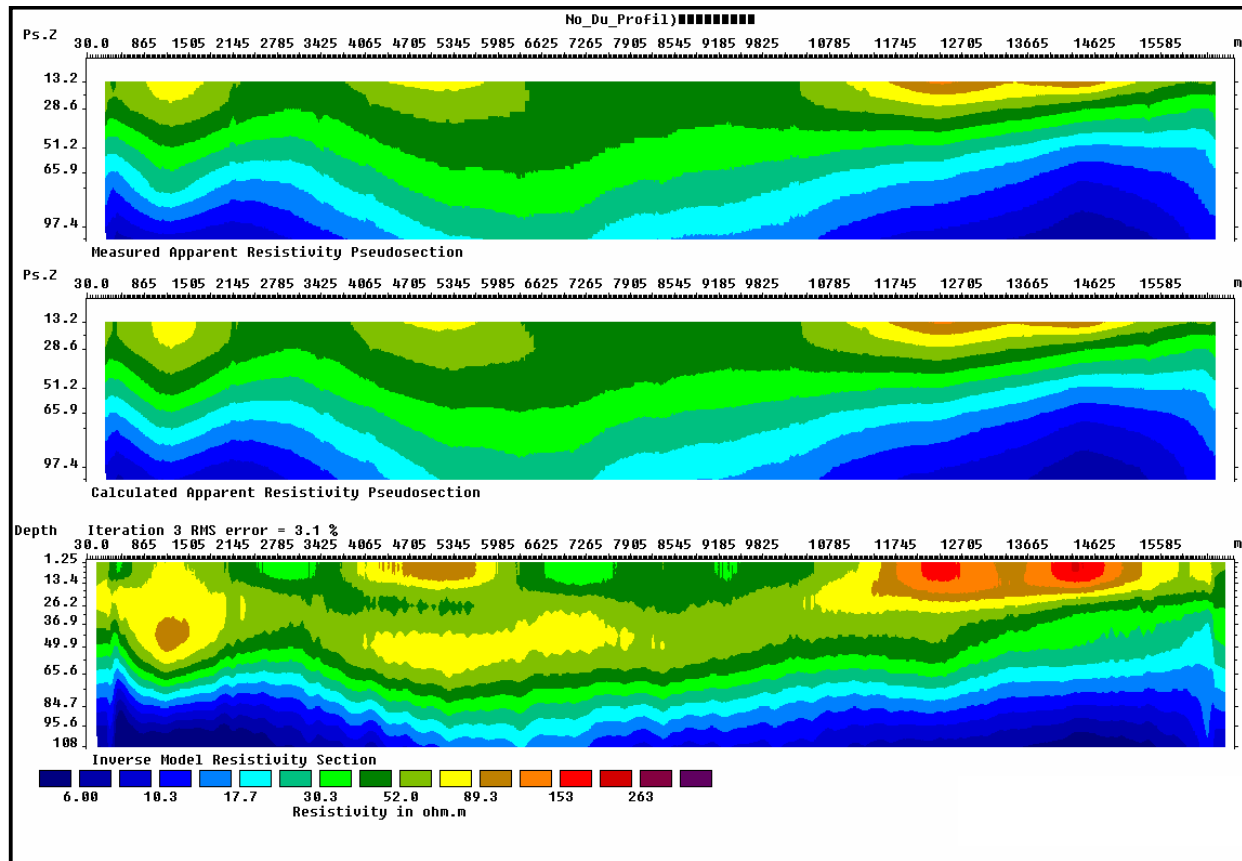


Profil B subsurface

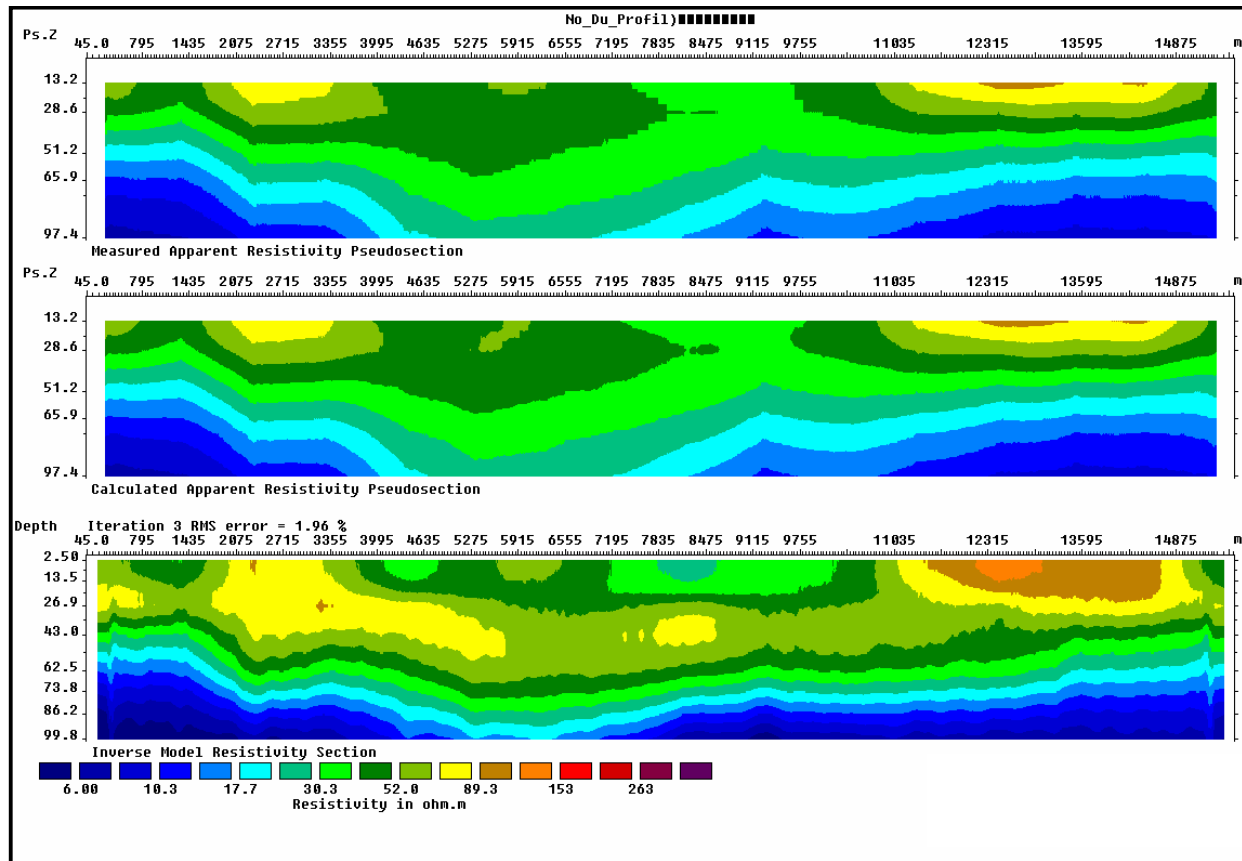




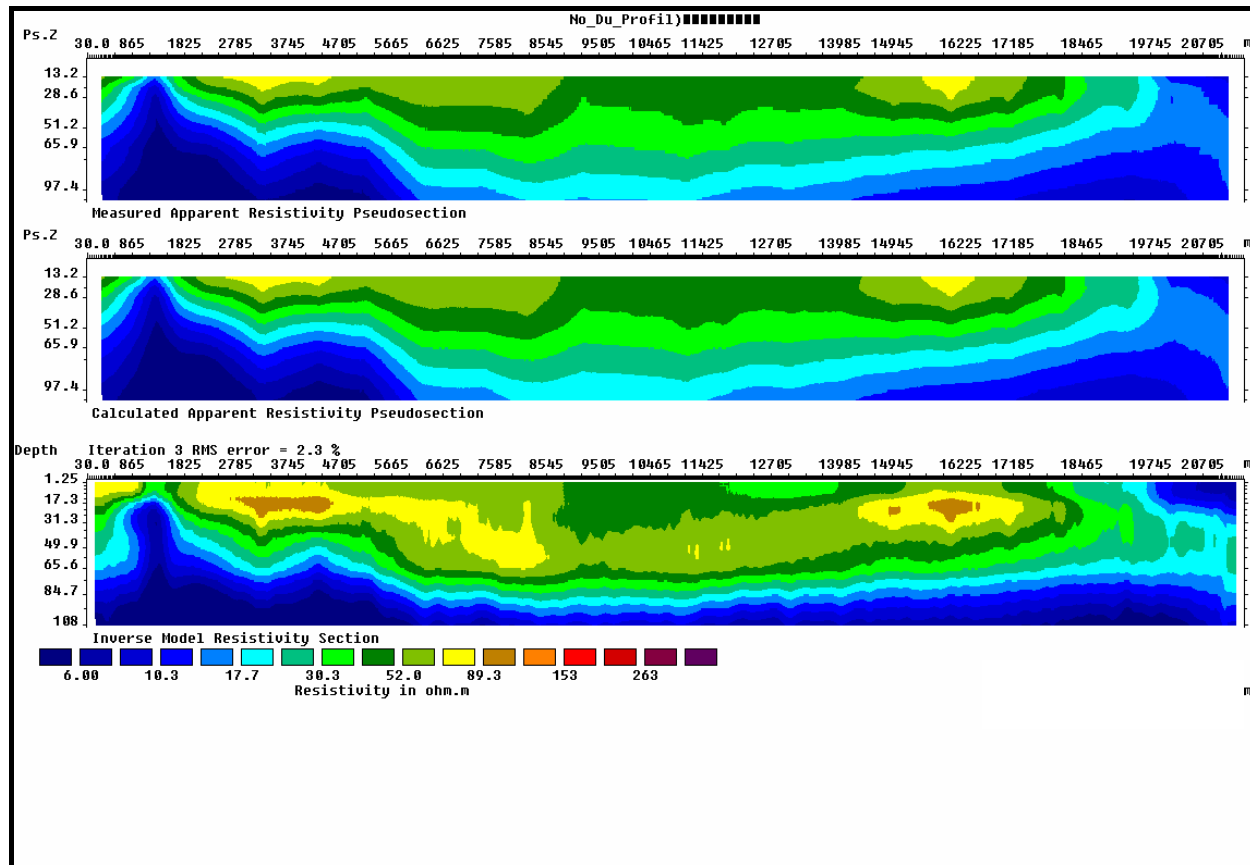
Profil C subsurface



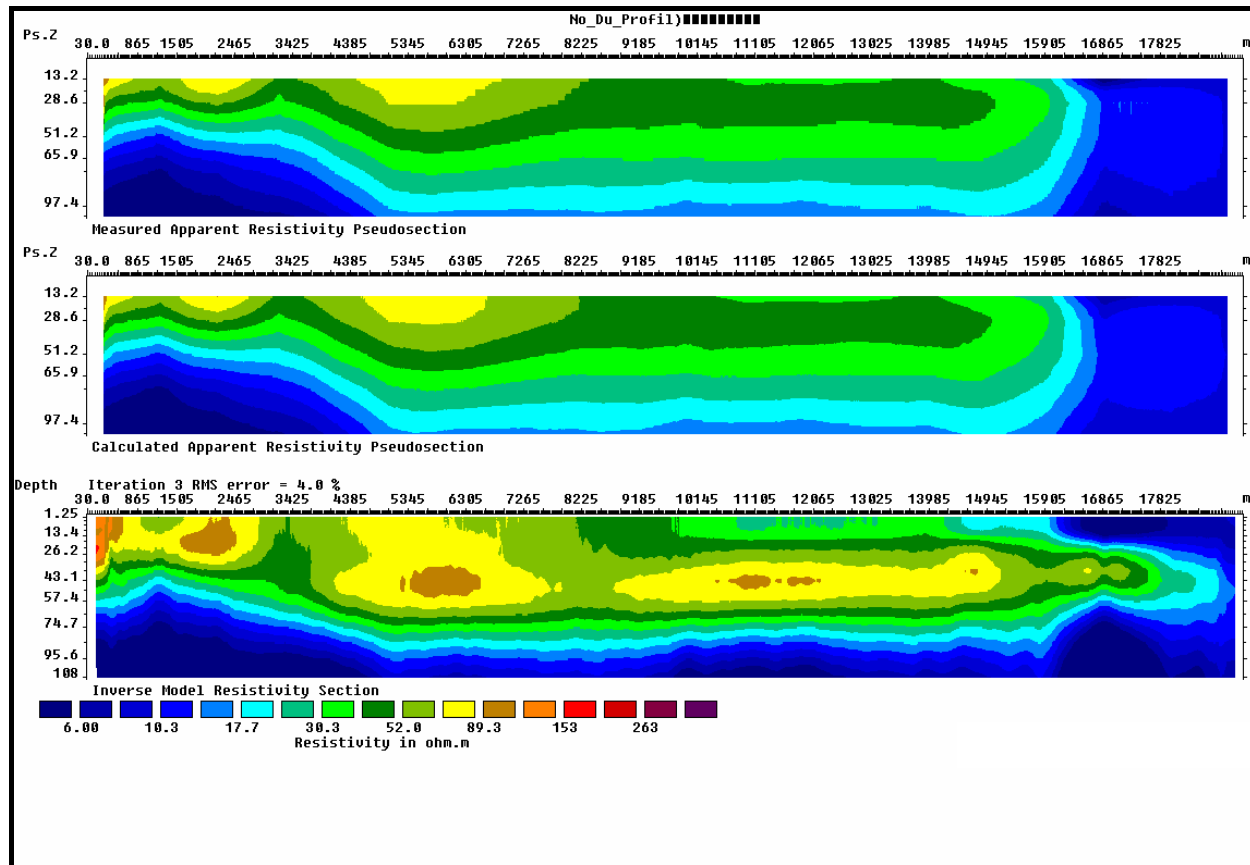
Profil D subsurface



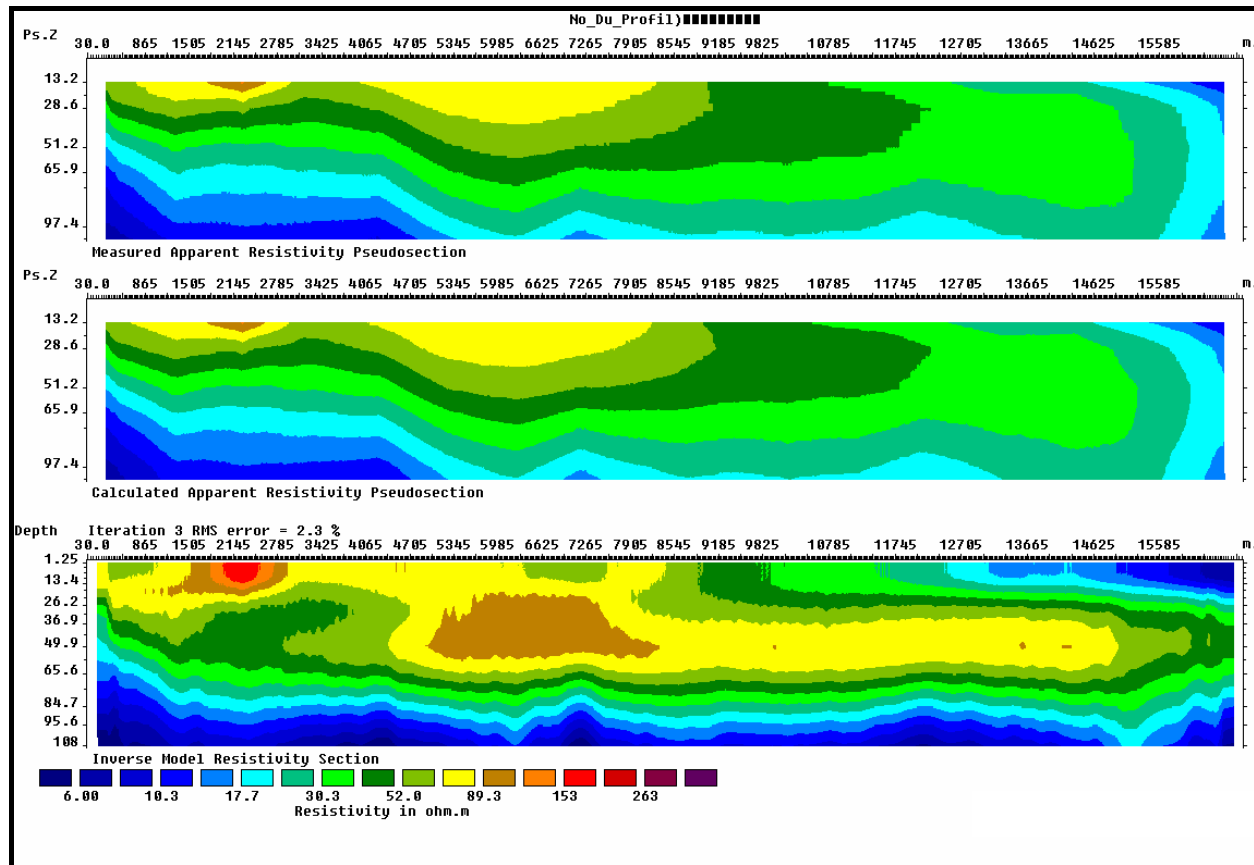
Profil E subsurface



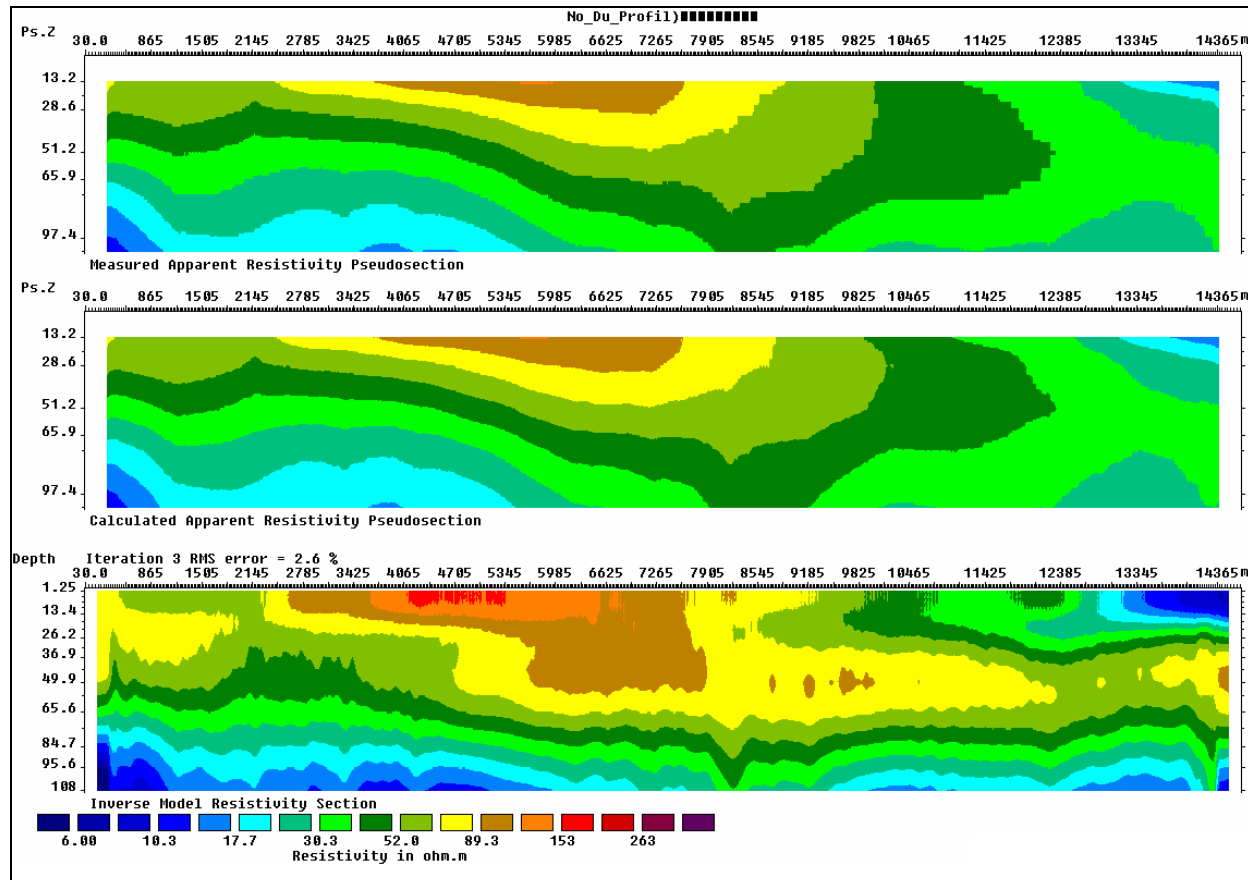
Profil F subsurface



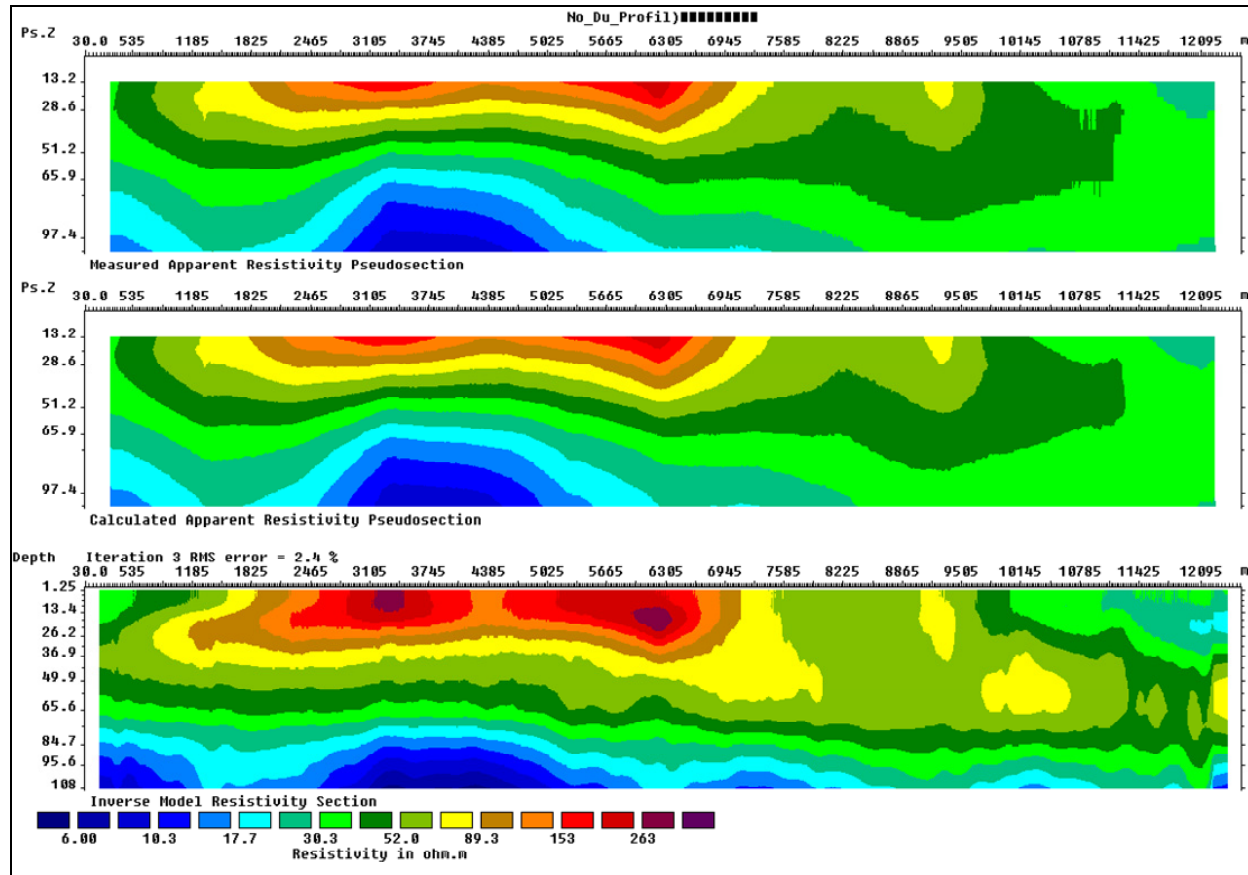
Profil G-subsurface



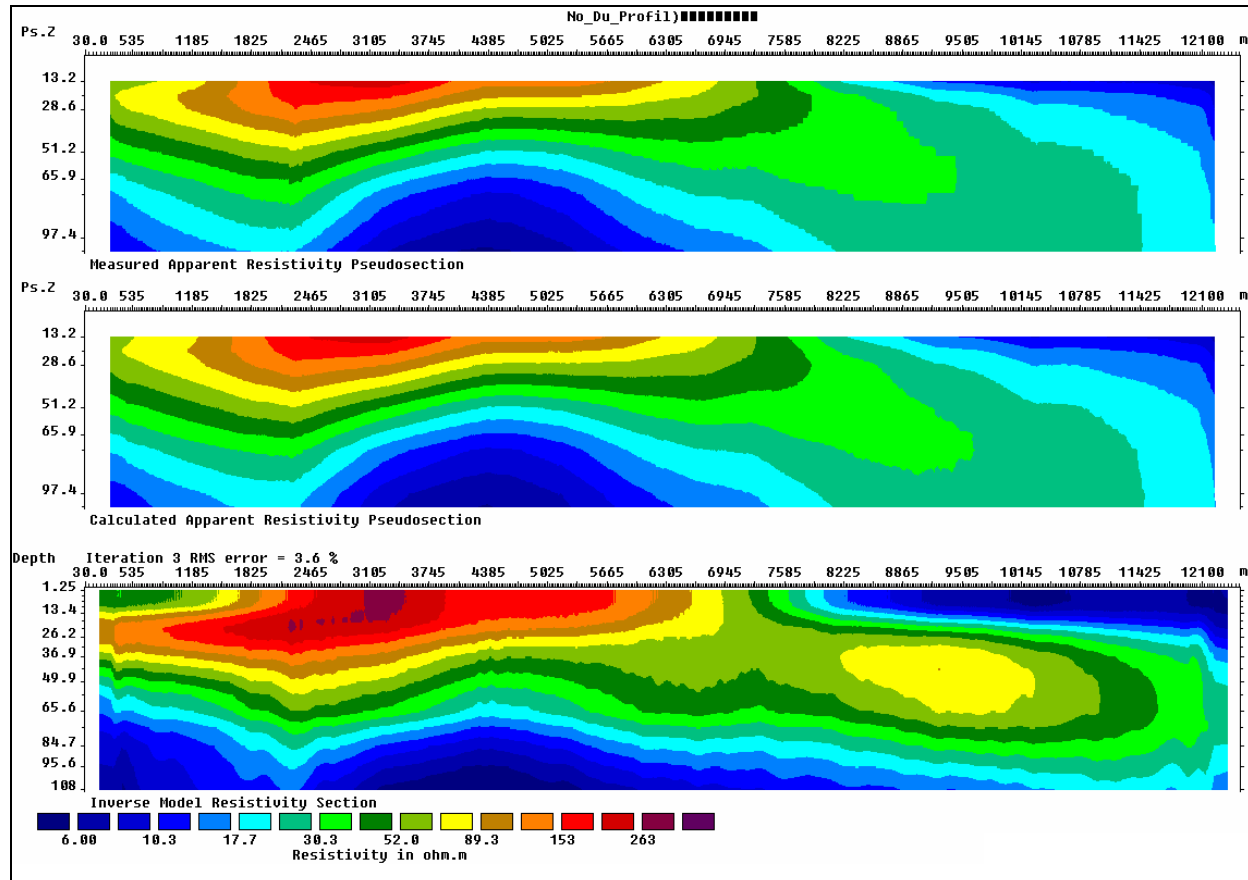
Profil H subsurface



Profil I subsurface



Profil J subsurface





## Description des forages

### Forage 3337/15

X= 520,000

Y= 376,300

Z= 408,000

-0-3 : Terre végétale

-3-6 : Marnes beiges

-6-17 : Grès marneux

-17-21 : Grès

-21-47 : Grès marneux

-47-50 : Grès sableux

-50-60 : Niveau à galets centimétriques

-60-80 : Marnes grises plastiques.

### Forage 2430/15

X= 522,800

Y= 373,200

Z= 460,90

-0-3 : Terre végétale

-3-33 : Calcaire lacustre et argile beige et jaune

-33-42 : Calcaire lacustre beige,

-42-54 : Argile jaune et ocre

-54-67 : Conglomérats et calcaires

-67-404 : Marnes grises plastiques

-404-455 : Marnes grises plus ou moins sableuses avec passées de grès gris

-455-551 : Marnes bleues plastiques

-551-601 : Dolomie cristallines beiges.

### Forage 1929/15

X= 517,904

Y= 383,045

Z= 435,00

-0-52 : calcaires blancs dolomitiques et marneux

-52-950 : Marnes grises

-950-2056 ; Marnes grises à filonnets de calcite gréseuse par place

-2056-2074 : Grès calcaires gris foncé (Burdigalien)

-2074-2161 : Marnes jaunes et brunes (Aquitaniens)

-2161-2288 : Marnes bariolées (Permo-triasique)

Forage 2793/15

X= 521,925

Y= 382,620

Z= 383,00

-0-5 : Limon marneux rouge

-5-8 : Calcaire

-8-11 : Argiles et calcaire

-11-80 : Intercalation de marnes et calcaires

-80-123 : Argiles rouges et passages calcaires

-123-..... : Marnes grises

Forage 2370/15

X= 524,350

Y= 382,350

Z= 383,00

-0-90 : Calcaires blanchâtres marneux ou à faciès travertineux

-90-118 : Microconglomérats

-118-1200 : Marnes grises plastiques pyriteuses

-1200-1278 : Intercalation des grès dans les marnes grise

-1278-1316 : Calcaires détritiques et marnes

-1316-..... : Dolomie cristallines beiges.

Forage 2564/15

X= 532,708

Y= 380,332

Z= 383,85

-0-1 : Terre végétale

-1-2 : Galet à matrice argileux

-2-3 : Sables

-3-5 : Galets à matrice argilo-marneux et limons jaune

-5-8 : Argiles marneuses rougeâtre à galets

-8-11 : Argiles marneux jaunes à galets

-11-15 : Calcaires et marnes, calcaires fracturés de 13 à 15m.

Forage 2743/15

X= 514,744

Y= 372,00

Z= 435,00

-0-10 : Limons jaunes

-10-35 : Marnes jaunes plastiques légèrement sableuses

-35-60 : Marnes grises plastiques.

