

Document public



Intitulé du projet : **Définition des indicateurs de gestion de la masse d'eau de Pierrefonds par l'Office de l'Eau de La Réunion**

Titre du rapport : **Supervision et interprétation des tomographies électriques réalisées sur le site de Pierrefonds par la société Stratagem974**

Rapport final

BRGM/RP-65573-FR  
Juin 2016





Intitulé du projet : **Définition des indicateurs de gestion de la masse d'eau de Pierrefonds par l'Office de l'Eau de La Réunion**

Titre du rapport : **Supervision et interprétation des tomographies électriques réalisées sur le site de Pierrefonds par la société Stratagem974**

Rapport final

**BRGM/RP-65573-FR**

Juin 2016

**Baltassat J.M., Aunay B. & Dumont M.**

**Vérificateur :**

Nom : N. Coppo

Fonction : Géophysicien senior

Date : 29/03/2016

Signé

**Approbateur :**

Nom : Jean-Marc Mompelat

Fonction: Directeur adjoint DAT

Date : 23/05/2016

Signé

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

**Mots-clés** : tomographie électrique, hydrogéologie, géophysique, roche volcanique, basalte, aquifère, ERT, TEM (transient electromagnestism), AEM (Airborne ElectroMagnetic), La Réunion (974), Saint-Pierre, Pierrefonds

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Baltassat J.M., Aunay B. & Dumont M. (2016) – Supervision et interprétation des tomographies électriques réalisées sur le site de Pierrefonds par la société Stratagem974 pour le compte de l'Office de l'eau de la Réunion, Rapport final. BRGM/RP-65573-FR, 175 p.

## Synthèse

Dans le cadre de sa mission d'étude et de suivi des ressources en eau, l'Office de l'Eau de la Réunion (OLE) réalise des modèles numériques hydrogéologiques utilisés comme outils d'aide à la décision pour la définition des plans de gestion des eaux souterraines. Afin d'approfondir ses connaissances de la structure géologique des systèmes aquifères de Pierrefonds, notamment en vue de mieux contraindre le modèle hydrogéologique, l'OLE a fait réaliser par Stratagem974, 5 profils de tomographie de résistivité électrique (« Electrical Resistivity Tomography », ERT en anglais), pour étudier ces systèmes aquifères. Ces investigations au sol viennent compléter de précédentes investigations réalisées par le BRGM à titre méthodologique dans la partie est de la zone (Girard *et al.*, 2008) ainsi que les données TEM<sup>1</sup> hélicoptère acquises dans le cadre du projet REUN\_EM (Martelet *et al.*, 2014).

Le présent rapport constitue une partie d'un projet partenarial entre l'Office de l'eau et le BRGM, sur le secteur de Pierrefonds, dont les objectifs, plus vastes, consistaient à réaliser les trois tâches suivantes :

- (i) adapter et interpréter les données de géophysique hélicoptère, acquises dans le cadre du projet REUN\_EM (géophysique électromagnétique hélicoptère ou AEM), au contexte hydrogéologique de Pierrefonds. Cette tâche est traitée dans le rapport BRGM/RP-65621-FR (Aunay *et al.*, 2016) ;
- (ii) appuyer techniquement l'Office de l'eau pour la réalisation d'une modélisation du fonctionnement de l'hydrosystème de Pierrefonds. Cette tâche a principalement consisté en la participation à des réunions d'échange technique et à des relectures de rapports rédigés par l'Office de l'eau ;
- (iii) appuyer techniquement l'Office de l'eau pour la réalisation d'une campagne de géophysique profonde. Cette dernière tâche, détaillée ci-dessous, fait l'objet du présent rapport.

La mission du BRGM, détaillée dans le présent rapport, a donc consisté en 1) une assistance pour la finalisation du cahier des charges et le choix du prestataire, réalisée en octobre et novembre 2014, 2) à la supervision (depuis Orléans) des travaux de terrains réalisés en mars et avril 2015 et enfin, 3) à l'analyse des résultats et du rapport présentés par le prestataire en mai 2015. Une interprétation des résultats Stratagem en comparaison des résultats AEM complète ces travaux.

Malgré les difficultés rencontrées sur le terrain (maintenance de l'électrode lointaine, interférences du réseau de canalisation...), les investigations par tomographie électrique de résistivité réalisées par Stratagem974 sur le site de Pierrefonds ont produit des résultats de bonne qualité qui sont présentés dans un rapport bien documenté (rapport Stratagem 974 - Chaput & Durand (2015)). La comparaison réalisée dans le cadre des présents travaux d'expertise du BRGM montre une bonne corrélation des résultats ERT avec les logs ou coupes lithologiques des forages : la profondeur des interfaces des principaux horizons géo-électriques est évaluée avec une incertitude à 10% près dans les conditions favorables, jusqu'à 100 m de profondeur. Cette bonne cohérence globale entre résultats ERT et la géologie tend à prouver que les interférences potentielles, notamment celles des canalisations métalliques sur les résultats des tomographies sont réduites.

---

<sup>1</sup> « transient electromagnetism », électromagnétisme transitoire en anglais

Le calage des faciès de résistivités avec les lithologies observées en forage montre qu'il existe un recouvrement important des gammes de résistivité des différentes formations en présence. Dans ces conditions, l'interprétation ne peut être basée sur le seul paramètre résistivité.

La révision des résultats de Stratagem974 et TEM conduit à un modèle de conducteur profond dont l'interprétation est ambiguë ; il peut s'agir :

- De séries basaltiques anciennes et altérées telles que proposées par les études précédentes ;
- De l'effet de l'intrusion saline mise en place dans des terrains transmissifs et poreux (alluvions sableuses à graveleuses, basaltes fracturés et/ou scoriacés...).

Les considérations géométriques sur la pente du conducteur principal et sa connexion avec la zone marine sont des arguments décisifs, complémentaires à la résistivité.

La bonne cohérence des résultats TEM et ERT sur quatre profils tomographiques examinés en détail dans le cadre des présents travaux conduit à cartographier la profondeur de l'invasion saline à partir de la profondeur du toit du conducteur principal et à esquisser une méthodologie de cartographie de l'invasion saline sur la base de l'interprétation conjointe des deux ensembles de données.

Des recommandations sont proposées pour affiner cette méthodologie et la révision de l'ensemble des données TEM du site de Pierrefonds est suggérée pour améliorer la cartographie de l'intrusion saline obtenue à partir de ces travaux préliminaires.

Le présent rapport constitue une partie d'un projet partenarial entre l'Office de l'eau et le BRGM, sur le secteur de Pierrefonds, dont les objectifs, plus vastes, consistaient à appuyer techniquement l'Office de l'eau sur les deux sujets suivants : (i) réalisation d'une campagne de géophysique profonde par le BE Stratagem (rapports Stratagem, 2015 et BRGM/RP-65573-FR (Baltassat *et al.*, 2016)) et (ii) modélisation du fonctionnement de l'hydrosystème de Pierrefonds.

# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>9</b>
1.1. CONTEXTE .....	9
1.1.1. Objet de l'intervention du BRGM.....	10
1.1.2. Déroulement des travaux .....	10
<b>2. Supervision des travaux terrains .....</b>	<b>13</b>
2.1. DEROULEMENT DE LA SUPERVISION .....	13
2.2. QUALITE DES MESURES.....	13
2.2.1. Mesures de résistivité .....	13
2.2.2. Levé topographique et altimétrique .....	17
2.2.3. Prise en compte des canalisations.....	17
2.2.4. Positionnement et prise en compte de l'électrode lointaine .....	19
<b>3. Interprétation des résultats des tomographies de résistivité.....</b>	<b>21</b>
3.1. ETALONNAGE DES TOMOGRAPHIES .....	21
3.1.1. Comparaison avec la lithologie des forages.....	21
3.1.2. Effet de l'intrusion saline .....	24
3.2. COMPARAISON DES RESULTATS ERT ET TEM .....	28
3.3. INTERPRETATION GLOBALE .....	28
<b>4. Conclusion.....</b>	<b>35</b>
<b>5. Bibliographie .....</b>	<b>37</b>
A.1. PRINCIPE DE LA METHODE.....	41
A.2. DISPOSITIFS D'ELECTRODES / CONFIGURATIONS D'ACQUISITION.....	42
A.3. CONSTRUCTION D'UNE PSEUDO-SECTION DE RESISTIVITE APPARENTE	44
A1.4. TRAITEMENT ET INVERSION DES DONNEES .....	45
A1.5. APPLICATIONS .....	46

## Liste des illustrations

Figure 1 - Carte d'implantation des investigations géophysiques sur le secteur de Pierrefonds sur fond de la carte topographique de l'IGN au 1/25000 .....	11
Figure 2 – Evaluation de la qualité des mesures par analyse des paramètres ( $V_{MN}$ et écart-type) pour le dispositif Wenner (en haut) et pôle-dipôle (forward et reverse, en bas de droite à gauche) de la tomographie CD02. ....	14
Figure 3 – Résistances de prise sur CD3 et AB4 (document Stratagem974). ....	15
Figure 4 – Paramètres (voltage, écart-type) de la tomographie pôle-dipôle CD3 (PdP forward et reverse, en haut) et AB4 (PdP forward et reverse, en bas). ....	15
Figure 5 – Pseudo-sections avant filtrage des tomographies pôle-dipôle (PdP) des profils CD3 (PdP forward et reverse, en haut) et AB4 (PdP forward et reverse, en bas). Remarquer les nombreux artefacts haute fréquence sur le profil CD3 présentant les résistances de prise les plus élevées. ....	16
Figure 6 – Eléments géométriques (trait discontinu rouge) sur les résultats d'inversion préliminaire du profil GH01-2-3-4 (le profil est orienté SE-NO, SE à gauche). ....	19
Figure 7 – Comparaison des profondeurs des tomographies et des logs lithologiques des forages pour les interfaces les plus significatives. ....	24
Figure 8 – Log de conductivité électrique de l'eau du forage P11 et conversion en résistivité électrique (Mesure du 7 mars 2007 par l'OLE, tiré du rapport BRGM/RP-56612-FR - Girard et al., 2008). ....	27
Figure 9 – Corrélation des principales interfaces définies par les tomographies de Stratagem974 avec les limites lithologiques définies par forage. Les corrélations sont soulignées par un trait discontinu blanc. ....	31
Figure 10 - Sections de résistivité TEM PF06 et P11 comparées respectivement aux résultats d'inversion ERT de Stratagem974 AB01-2-3 et dipôle-dipôle BRGM. Les courbes d'isorésistivité 80 et 150 Ohm.m de l'inversion « lissée » de Stratagem974 sont représentées par des traits noirs discontinus superposés aux sections TEM... ..	32
Figure 11 – Résultats d'inversion « blocky » des profils AB01-2-3 et dipôle-dipôle BRGM comparés respectivement aux sections TEM PF06 et P11. Les courbes d'isorésistivité 80 et 150 Ohm.m de l'inversion « lissée » sont représentées par des traits noirs discontinus superposés aux sections TEM et aux inversions blocky. ....	33
Figure 12 – Carte de la profondeur de l'invasion salée d'après les investigations ERT (mode « blocky ») corrélées aux investigations TEM (iso-profondeurs -50, -100 et -150 m surimposées en noir). ....	33
Figure 13 : Principe de la mesure en courant électrique continu .....	41
Figure 14 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel ( $0 < \theta, \Phi < \pi$ ) .....	42
Figure 15 : Configuration dipôle-dipôle .....	43
Figure 16 : Configuration de Schlumberger .....	43
Figure 17 : Configuration dipôle-dipôle .....	43
Figure 18 : Configuration Wenner .....	44
Figure 19 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner .....	44

Figure 20 : Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).	45
Figure 21 : Résultat de l'inversion de la figure 8 avec la topographie.	46

## Liste des annexes

Annexe 1 Principes de la tomographie de résistivité électrique	39
Annexe 2 Compte-rendu d'analyse qualité du profil AB1-2-3	47
Annexe 3 Compte-rendu d'analyse qualité du profil AB4	67
Annexe 4 Compte-rendu d'analyse qualité du profil CD1-2	77
Annexe 5 Compte-rendu d'analyse qualité du profil CD3	97
Annexe 6 Compte-rendu d'analyse qualité du profil EF1	109
Annexe 7 Compte-rendu d'analyse qualité du profil EF2	121
Annexe 8 Compte-rendu d'analyse qualité du profil GH01-2-3-4	131
Annexe 9 Compte-rendu d'analyse qualité du profil IJ01-02-03	151
Annexe 10 Logs forages du secteur de Pierrefonds – Compléments par rapport à ceux présentés dans le rapport Stratagem974	171



# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

Dans le cadre de sa mission d'étude et de suivi des ressources en eau, l'Office de l'Eau de la Réunion (OLE) réalise des modèles numériques hydrogéologiques utilisés comme outils d'aide à la décision pour la définition des plans de gestion des eaux souterraines. Afin d'approfondir ses connaissances de la structure géologique des systèmes aquifères de Pierrefonds, notamment en vue de mieux contraindre le modèle hydrogéologique, l'OLE a besoin d'investigations géophysiques explorant ces systèmes aquifères. Ces investigations sont réalisées par un prestataire dans le cadre d'un marché mis en œuvre par l'OLE, sous la supervision scientifique et technique du BRGM. Ces investigations au sol viennent compléter de précédentes investigations réalisées par le BRGM à titre méthodologique dans la partie est de la zone (Girard *et al.*, 2008) ainsi que les données TEM hélicoptéré<sup>2</sup> acquises dans le cadre du projet ReunEM (Martelet *et al.*, 2014). La localisation des différentes investigations est présentée sur la figure 1.

Le présent rapport constitue une partie d'un projet partenarial<sup>3</sup> entre l'Office de l'eau et le BRGM, sur le secteur de Pierrefonds, dont les objectifs, plus vastes, consistaient à réaliser les trois tâches suivantes :

- (i) adapter et interpréter les données de géophysique hélicoptérées, acquises dans le cadre du projet REUN\_EM (géophysique électromagnétique hélicoptérée ou AEM), au contexte hydrogéologique de Pierrefonds. Cette tâche est traitée dans le rapport BRGM/RP-65621-FR (Aunay *et al.*, 2016) ;
- (ii) appuyer techniquement l'Office de l'eau pour la réalisation d'une modélisation du fonctionnement de l'hydrosystème de Pierrefonds. Ce tâche a principalement consisté à la participation à des réunions d'échange technique et à des relectures de rapports rédigés par l'Office de l'eau ;
- (iii) appuyer techniquement l'Office de l'eau pour la réalisation d'une campagne de géophysique profonde. Cette dernière tâche, détaillée ci-après, fait l'objet du présent rapport.

---

<sup>2</sup> transient electromagnetism ou AEM Airborne ElectroMagnetic

<sup>3</sup> Convention de Recherche & Développement partagés entre l'Office de l'eau et le BRGM, du 16/12/2014, relative à un appui technique pour la définition des indicateurs de gestion de la masse d'eau de Pierrefonds « Appui hydrogéophysique Pierrefonds »

### **1.1.1. Objet de l'intervention du BRGM**

Le BRGM est intervenu en appui technique auprès de l'Office de l'Eau de La Réunion à différents stades du projet, notamment :

1. en aidant l'OLE à la définition du cahier des charges pour la consultation des prestataires géophysiques ;
2. pour contribuer, par une analyse technique détaillée des offres soumises, au choix du prestataire par l'OLE ;
3. en supervisant depuis Orléans la réalisation des mesures ;
4. en analysant les résultats et le rapport présentés par le prestataire ;
5. en réalisant une interprétation des données acquises incluant notamment une analyse comparée, succincte des investigations au sol et aéroportées.

Cette assistance technique a été réalisée par J-M Baltassat, géophysicien expert, depuis le centre scientifique et technique du BRGM à Orléans. Les tâches 1, 2 et 3 ont été traitées lors d'échange de mails et de réunions téléphoniques. Le présent rapport rend compte particulièrement des tâches 4 et 5.

### **1.1.2. Déroulement des travaux**

L'assistance pour la finalisation du cahier des charges a été réalisée entre le 10 et le 13/10/2014 et l'aide au choix du prestataire entre le 18 et le 26/11/2014. Ces travaux sont concrétisés d'une part, par une révision du Cahier des Clauses Techniques Particulières, CCTP de l'OLE et d'autre part, par une analyse détaillée des deux propositions techniques de prestataires sous forme d'un tableau Excel. La restitution de ces travaux a été faite par e-mails qui ne sont pas présentés dans le présent rapport.

Le démarrage du projet a fait l'objet d'une réunion de lancement qui s'est tenue le 02/02/2015 dans les locaux de l'OLE et a été suivie en conférence téléphonique depuis Orléans.

L'entreprise retenue est Stratagem974. Les travaux terrains ont été réalisés du 16 février au 19 mars 2015 avec une interruption du 9 au 16 mars lors du passage de la tempête tropicale Haliba sur la Réunion. Stratagem974 a présenté son rapport lors d'une réunion de restitution qui a eu lieu le 08/04/2015 dans les locaux de l'OLE et qui a été suivie en conférence téléphonique depuis Orléans. Le rapport final de Stratagem974 a été livré à l'OLE le 12/05/2015.

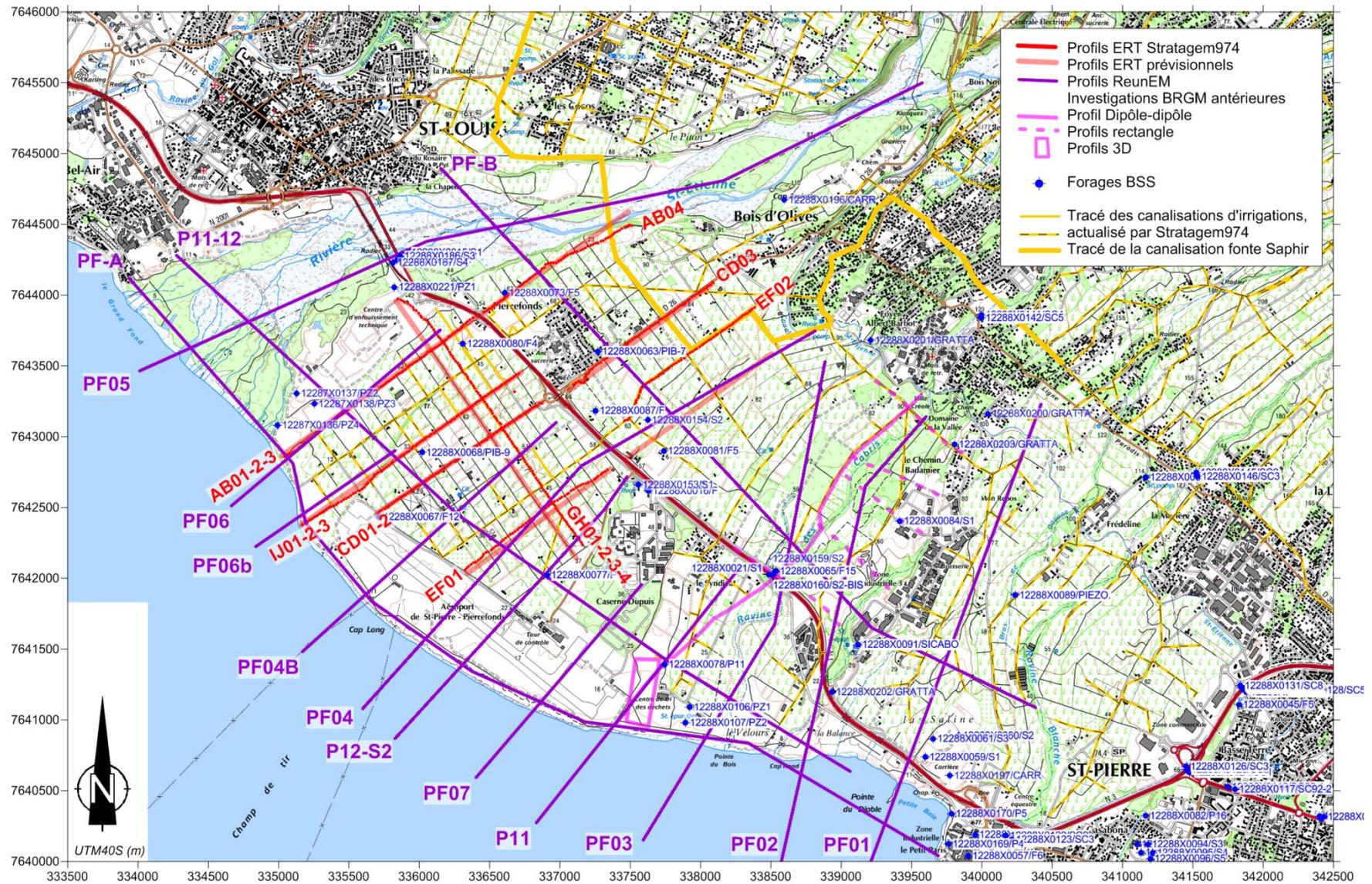


Figure 1 - Carte d'implantation des investigations géophysiques sur le secteur de Pierrefonds sur fond de la carte topographique de l'IGN au 1/25000



## 2. Supervision des travaux terrains

### 2.1. DEROULEMENT DE LA SUPERVISION

La supervision des travaux de terrain a été réalisée du 16/02/2015 au 25/03/2015 tenant compte du délai de restitution des résultats des dernières tomographies acquises.

Plusieurs difficultés ont été traitées par Stratagem974 durant la réalisation des travaux. Elles sont relatées en détail dans le rapport Stratagem974 daté du 11/05/2015. Ce sont principalement :

- Dégradation et vols de câbles, notamment de l'électrode lointaine qui a dû être déplacée en début d'opération ;
- Refus d'accès aux propriétés qui a conduit à déplacer une partie des profils prévus (EF02 et GH) ;
- Relations avec les chantiers recoupant les profils ;
- Prise en compte des canalisations métalliques supposées et relocalisation d'une partie de leur tracé ;
- Résistance de terre élevée sur certains secteurs ponctuels.

Les compte-rendus de la supervision établis au cours des travaux sont restitués dans les annexes 2 à 10 du présent rapport.

### 2.2. QUALITE DES MESURES

#### 2.2.1. Mesures de résistivité

La qualité des mesures est globalement bonne avec des valeurs de voltage  $V_{MN}$  et de son erreur (écart-type de la répétition de la mesure) généralement supérieures et inférieures à 0.1 mV et 5%, respectivement. La qualité des mesures Wenner est généralement meilleure que la qualité des mesures pôle-dipôle (Figure 2). Cela est dû à la décroissance plus faible du signal Wenner avec l'augmentation de l'espacement émetteur-récepteur et justifie l'utilisation de ce dispositif, rapide à acquérir, en complément du dispositif pôle-dipôle qui est choisi pour ses performances de résolution latérale et d'investigation en profondeur. Les mesures Wenner peuvent alors être utilisées pour compléter le jeu de données aux faibles profondeurs quand les données Pôle-dipôle présentent un rapport signal/bruit défavorable.

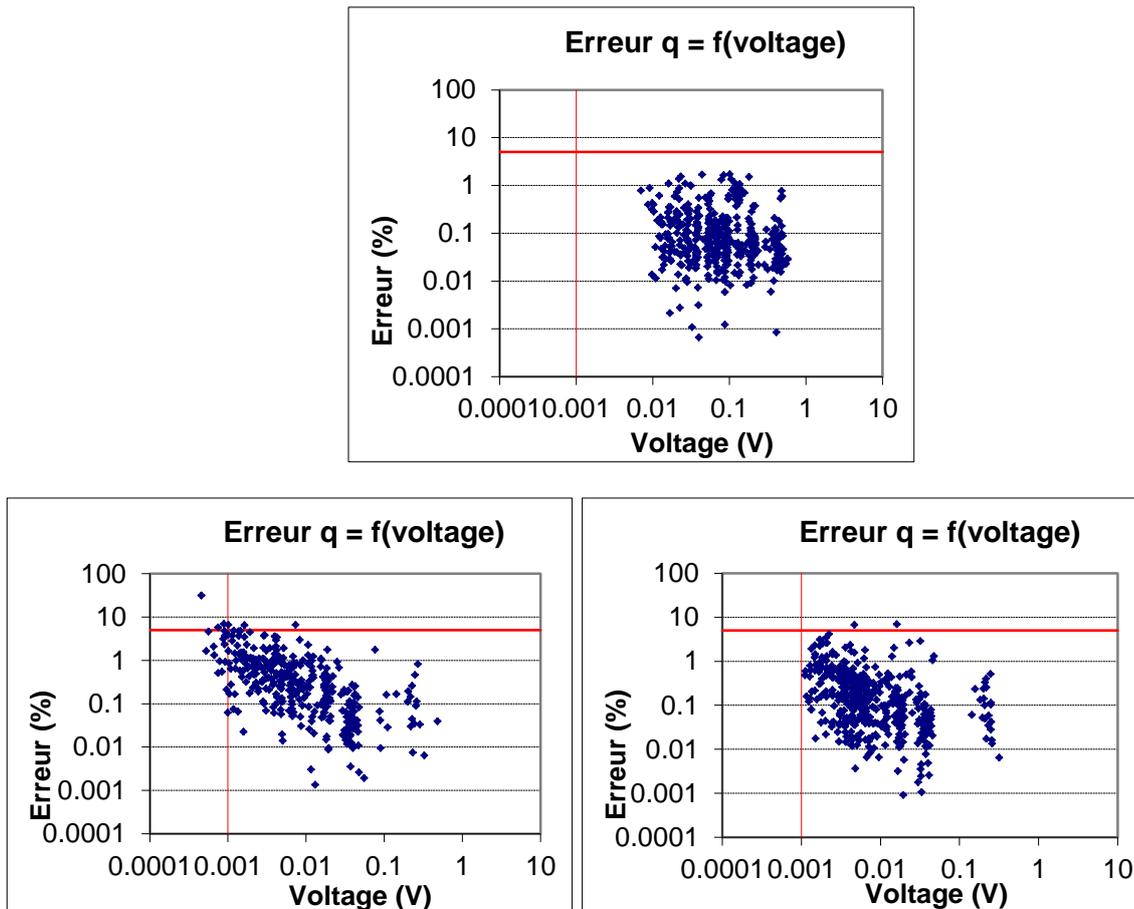


Figure 2 – Evaluation de la qualité des mesures par analyse des paramètres ( $V_{MN}$  et écart-type) pour le dispositif Wenner (en haut) et pôle-dipôle (forward et reverse, en bas de droite à gauche) de la tomographie CD02.

Certaines zones présentent des résistances de prise élevées (Figure 3). Ces conditions conduisent à des mesures aberrantes du résistivimètre ABEM qui se manifestent par des anomalies haute fréquence sur les pseudo-sections de résistivité apparente (Figure 5). Ces artefacts ne peuvent être filtrés à partir de la mesure du voltage  $V_{MN}$  et de son erreur (écart-type de la répétition de la mesure, Figure 4) car ces paramètres sont peu affectés. Ils sont attribués à des effets électromagnétiques à l'intérieur du circuit de mesure (potentiellement des courants de fuite entre les parties émission et réception du résistivimètre ou au niveau des connexions des câbles) et sont répétitifs.

Quand elles restent localisées et peu nombreuses, ces anomalies sont heureusement aisément filtrées par édition manuelle ou filtrage spatial (cas du profil CD3). L'important artefact observé au niveau des électrodes 15 à 18 sur le profil CD1 affecte toute la section et menace la qualité globale de la tomographie. Toutefois, il n'a pas un impact important sur le résultat de ce profil car la profondeur d'investigation est encore réduite à cette abscisse et le conducteur cible n'est pas encore investigué. Des recommandations ont été faites pour un filtrage sévère de ces artefacts (cf. Annexe 4 et 5).

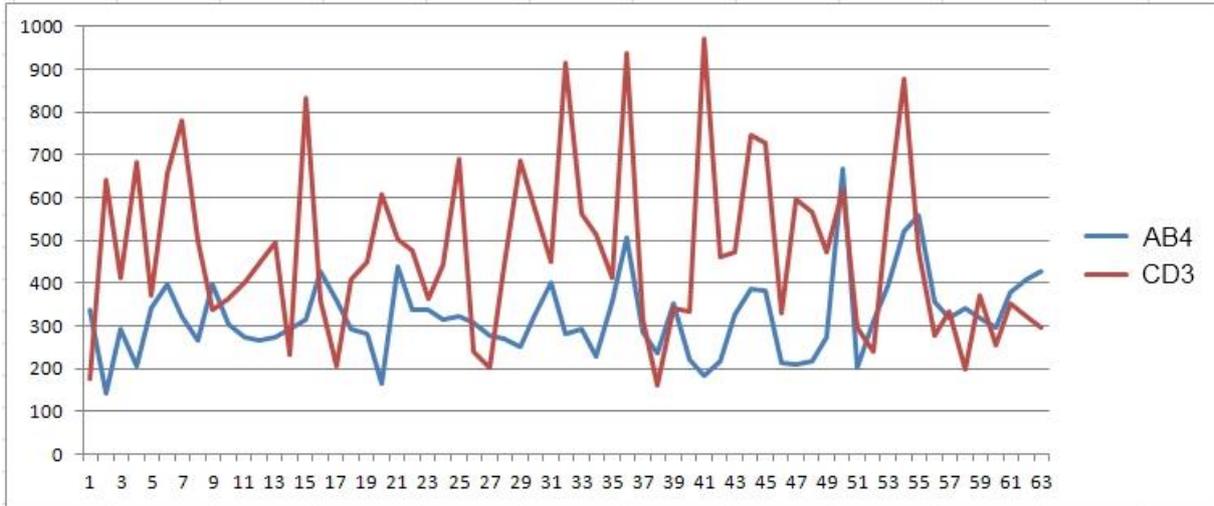


Figure 3 – Résistances de prise sur CD3 et AB4 (document Stratagem974).

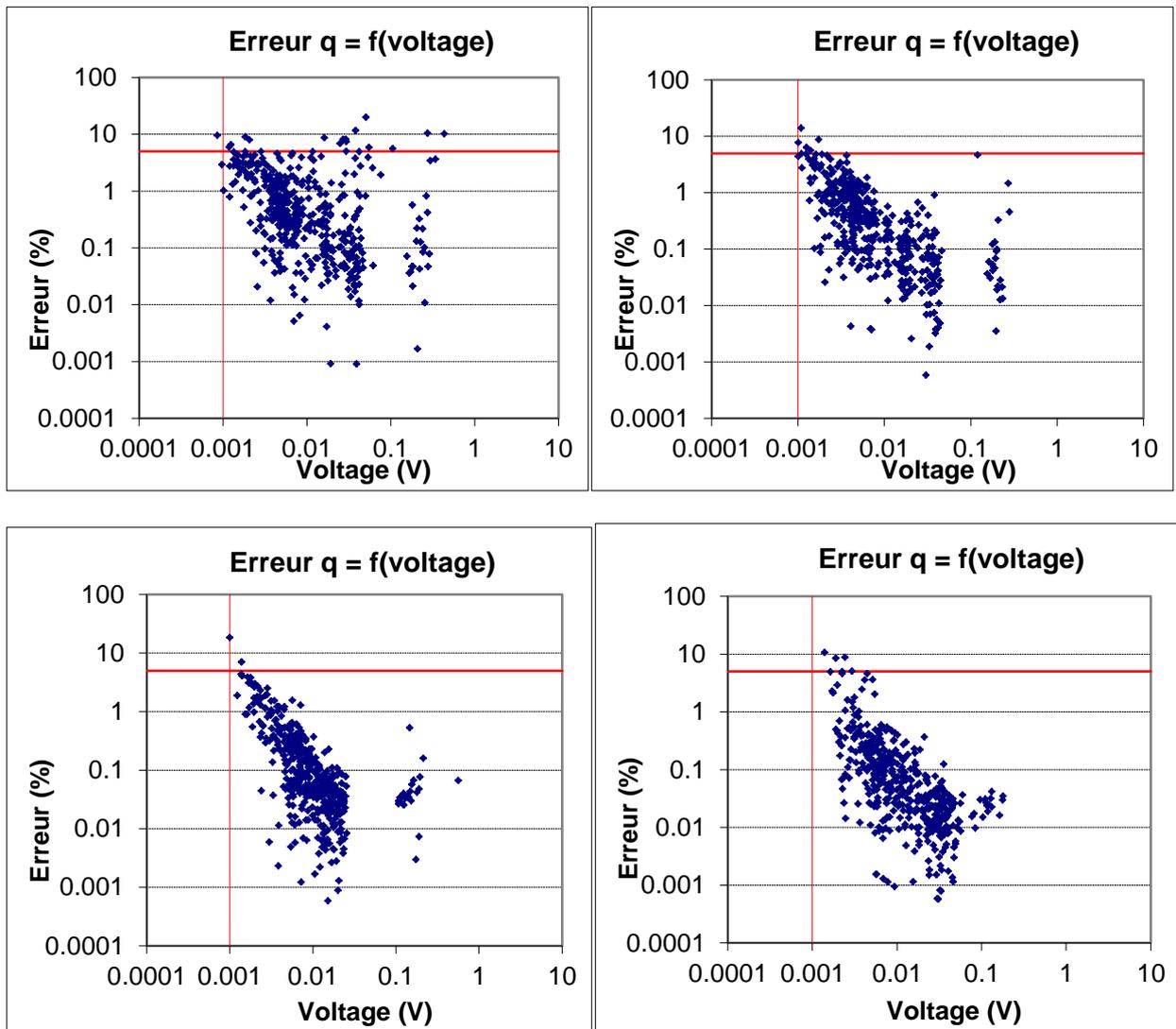


Figure 4 – Paramètres (voltage, écart-type) de la tomographie pôle-dipôle CD3 (PdP forward et reverse, en haut) et AB4 (PdP forward et reverse, en bas).

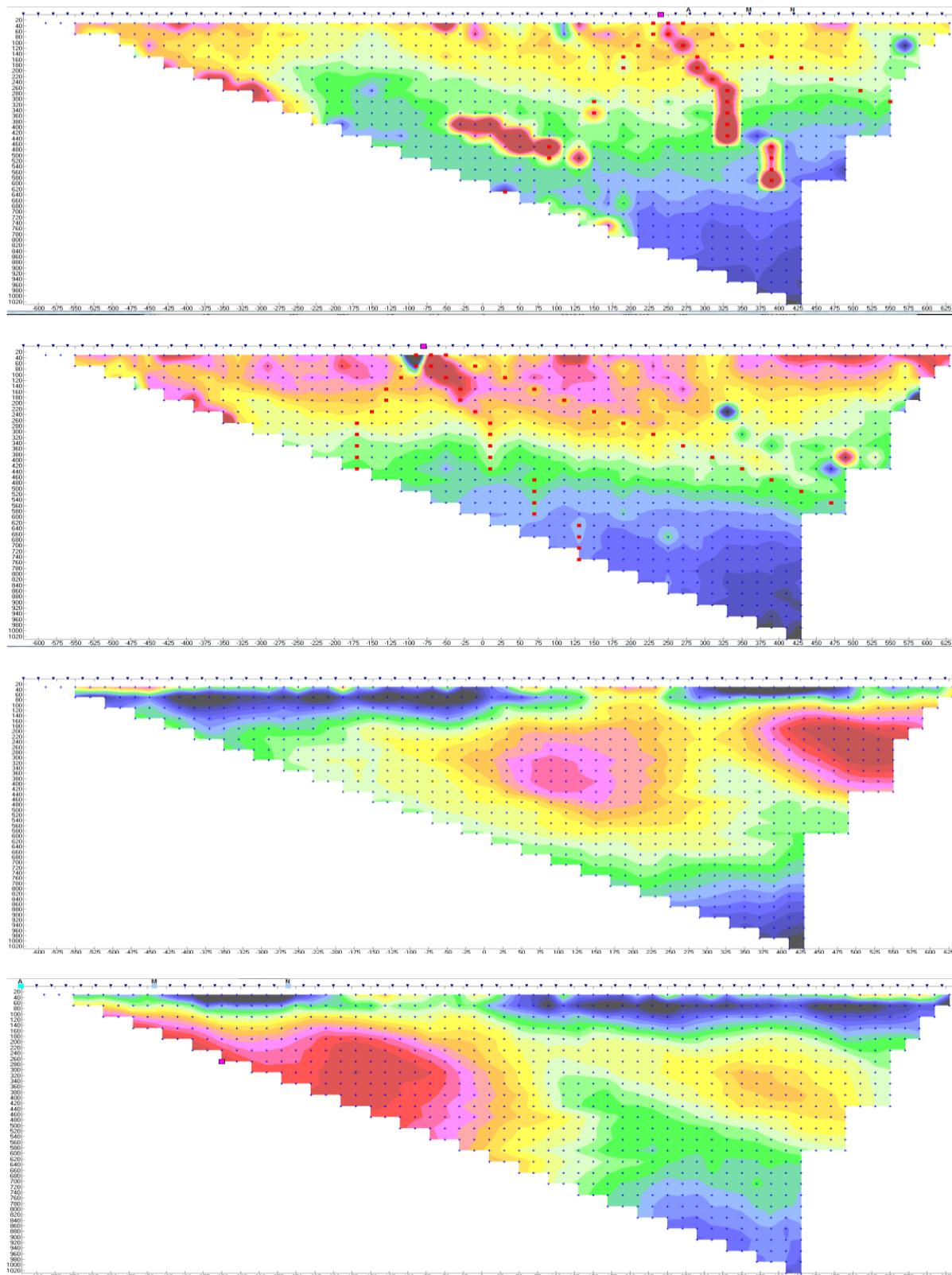


Figure 5 – Pseudo-sections avant filtrage des tomographies pôle-dipôle (PdP) des profils CD3 (PdP forward et reverse, en haut) et AB4 (PdP forward et reverse, en bas). Remarquer les nombreux artefacts haute fréquence sur le profil CD3 présentant les résistances de prise les plus élevées.

### 2.2.2. Levé topographique et altimétrique

Le positionnement a été réalisé par Stratagem974 grâce à un GPS de poche (GARMIN GPSMAP64s) et la répétition de mesures sur plusieurs points fixes tout au long de la mission permet d'évaluer sa précision relative à mieux que +/-6 m en x et y.

Le levé altimétrique a été réalisé en relatif avec un télémètre laser avec inclinomètre offrant une précision de l'ordre de la dizaine de cm puis recollée sur l'altimétrie absolue de la carte IGN.

### 2.2.3. Prise en compte des canalisations

La zone d'étude est recoupée par un réseau de canalisation d'irrigation dense qui était à l'origine en fonte et qui a pu être remplacé par endroits par des éléments non métalliques (PVC, PEHD, ...) ou qui a pu être démantelé lors de différents travaux (Chaput et Durand, 2015). Une canalisation en fonte de diamètre 800 mm recoupe le NE de la zone (canalisation Saphir, profils AB4, CD03, EF02, cf. Figure 1). Bien que protégée par un système électrique anticorrosion, cette dernière serait isolée de son environnement par une gaine caoutchouc, ce qui limiterait son impact sur les mesures. Stratagem974 a relocalisé, grâce à des systèmes électromagnétiques dédiés, les canalisations métalliques au niveau des profils. Cela a conduit à une nouvelle cartographie du réseau d'irrigation métallique telle que présentée sur la Figure 1.

Des anomalies haute fréquence pouvant être dues à des canalisations en surface ont été observées en différents points de la plupart des profils (cf. Tableau 1). Seul le profil AB04, situé dans la zone la moins urbanisée et bénéficiant de terrains relativement conducteurs en surface (et donc de résistances de prise peu élevées, comme déjà évoqué plus haut) n'est pas affecté.

L'analyse de ces observations (Tableau 1) ne permet pas d'établir de façon simple et claire l'effet des canalisations sur les mesures de tomographies électriques. Il est possible que les artefacts observés soient dus en partie aux canalisations métalliques mais aussi à des effets électromagnétiques sur les lignes de mesure lorsque les résistances de prise dépassent une certaine limite.

Pour exemple les électrodes 43 sur CD03 et 61 sur EF02 (en limite de la tomographie) correspondent à la localisation de la canalisation Saphir mais on n'observe pas d'effet apparent de cette même canalisation sur EF2 alors que ce profil la longe entre les électrodes 36 et 64. On n'observe pas non plus de réponse marquée lorsque le profil EF1 recoupe une canalisation d'irrigation connue au niveau de l'électrode 40 et lorsque le profil AB04 recoupe la canalisation Saphir au niveau des électrodes 55 et 56.

Les observations terrain de Stratagem974 montrent clairement que l'artefact intense au niveau des électrodes 15-18 sur le profil CD01-2 correspond à une zone bétonnée en surface. L'effet potentiel supplémentaire d'une canalisation sous-jacente ne peut être discriminé dans le cadre de cette étude.

Profil	Electrodes	Artefact électro-magnétique suspecté	Cohérence avec canalisations connues	Absence de canalisation connue	Cohérence avec chemin intersecté
AB01-2-3	20, 36, 66-70	20, 36		20, 36, 66, 70	20, 36, 66
AB04					
CD01-2	15-18	15-18		15-18	Zone bétonnée
CD03	2, 11, 28, 37, 43	2, 11, 28, 37, 43	43	2, 11, 28, 37	37, passage rondpoint entre 2 et 11
EF01	53			53	
EF02	32, 59-61		61		
GH01-2-3-4	30,	30	Conducteur incliné en cohérence avec intersection de canalisation connue	30	
IJ01-2-3	50, 54, 71, 81	50, 54	50, 54, 71, 81		50, 54, 71, 81

Tableau 1 – Observations anormales potentiellement liées aux canalisations métalliques

La Figure 6 présente des éléments de géométrie (en tireté rouge) sur les coupes GH01-2-3-4 inversées par STRATAGEM974 (version terrain provisoire). A l'extrémité SE, le conducteur incliné n'est pas incompatible avec un croisement de la canalisation sur le profil GH à l'abscisse 250 m. Au-delà de 250 m la disparition apparente du conducteur peut s'expliquer comme suit, considérant que le spacing à 20 m est trop large pour bien investiguer la réponse de la canalisation : le conducteur est soit hors résolution, soit résolu comme un mince conducteur superficiel visible par place. La même interprétation a été suggérée pour le profil AB01-2-3 (Annexe 2). Il serait possible d'étudier ce croisement avec une meilleure définition au moyen d'un dispositif avec un spacing à 5 m mais c'est hors du cadre du projet.

Au NW, le conducteur observé à moins de 50 m de profondeur entre les abscisses 1350 et 2000 m pourrait être la réponse de la canalisation suivie sur un chemin parallèle décalé latéralement de 80 m au NE. Il reste toutefois au moins à expliquer pourquoi on l'observe à moins de 50 m de profondeur alors qu'intuitivement elle devrait apparaître à plus de 80 m et pourquoi l'anomalie se propage au-delà de l'abscisse 2000 m alors qu'il n'existe plus de canalisation connue. La bonne corrélation au niveau du croisement des profils GH et AB permet d'établir que le conducteur est dû à une structure plane et finalement d'exclure l'effet de la canalisation.

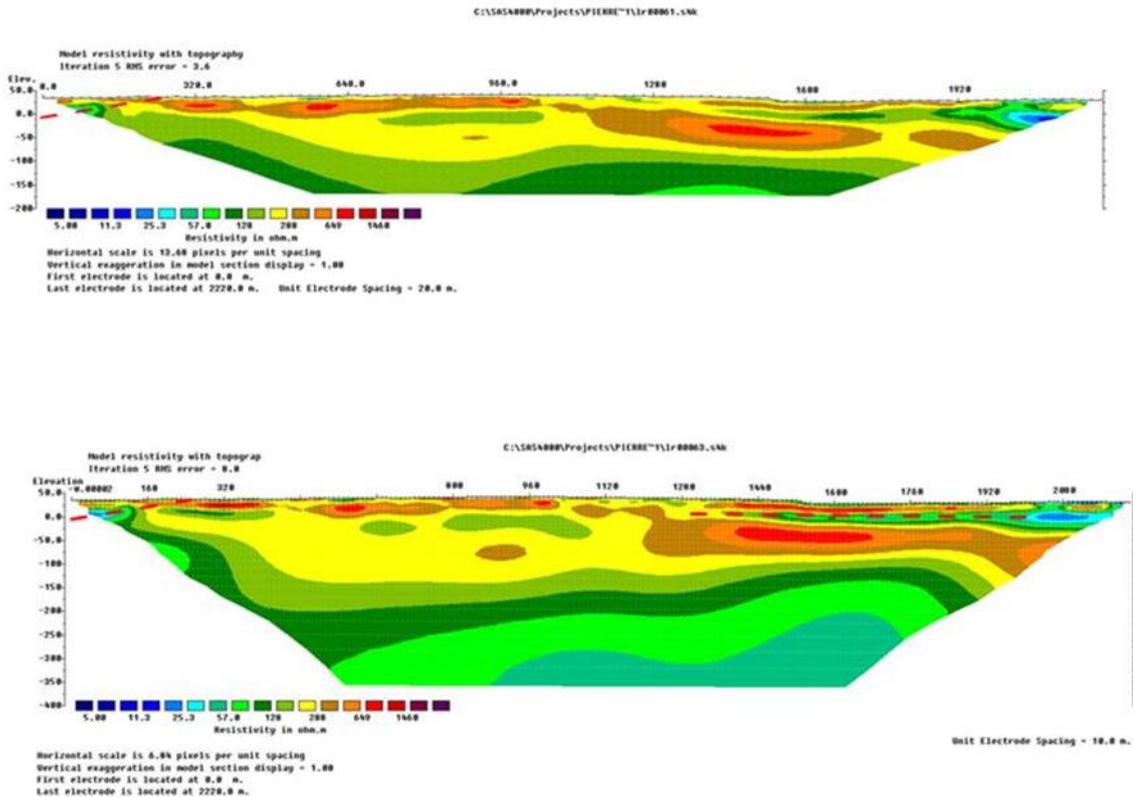


Figure 6 – Eléments géométriques (trait discontinu rouge) sur les résultats d'inversion préliminaire du profil GH01-2-3-4 (le profil est orienté SE-NO, SE à gauche).

#### 2.2.4. Positionnement et prise en compte de l'électrode lointaine

Après avoir été déplacée sur le site de St-Pierre (Zone industrielle Le Petit Paris), l'électrode lointaine du dispositif pôle-dipôle (pôle de retour du courant injecté sur le dispositif) est située entre 4900 m (profil AB0123) et 3500 m (Profil EF01) des profils tomographiques.

Ce pôle d'injection lointain doit être localisé à au moins 5 fois la plus grande distance entre le pôle d'injection et le dipôle de mesure sur le profil et dans une direction orthogonale au profil de mesure pour limiter les effets indésirables sur les tomographies (Razafindratsima et Lastaste 2014). Considérant que cette plus grande distance est de 1000 m sur les dispositifs Stratagem974, les profils AB, IJ et CD sont pas ou peu impactés mais il est en revanche possible que l'effet soit sensible en base de section sur les profils EF et à l'est de GH. Comme il ne semble pas que de nouveaux niveaux soit mis en évidence à grande profondeur (au-delà de 250 m) sur l'ensemble de l'étude, l'impact sur le résultat est probablement réduit. On doit néanmoins considérer que la profondeur d'investigation est sensiblement réduite sur les tomographies EF et la partie E de GH par rapport aux autres tomographies. L'étude plus détaillée de ces effets sort du cadre des travaux de ce rapport mais pourrait être entreprise si une réinterprétation complète du jeu de donnée est envisagée.



## 3. Interprétation des résultats des tomographies de résistivité

### 3.1. ETALONNAGE DES TOMOGRAPHIES

#### 3.1.1. Comparaison avec la lithologie des forages

La zone étudiée bénéficie d'au moins 7 forages documentés qui ont été utilisés par Stratagem974 dans son rapport.

La profondeur des interfaces de résistivité les plus évidents est comparée avec celle des interfaces lithologiques définies en forage tel que présenté dans le tableau 2. Cette comparaison est illustrée sur la figure 9 par des lignes discontinues blanches. Les gammes de résistivité des niveaux délimités par ces interfaces sont comparées aux lithologies correspondantes dans le tableau 3. La comparaison des profondeurs des interfaces est également présentée sur le graphique de la figure 7. L'intervalle de confiance à 95% définit une précision de détermination des interfaces géologiques à plus ou moins 10 %. Cet exercice comporte en fait un biais parce que d'une part la correspondance entre les interfaces de résistivité et les interfaces lithologiques n'est pas établie de façon formelle (on n'est pas assuré que les interfaces que l'on compare correspondent effectivement à la même chose) mais basée sur l'interprétation et d'autre part parce que toutes les interfaces ne sont pas prises en compte (au-delà d'un certain écart de profondeur, on cherchera une autre correspondance et si elle n'est pas trouvée, elle est abandonnée). On peut donc considérer que la précision obtenue est une valeur optimiste.

Cette bonne précision permet néanmoins de considérer que :

- La correspondance des limites lithologiques avec les limites de résistivité des tomographies est satisfaisante.
- L'effet des canalisations sur les résultats tomographiques est limité et affecte peu le résultat global de la reconnaissance électrique.

Elle permet, en outre, d'établir les correspondances suivantes entre faciès de résistivité et faciès géologique :

- Alluvions sèches : 200-1200 Ohm.m
- Alluvions humides : 30-300 Ohm.m
- Basaltes (peu ou pas altérés) : 200-1200 Ohm.m
- Basaltes altérés : 30-300 Ohm.m
- Lahar, coulées de boue et coulées de cendre : 150-700 Ohm.m (1 observation sur 73/F5) et 30-150 Ohm.m (1 observation sur 217/S2)

Deux gammes de résistivité sont observées pour les alluvions mais la bonne corrélation de l'interface entre le faciès résistant et le faciès conducteur avec le niveau piézométrique dans les forages PIB9, P12 et F7 invite à discriminer ici alluvions sèches et alluvions sous nappes considérant aussi que ces valeurs sont typiques pour ce type de sédiment avec une porosité intergrain élevée. Les sites où il n'est pas observé de correspondance entre le niveau piézométrique et une discontinuité dans les résistivités peuvent être attribués à des alluvions peu poreuses où la conductivité électrolytique est limitée : la résistivité de formation est alors dominée par les effets lithologiques (cimentation, argilosité, ...).

La plupart des basaltes décrits comme compacts, à feldspath ou à olivine sont caractérisés par une gamme de résistivité de 200-1200 Ohm.m. Cette gamme, assez large, englobe a priori (par référence à notre expérience et à la littérature) des basaltes peu à pas altérés. Seul un basalte décrit comme compact dans le forage PIB7 présente une gamme de 30-300 Ohm.m correspondant typiquement à des basaltes altérés. On peut raisonnablement penser qu'il s'agit en l'occurrence d'une description lithologique imparfaite et qu'il faut plus probablement considérer qu'il s'agit d'un basalte altéré comme rencontré dans le forage F5.

Forages	N° BSS	Contact	Prof. (m)	ERT	Prof. (m)
F4	80	Np	44	AB123	
F4	80	A/Bc	46	AB123	43
F4	80	Bc/A	100	AB123	100
F5	73	Np	54		
F5	73	L/Ba	15	AB4	13
F5	73	Ba/A	45	AB4	44
F12	67	Np	17	IJ123	15
F12	67	A/B	46	IJ123	47
PIB9	68	Np	30	IJ123	23
PIB9	68	A/B	41	IJ123	47
F12	67	Np	20	CD1	
F12	67	A/B	46	CD1	45
PIB7	63	Np	62	CD3	
PIB7	63	Bc/B	60	CD3	48
P12	77	Np	28	EF1	23
P12	77	L/B	59	EF1	64
S2	217	Np	47	EF1	24
S2	217	Ce/B	72	EF1	99
S2	217	Np	47	GH1234	19
S2	217	Ce/B	72	GH1234	65
F7	71	Np	39	GH1234	36
F4	80	Np	44	GH1234	
F4	80	A/Bc	46	GH1234	46
F4	80	Bc/A	100	GH1234	118

Tableau 2 – Profondeurs comparées des interfaces géologiques définies en forage avec les interfaces de résistivités les plus proches sur les coupes tomographiques présentant une corrélation significative.

Les interfaces ne présentant pas de relation significative (correspondance lithologie/résistivité, compatibilité géométrique, ...) ne sont pas prises en compte. Voir le tableau 3 pour l'explication des codes lithologiques des interfaces. Ce = cendre

Il y a donc un recouvrement important des gammes de résistivité des alluvions (sèches et/ou humides) et des basaltes (peu ou pas altérés et/ou altérés). On ne peut donc pas les différencier sur la base du seul paramètre résistivité. C'est en s'aidant de considérations géométriques et en s'appuyant sur les calages qu'il convient d'interpréter les tomographies de résistivité. Ces interprétations seront assorties d'un degré d'incertitude variable, d'autant plus important que l'on s'éloignera des points de calage ou que des discontinuités verticales (latérales) seront mises en évidence. Elles devraient conduire à des recommandations de contrôle par forage sur les zones présentant le plus d'intérêt.

En outre, il faut compter avec l'effet de la salinisation qui interfère avec les effets lithologiques (Girard *et al.* 2008).

Forages	N° BSS	Litho	lithologie	Profil	Rho (Ohm.m)
F4	80	A1	alluvion	AB123	200-1200
F4	80	A2	alluvion	AB123	50-200
F4	80	Bc	basalte compact	AB123	200-900
F4	80	A	alluvion	AB123	50-200
F5	73	L	lahar	AB4	150-700
F5	73	Ba	basalte altéré	AB4	30-200
F5	73	B	basalte	IJ123	200-500
F12	67	A	alluvion	IJ123	80-300
F12	67	B	basalte	IJ123	300-700
PIB9	68	A1	alluvion sèche	IJ123	300-1200
PIB9	68	A2	alluvion sous nappe	IJ123	50-250
PIB9	68	B	basalte	IJ123	300-1200
F12	67	A	alluvion	CD1	200-400
F12	67	B	basalte	CD1	300-500
PIB7	63	Bc	basalte compact	CD3	300-1200
PIB7	63	Bc	basalte compact	CD3	30-300
PIB7	63	B	basalte	CD3	300-1200
P12	77	A1	alluvion sèche	EF1	200-900
P12	77	A2	alluvion sous nappe	EF1	30-200
P12	77	B	basalte	EF1	200-700
F7	71	A1	alluvion sèche	GH123	300-900
F7	71	A2	alluvion sous nappe	GH123	150-300
F4	80	A1	alluvion	AB123	200-1200
F4	80	A2	alluvion	AB123	50-200
F4	80	Bc	basalte compacte	AB123	300-900
F4	80	A	alluvion	AB123	50-200

Tableau 3 – Correspondances entre faciès de résistivité limités par les interfaces inventoriées dans le tableau précédent et les faciès géologiques définis dans les logs des forages.

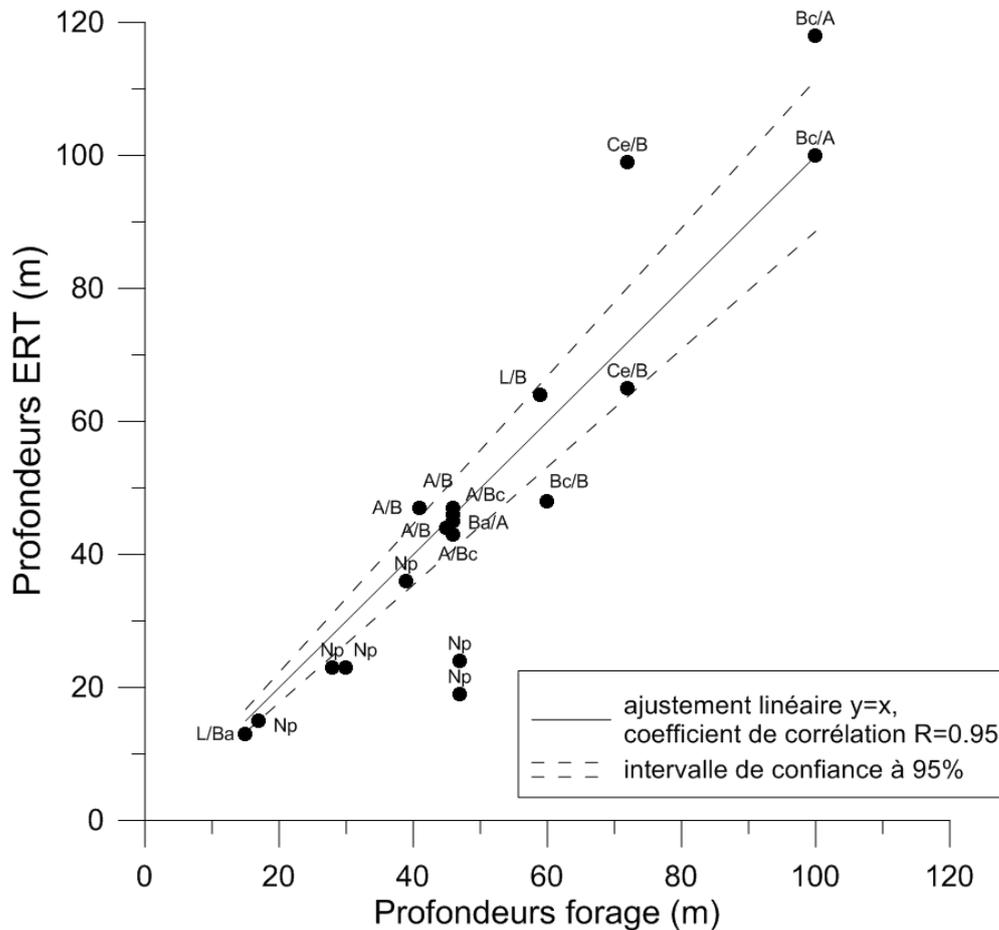


Figure 7 – Comparaison des profondeurs des tomographies et des logs lithologiques des forages pour les interfaces les plus significatives.

*Np*= Niveau piézométrique ; Voir tableau 2 et tableau 3 pour l'explication des codes lithologiques des interfaces portés en étiquette.

### 3.1.2. Effet de l'intrusion saline

Pour tenter de prendre en compte l'effet de l'intrusion saline sur la résistivité des tomographies nous nous calons sur les observations en forage et sur les observations les plus proches de la côte. Dans ce cadre, nous utilisons le log de résistivité du forage 078/P11 qui est le seul forage qui montre une intrusion saline marquée avec des résistivités de l'eau de l'ordre de 1 Ohm.m à 25 m de profondeur (Figure 8) ainsi que les profils de résistivités TEM qui investiguent l'intrusion saline depuis la mer. Les horizons de faible résistivité observés par TEM depuis la mer et s'étendant à l'intérieur des terres, sans interruption sont interprétés a priori comme des intrusions salines et sont ici considérés comme des points de calage utiles pour aider à l'interprétation des tomographies électriques.

Les sections de résistivité TEM des profils PF6 et P11 sont comparées respectivement aux résultats de l'inversion tomographique du profil AB01-2-3 (Stratagem974) et du profil dipôle-dipôle 100 m du BRGM, à titre d'exemple, sur la Figure 10. Les courbes d'isorésistivité 80 et

150 Ohm.m<sup>4</sup> des tomographies de résistivité par courant continu sont portées en surcharge des sections de résistivité TEM.

Le forage 078/P11 n'est pas recoupé par une tomographie de Stratagem974 mais par les tomographies du rapport BRGM de 2008. Il s'agit d'une part de la tomographie dipôle-dipôle profonde à inter-électrode de 100 m et d'autre part de tomographies plus haute résolution (inter-électrode de 5 m). Le rapport BRGM montre que les deux tomographies présentent des résultats cohérents sauf la meilleure résolution à 5 m qui apparaît bien utile pour imager correctement les variations lithologiques des terrains alluvionnaires et les effets de l'intrusion saline à faible profondeur (dans les premiers 50 m de profondeur).

### **Comparaison PF06 – AB01-2-3 (Figure 10 et Figure 11)**

Pour le profil PF06, on observe une correspondance raisonnable entre la base du corps résistant définie par les isorésistivités 80 et 150 Ohm.m (tomographie AB01-2-3, inversion « smooth » par Stratagem974) et la base du résistant TEM R1 (Figure 10). L'isorésistivité à 150 Ohm.m en ERT correspond grossièrement à l'isorésistivité 30 Ohm.m en TEM. Le résistant TEM R1 de résistivité comprise entre 30 et 300 Ohm.m correspond à un corps de résistivité comprise entre 150 et 900 Ohm.m en ERT.

L'option d'inversion « smooth » (Loke et al. 2001) utilisée par Stratagem974 bien qu'elle produise des résultats satisfaisants comme montré par l'analyse du paragraphe 3.1.1. n'est pas a priori la mieux appropriée pour définir les interfaces et les résistivités dans des milieux présentant de forts contrastes de résistivité car elle a tendance à étaler les gradients de résistivités au niveau des limites de formations. D'après notre expérience, confirmée par de nombreux articles de la littérature (Loke et al. 2003, Seaton et Burbey 2002), l'option d'inversion « blocky » (Loke et al. 2001) permet de mieux définir la géométrie et la résistivité des formations présentant des résistivités relativement homogènes à l'intérieur de leurs limites et très contrastées par rapport aux formations voisines. L'inversion en mode « blocky » a été appliquée pour les profils Stratagem AB01-2-3, IJ01-2-3, EF1 et pour le profil dipôle-dipôle 100 m du BRGM. Les résultats sont comparés aux résultats TEM sur la figure 11. Sur le profil AB01-2-3, le toit du conducteur C1 défini par l'inversion « blocky » montre une cohérence, illustrée par un trait discontinu rouge sur la Figure 11, plus évidente avec le toit du conducteur C1 TEM que ce n'était avec l'inversion lissée (« smooth »). Sur la section ERT, l'interface inclinée vers l'intérieur des terres invite à poursuivre l'interprétation d'une intrusion saline jusqu'à l'abscisse 1200 m. Le résistant R1 apparaît comme une structure plus complexe, très résistante (> 500 Ohm.m) qui peut être interprétée comme un bloc massif, imperméable limitant l'intrusion saline qui s'établirait alors latéralement. Le mode « blocky » fait apparaître également une structure plus complexe en intercalant un conducteur à 50 m de profondeur dans le bloc résistant au NE qu'il serait intéressant de comparer au log du forage F4.

### **Comparaison P11 – dipôle-dipôle BRGM (Figure 10 et Figure 11)**

Sur le profil BRGM, les isorésistivités 150 Ohm.m de l'option « smooth » (lissée) et de l'option « blocky » sont coïncidentes. L'inversion « blocky » n'apporte donc rien dans cette partie SW par rapport à l'option « smooth » alors qu'elle introduit une complexité dans la partie NE avec intercalation d'une couche conductrice à l'instar du profil AB01-2-3. Le défaut de résultat du mode « blocky » dans la partie SW est probablement imputable à la faible résolution de la

<sup>4</sup> Les courbes isorésistivités portées en surcharge des sections ERT du rapport Stratagem974 ont des labels erronés : ce sont en fait 80 et 150 Ohm.m en place de, respectivement, 50 et 100 Ohm.m indiquées sur les figures du rapport Stratagem974.

tomographie à inter-électrode 100 m qui se manifeste également par la texture « patchy » de l'image dans la tranche la plus superficielle (0-150 m) de la tomographie dans sa partie NE. Ce mode d'inversion pourrait être plus efficace sur les tomographies ERT à inter-électrode 5 m, de plus haute résolution.

La variation de résistivité de l'eau de 20 à 2 Ohm.m entre les altitudes -3 et -15 m telle que mesurée dans le forage P11 correspond à des résistivités de 300 à 150 Ohm.m sur la section ERT et de 200 à 50 Ohm.m sur la section TEM. Il est possible que l'intrusion saline ne soit apparente en résistivité qu'à la faveur de niveaux particulièrement transmissifs hydrauliquement pour lesquels la conductivité électrolytique domine. Les niveaux de scories et de basaltes scoriacés observés entre 70 et 95 m de profondeur dans le forage P11, en correspondance raisonnable avec le maximum de conductivité de C1, pourraient jouer ce rôle.

Dans ce cas, il n'y a pas de correspondance simple entre la variation de résistivité de l'eau observée en forage et la variation de résistivité de formation observée par tomographie. Toutefois, la continuité de l'observation du conducteur C1 depuis la mer et son allure pentée vers les terres invitent à l'interpréter comme une manifestation de l'intrusion saline. Sa pente est moins accusée que sur AB01-2-3. On peut y voir l'effet de la charge de la nappe de la rivière St-Etienne sur ce dernier profil. Définir la limite de l'intrusion saline à l'intérieur des terres le long du profil BRGM est un exercice périlleux en l'absence de calage satisfaisant au niveau de P11 et de mesure de conductivité au niveau F15 ou plus amont. Le rapport BRGM/RP-56612-FR (Girard *et al.*, 2008) l'envisageait jusqu'à l'abscisse 500 m qui coïncide avec une discontinuité verticale. L'état des connaissances ne permet pas d'infirmier cette hypothèse, mais il est recommandable de vérifier l'extension de l'intrusion saline par forage descendu à au moins 200 m au niveau de F15 et plus bas encore à l'intérieur des terres.

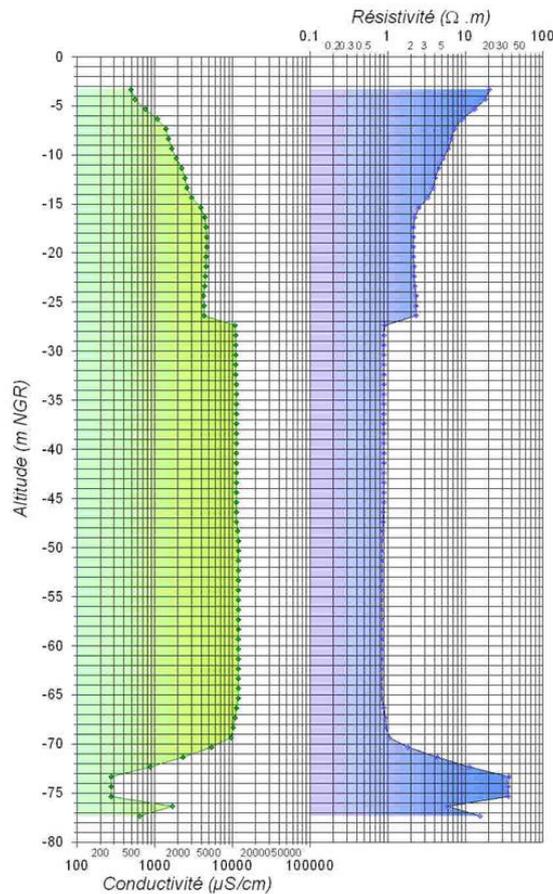


Figure 8 – Log de conductivité électrique de l'eau du forage P11 et conversion en résistivité électrique (Mesure du 7 mars 2007 par l'OLE, tiré du rapport BRGM/RP-56612-FR - Girard et al., 2008).

### Comparaison PF06b – IJ01-2-3 (Figure 11)

Sur le profil IJ01-2-3, l'inversion blocky conduit à la définition d'un conducteur profond bien marqué (20-50 Ohm.m) et continu sur toute la longueur de la section. La limite C1-R1 est bien définie par un fort gradient de résistivité, centré autour de 50-80 Ohm.m. L'isocontour 50 Ohm.m de la section ERT montre une bonne correspondance avec l'isocontour 10 Ohm.m de la section TEM. Notons que l'approfondissement localisé entre 550 et 700 m de distance coïncide avec une anomalie superficielle qui peut être imputable à l'effet d'une canalisation. Un filtrage spatial pourrait être tenté pour supprimer cet effet.

### Comparaison PF04 – EF01-EF2 (Figure 11)

Sur EF01, l'inversion blocky produit une situation comparable au cas précédent avec des résistivités encore plus basses (10-50 Ohm ;m) pour C1. Le tracé des isocontours 50 Ohm.m sur les sections ERT et 10 Ohm.m sur les sections TEM a été étendu à l'ensemble des quatre profils (Figure 11) pour comparer les résultats ERT et TEM.

### 3.2. COMPARAISON DES RESULTATS ERT ET TEM

La comparaison abordée dans le paragraphe précédent entre les résultats ERT et TEM apporte les éléments suivants :

1. L'interface R1/C1 est globalement bien observée par les deux méthodes : Les deux isocontours tracés sur la Figure 11 montrent une cohérence certaine, avec un pendage constant vers l'intérieur des terres.
2. Les résistivités de part et d'autre de l'interface présentent des gammes décalées, les résistivités ERT étant nettement plus élevées que les résistivités TEM.
3. L'inversion « blocky » permet une définition plus précise de l'interface R1/C1 (au maximum de gradient) et réduit l'écart entre les gammes de résistivité (C1=15-50 Ohm.m en ERT pour C1=2-10 Ohm.m en TEM).
4. Les sections TEM et ERT ne présentent pas, en première interprétation, une corrélation directe avec l'intrusion saline définie par les mesures de résistivité de l'eau dans le forage P11. Toutefois les deux méthodes définissent un conducteur C1 penté vers l'amont qui peut être raisonnablement interprété comme une manifestation de l'intrusion saline.
5. L'interface C1/R2 qui apparait sur les deux sections TEM PF06 et P11 ne trouve pas de correspondance sur les sections ERT (Figure 11). L'interface C1/R2 définie sur le profil BRGM 200 m plus bas ne peut pas lui être rattaché si l'on considère notamment la précision de 10% évaluée dans le paragraphe 3.1.1. même en prenant en compte la baisse de résolution avec la profondeur.

L'interprétation hydrogéologique et en terme d'intrusion saline des données de résistivité n'est pas facile dans l'environnement du site de Pierrefonds du fait notamment de relations non univoques entre résistivités et faciès géologiques. La cohérence des observations de l'interface C1-R1 en TEM et ERT conduit néanmoins à interpréter le conducteur C1 comme une invasion saline s'étendant du domaine marin où elle est observée par TEM, vers l'intérieur des terres.

Pour une utilisation optimale des résultats TEM et ERT, il est recommandé de poursuivre l'étude conjointe de la cohérence des réponses et des résultats d'inversion des deux méthodes : Les points 2 à 4 ci-dessus peuvent être abordés par des travaux de modélisations/inversion sur des zones bien contraintes par forage tel que P11.

Un écart de 5 à 8 m entre l'altimétrie ERT et TEM est observée sur la tomographie dipôle-dipôle BRGM. Cet écart ne simplifie pas la comparaison et doit être étudié et corrigé avant tout nouvel exercice de comparaison.

### 3.3. INTERPRETATION GLOBALE

Outre les niveaux superficiels (<50 m de profondeur), dont certains ont pu être rattachés à l'effet de la nappe dans les alluvions ou autres formations poreuses, le site investigué par Stratagem974 par tomographie électrique de résistivité montre globalement sous un résistant de 50 à 100 m d'épaisseur un conducteur profond C1 qui, sur les quatre profils étudiés en détail, se connecte au NW au conducteur mis en évidence par TEM depuis le bord de mer et présente une inclinaison vers l'intérieur des terres.

Ces caractéristiques nous invitent à attribuer ce conducteur profond à l'intrusion saline. Toutefois, il est également possible qu'il puisse représenter une série volcanique basaltique altérée mise en place « au cours du stade basique du Piton des Neiges » comme suggéré par Stratagem 974 et dans la littérature locale<sup>5</sup>.

Il n'est pas possible de trancher entre ces deux interprétations sur la seule base de la résistivité car les gammes des deux formations se recoupent largement. Que des résistivités plus faibles soient observées sur IJ0123 (interprétation Stratagem974) en comparaison des autres profils n'est pas un argument suffisant pour invoquer l'intrusion saline sur ce secteur et l'exclure sur les zones adjacentes. D'ailleurs, l'inversion blocky montre que les résistivités sur IJ0123 sont comparables aux résistivités sur AB0123 et EF01.

Le seul calage dont nous disposons avec des mesures de salinité en forage (sur P11) nous montre que des résistivités de formation de plus de 150 Ohm.m en ERT et de plus de 30 Ohm.m en TEM peuvent encore correspondre à des eaux sous influence océanique dans cet environnement basaltique. Ces valeurs sont cohérentes avec un modèle de milieu fissuré présentant un facteur de formation, F de 100 (Girard et al., 2008 ; Keller 1987). En outre, ce calage n'est pas trivial et fait intervenir une zone plus transmissive et poreuse pour expliquer le maximum de conductivité du niveau C1 à la faveur de formations scoriacées. Ailleurs, il semble que l'intrusion saline correspond à des résistivités de 2-10 Ohm.m en TEM et 15-50 Ohm.m en ERT. L'ensemble du conducteur profond C1 peut donc refléter une influence marine.

Les arguments (complémentaires à la résistivité) les plus forts pour l'interprétation en intrusion saline du conducteur profond (de résistivité inférieure ou égale à 150 Ohm.m) sont bien la connexion avec la mer au travers des observations TEM et la pente du toit de ce conducteur, inclinée vers l'amont. Toutefois au-delà d'une certaine distance à la mer, cette interprétation devient de plus en plus incertaine et il conviendrait de rechercher des arguments autres que géophysiques (réalisation de forages de contrôle descendus au moins 50 m sous le toit du conducteur profond, arguments hydrodynamiques issus de la modélisation...) pour assurer la présence d'une intrusion saline dans les zones situées le plus en amont. Les discontinuités latérales ou les remontées de l'interface C1-R1 pourraient être des indices géophysiques de la limite de l'invasion salée mais ce ne sont pas des déterminations assurées.

L'interprétation proposée ici qui attribue à l'invasion saline le conducteur profond et penté vers l'amont, observé en TEM et en ERT conduit à tracer une carte de l'invasion salée telle que présentée sur la figure 12. On constate que l'invasion salée est plus pénétrante au SE qu'au NO avec un minimum de pénétration au niveau de IJ0123. Doit-on voir ici l'indice d'un terrain moins perméable confirmant qu'on peut passer latéralement d'un conducteur plus perméable et salé à un conducteur plus altéré (argileux) et moins transmissif ? Ou bien est-ce l'effet d'un chenal particulièrement transmissif, préférentiellement alimenté par la Rivière St-Etienne et repoussant l'invasion salée ?

Nous ne disposons pas d'informations robustes sur la géologie profonde de la plaine de Pierrefonds, mais la caractérisation plus fine de l'intrusion saline pourrait être appréhendée, dans une première approche, par la comparaison des cartes TEM avec les cartes des intrusions connues en essayant d'en tirer des facteurs de formation, F par formation (degré d'altération du basalte, alluvions...). Ce travail dépasse cependant le cadre du présent projet.

---

<sup>5</sup> En haut de la page 55 du rapport de Stratagem974, le conducteur profond est évoqué : « *Les études géologiques et hydrogéologiques antérieures suggèrent que ce conducteur profond correspond à des coulées de laves basaltiques altérées mises en place au cours du stade basique du Piton des Neiges (> 430 ka) dont la surface a subi une importante érosion au cours de la phase de transition de l'édifice (430-340 ka)* ».

En revanche, les explorations géophysiques pour la géothermie ont montré que des résistivités inférieures à 10 Ohm.m et même encore inférieures à cette valeur peuvent être dues à l'altération hydrothermale. L'observation de résistivité à 10 Ohm.m n'est donc pas un indicateur univoque de l'intrusion saline.

Deux schémas interprétatifs sont possibles dans un même environnement basaltique caractérisé par des résistivités également faibles mais conduisant à des conditions hydrodynamiques opposées. Il convient d'apporter des informations autres que celles basées sur la résistivité pour les distinguer :

- Laves altérées (probablement anciennes) ⇔ Faible perméabilité des terrains ⇔ Charge hydraulique élevée ⇔ Intrusion saline peu marquée
- Laves peu altérées (probablement récentes) ⇔ forte perméabilité des terrains ⇔ Charge hydraulique faible ⇔ Intrusion saline significative.

Une modélisation hydrodispersive, axée sur la sensibilité de la position pourrait permettre, sur la base d'analyses de sensibilité robustes, de répondre en partie à ces incertitudes.

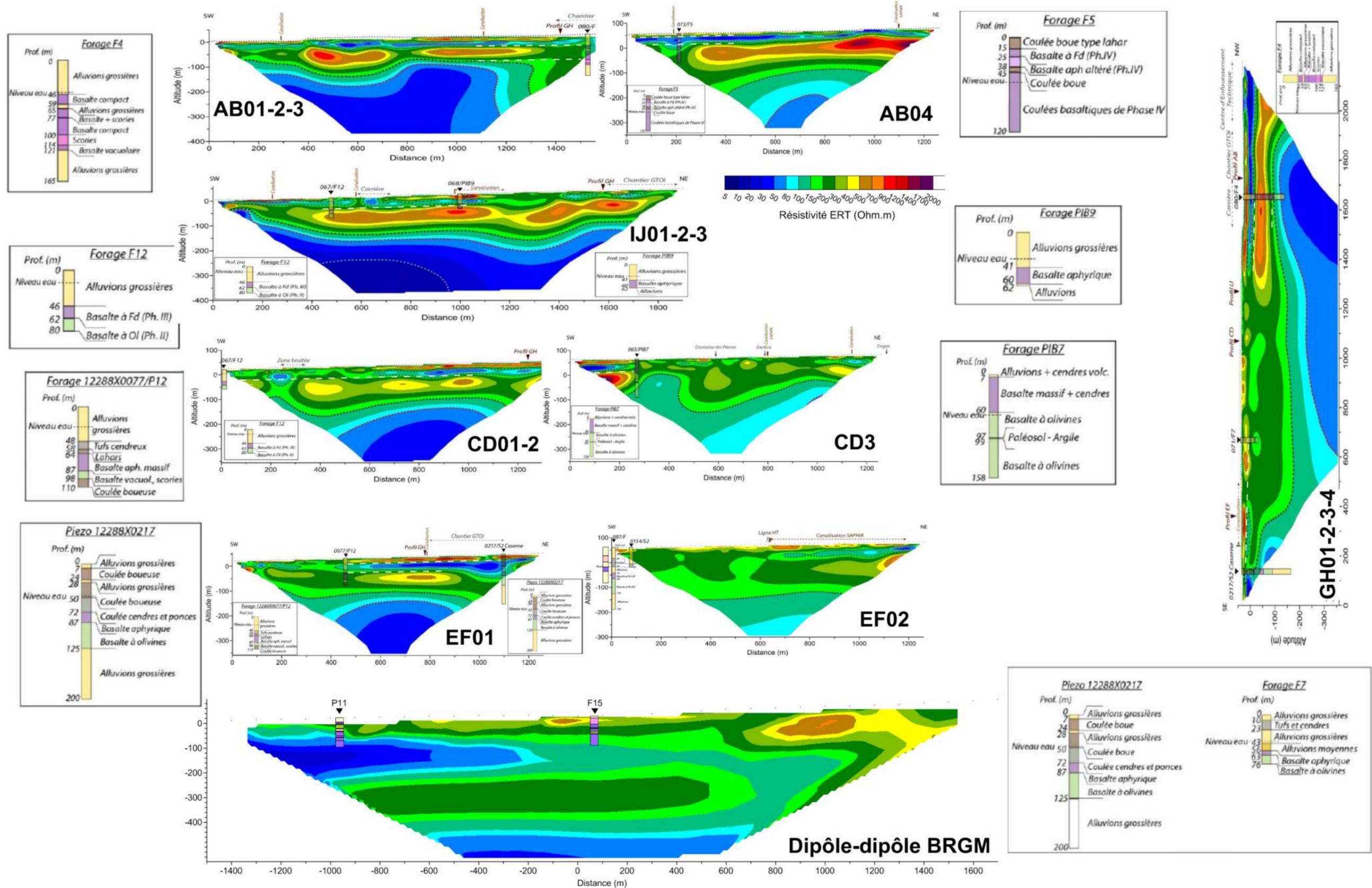


Figure 9 – Corrélation des principales interfaces définies par les tomographies de Stratagem974 avec les limites lithologiques définies par forage. Les corrélations sont soulignées par un trait discontinu blanc.

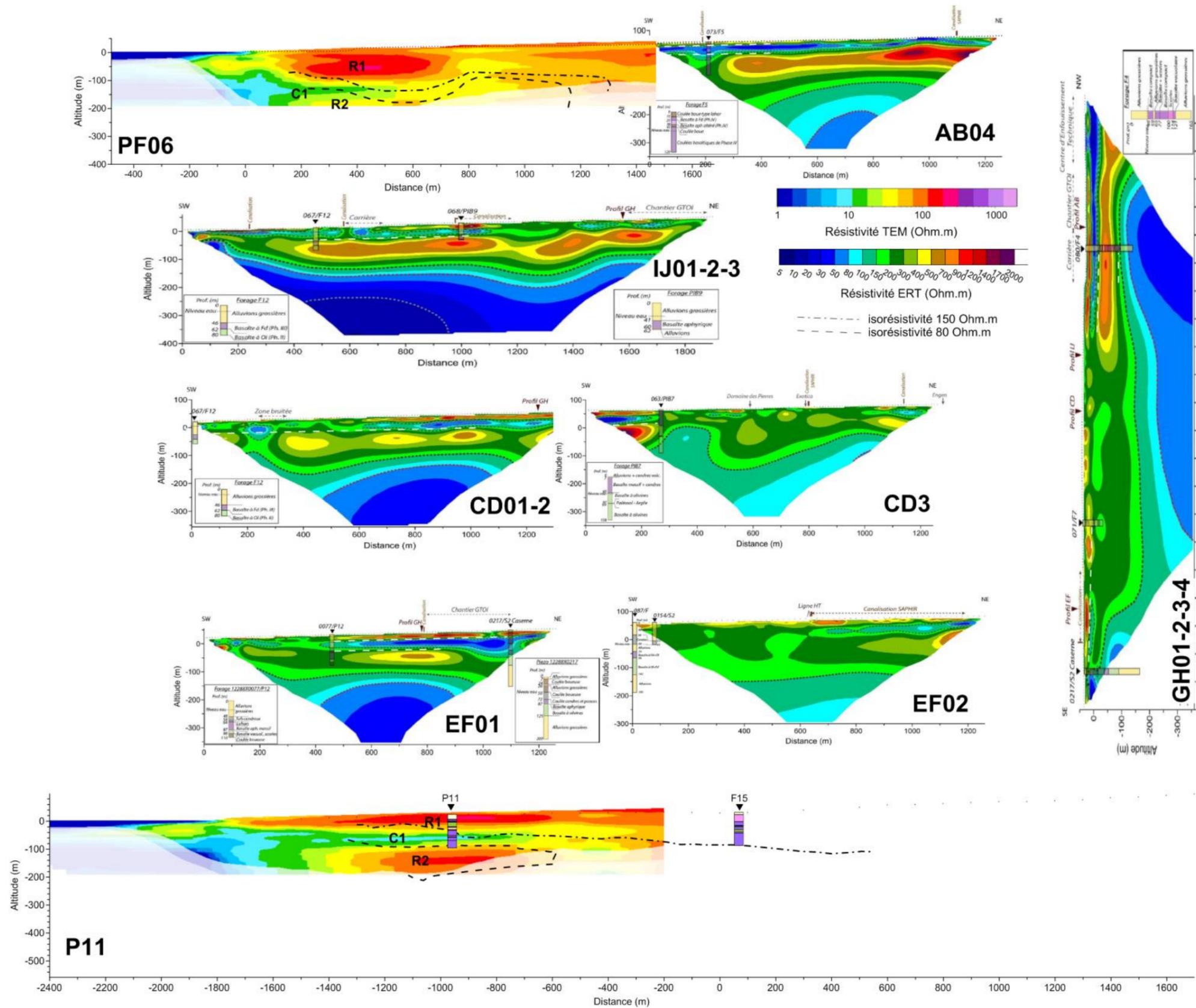


Figure 10 - Sections de résistivité TEM PF06 et P11 comparées respectivement aux résultats d'inversion ERT de Stratagem974 AB01-2-3 et dipôle-dipôle BRGM. Les courbes d'isorésistivité 80 et 150 Ohm.m de l'inversion « lissée » de Stratagem974 sont représentées par des traits noirs discontinus superposés aux sections TEM.

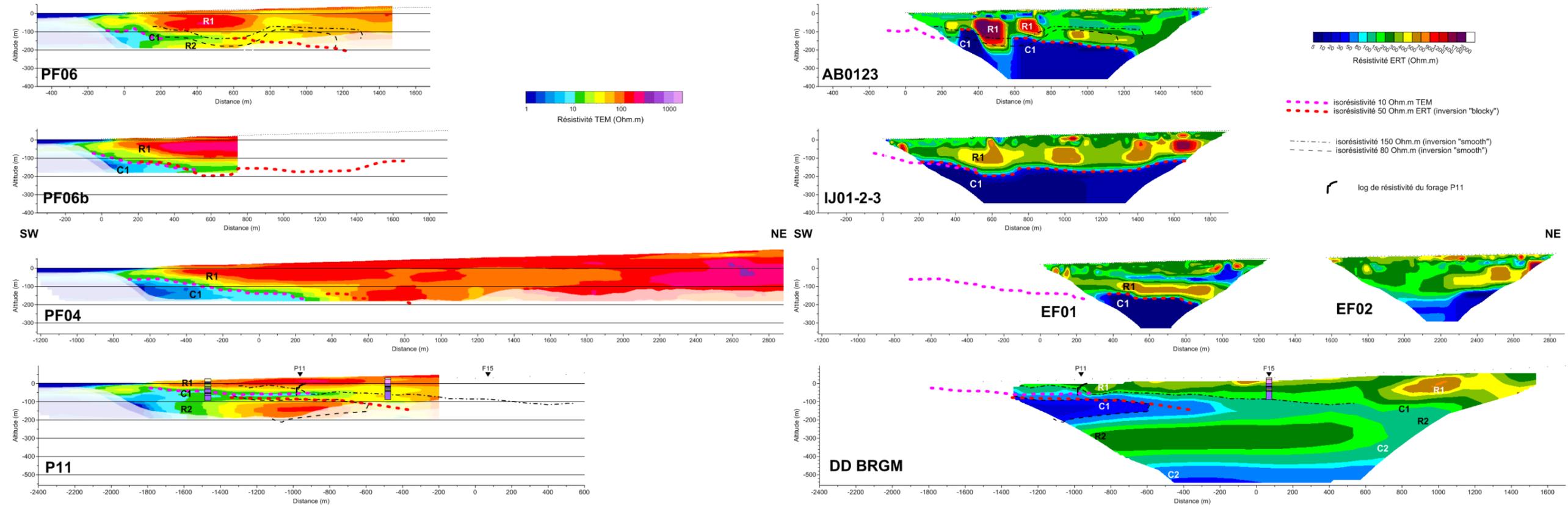


Figure 11 – Résultats d'inversion « blocky » des profils AB01-2-3 et dipôle-dipôle BRGM comparés respectivement aux sections TEM PF06 et P11. Les courbes d'isoresistivité 80 et 150 Ohm.m de l'inversion « lissée » sont représentées par des traits noirs discontinus superposés aux sections TEM et aux inversions blocky.



Figure 12 – Carte de la profondeur de l'invasion salée d'après les investigations ERT (mode « blocky ») corrélées aux investigations TEM (iso-profondeurs -50, -100 et -150 m surimposées en noir).



## 4. Conclusion

Malgré les difficultés rencontrées sur le terrain (maintenance de l'électrode lointaine, interférences du réseau de canalisation...), les investigations par tomographie de résistivité électrique (« Electrical Resistivity Tomography », ERT en anglais) réalisées par Stratagem974 sur le site de Pierrefonds a produit des résultats de bonne qualité qui sont présentés dans un rapport bien documenté.

La comparaison réalisée dans le cadre des travaux d'expertise du BRGM montre une bonne corrélation des résultats ERT avec les logs lithologiques des forages : la profondeur des interfaces des principaux horizons géo-électriques est évaluée à 10% près dans les cas favorables, jusqu'à 100 m de profondeur. Cette bonne cohérence globale entre résultats ERT et les interprétations géologiques tend à prouver que les interférences potentielles des canalisations métalliques sur les résultats des tomographies sont réduites.

Le calage des faciès de résistivités avec les lithologies observées en forage montre qu'il existe un recouvrement important des gammes de résistivité des différentes formations en présence. Dans ces conditions l'interprétation ne peut être basée sur le seul paramètre résistivité.

Outre les niveaux superficiels (<50 m de profondeur), dont certains ont pu être rattachés à l'effet de la nappe dans les alluvions ou autres formations poreuses, les résultats des tomographies de Stratagem974, montrent globalement un conducteur profond dont le toit s'établit entre 100 et 150 m de profondeur sous un ensemble résistant correspondant à des basaltes plus ou moins altérés mais également à des alluvions.

Ce conducteur profond se prête à au moins deux interprétations qui ne peuvent être tranchées à partir des seuls résultats de tomographie de résistivité. Il peut s'agir :

- De séries basaltiques anciennes et altérées telles que proposées par des études précédentes ;
- De l'effet de l'intrusion saline mise en place dans des terrains transmissifs et poreux (alluvions sableuses à graveleuses, basalte fracturé ou scoriacé...).

Sur quatre profils tomographiques examinés en détail dans le cadre des présents travaux, le conducteur profond se connecte au NO au conducteur mis en évidence par électromagnétisme hélicoptère (TEM, « transient electromagnetism » en anglais) depuis le bord de mer et présente une inclinaison vers l'intérieur des terres. Les considérations géométriques sur la pente du conducteur principal et sa connexion avec la zone marine sont des arguments complémentaires décisifs pour attribuer raisonnablement ce conducteur à l'invasion saline. Cette démarche conduit à cartographier la profondeur de l'invasion saline à partir de la profondeur du toit du conducteur C1. L'invasion saline serait ainsi plus pénétrante au SE et moins pénétrante au NO.

Au-delà des objectifs du présent projet, une méthodologie de cartographie de l'invasion saline se dessine. Elle est basée sur :

- l'inversion en mode « blocky » des tomographies électriques pour une meilleure définition des interfaces et des résistivités ;
- l'interprétation conjuguée des sections ERT et TEM pour définir l'invasion saline depuis le domaine marin en suivant le toit du conducteur principal qui s'approfondit à l'intérieur des terres.

La définition de la limite de l'invasion salée reste toutefois problématique du fait du possible passage latéral à un milieu conducteur correspondant à un milieu argileux, non transmissif. Les discontinuités latérales ou les remontées du toit du conducteur principal révélées par la géophysique sont des indications de limites potentielles de l'invasion salée mais doivent être contrôlées (par forage) afin de déterminer leur nature exacte.

Pour affiner cette méthodologie dans un autre cadre que le présent projet partenarial, il est recommandé d'envisager des travaux complémentaires visant à :

- étudier plus largement la cohérence des résultats TEM et ERT sur la base d'observations coïncidentes, si possible calées sur des informations de forage ;
- par des modélisations/inversions visant à tester les performances de résolution des deux méthodes ;
- de tester différentes approches d'inversion ERT et TEM pour une meilleure définition de la géométrie et des résistivités.

La révision de l'ensemble des données TEM et ERT du site de Pierrefonds permettrait par ailleurs d'améliorer la cartographie de l'intrusion saline obtenue à partir de ces travaux préliminaires.

## 5. Bibliographie

Aunay B., Reninger P.-A. & Dumont, M. (2016) – Interprétation hydrogéologique des données de géophysique aéroportée sur le secteur de Pierrefonds. Rapport final. BRGM/RP-65621-FR, 53 p.

Chaput M., Durand F. (2015) – Etude d'imagerie géophysique du sous-sol sur le secteur de Pierrefonds, commune de St- Pierre, La Réunion, Marche 2014A, Rapport Stratagem974, 57 p., 26 fig., 3 Tab., 7 Annexes.

Girard J-F., J-M. Miehé, N. Coppo, B. Aunay (2008) - Méthodologie d'imagerie électrique haute résolution des aquifères côtiers en milieu volcanique à la Réunion. Rapport BRGM/RP-56612-FR. 57 p.

Keller, G. 1987, Chap.1. Rock and mineral properties, fig 19, p 42, Relationship between formation factor to the amount of water in a rock for various types of pore structure, in Electromagnetic methods in applied geophysics, SEG ed., vol. 1.

Loke, M.H., 2001. Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys. GeotomoSoftware, Malaysia.

Loke, M.H., Acworth, I., Dahlin, T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. Explor. Geophys. 34, 182–187.

Martelet G., Reninger P.A., Perrin J., Deparis J. (2014) – Acquisition géophysique hélicoptère de l'île de La Réunion. Rapp. BRGM/RP-63818-FR, 91 p., 28 fig., 21 tab., 5 ann.

Razafindratsima S., Lataste J-F, (2014), Estimation of the error made in Pole–Dipole Electrical Resistivity Tomography depending on the location of the remote electrode : Modeling and field study, Journal of Applied Geophysics 100 (2014) 44–57

Seaton William J., Thomas J. Burbey (2002), Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane Journal of Applied Geophysics 51 (2002) 21– 41



## **Annexe 1**

# **Principes de la tomographie de résistivité électrique**



## A.1. PRINCIPE DE LA METHODE

La tomographie de résistivité électrique (ERT pour Electrical Resistivity Tomography en anglais) est une méthode géophysique permettant d'obtenir la distribution de la résistivité électrique des matériaux (roches ou structures) en profondeur (2D et 3D selon le dispositif d'acquisition mis en place et les procédés d'inversion/modélisation appliqué) à partir de mesures de potentiel électrique en surface. Les termes «panneau électrique» ou «tomographie électrique» sont utilisés pour qualifier une prospection électrique (initialement basée sur quatre électrodes) automatisée le long d'un profil multi-électrodes (2D) ou sur une surface (3D). Ce type d'acquisition présente l'avantage de fournir des résultats fiables en 2D ou 3D, et d'être rapidement mis en œuvre.

Le principe de base de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité  $I$  entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel  $\Delta V$  induite entre une autre paire d'électrodes M et N (Figure 13).

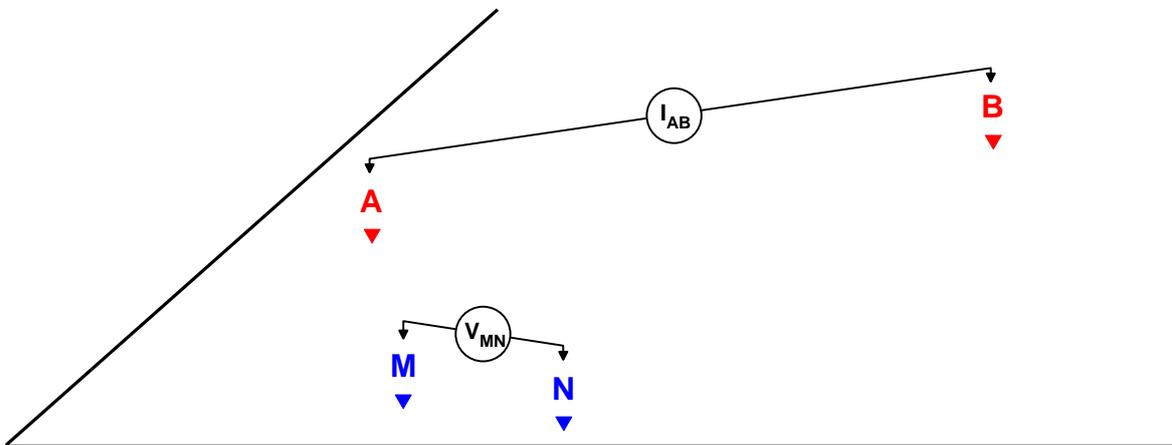


Figure 13 : Principe de la mesure en courant électrique continu

A partir de la valeur du courant injecté  $I$ , de la mesure de la différence de potentiel  $\Delta V$  et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la **résistivité électrique apparente** du sous-sol sur base de la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

où  $K$  est un facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure (Figure 14) :

$$K = 2\pi \times \left[ \frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right]^{-1}$$

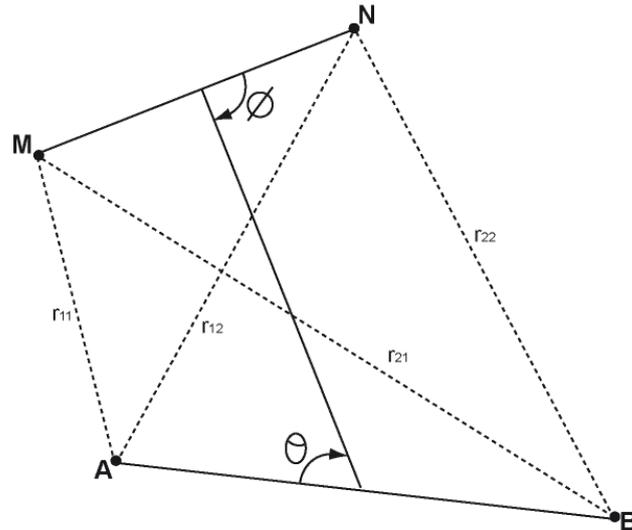


Figure 14 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel ( $0 < \theta, \Phi < \pi$ )

La résistivité apparente d'un terrain hétérogène correspond à la résistivité d'un terrain homogène qui, pour une configuration identique des électrodes et un même courant injecté, donnerait la même mesure  $\Delta V$ . Elle est fonction de la résistivité, de la géométrie des diverses couches et de la disposition des électrodes. Il existe plusieurs dispositifs d'électrodes utilisés en pratique : Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, pôle-pôle, etc.

## A.2. DISPOSITIFS D'ELECTRODES / CONFIGURATIONS D'ACQUISITION

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant (AB) et de potentiel (MN) (soit les quadripôles ABMN) en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant avantages et inconvénients. Les différences majeures entre ces configurations sont la distribution des lignes de courant électrique dans le sol et donc la forme des équipotentiels en surface ainsi que la valeur du coefficient géométrique K qui conditionnera les valeurs du courant minimal I à injecter pour mesurer un potentiel électrique minimal U fiable. Selon les équipements utilisés, certains dispositifs sont également plus rapides (dipôle-dipôle) à acquérir que d'autres (Schlumberger) grâce à des acquisitions multivoies (plusieurs mesures de  $\Delta V$  pour une injection de courant).

Pour la configuration Wenner, par exemple, la profondeur d'investigation est estimée égale à la moitié du plus grand écartement utilisé entre deux électrodes successives mais elle peut varier suivant la nature des terrains et leur résistivité. L'écartement entre électrodes détermine donc la profondeur d'investigation ainsi que les résolutions horizontale et verticale. Par rapport aux autres configurations, le dispositif Wenner rend les structures plus facilement reconnaissables sur la pseudo-section.

D'une manière générale, la mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet dans la plupart des contextes de mieux appréhender la géométrie des différents corps en présence. Ci-dessous sont présentées trois configurations souvent mises en œuvre avec les équipements automatisés actuels.

**Le dispositif dipôle-dipôle** donne une très bonne résolution des terrains de subsurface et pour les discontinuités verticales. Dans cette configuration, le rapport signal/bruit décroît rapidement et la profondeur d'investigation se réduit également (Figure 15).

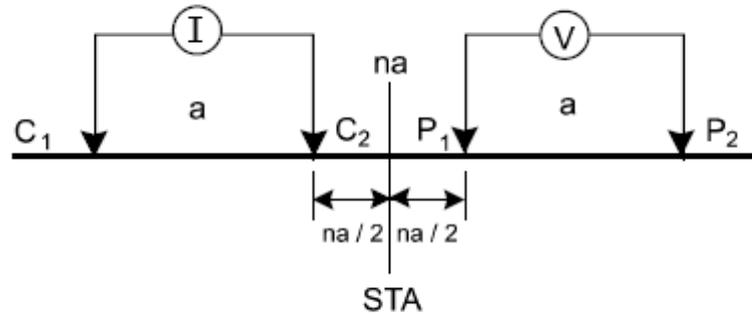


Figure 15 : Configuration dipôle-dipôle

**Le dispositif Schlumberger** est plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux par rapport au profil de mesure. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte (de l'ordre de 80m pour un dispositif de 500 m de long) grâce à un meilleur rapport signal/bruit (Figure 16).

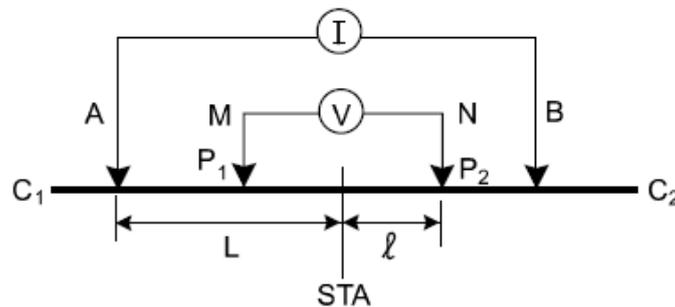


Figure 16 : Configuration de Schlumberger

**Le dispositif pôle-dipôle** (Figure 5) allie une bonne résolution avec une bonne profondeur d'investigation. Il nécessite néanmoins de mettre en place et maintenir une électrode lointaine (au moins 5 à 10 fois le plus grand écartement).

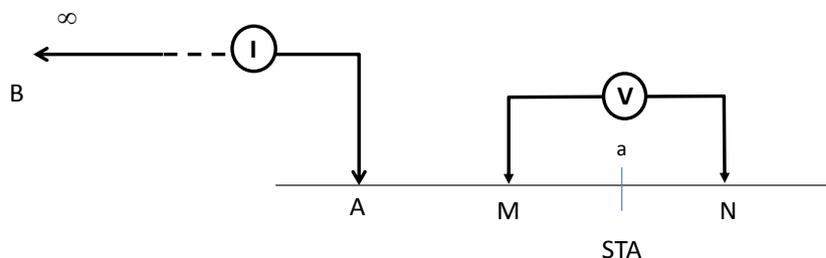


Figure 17 : Configuration dipôle-dipôle

**Le dispositif Wenner** est un dispositif présentant la particularité d'avoir trois espacements identiques entre les quatre électrodes. Avec ce dispositif, les résistivités apparentes sont moins affectées par les variations latérales superficielles (Figure 18).

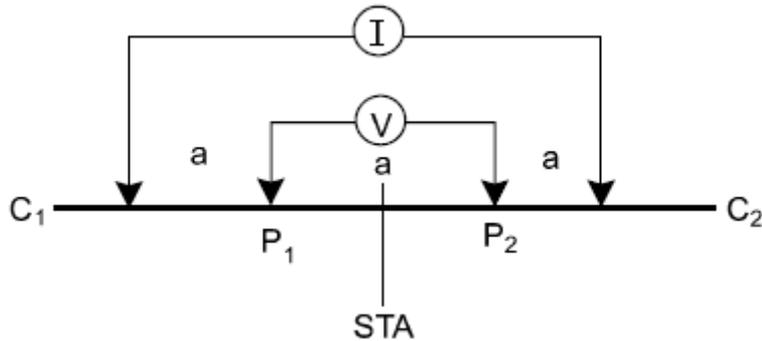


Figure 18 : Configuration Wenner

### A.3. CONSTRUCTION D'UNE PSEUDO-SECTION DE RESISTIVITE APPARENTE

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré (logiciels Iris Instruments et X2ipi), celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol. Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une pseudo-profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité (puisqu'apparentes) et celles de profondeur ne sont pas correctes (Figure 19).

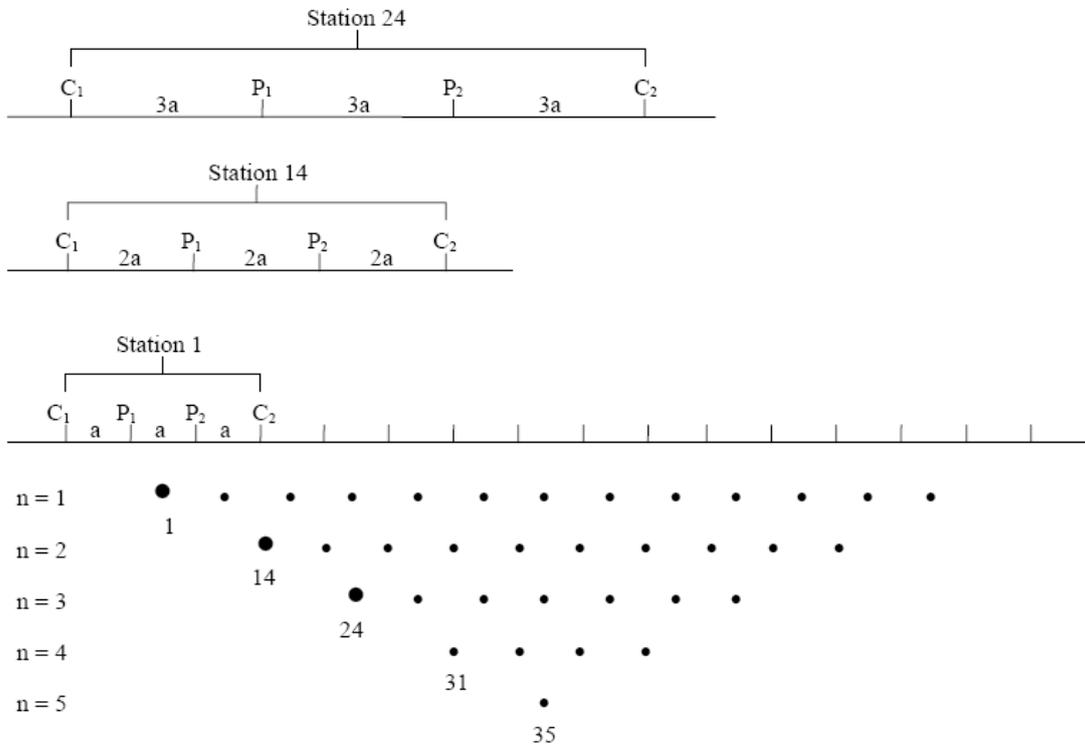


Figure 19 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner

## A1.4. TRAITEMENT ET INVERSION DES DONNEES

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section (Figure 20). Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Loke & Barker). Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Afin de prendre en compte les morphologies rencontrées, la topographie de chaque profil est incluse lors de l'inversion ( Figure 21).

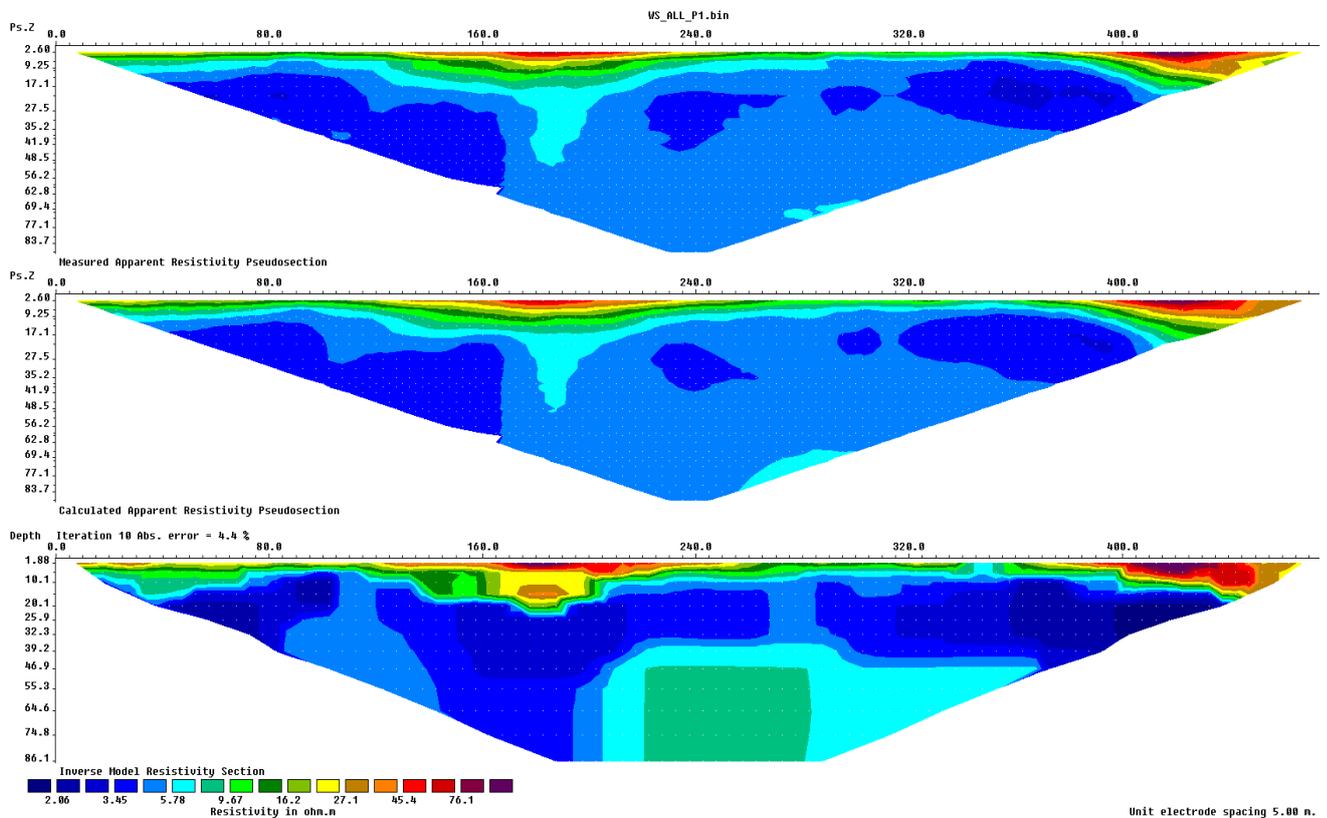


Figure 20 : Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).

La pseudosection de résistivité « vraie » (illustration du bas de la Figure 20), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie des horizons, profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe (section) semblable à celle de résistivité apparente présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

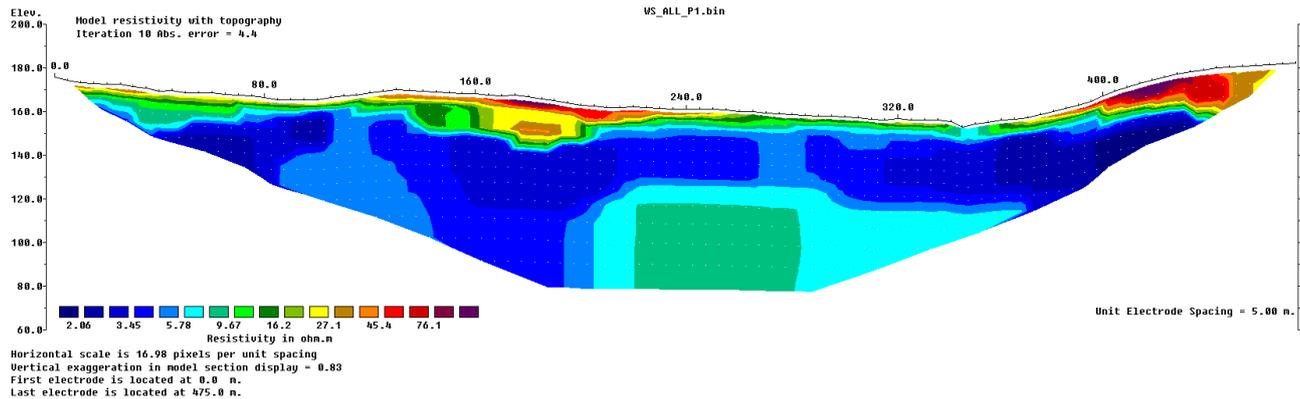


Figure 21 : Résultat de l'inversion de la figure 8 avec la topographie.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion sont choisis de manière à optimiser la réponse du modèle en incluant une information « à priori ».

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géoélectriques) les paramètres fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données) et sont soumis à des principes d'équivalence. Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations de terrain).

## A1.5. APPLICATIONS

La tomographie électrique s'applique d'une manière générale à caractériser les milieux présentant un contraste de résistivité par rapport à leur environnement dans les limites de la résolution de la méthode. La résistivité du sous-sol dépend de sa teneur en fluide, de la résistivité de ce fluide et de sa minéralogie (en particulier de sa teneur en argile). Le paramètre résistivité est ainsi généralement un bon descripteur de la géologie et un bon indicateur des propriétés hydrogéologiques du sous-sol.

La tomographie électrique proche surface (< 100m) s'applique globalement à toutes les sciences environnementales dans des domaines divers et variés.

- Hydrogéologie (géométrie et qualité des aquifères), profondeur du substratum, identification d'invasions salines en milieu côtier
- Géologie : identification de contact géologique ou tectonique
- Environnement : suivi de panache de contamination dans le sol ou dans un aquifère
- Risques naturels : délimitation de la base de glissements de terrain
- Dans le domaine minier (souvent associée à des mesures de polarisation provoquée (PP)), pour mettre en évidence des corps minéralisés
- En archéologie pour l'identification de structures enterrées
- Risques naturels : recherche de cavité en proche surface
- Géotechnique : qualité de fondations
- Volcanologie : identification des zones de fortes altérations hydrothermales

## **Annexe 2**

### **Compte-rendu d'analyse qualité du profil AB1-2-3**



L'ensemble des données pole-dipole (PdP) et Wenner du profil AB1-2-3 avec leur localisation a été réceptionnée le 02/03/2015 (envoi le 01/03/2015, envois partiels antérieurs).

L'implantation du profil est conforme aux prévisions (cf. carte en fin de document).

L'électrode à l'infini est à au moins 4900 m de AB1-2-3.

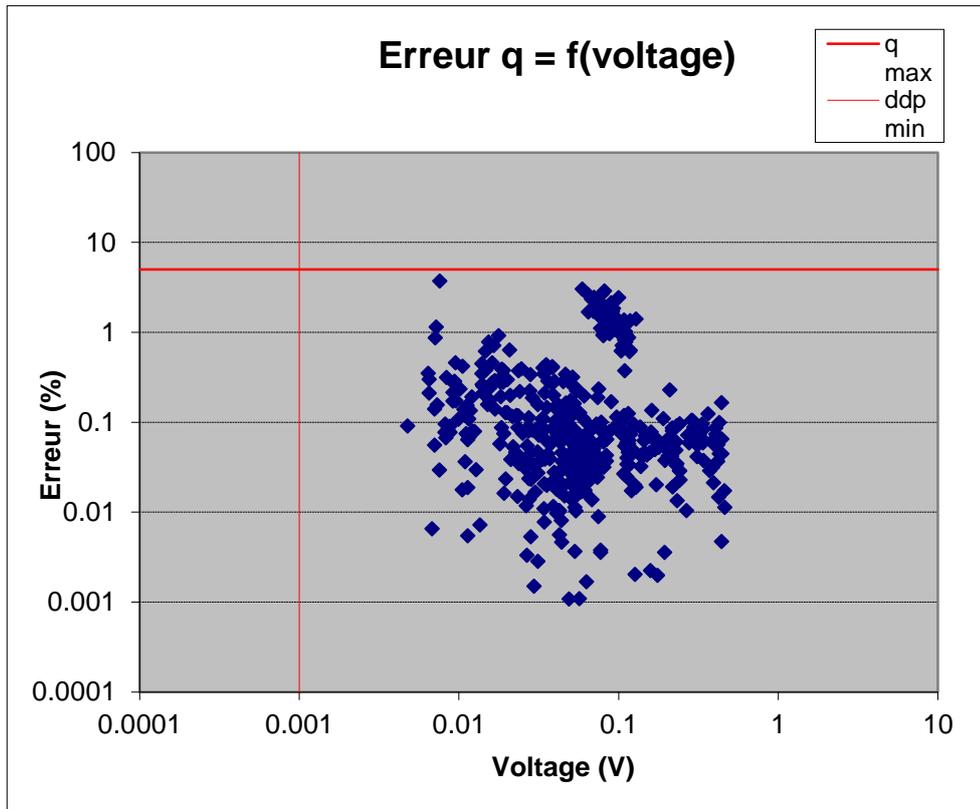
Un possible artefact affecte les mesures réalisées avec l'électrode 36 du profil AB1. Il est possible que l'électrode 20 soit aussi affectée mais l'effet est moins sensible. La section est traversée par des zones de résistivité très contrastées et localisées qui peuvent être l'effet de structures du sous-sol mais dont l'allure « très géométrique » invite à penser à des effets d'infrastructures de surface. La réponse autour des électrodes 66 à 70 en Wenner (cernée de blanc) est typiquement comparable à la réponse attribuable à des canalisations sur le profil IJ01-2-3 (électrodes 50 et 54). Les anomalies relevées ne semblent toutefois pas en cohérence avec les canalisations métalliques connues sur AB. STRATAGEM peut-il vérifier l'existence de canalisations métalliques aux électrodes 20, 36 et autour des électrodes 66 et 70.

Le saut topographique qui apparaît au niveau des électrodes 18 et 19 n'est pas visible sur la carte topographique : A confirmer/expliciter.

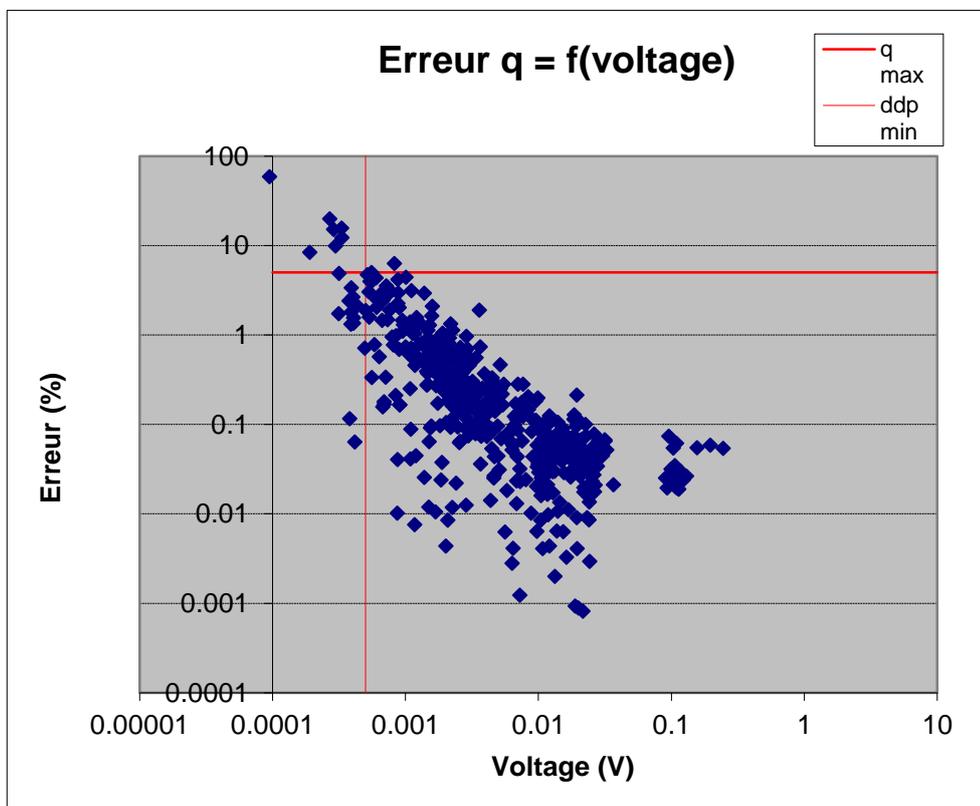
Les résultats préliminaires d'inversion montrent un conducteur profond en cohérence avec les cibles recherchées et le profil TEM. Le résistivité intermédiaire sur le PdP est bien cohérent avec les résultats du profil TEM. Les artefacts relevés ne semblent pas avoir un impact important sur le résultat en profondeur : l'explication serait que ces artefacts sont bien résolus par l'inversion comme des conducteurs très superficiels. Il convient toutefois de les analyser avec attention.

Sous réserve que les éléments complémentaires à produire par STRATAGEM974, les tests de filtrage et les résultats d'inversion après filtrage plus approfondi ainsi que les résultats d'analyse des profils IJ et EF n'apportent pas d'éléments nouveaux significatifs invalidant cette analyse préliminaire, **l'acquisition des tomographies AB01-2-3 est validée.**

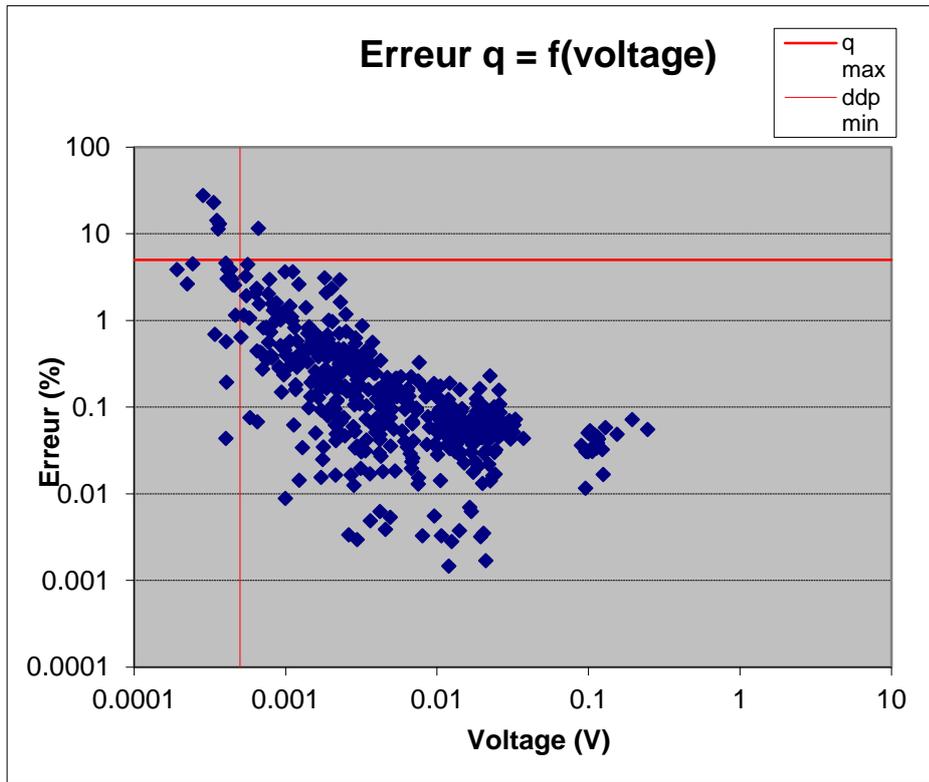
AB1 Wenner Alpha



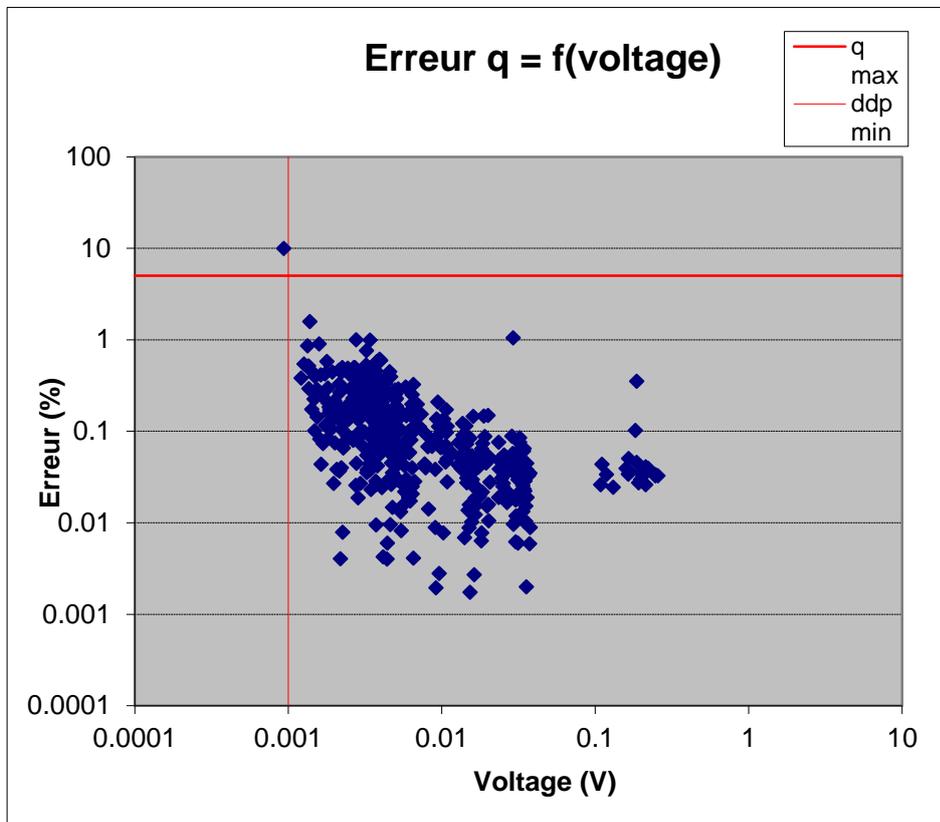
AB1 PdP- avant



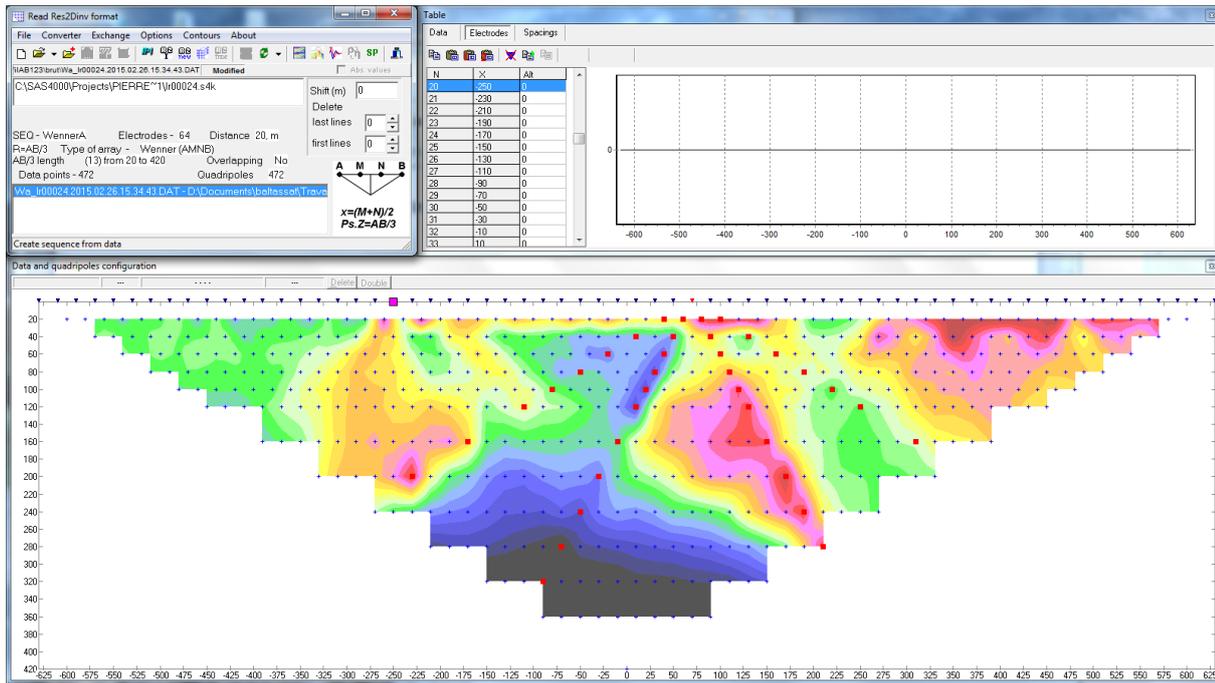
AB1 PdP- avant, répétition



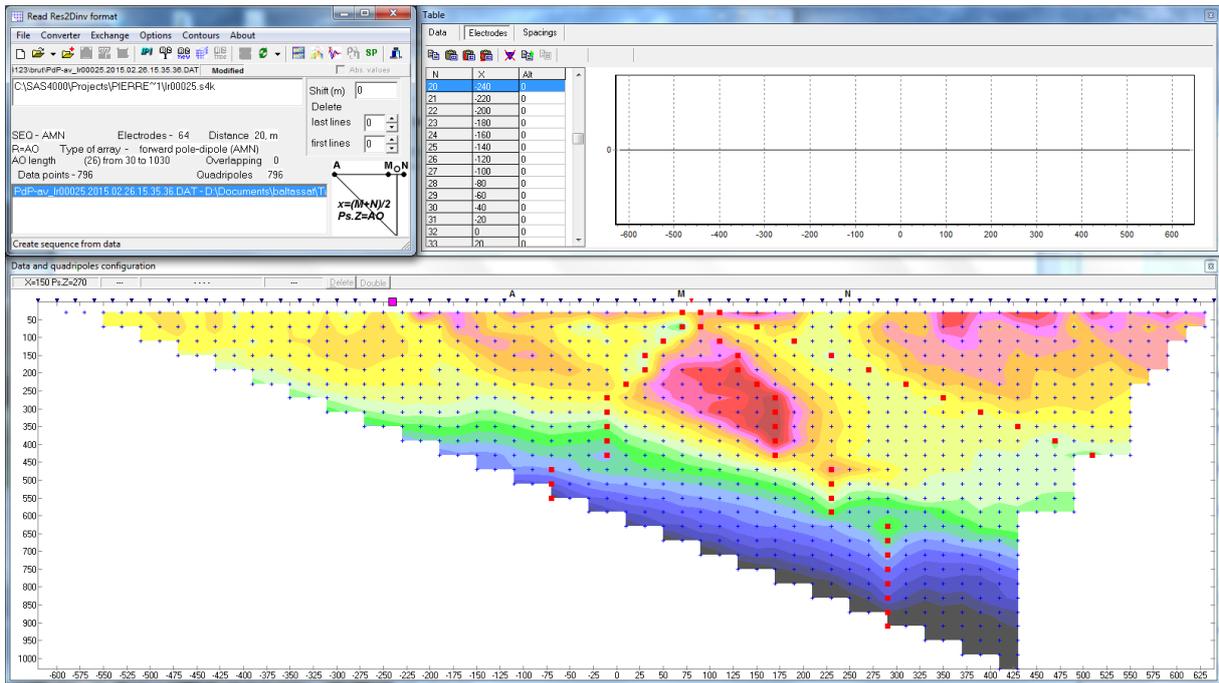
AB1 PdP- arrière



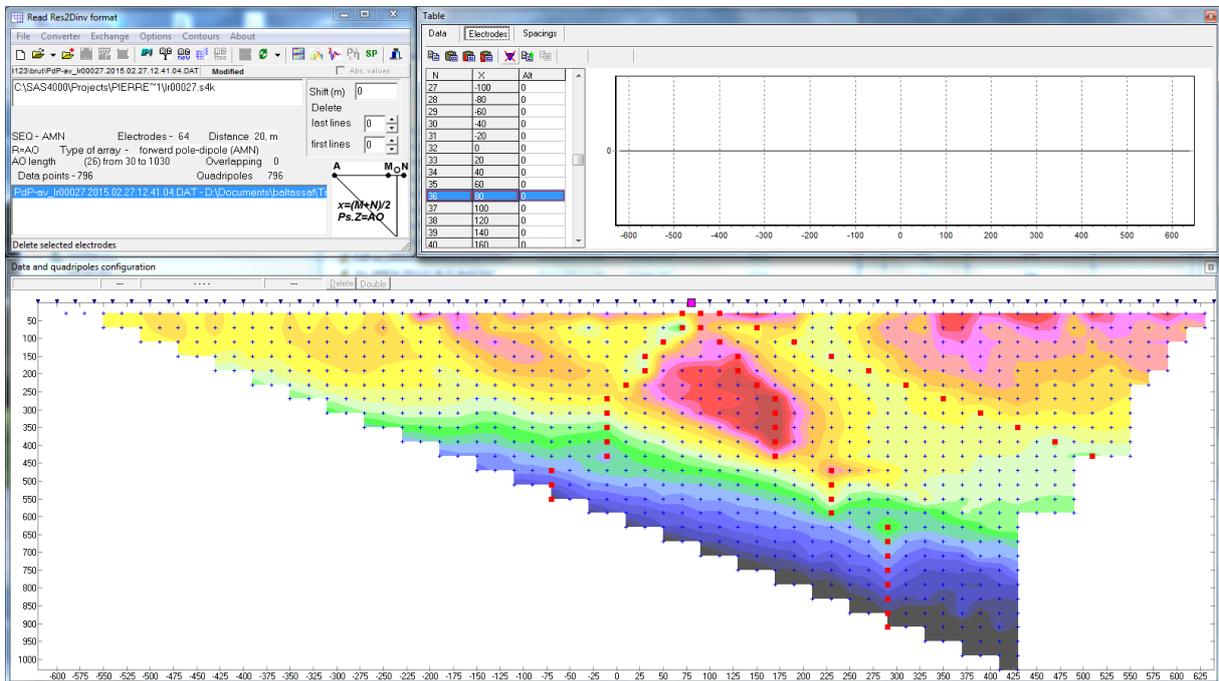
Profil AB1 Wenner Alpha avant filtrage (mesures correspondant à l'électrode 36 en rouge).



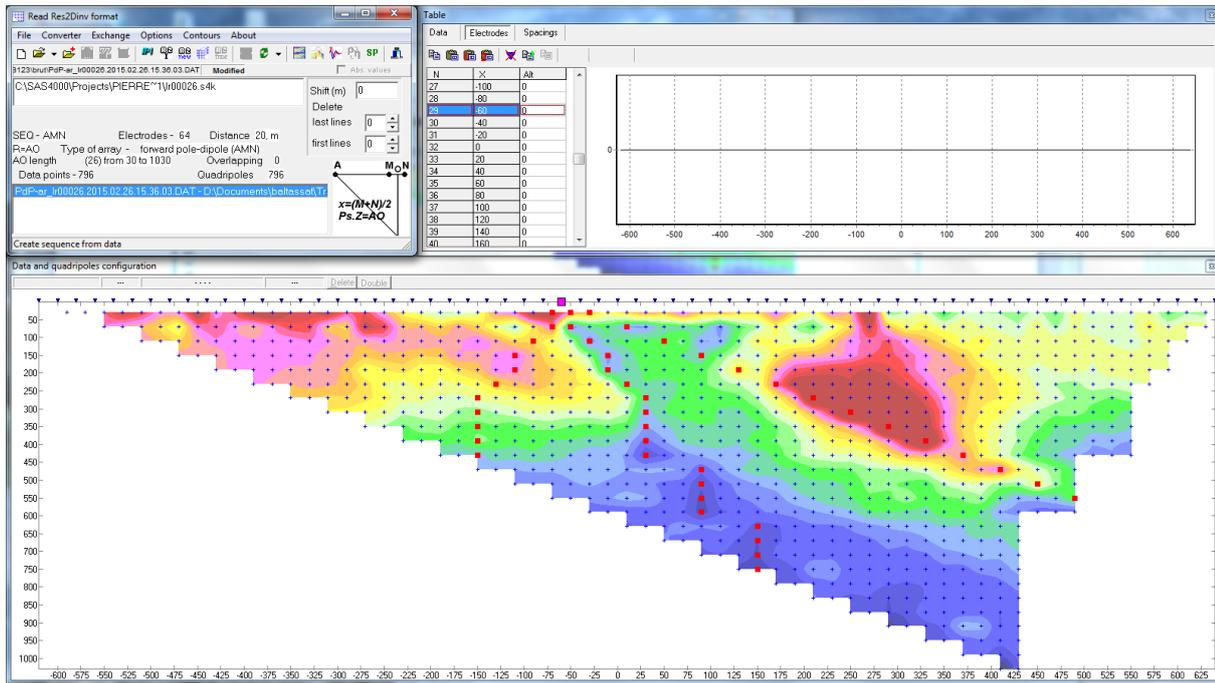
Profil AB1 PdP avant, avant filtrage



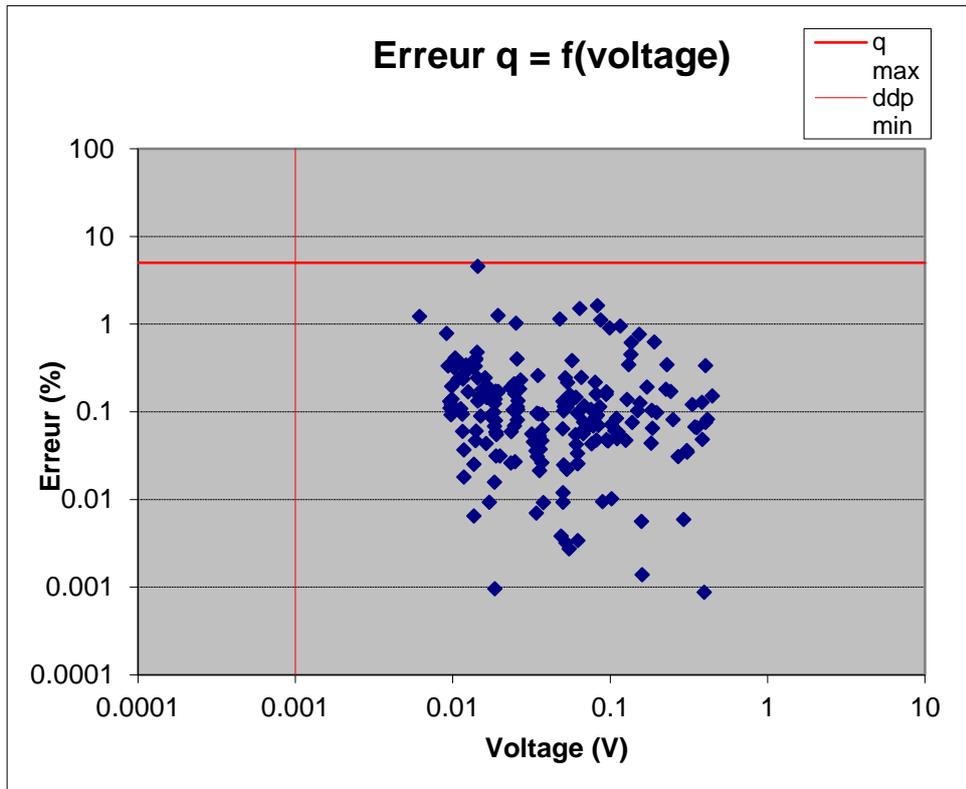
Profil AB1 PdP avant, répétition, avant filtrage



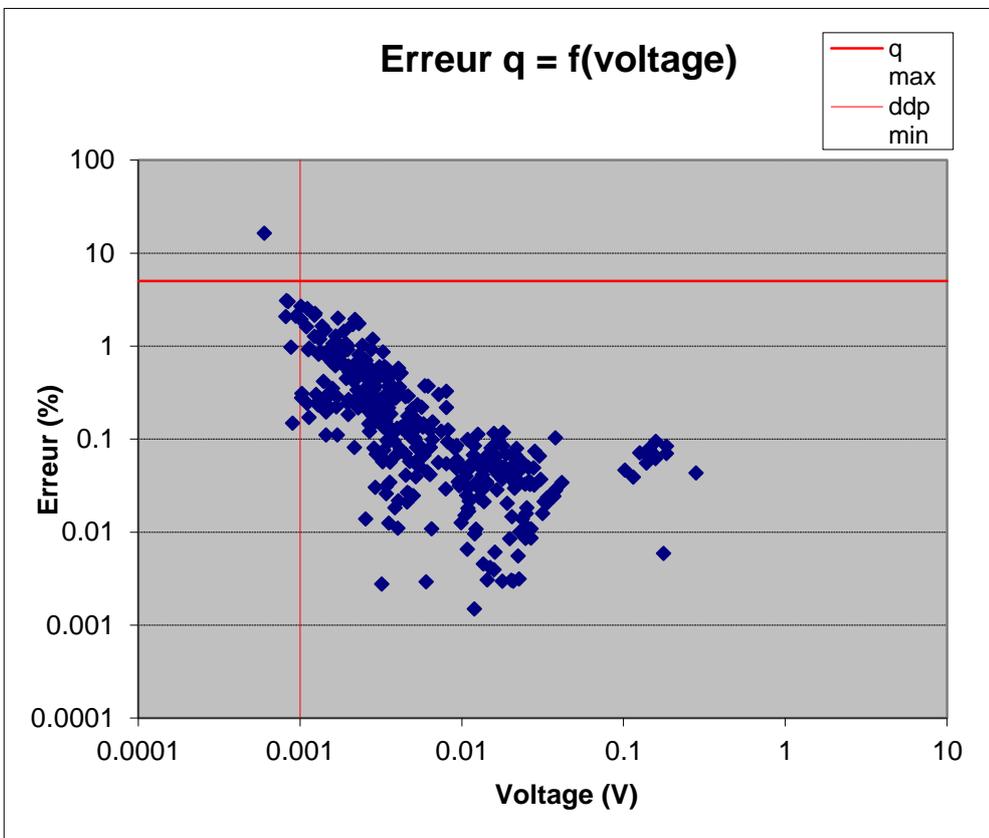
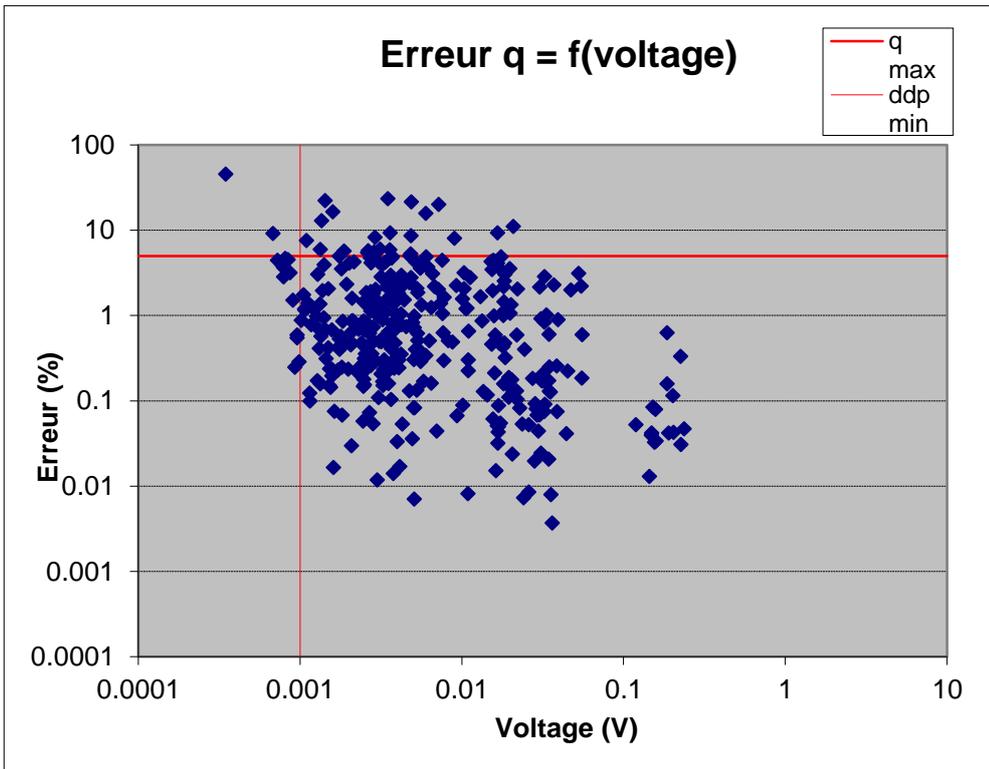
Profil AB1 PdP arrière, avant filtrage



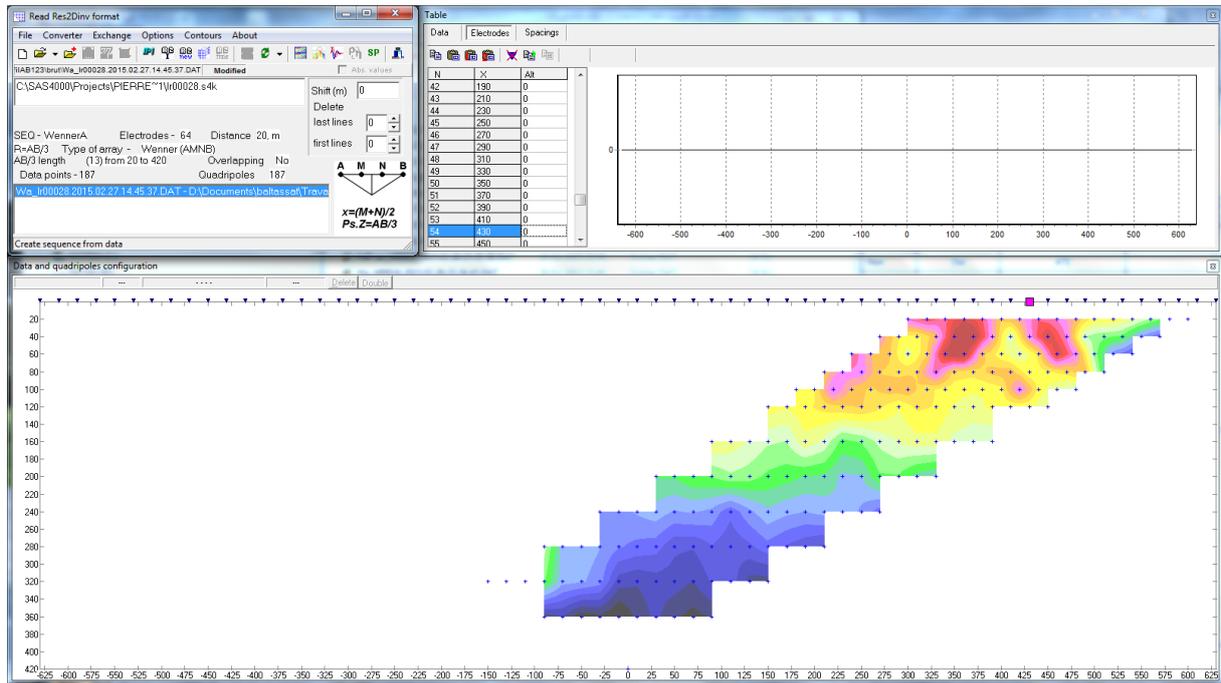
## AB2 Wenner alpha



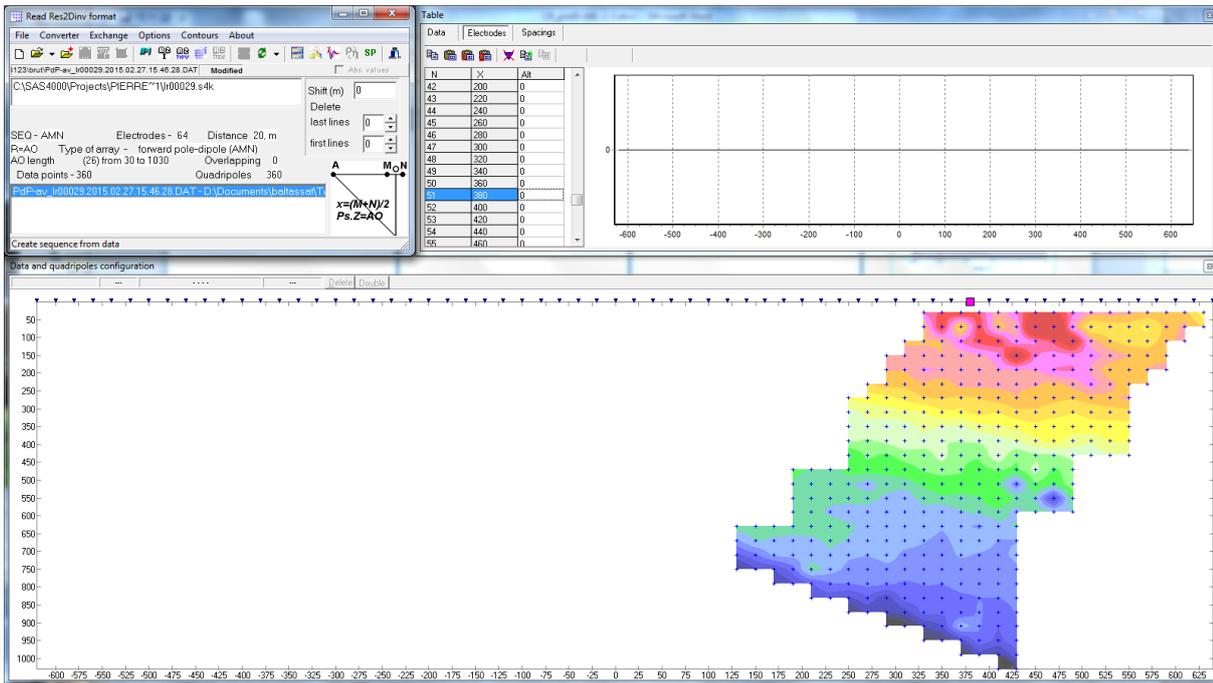
AB2 PdP avant (en haut), arrière (en bas)



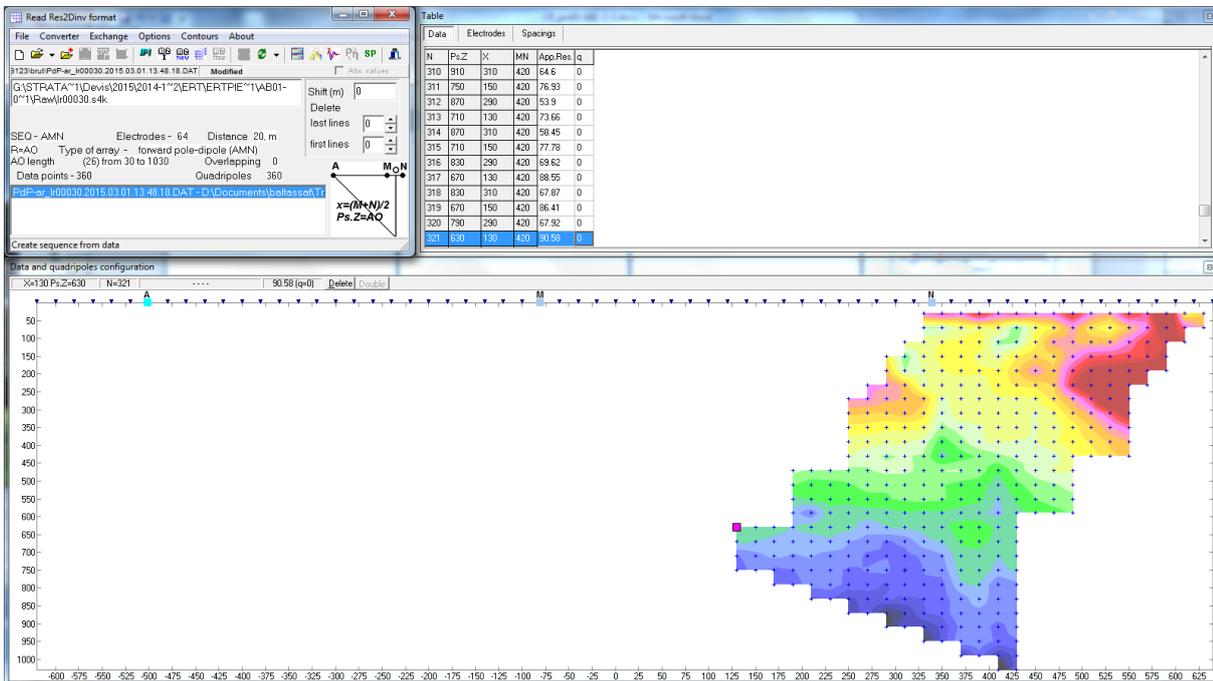
## Profil AB2 Wenner alpha, avant filtrage



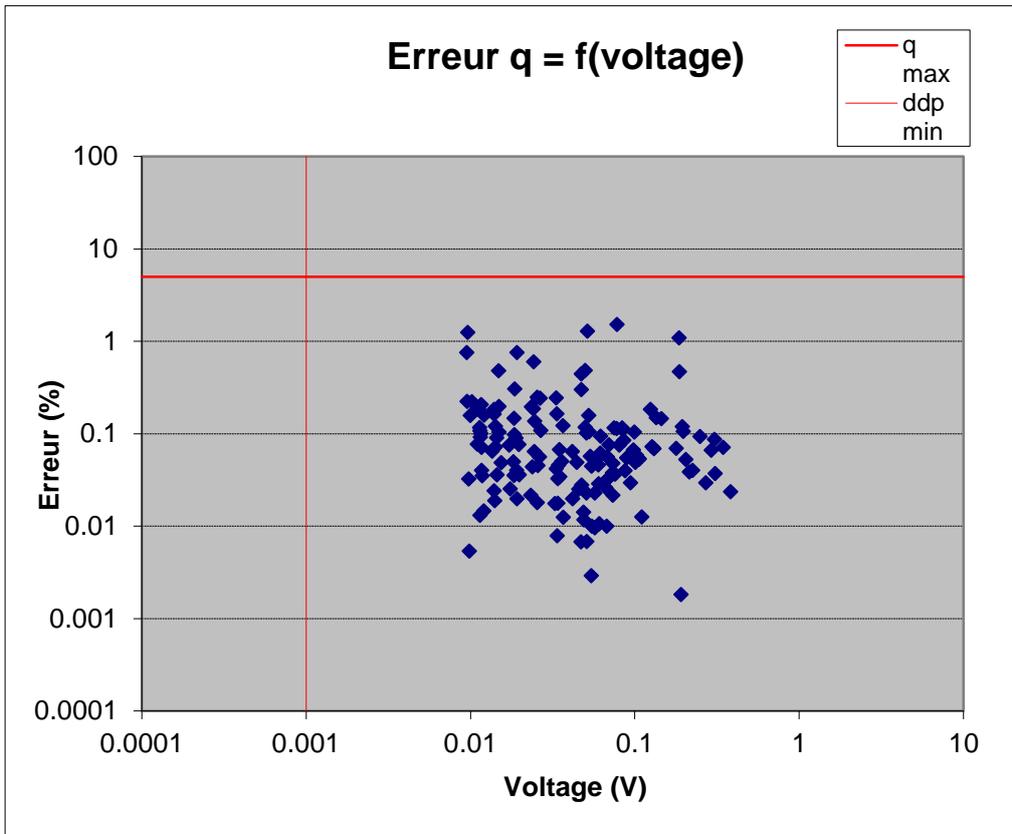
Profil AB2 PdP avant, avant filtrage



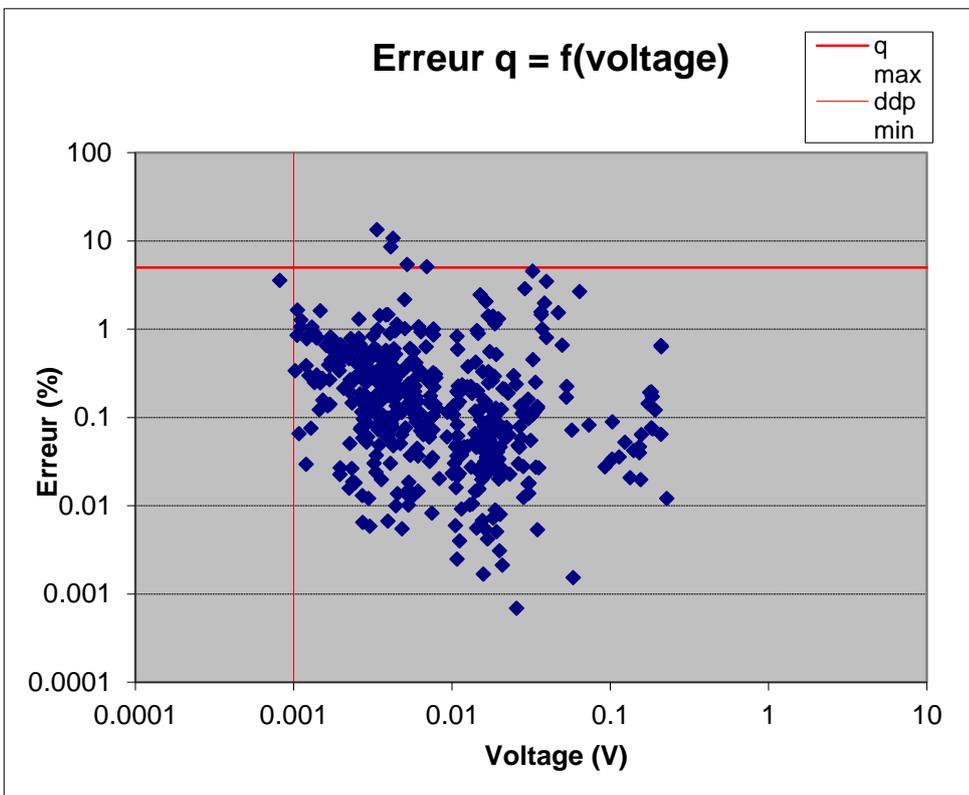
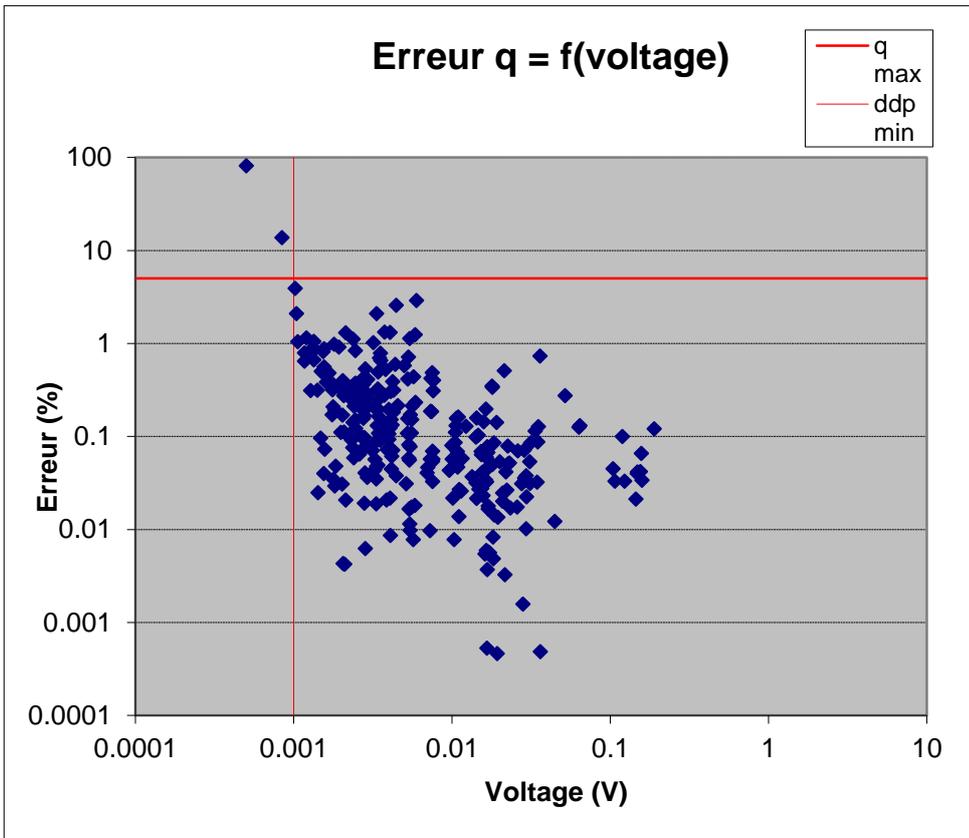
Profil AB2 PdP arrière, avant filtrage



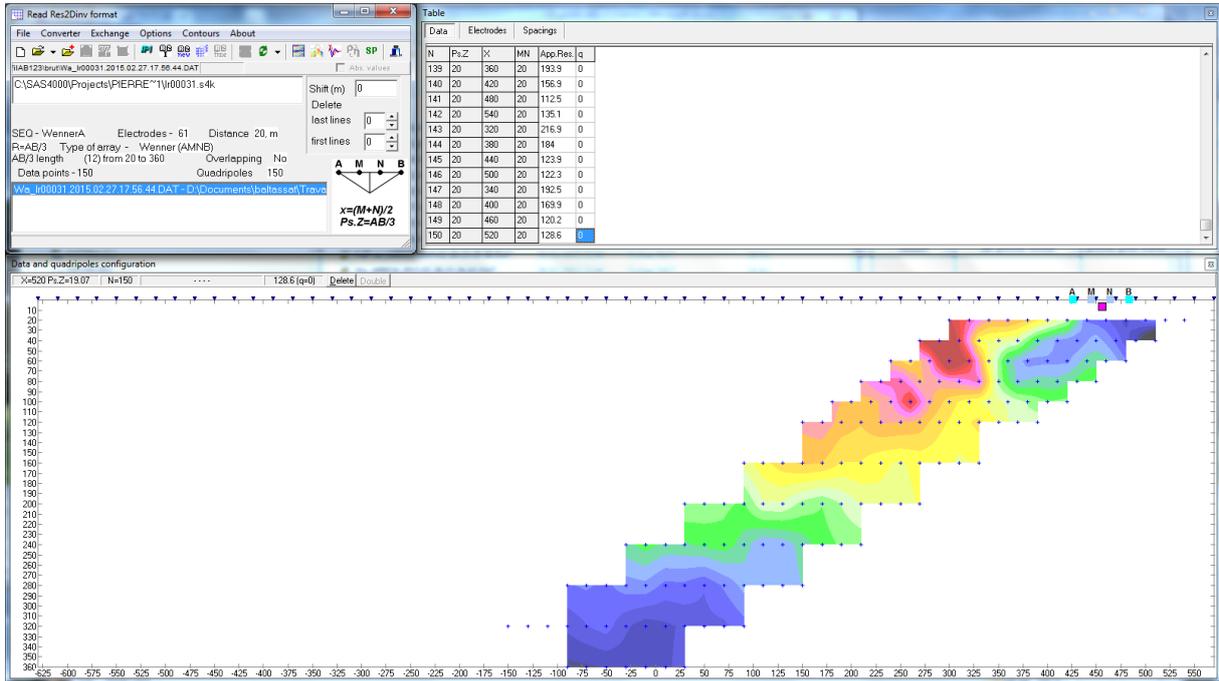
Profil AB1, Wenner Alpha



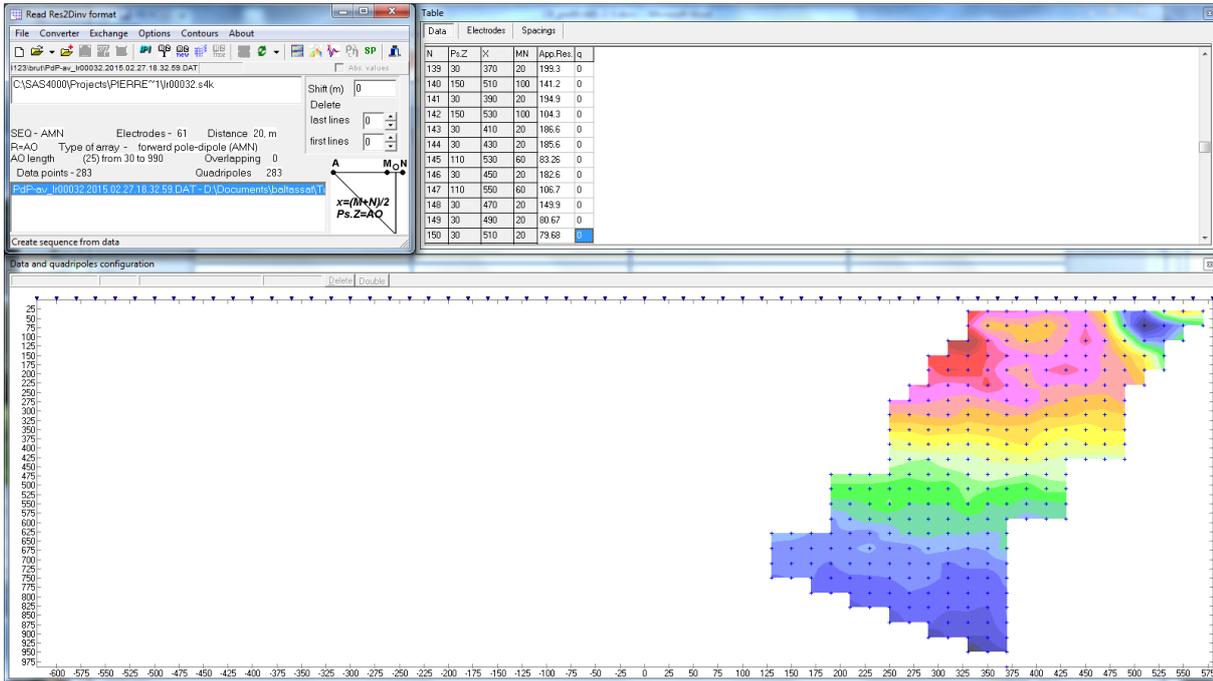
Profil AB3, PdP avant (en haut) et arrière (en bas)



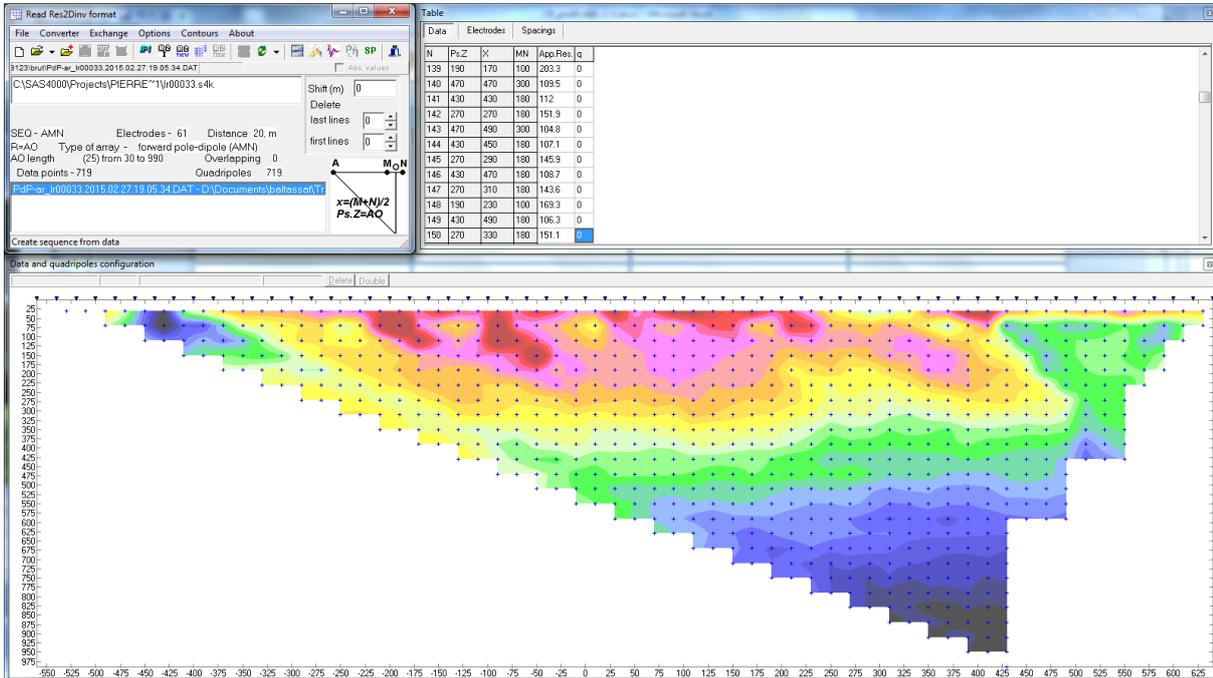
Profil AB3, Wenner alpha, avant filtrage



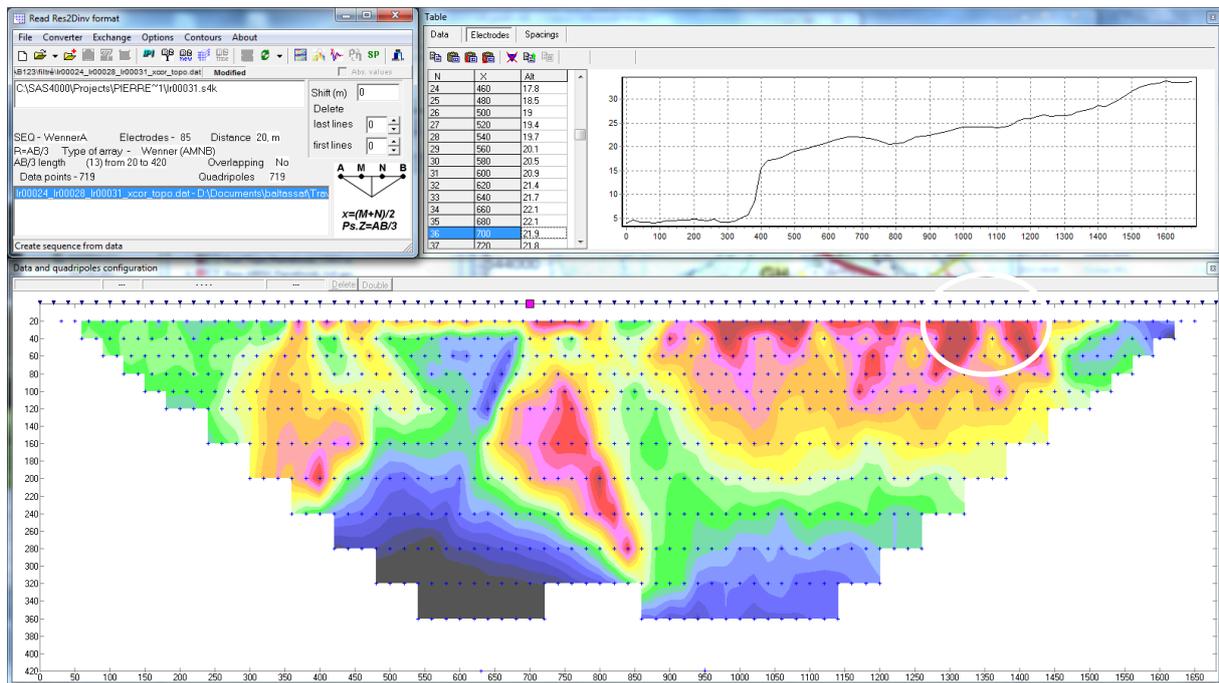
Profil AB3, PdP avant, avant filtrage



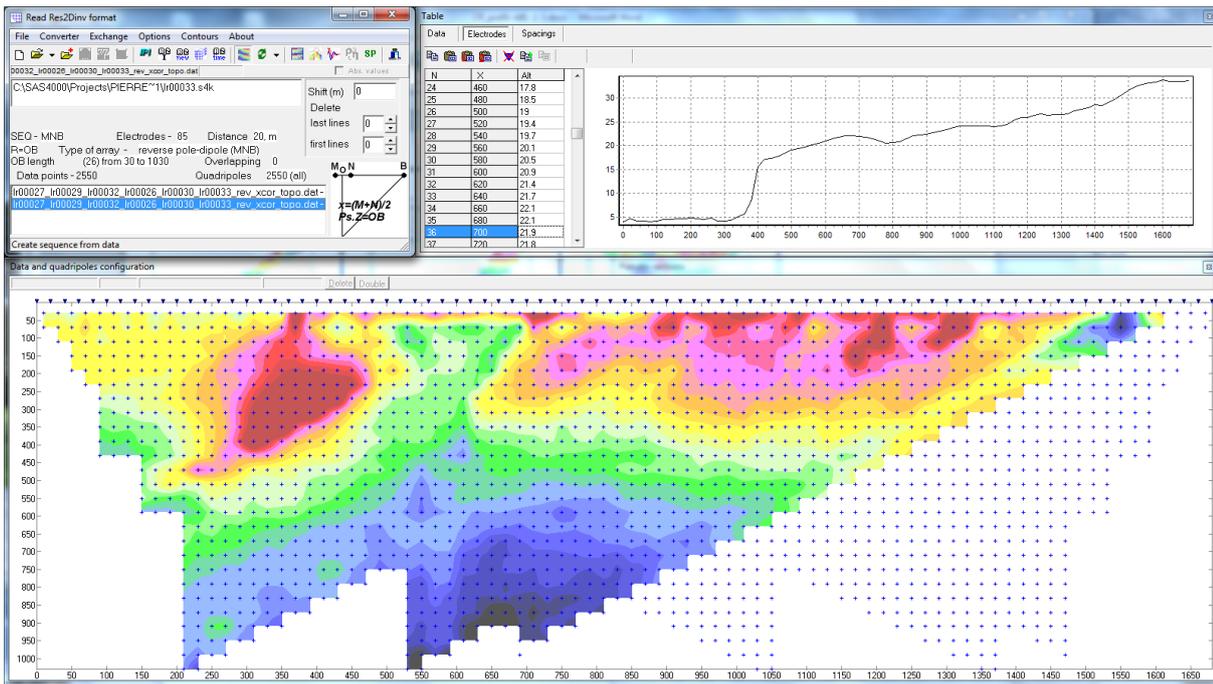
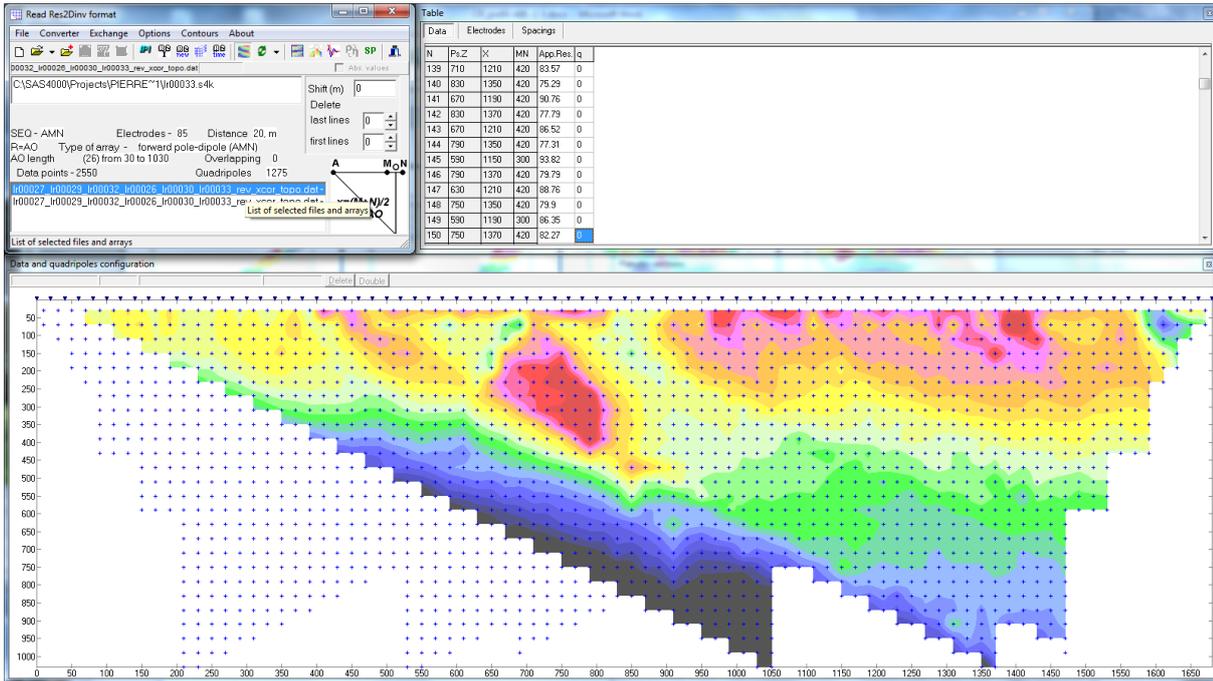
Profil AB3, PdP arrière, avant filtrage



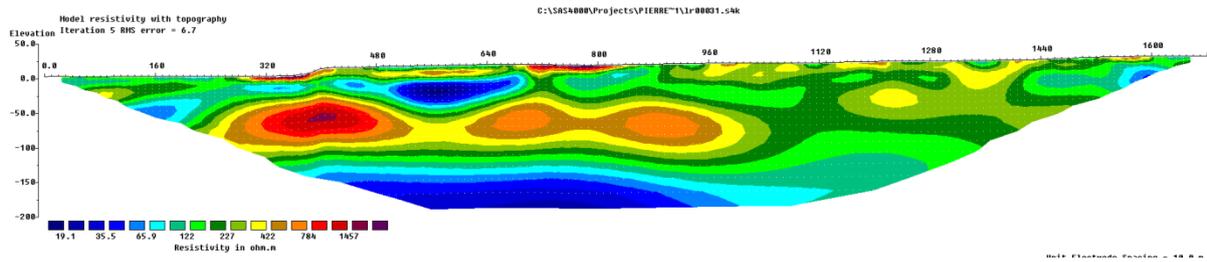
## Profil AB01-2-3 Wenner alpha, après filtrage



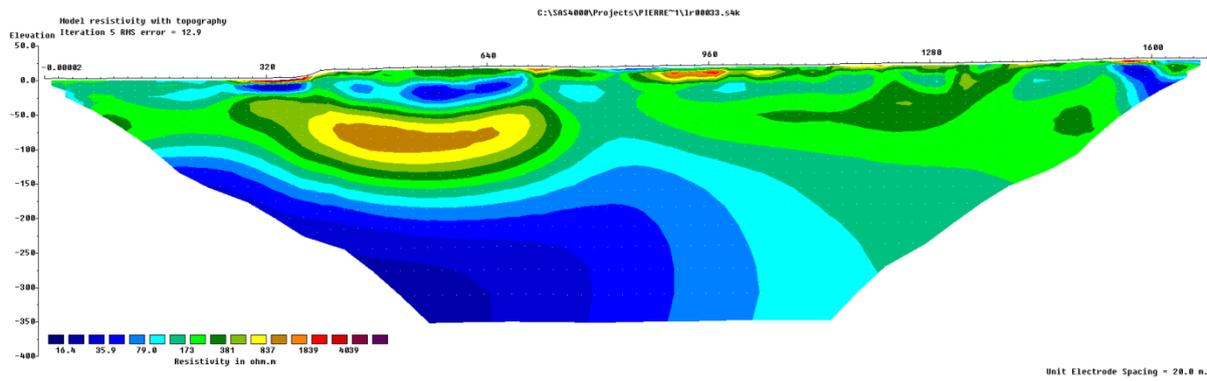
Profil AB01-2-3 PdP, après filtrage,



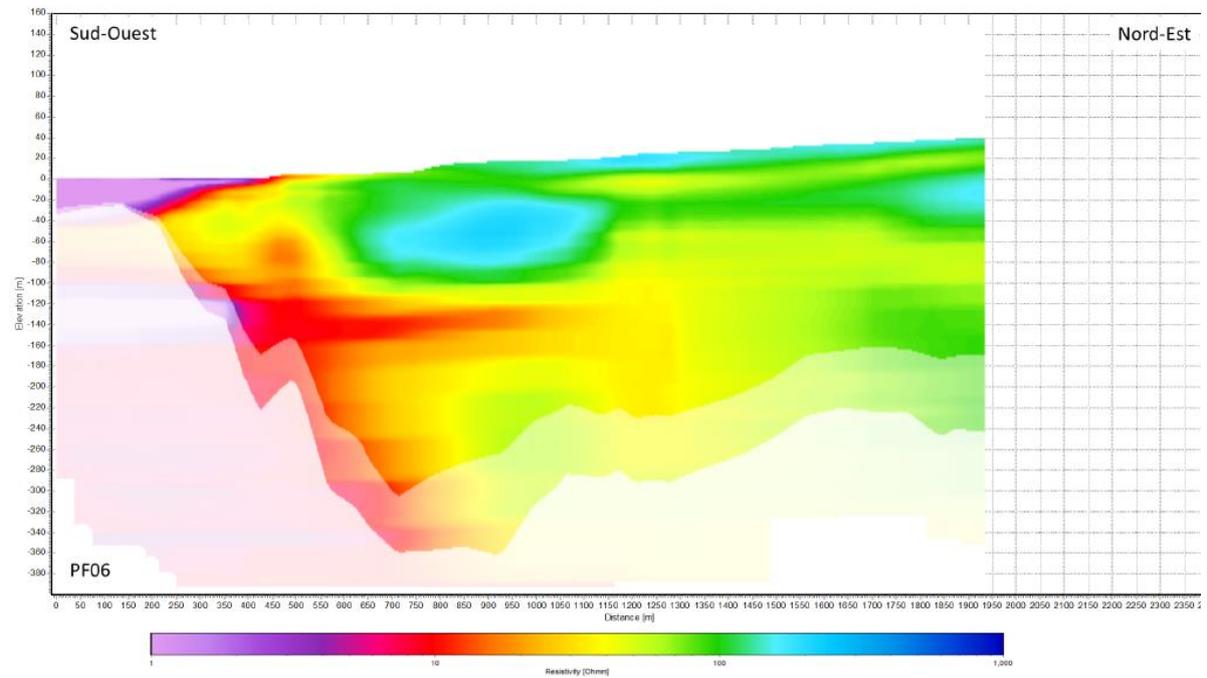
Profil AB01-2-3 Wenner, inversion préliminaire



Profil AB01-2-3 PdP, inversion préliminaire



Profil TEM correspondant



## Localisation



## **Annexe 3**

# **Compte-rendu d'analyse qualité du profil AB4**



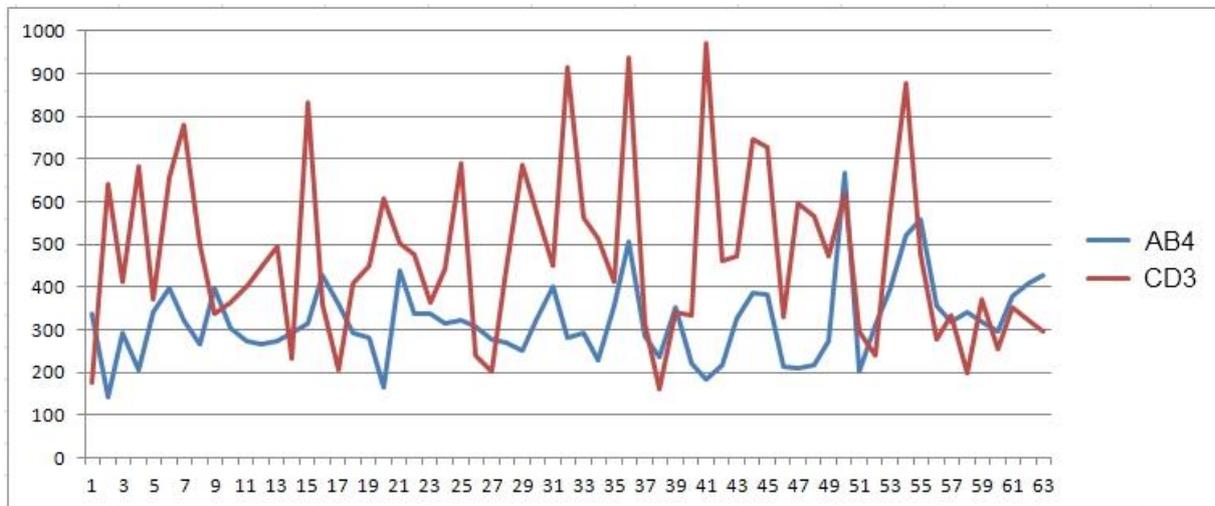
L'ensemble des données pole-dipole (PdP) et Wenner du profil AB4 avec sa localisation a été réceptionnée le 02/03/2015 (envoi le 01/03/2015).

L'implantation du profil est conforme aux prévisions (cf. carte en fin de document).

L'électrode à l'infini est à au moins 4900 m de AB4.

La qualité des mesures PdP est très bonne avec quasiment la totalité des mesures dont le facteur qualité,  $q$  est inférieur à 5 et dont le signal est supérieur à 1 mV. Aucun artefact « courte longue d'onde » n'est observé sur les panneaux de résistivité apparente. Cela est attribué à de meilleures conditions d'injection que précédemment avec des résistances de prise autour de 300 Ohm contre 600 sur CD3 (cf. figure ci-dessous préparée par STRATAGEM974).

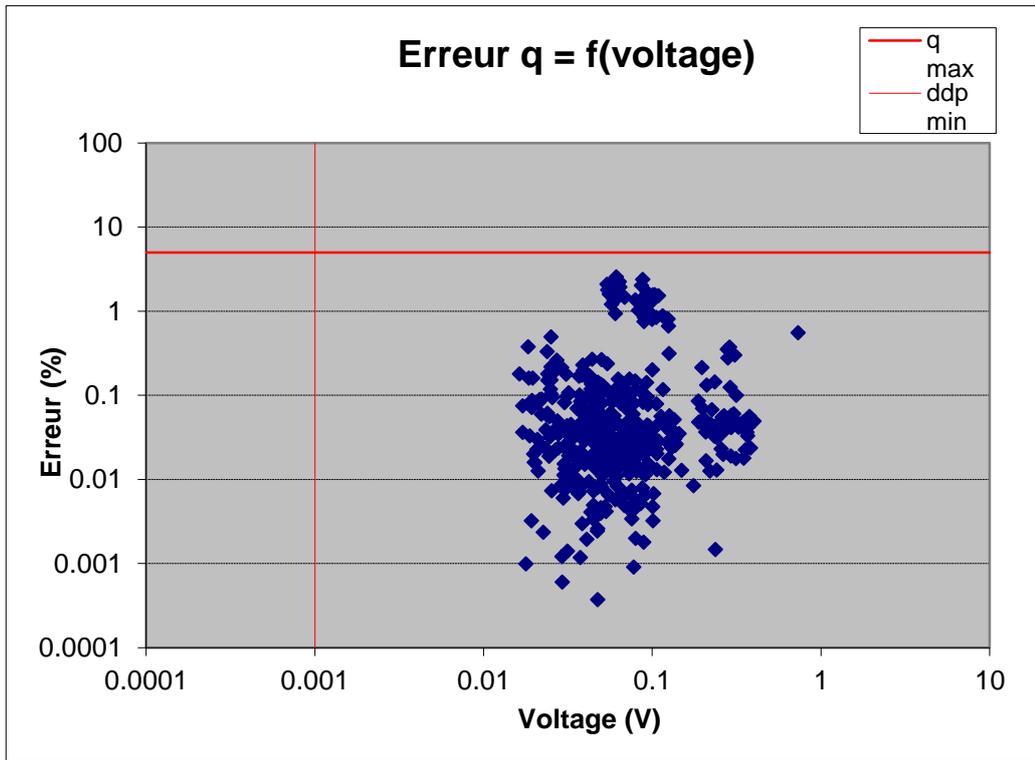
100% des mesures sont conservées pour l'inversion (472/472 pour le Wenner alpha et 796+796 /1592 pour le PdP). Les sections filtrées ne sont donc pas présentées ci-dessous.



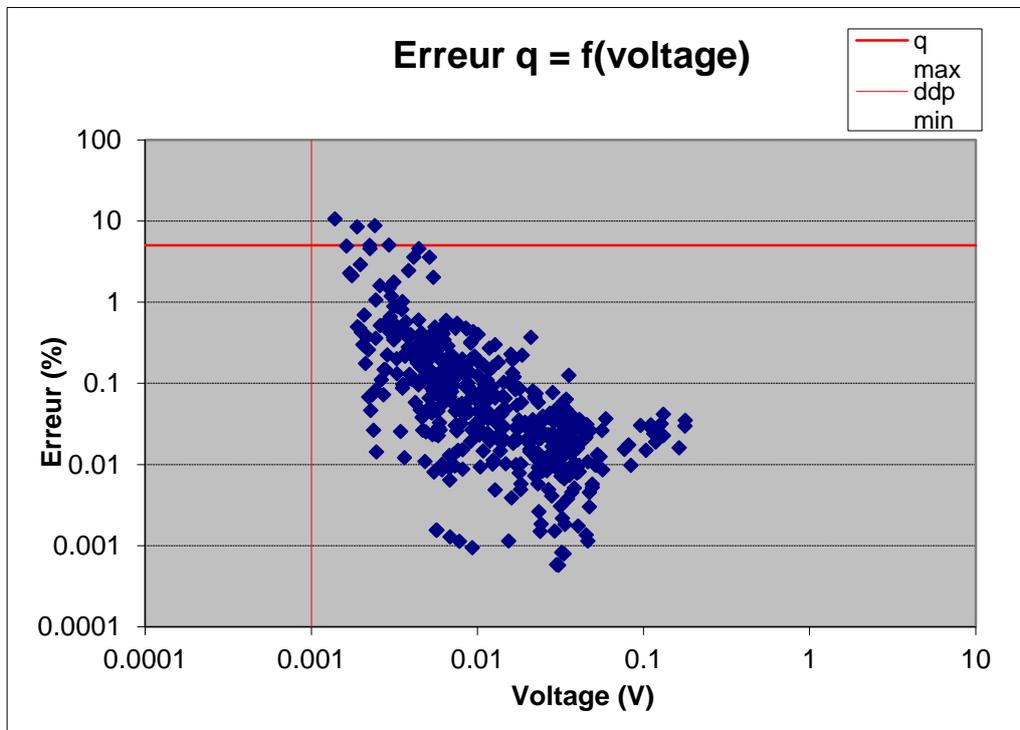
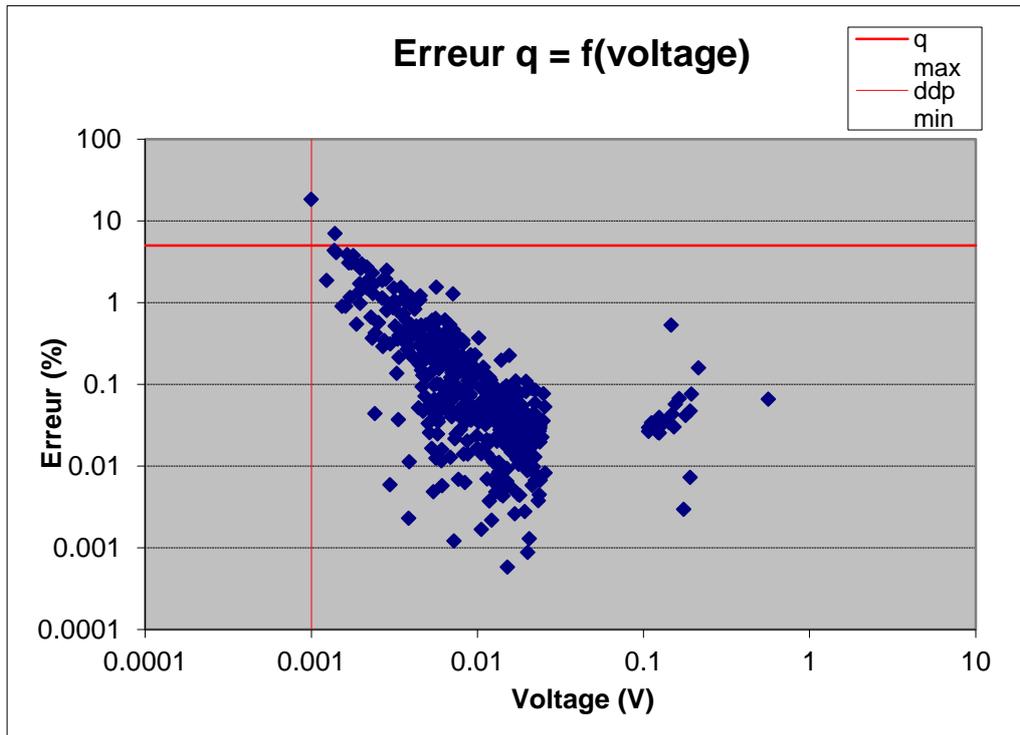
Les résultats préliminaires d'inversion montrent des coefficients d'ajustement et des résultats très raisonnables. Il n'y a pas de profil TEM Reun-EM disponible pour comparaison.

**L'acquisition de la tomographie AB4 est validée.**

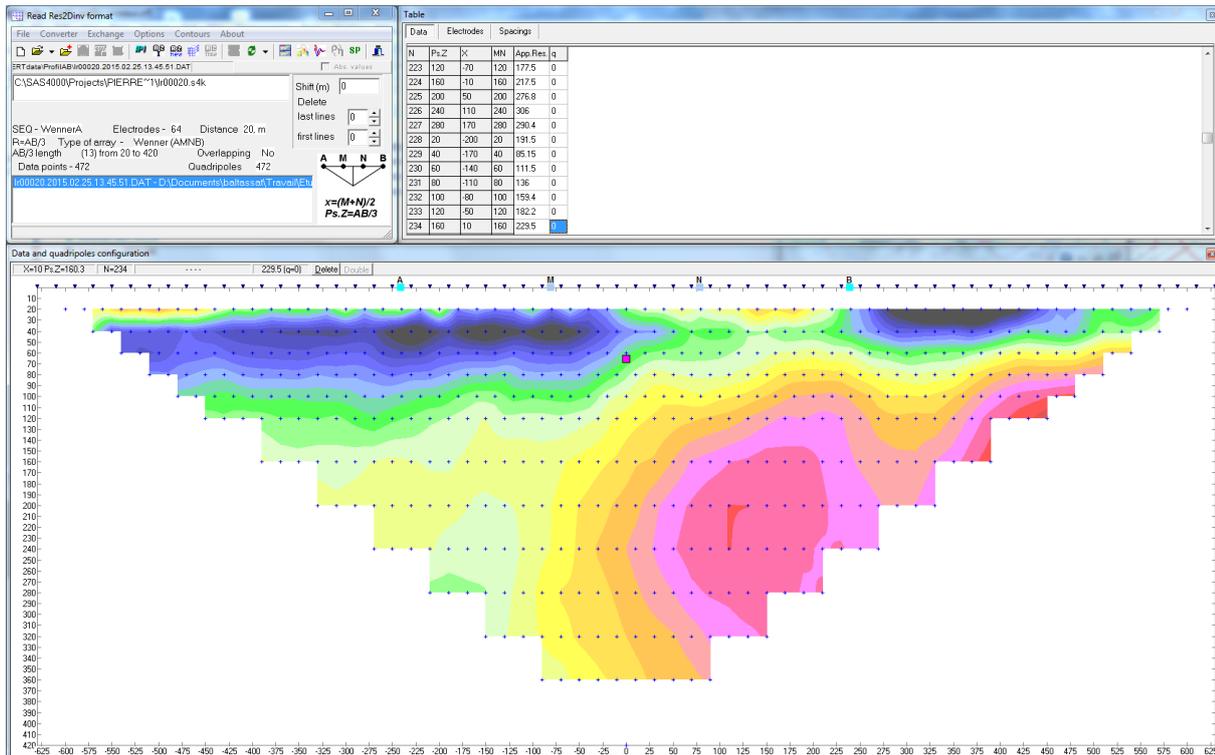
AB4 Wenner Alpha



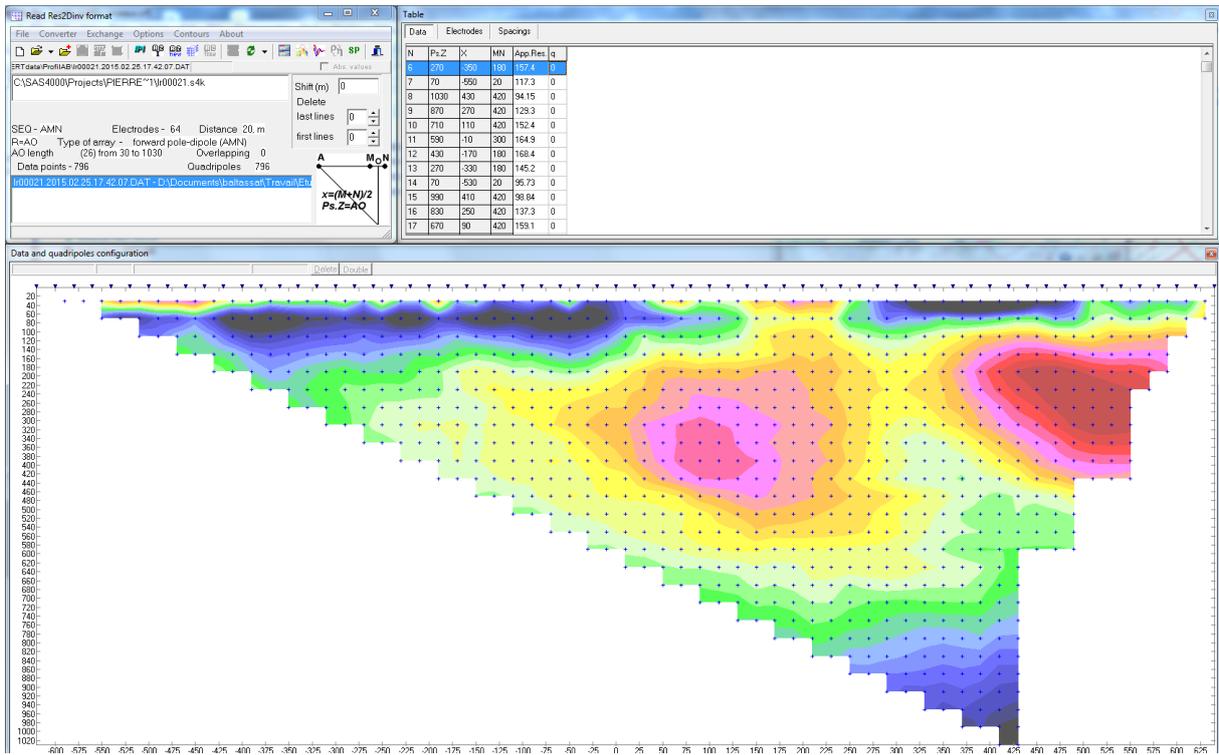
AB4 PdP avant (en haut) et arrière (en bas)



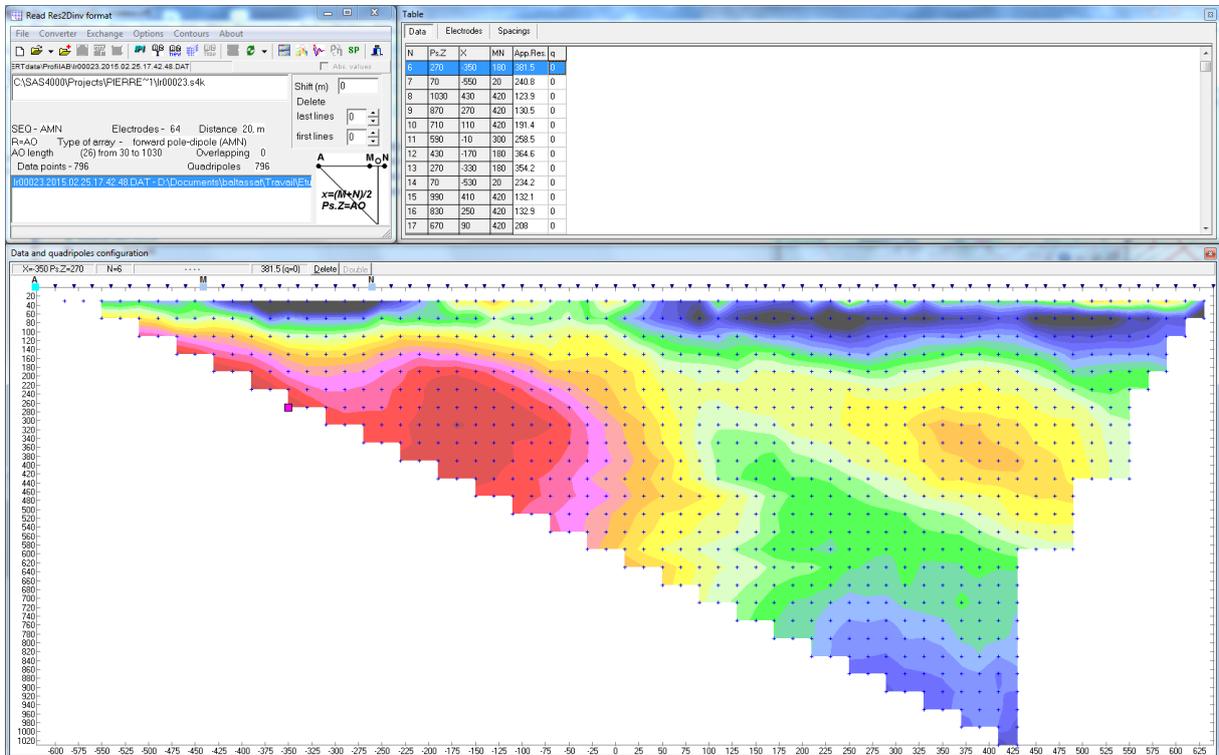
Profil AB4 Wenner Alpha avant filtrage (zone anomaliqne cernée en blanc).



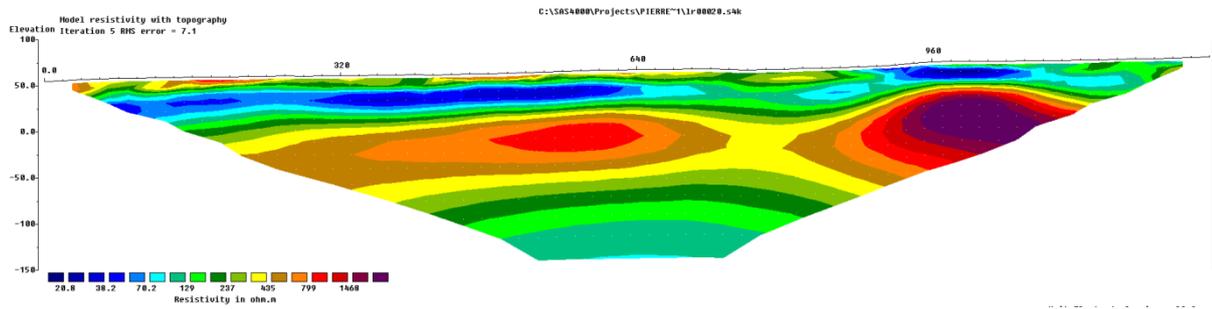
Profil AB4 PdP avant, avant filtrage



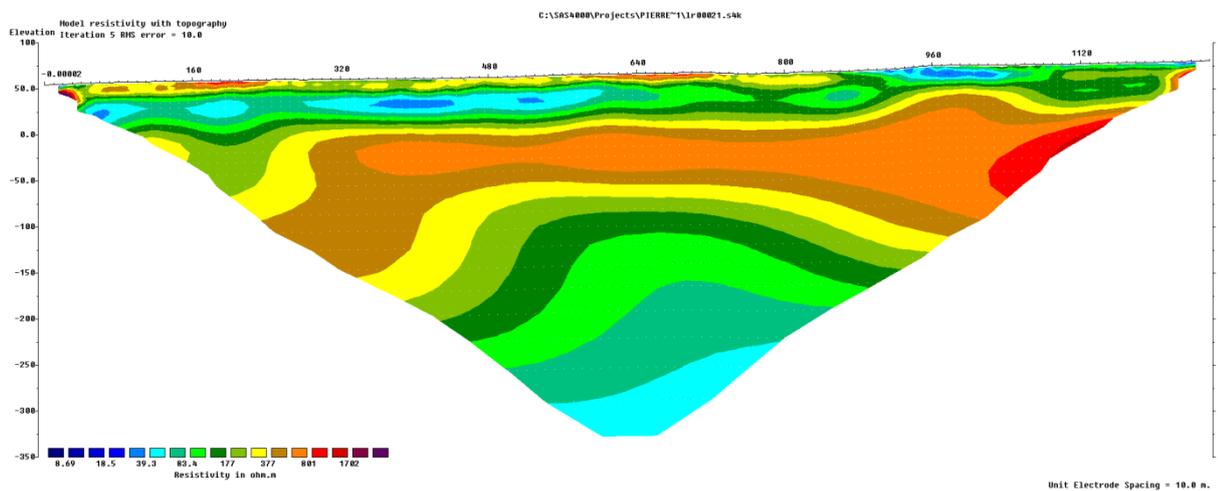
Profil AB4 PdP arrière, avant filtrage



### Profil AB4 Wenner, inversion préliminaire



### Profil AB4 Pole-dipole, inversion préliminaire



Localisation





## **Annexe 4**

### **Compte-rendu d'analyse qualité du profil CD1-2**



L'ensemble des données pole-dipole (PdP) et Wenner du profil CD (premier segment =CD1) et CD2 avec leur localisation a été réceptionnée le 24/02/2015 (envoi le 23/02/2015 au soir, envois partiels antérieurs).

L'implantation du profil est conforme aux prévisions (cf. carte en fin de document).

L'électrode à l'infini est à au moins 4300 m de CD1-2.

Une importante anomalie localisée et superficielle est observée au niveau des électrodes 15 à 18 (14 à 16 selon STRATAGEM974). Cette anomalie ne semble pas due à un défaut dans la ligne de mesure car la mesure a été répétée sans changement visible après démontage et remontage des câbles sans souci de leur position ni à un défaut de relais car après avoir inversé l'ordre de branchement des câbles sur le multiplexeur l'anomalie demeure au même endroit sur le profil. Considérant les conditions de surface (mur et surface goudronnée) il pourrait y avoir un effet de couplage interne au résistivimètre en conséquence de résistances de prises élevées (vérifier les résistances de prise et le voltage d'injection). A l'avenir nous recommandons d'éviter ces zones très résistantes en surface quitte à décaler latéralement le profil de mesure.

Quoiqu'il en soit cette anomalie n'a pas un impact important sur le résultat de ce profil où la profondeur d'investigation est encore réduite et où le conducteur cible n'est pas encore investigué. Nous recommandons toutefois un filtrage plus sévère de ces mesures anomaliques ou autrement considérer que cette partie de profil n'est pas exploitable (à discuter pour trouver la meilleure solution).

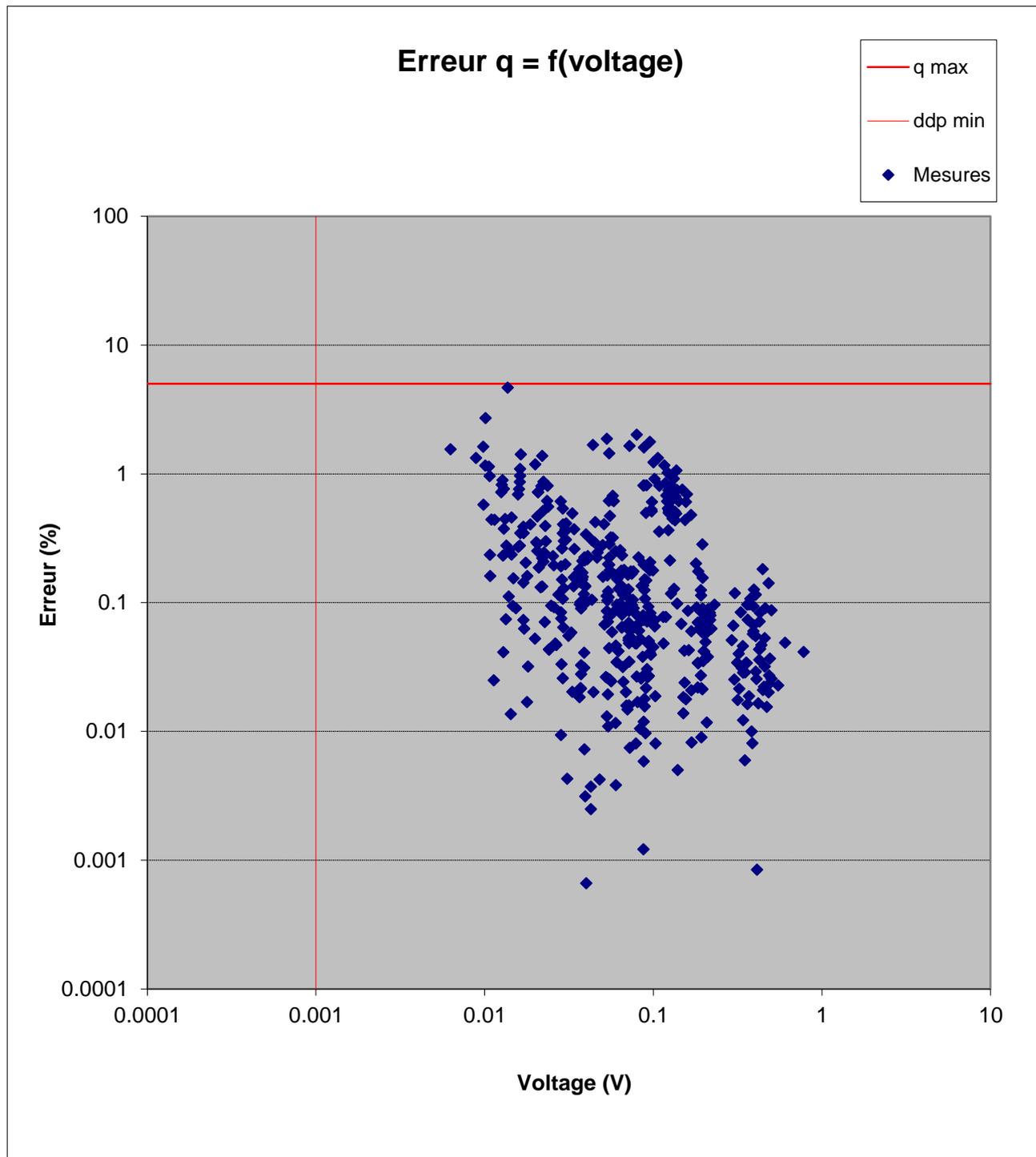
Globalement la qualité des mesures PdP est bonne avec peu de mesures dont le facteur qualité,  $q$  est supérieur à 5 et dont le signal est inférieur à 1 mV (quasi toutes les mesures avec signal  $>0.5$  mV). On observe une sensible amélioration de qualité sur le rollalong (CD2 toutes les mesures avec  $Q < 5$  et  $V > 1$  mV pour PdP arrière).

Des artefact « courte longue d'onde » parsème les panneaux de résistivité apparente. Ces artefacts isolés pourraient être facilement enlevés par édition manuelle.

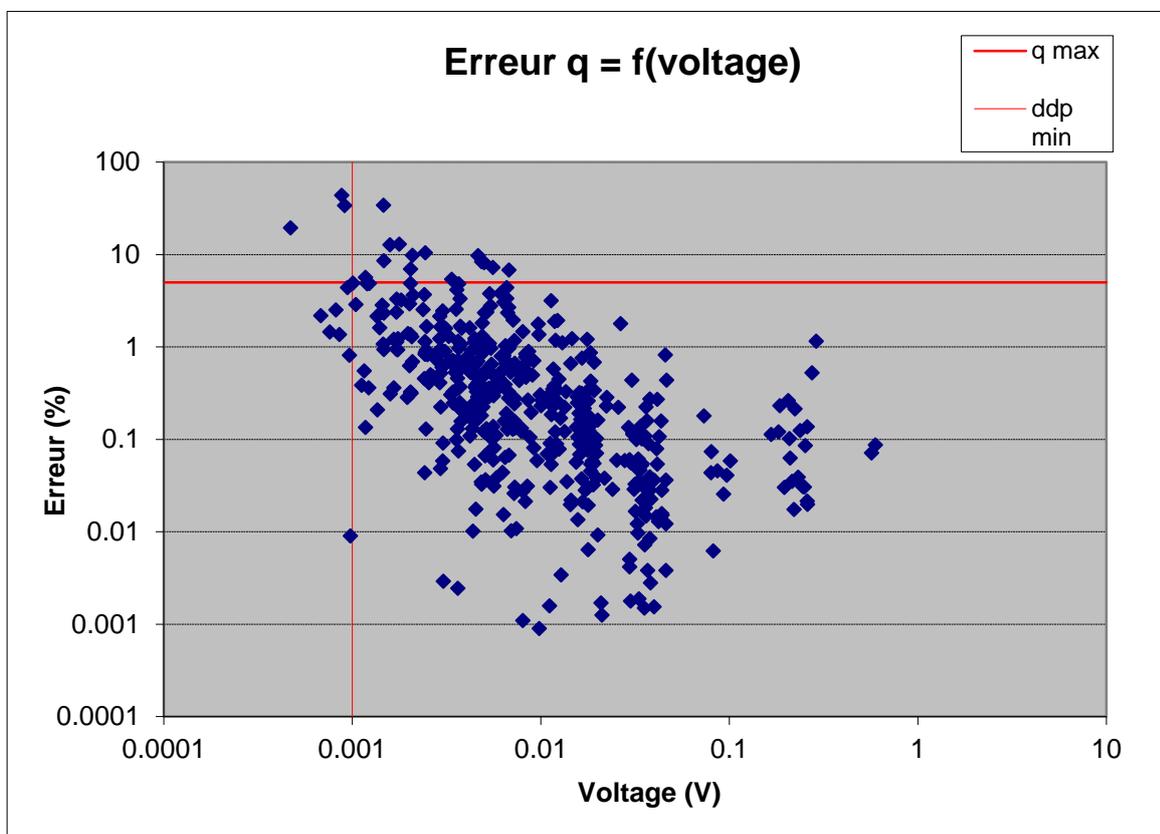
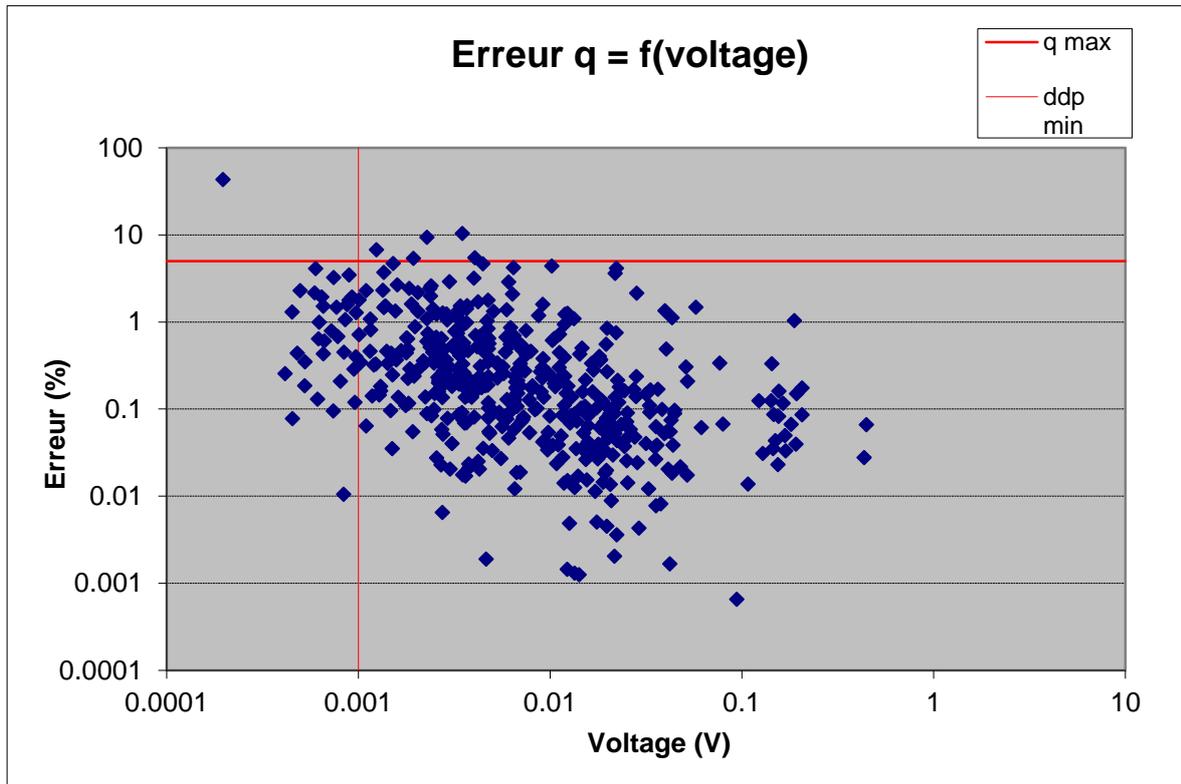
Les résultats préliminaires d'inversion montrent un conducteur profond en cohérence avec les cibles recherchées.

**L'acquisition des tomographies CD1-2 est validée.**

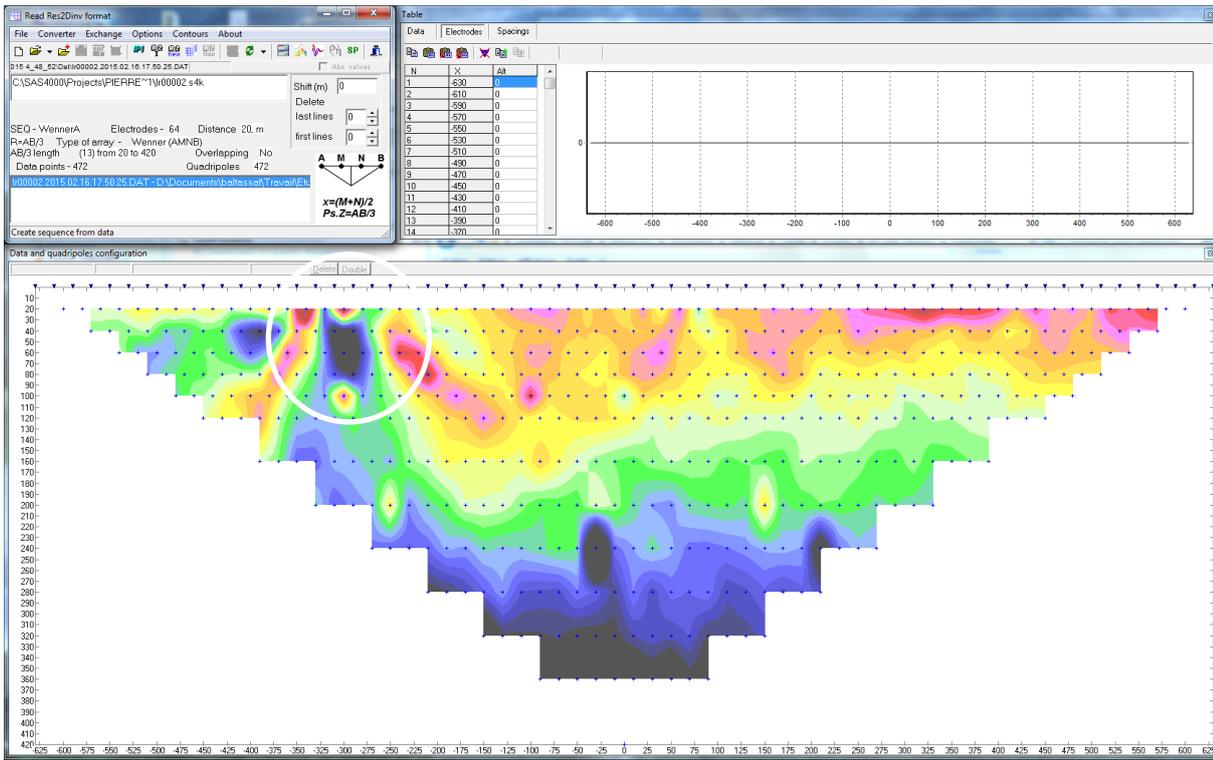
CD1 Wenner Alpha



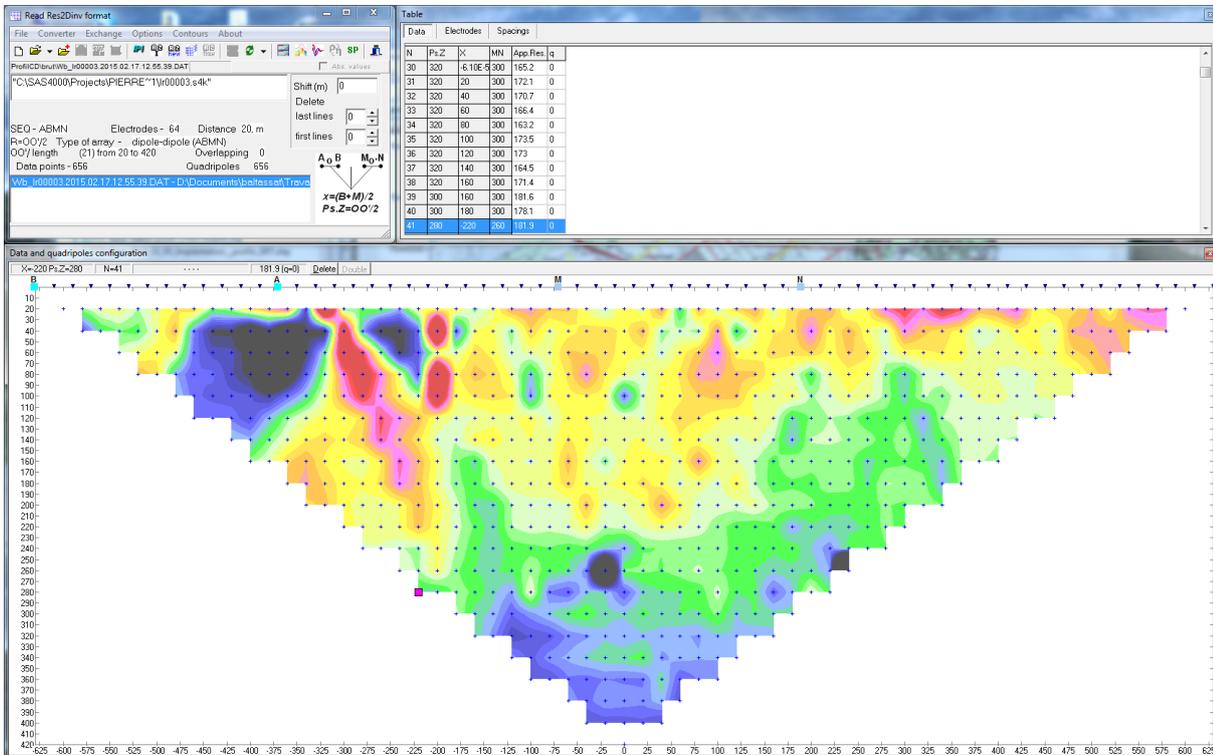
CD1 PdP avant (en haut) et arrière (en bas)



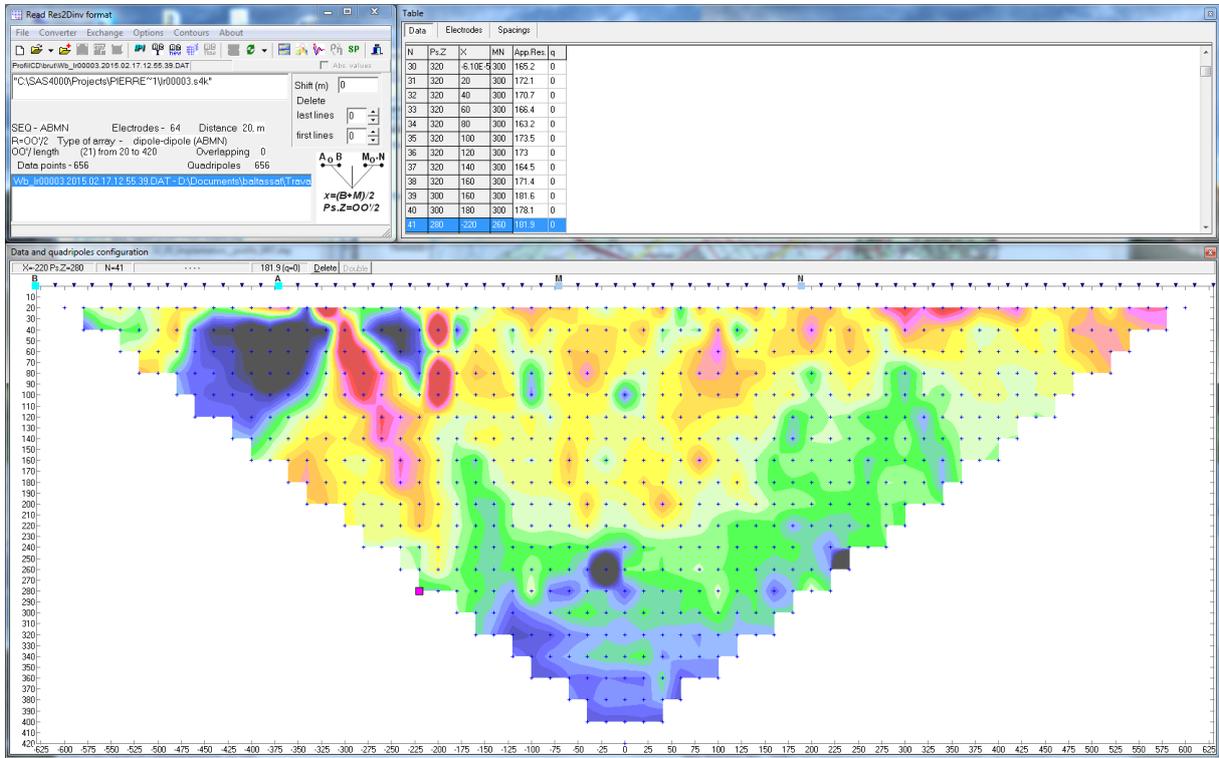
Profil CD1 Wenner Alpha avant filtrage (zone anormale cernée en blanc).



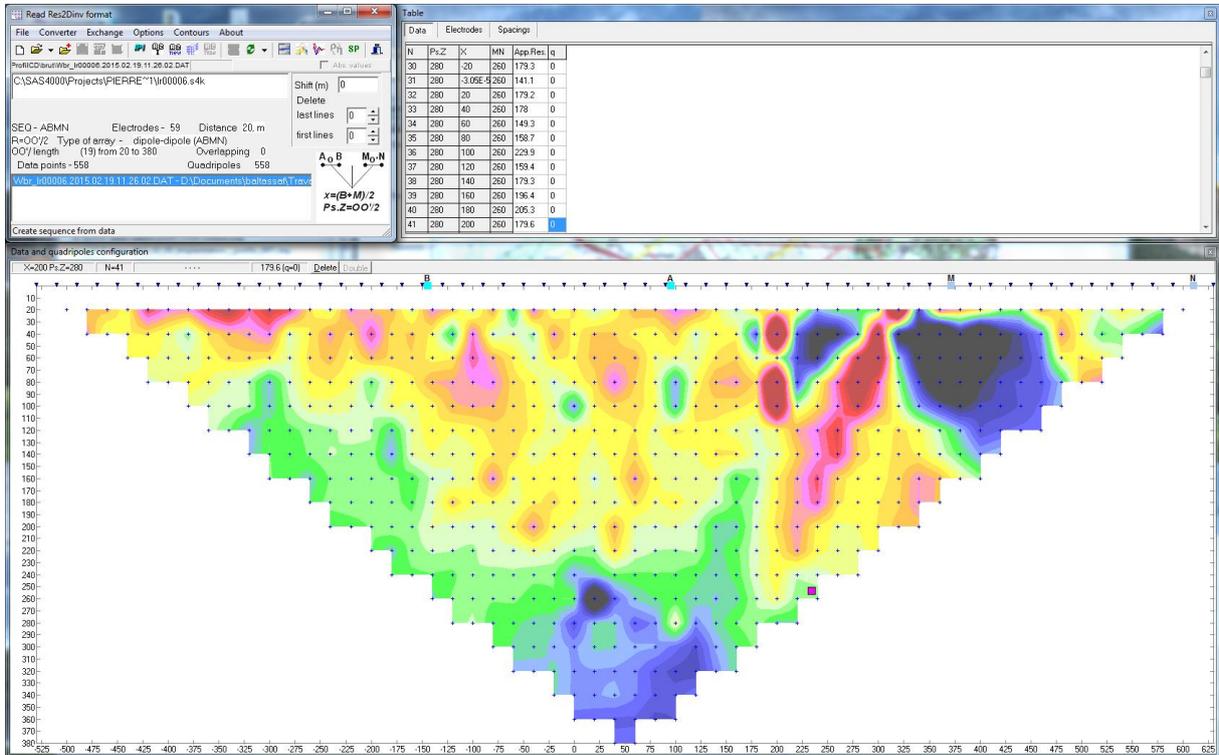
Profil CD1 Wenner beta avant filtrage



Profil CD1 Wenner beta répété, avant filtrage

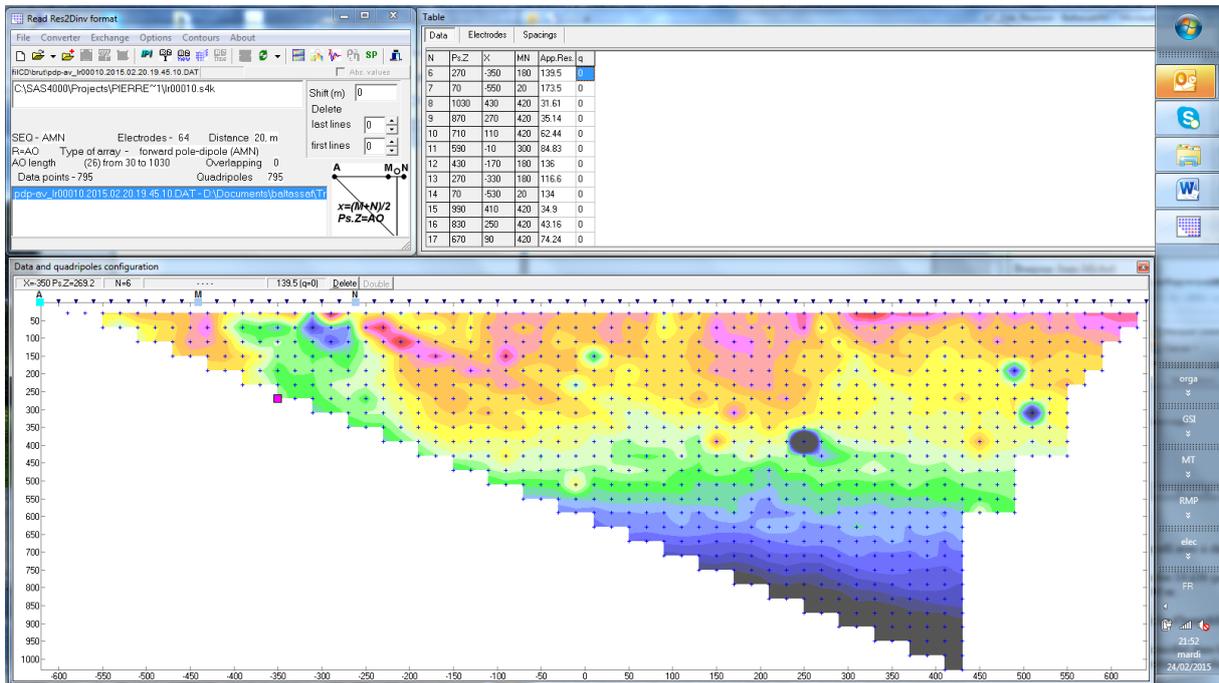


Profil CD1 Wenner beta inverse, avant filtrage

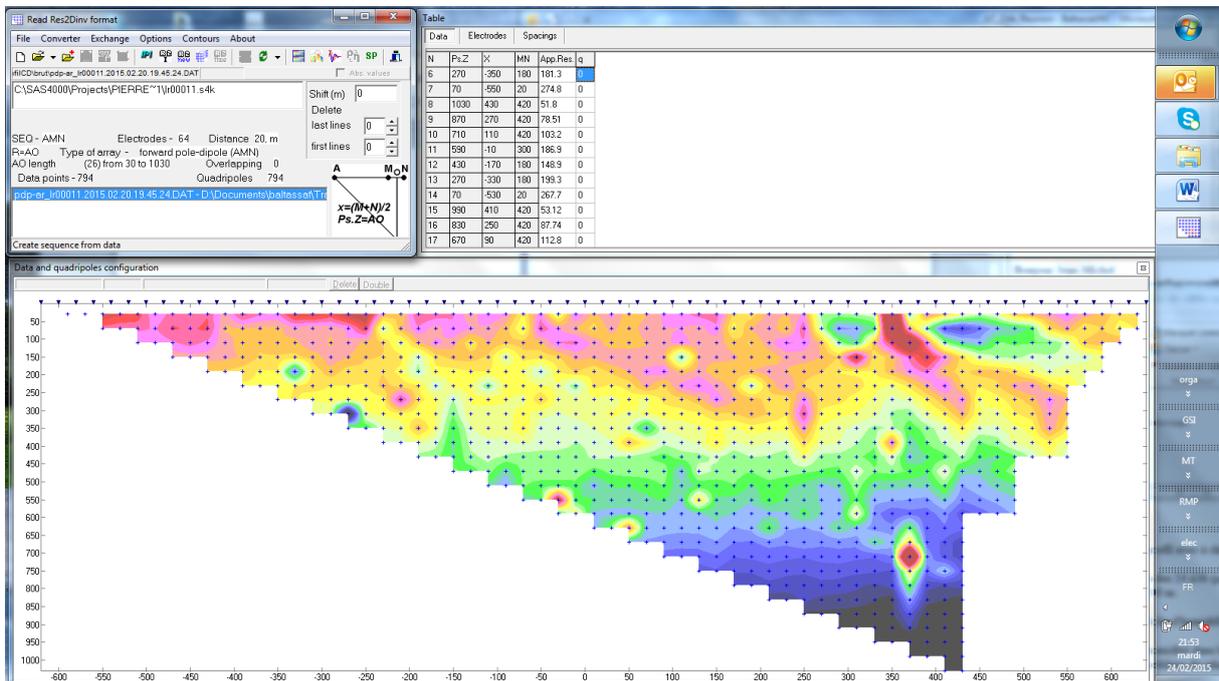




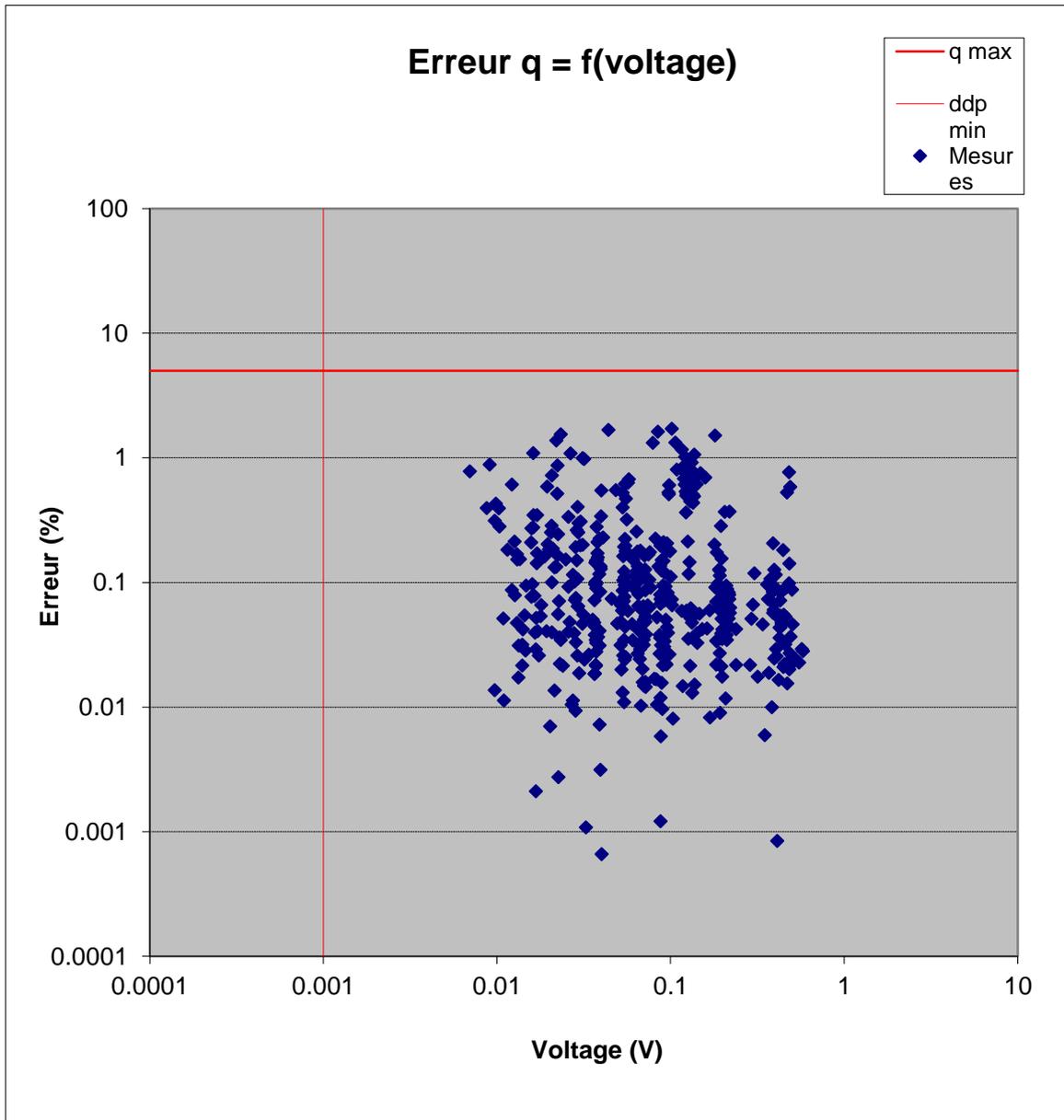
Profil CD1 PdP avant, avant filtrage



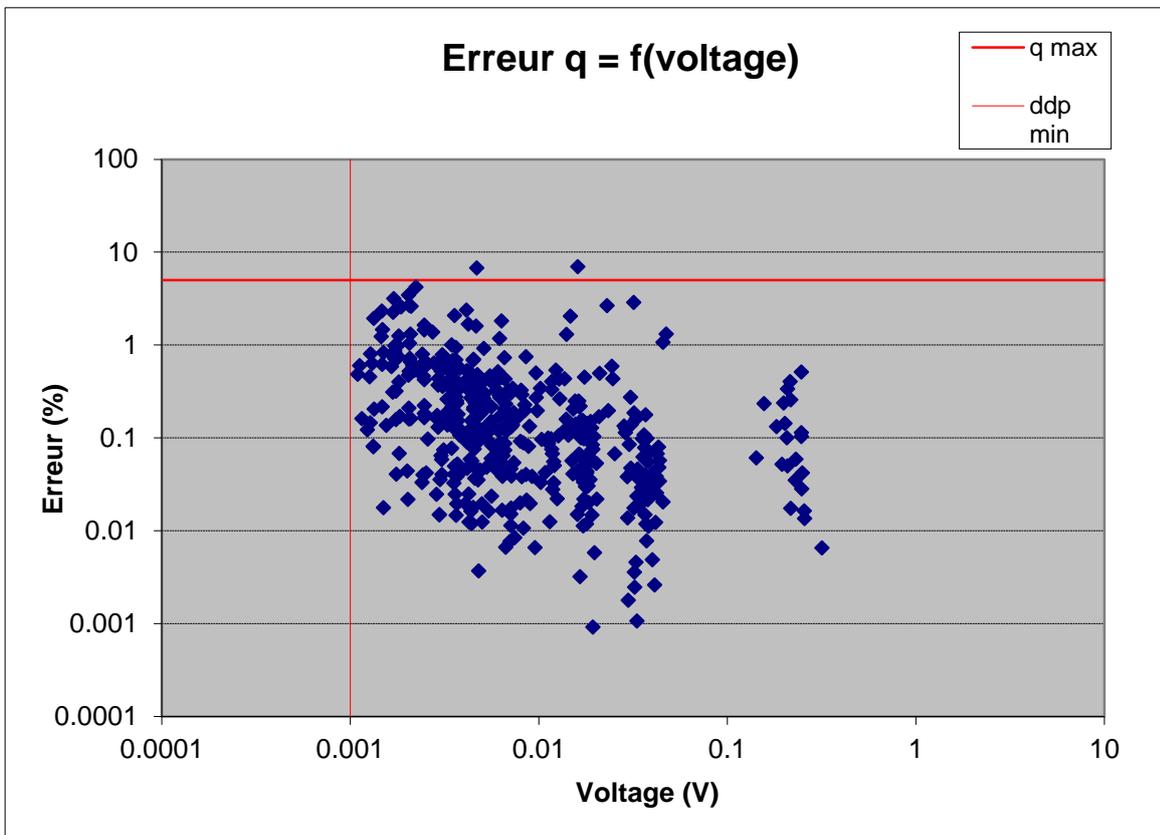
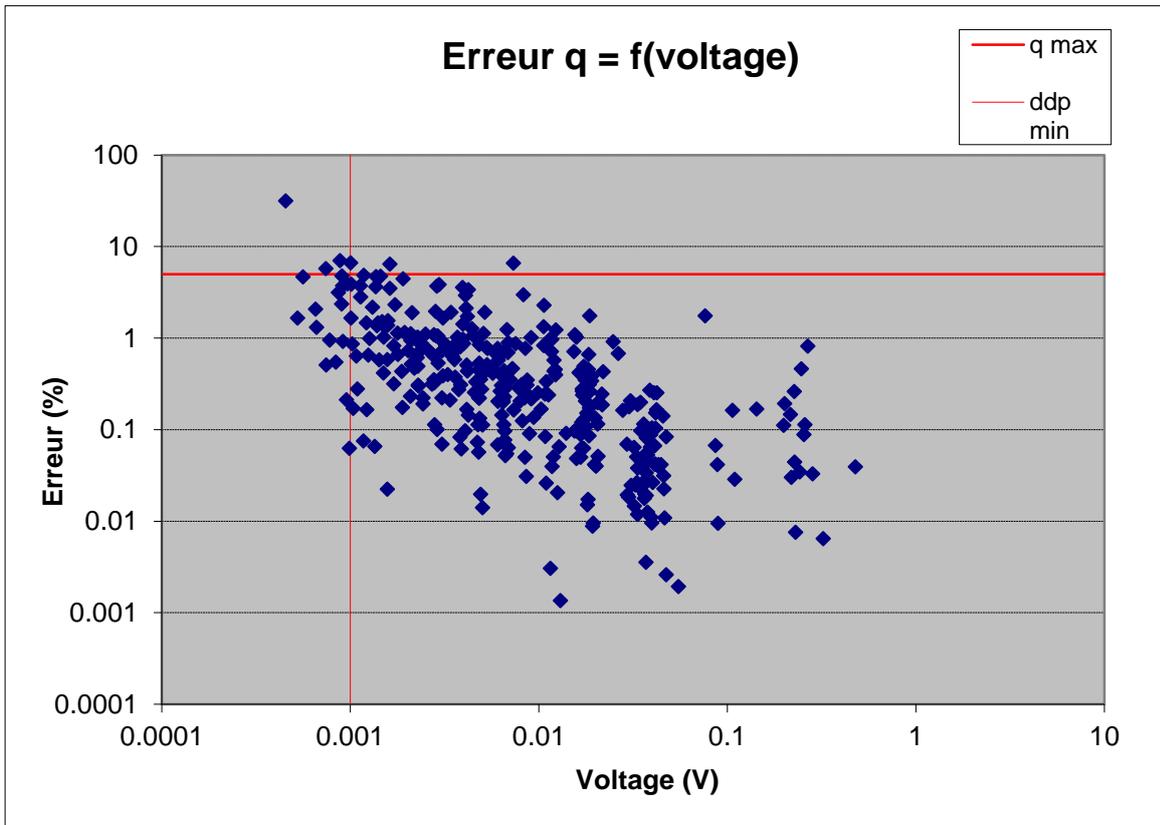
Profil CD1 PdP arrière, avant filtrage



CD2 Wenner alpha

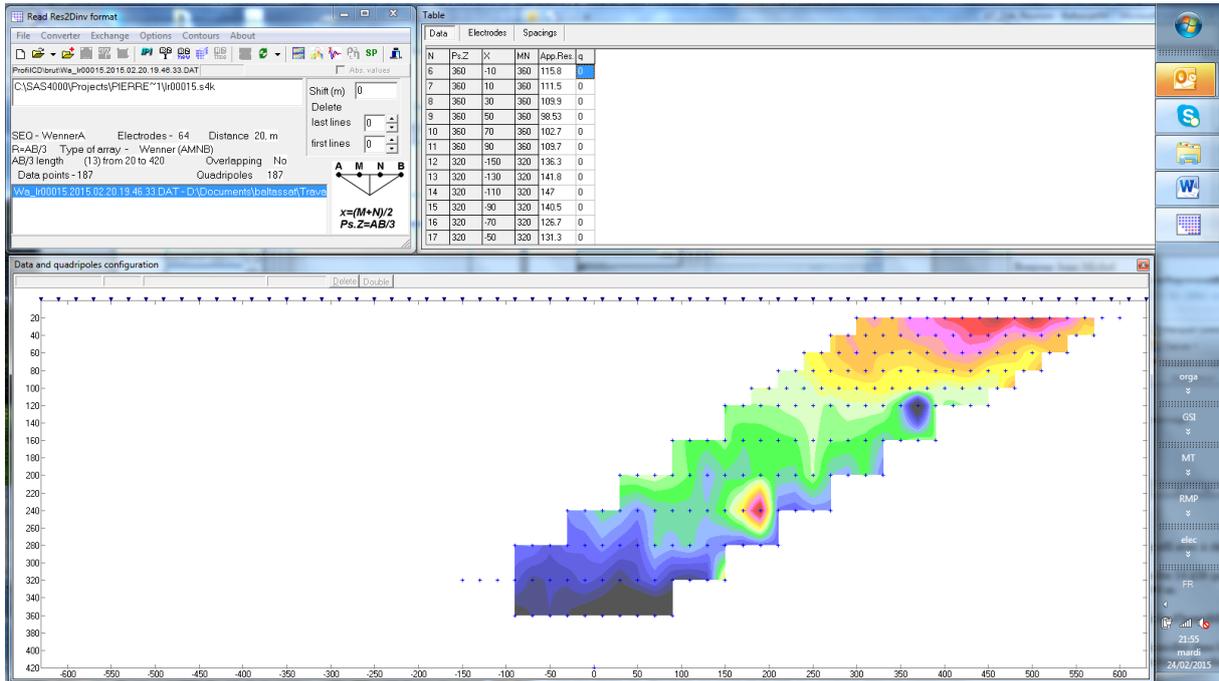


CD2 PdP avant (en haut), arrière (en bas)

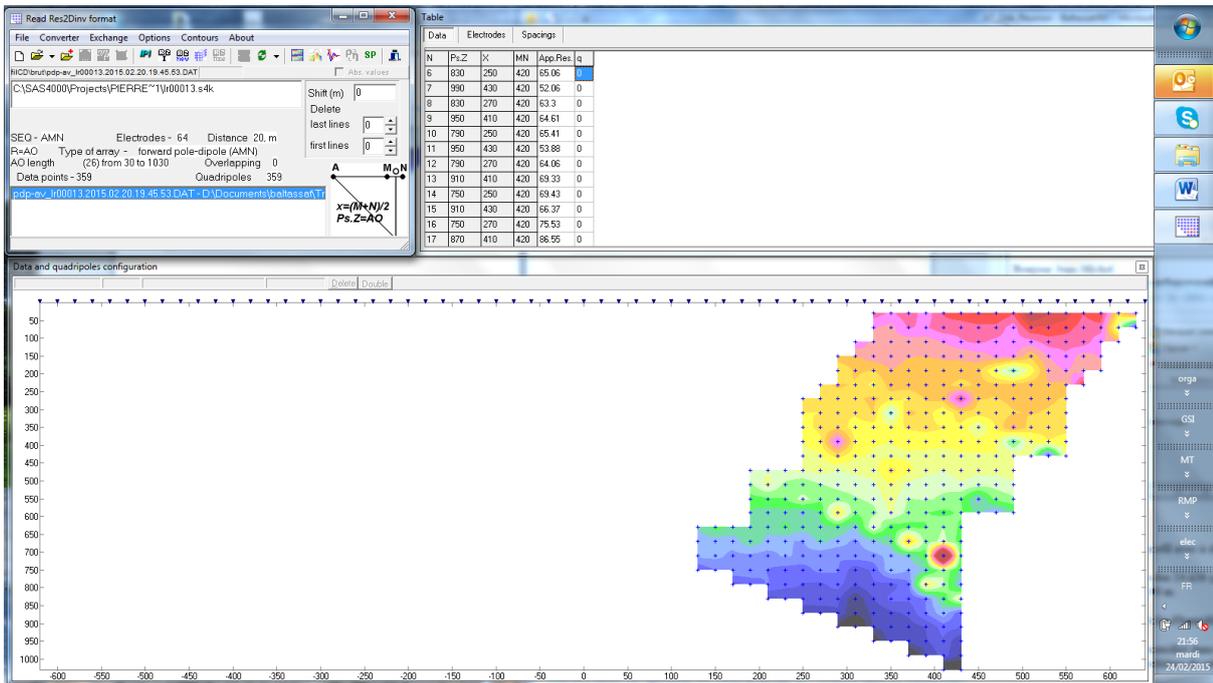




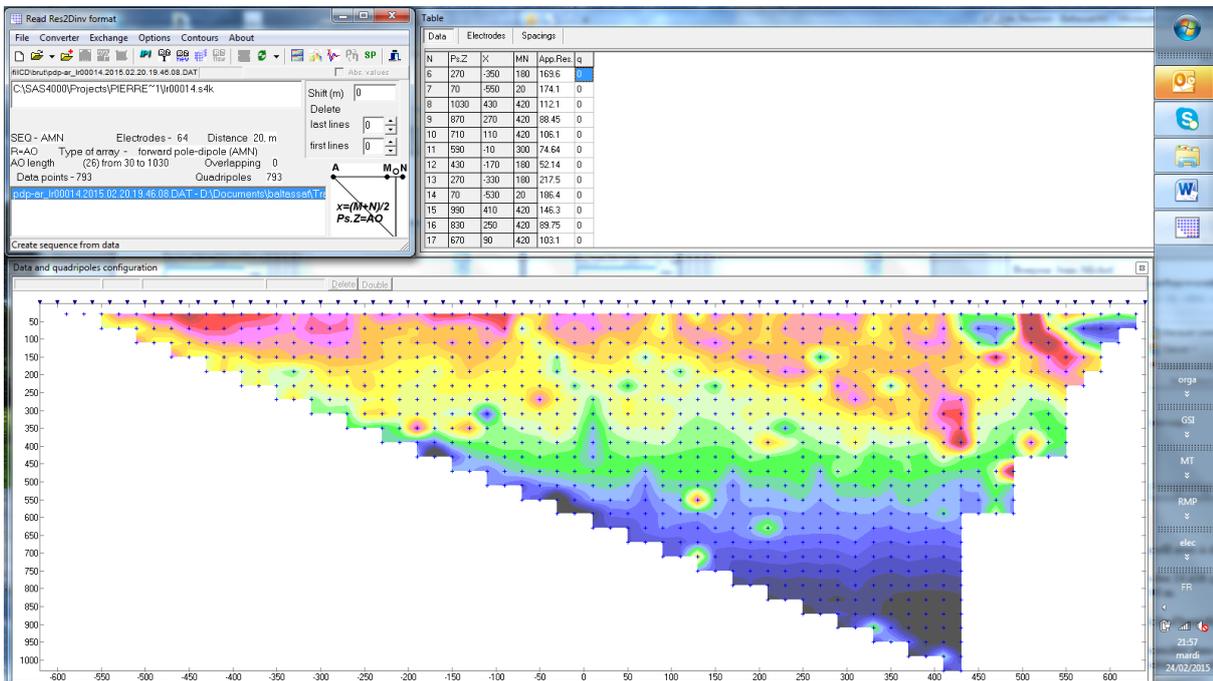
Profil CD2 Wenner alpha, avant filtrage



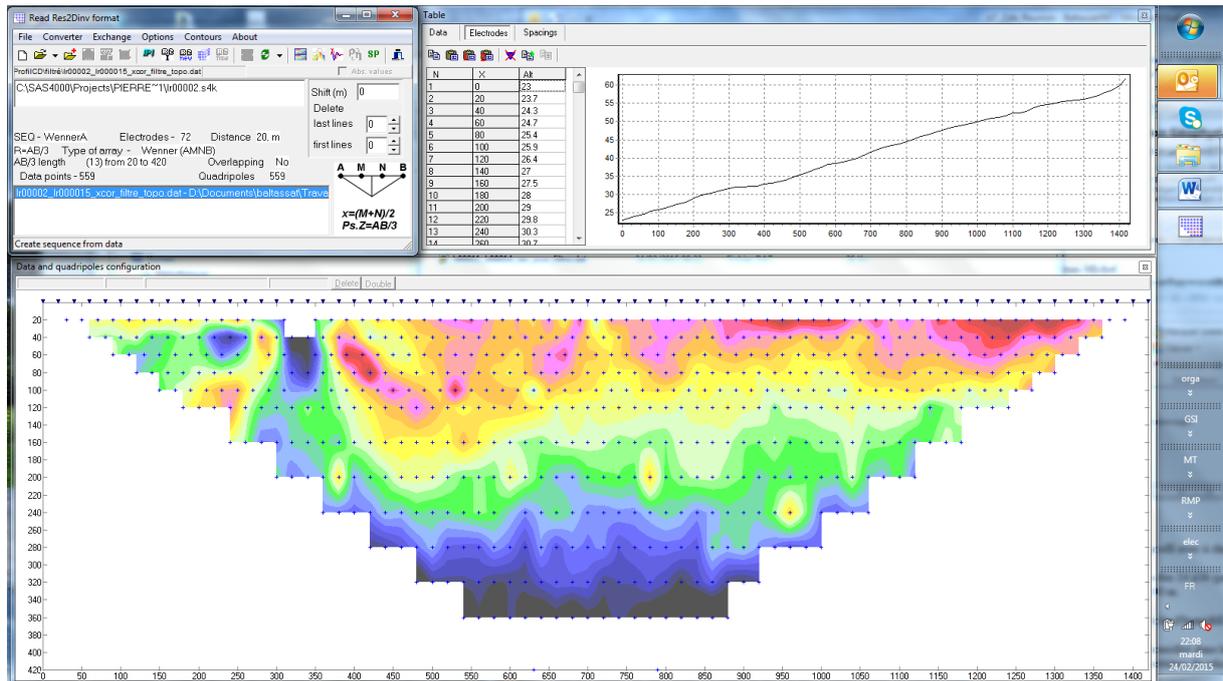
Profil CD2 PdP avant, avant filtrage



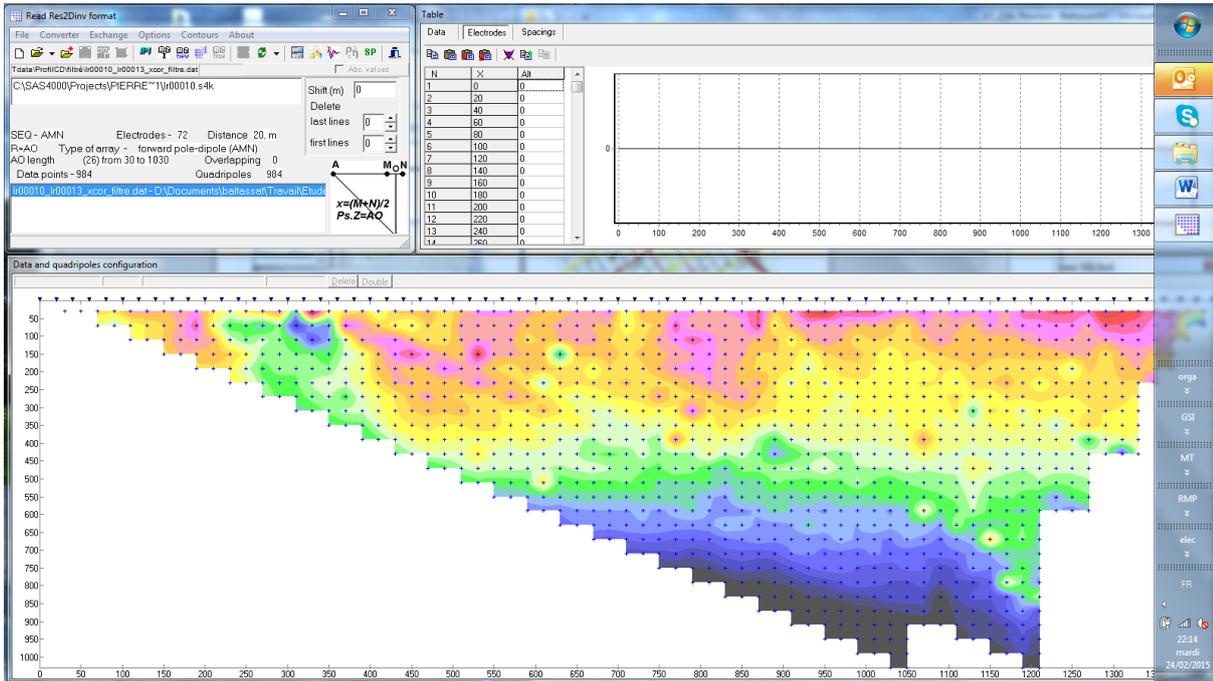
Profil CD2 PdP arrière, avant filtrage



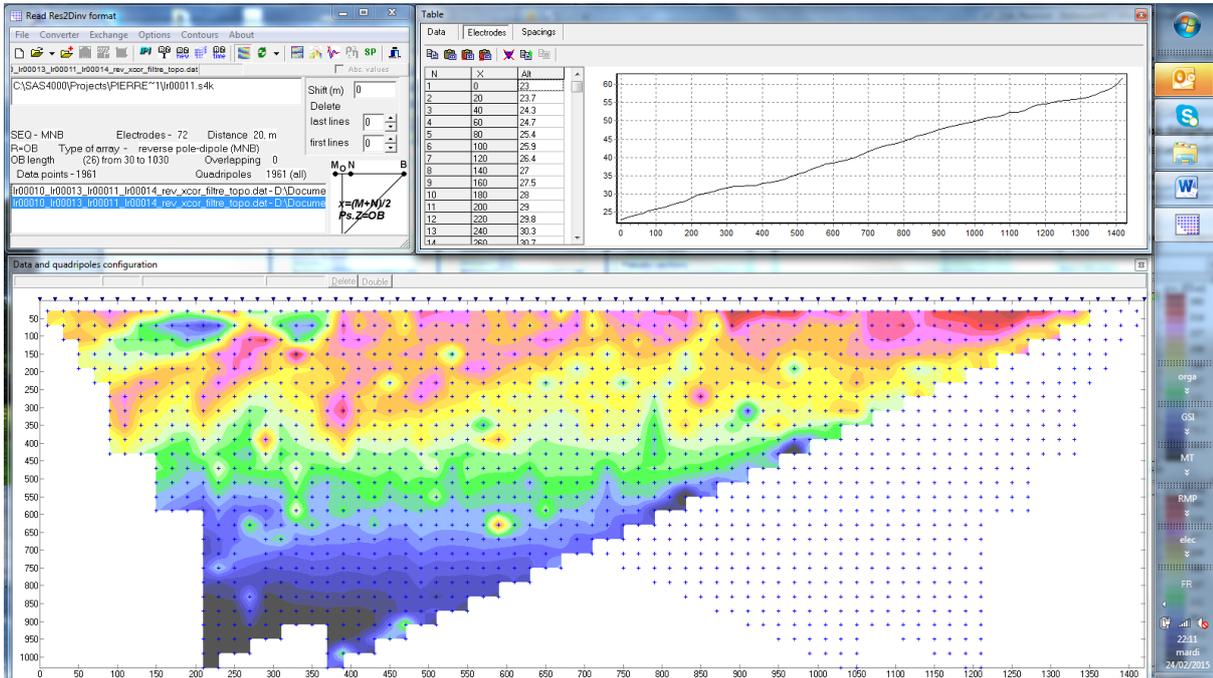
## Profil CD1-2 Wenner alpha, après filtrage



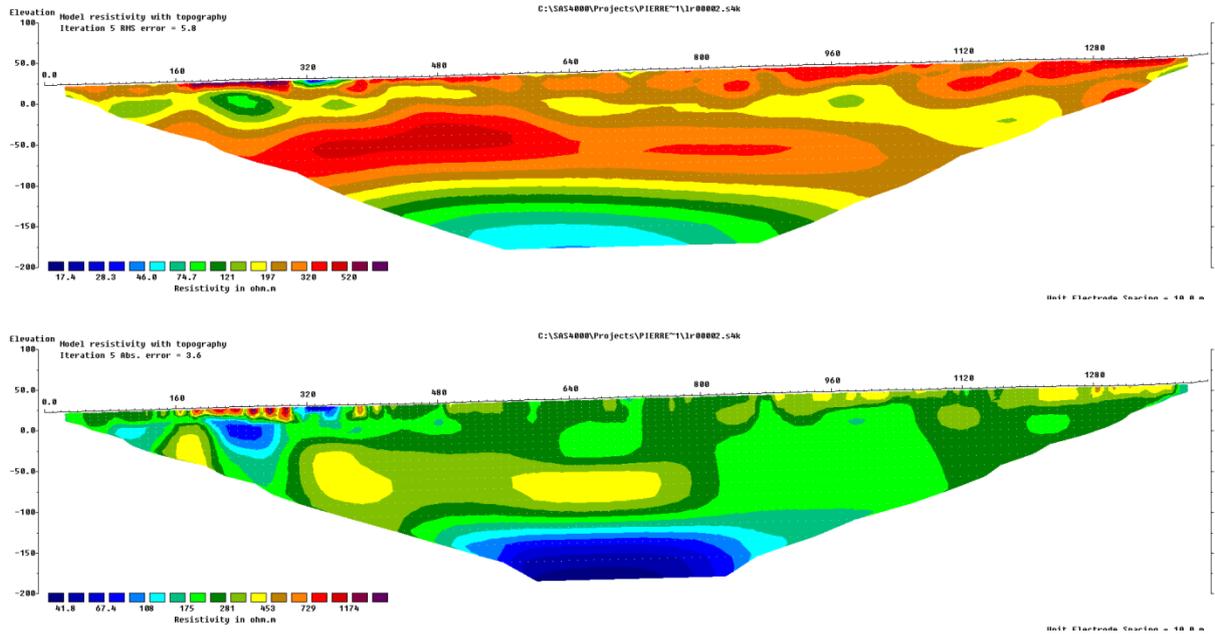
Profil CD1-2 PdP avant, après filtrage



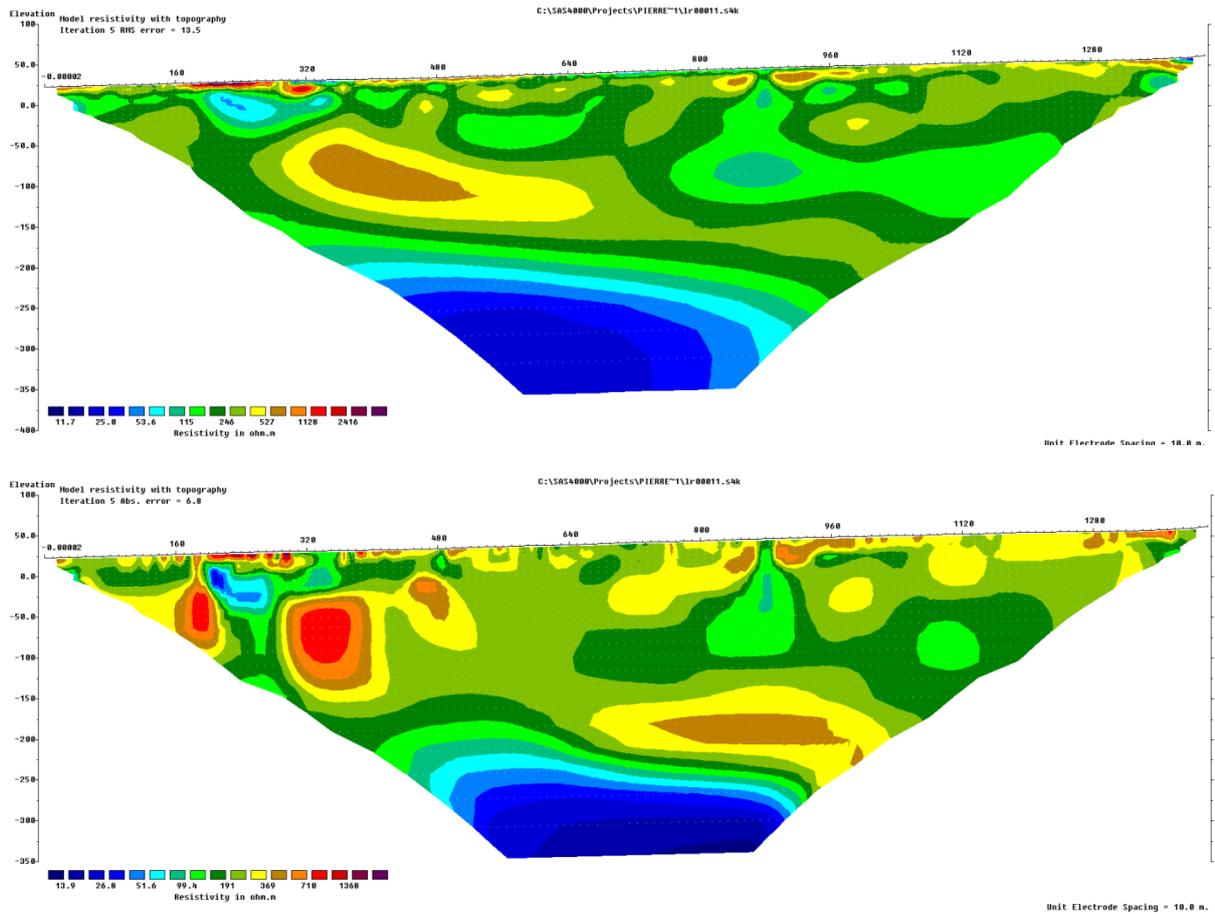
Profil CD1-2 PdP arrière, après filtrage



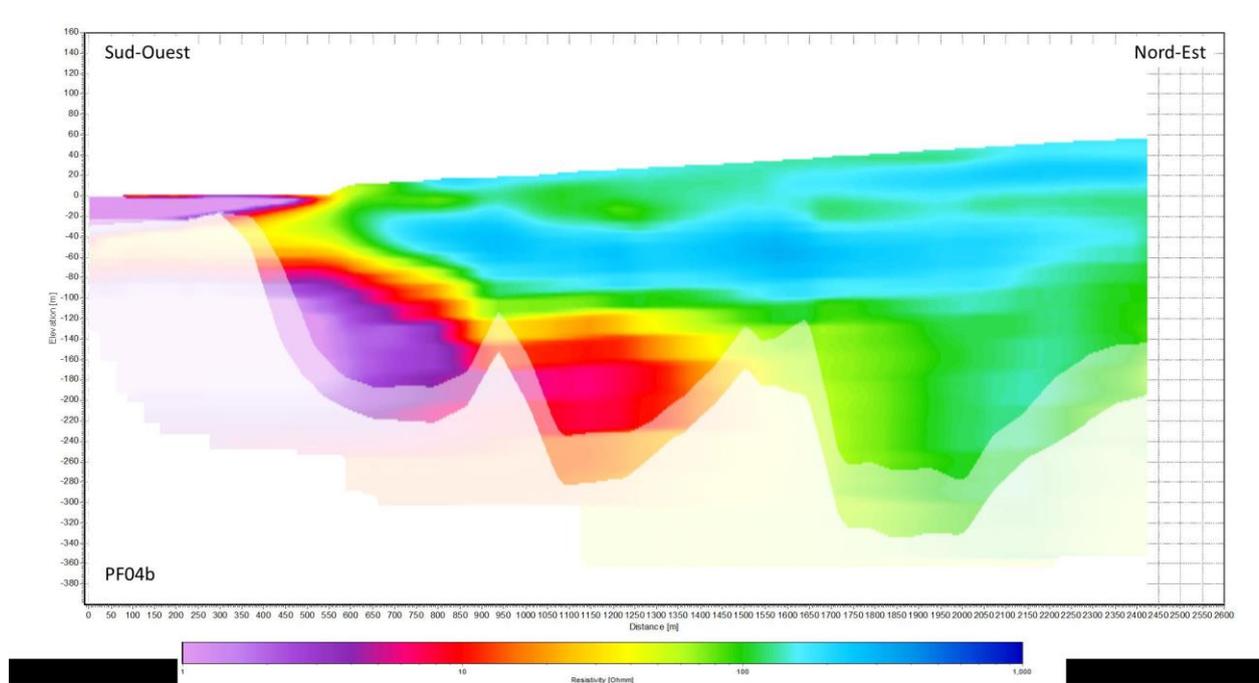
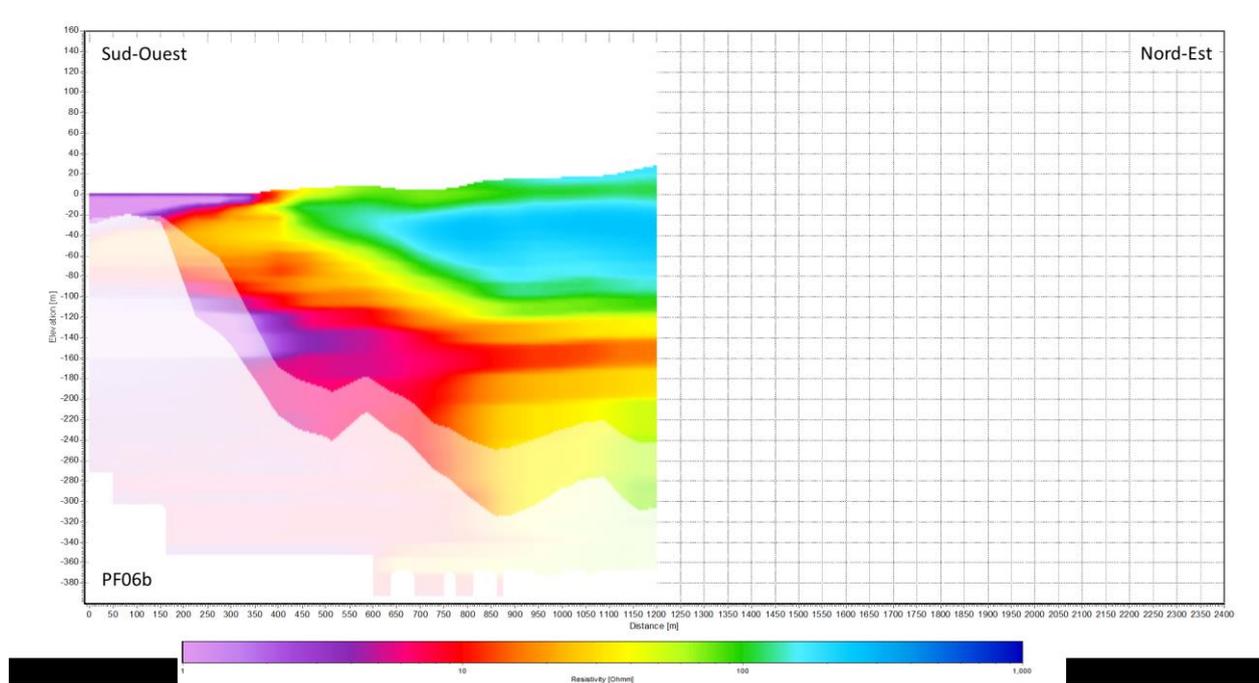
Profil CD1-2 Wenner, inversion préliminaire (« robust » en bas)



Profil CD1-2 Pole-dipole, inversion préliminaire (« robust » en bas)



### Profils TEM encadrant



### Localisation





## **Annexe 5**

### **Compte-rendu d'analyse qualité du profil CD3**



## Analyse du profil CD3

L'ensemble des données pole-dipole (PdP) et Wenner du profil CD (troisième segment =CD3) avec sa localisation a été réceptionnée le 25/02/2015 (envoi le 24/02/2015 au soir).

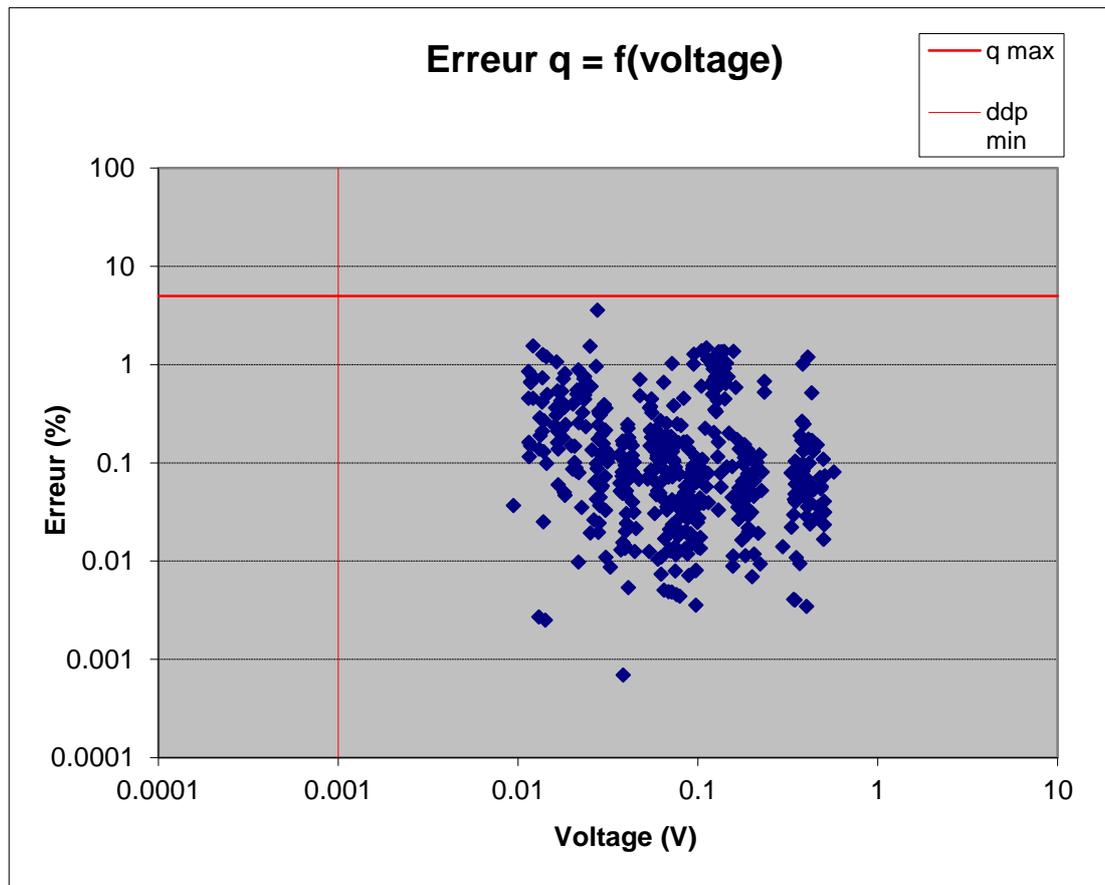
L'implantation du profil est conforme aux prévisions (cf. carte en fin de document).

L'électrode à l'infini est à au moins 4200 m de CD3.

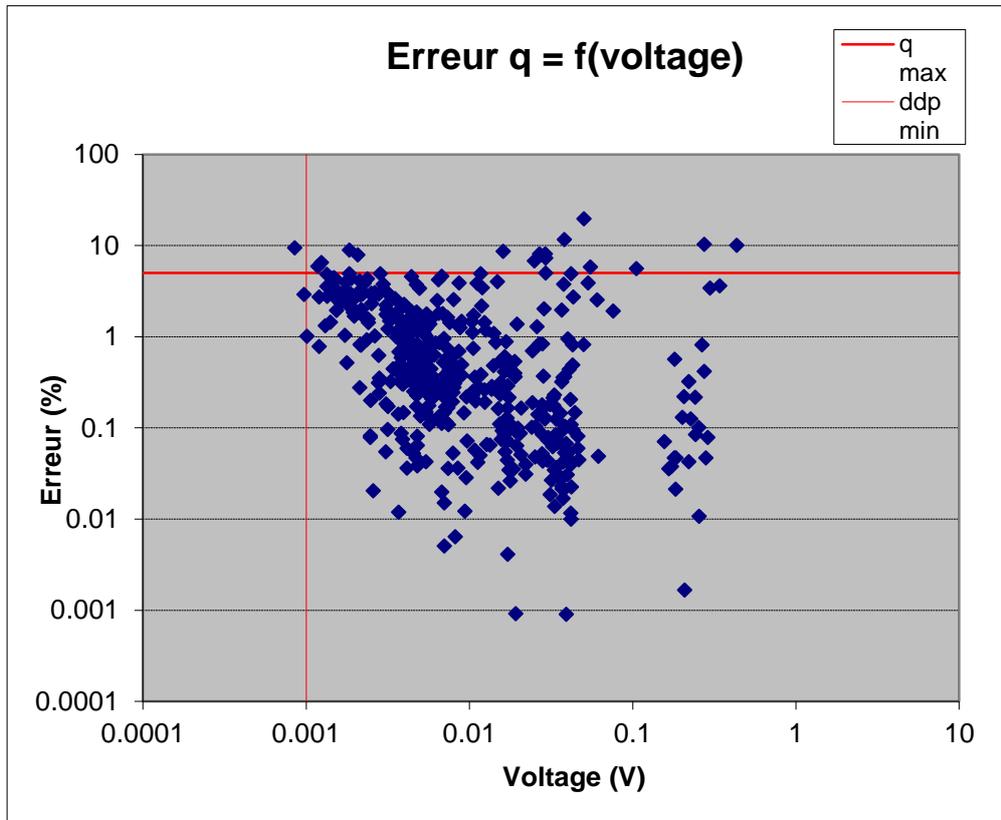
Un important artefact « courte longueur d'onde » localisé et superficiel est observé au niveau de l'électrode 37. Il est bien visible sur les Wenner alpha, Wenner beta et le PdP arrière. Elle est accompagnée d'autres artefact plus localisés qu'il sera aisé de filtrer. Sur le PdP avant, elle est moins intense sur l'électrode 37 mais deux autres artefacts sérieux sont observés au niveau de l'électrode 43 et en milieu de section entre les électrodes 30 et 38. Un artefact moins apparent affecte potentielle également la base de la section entre les électrodes 36 et 42. Si la plupart de ces artefact (cerné de blanc) semble filtrable (en enlevant l'électrode 37, l'électrode 44 comme indiqué en rouge sur les sections avant filtrage et en éditant manuellement les anomalies isolées) cette dernière apparait plus gênante car d'une part elle affecte la zone cible et d'autre part elle est moins apparente.

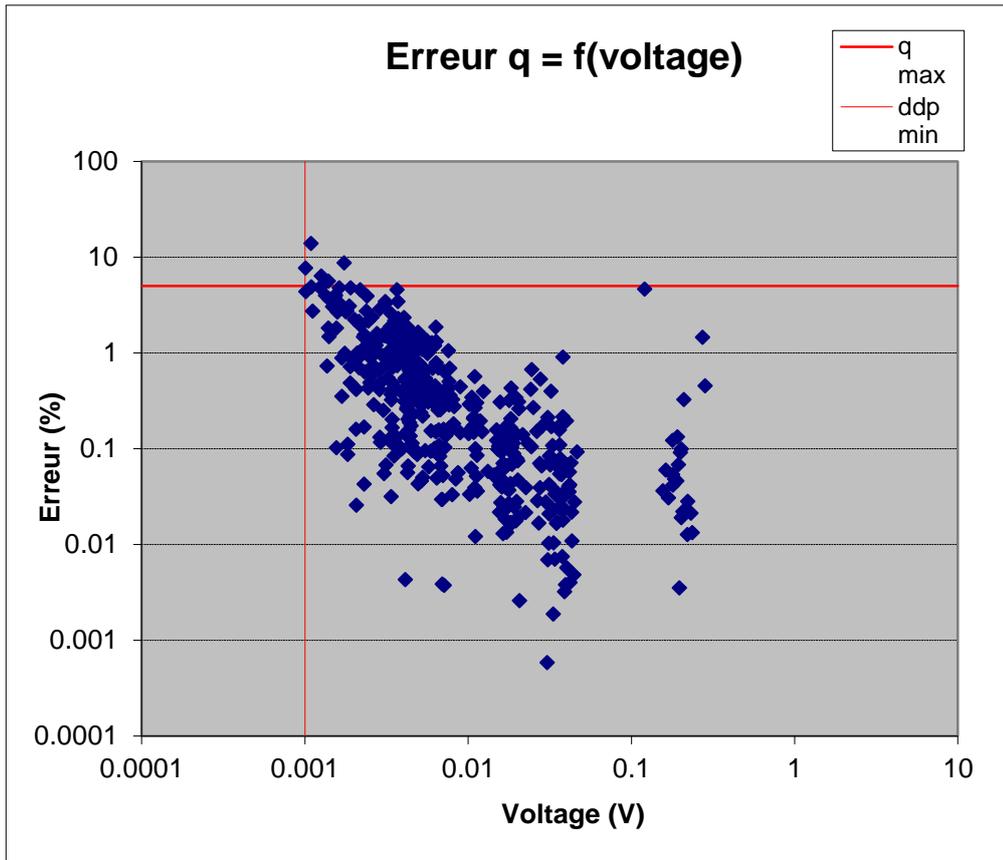
Le filtrage réalisé par STRATAGEM974 (sections après filtrage) apparait insuffisant.

CD3 Wenner Alpha

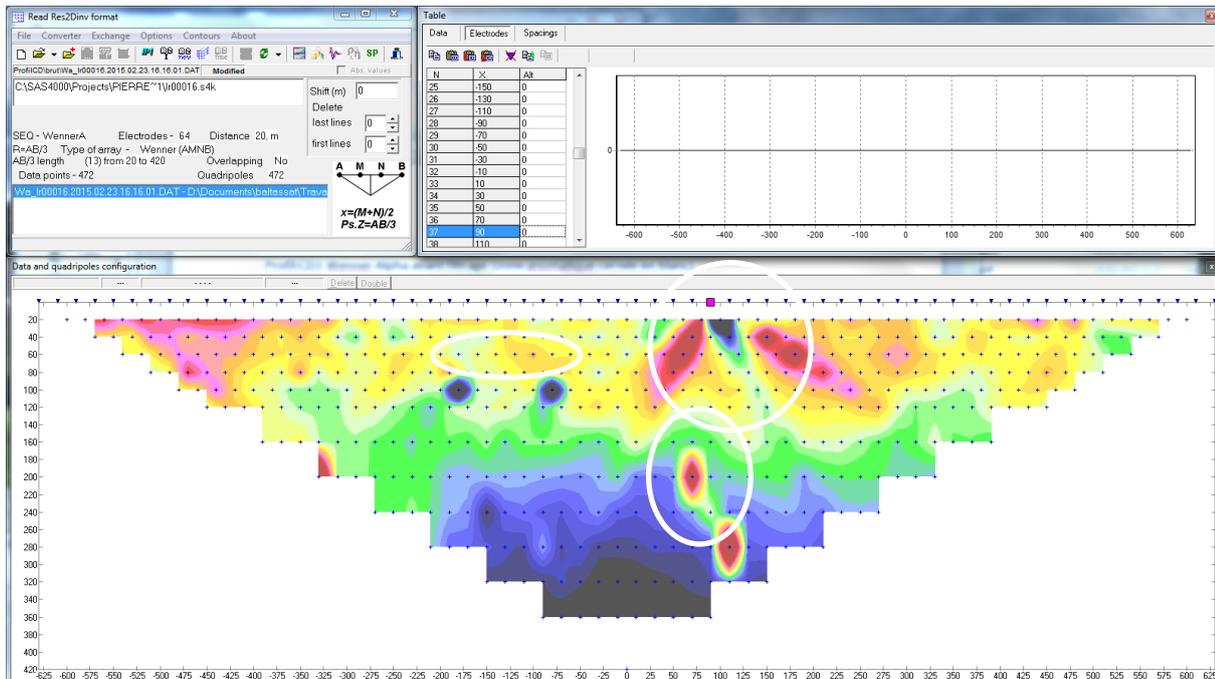


CD3 PdP avant (en haut) et arrière (en bas)

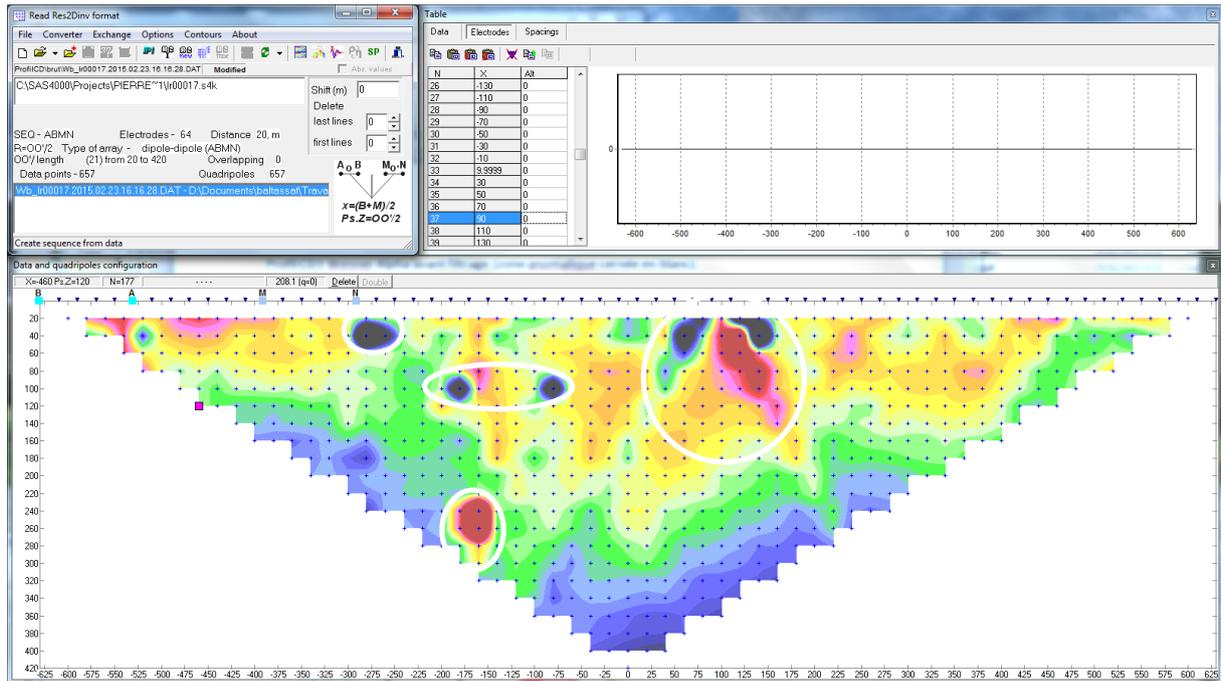




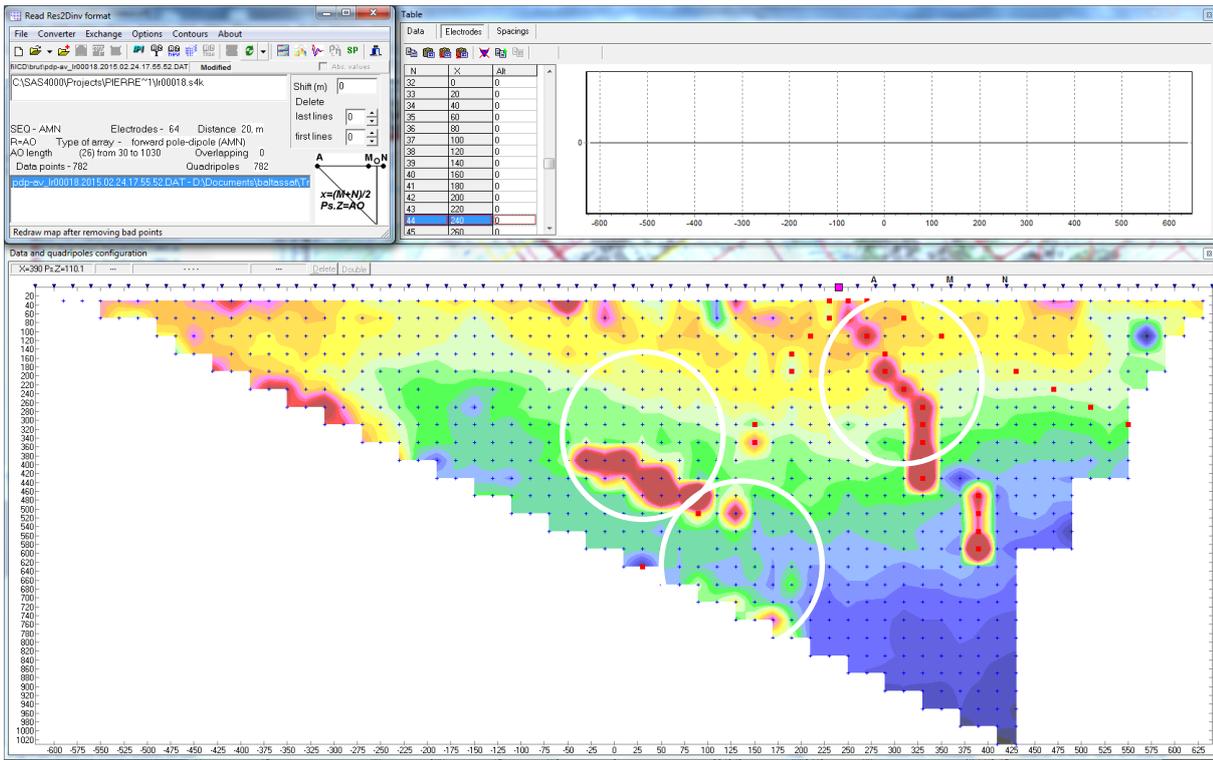
Profil CD3 Wenner Alpha avant filtrage (zone anormale cernée en blanc).



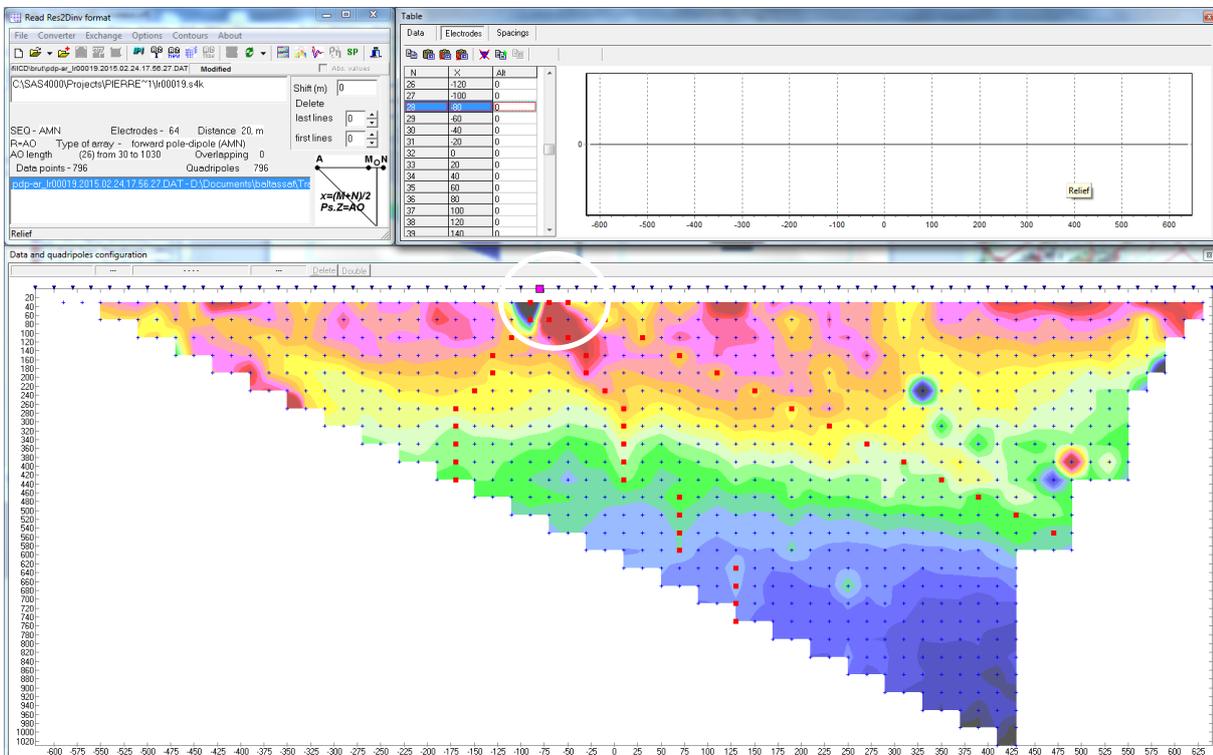
Profil CD3 Wenner beta avant filtrage



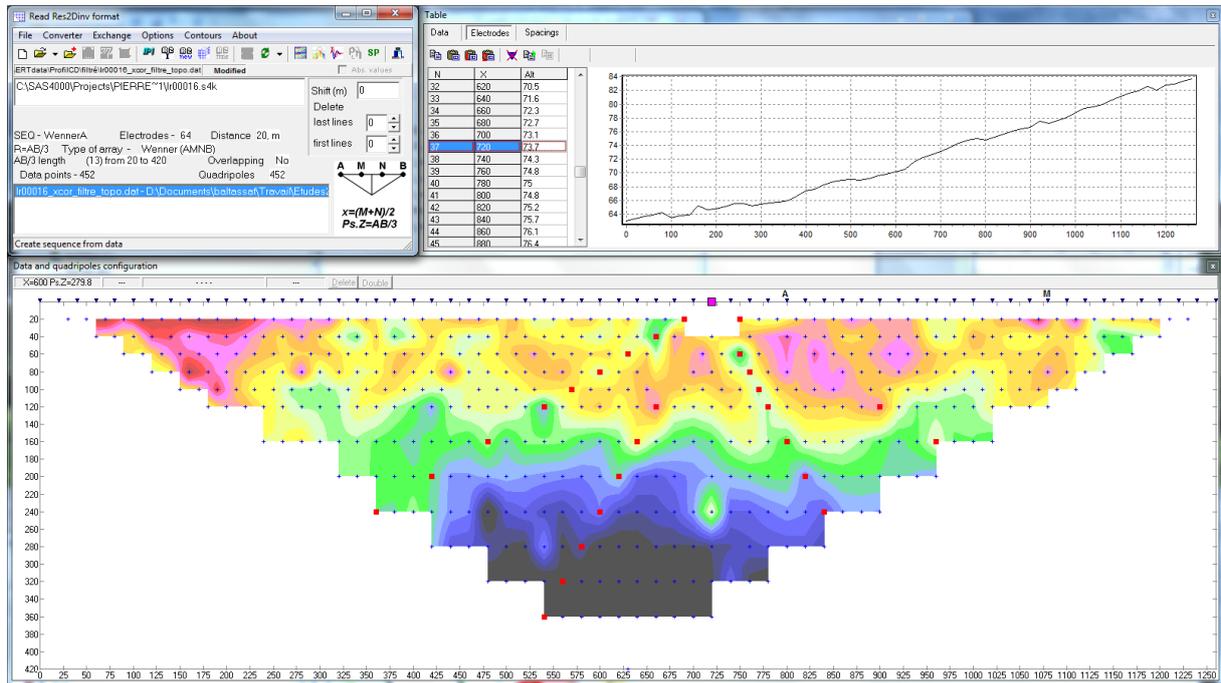
Profil CD3 PdP avant, avant filtrage



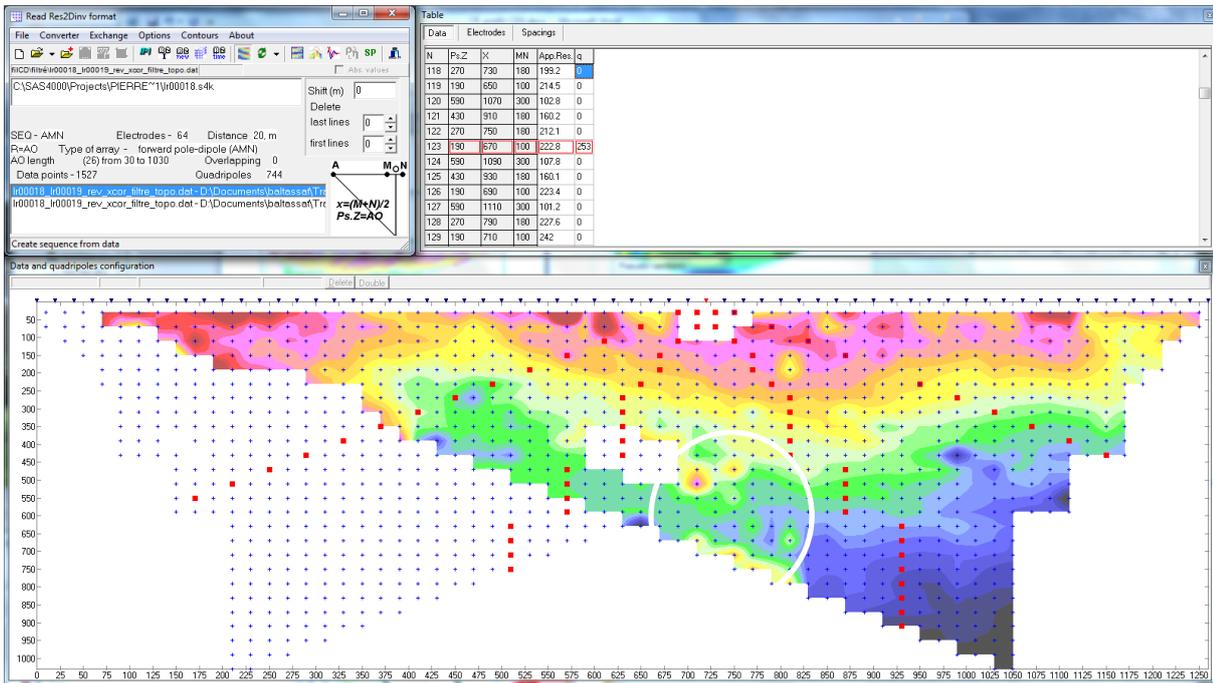
Profil CD3 PdP arrière, avant filtrage



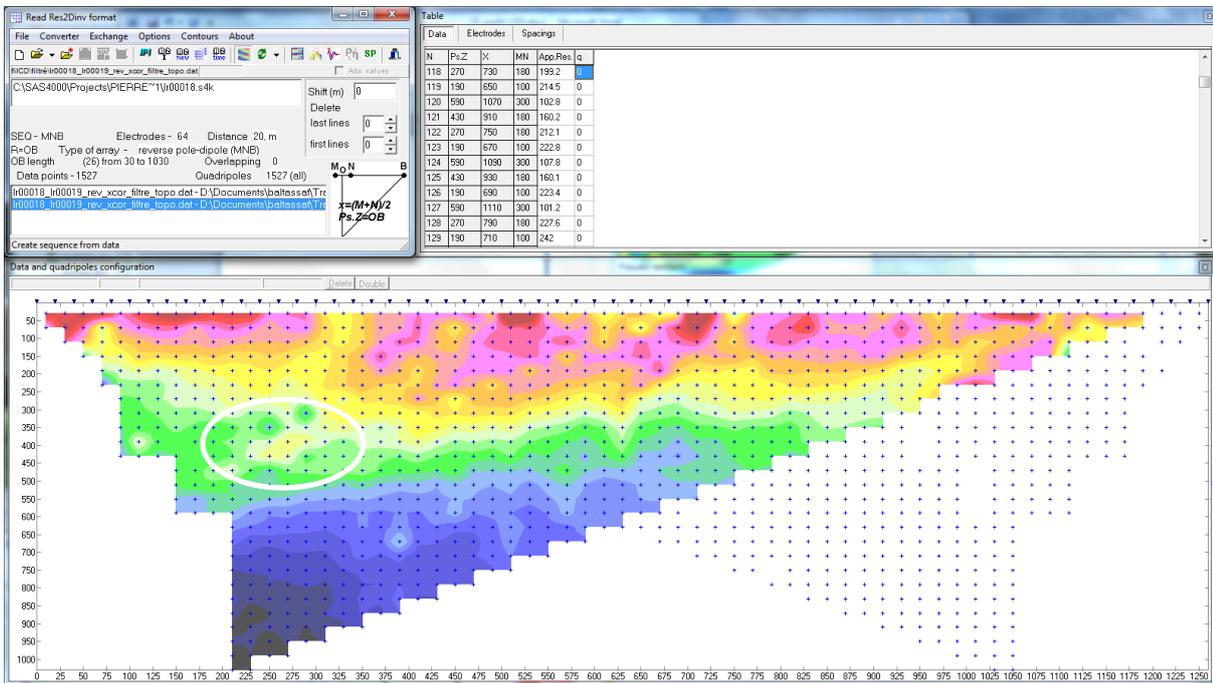
## Profil CD3 Wenner alpha, après filtrage



Profil CD3 PdP avant, après filtrage



Profil CD3 PdP arrière, après filtrage



Localisation





## **Annexe 6**

### **Compte-rendu d'analyse qualité du profil EF1**



L'ensemble des données pole-dipole (PdP) et Wenner du profil EF1 et sa localisation a été réceptionnée le 09/03/2015 (envoi le 07/03/2015, envoi partiel antérieur).

L'implantation du profil est conforme aux prévisions, légèrement déplacée vers le NW (cf. carte en fin de document).

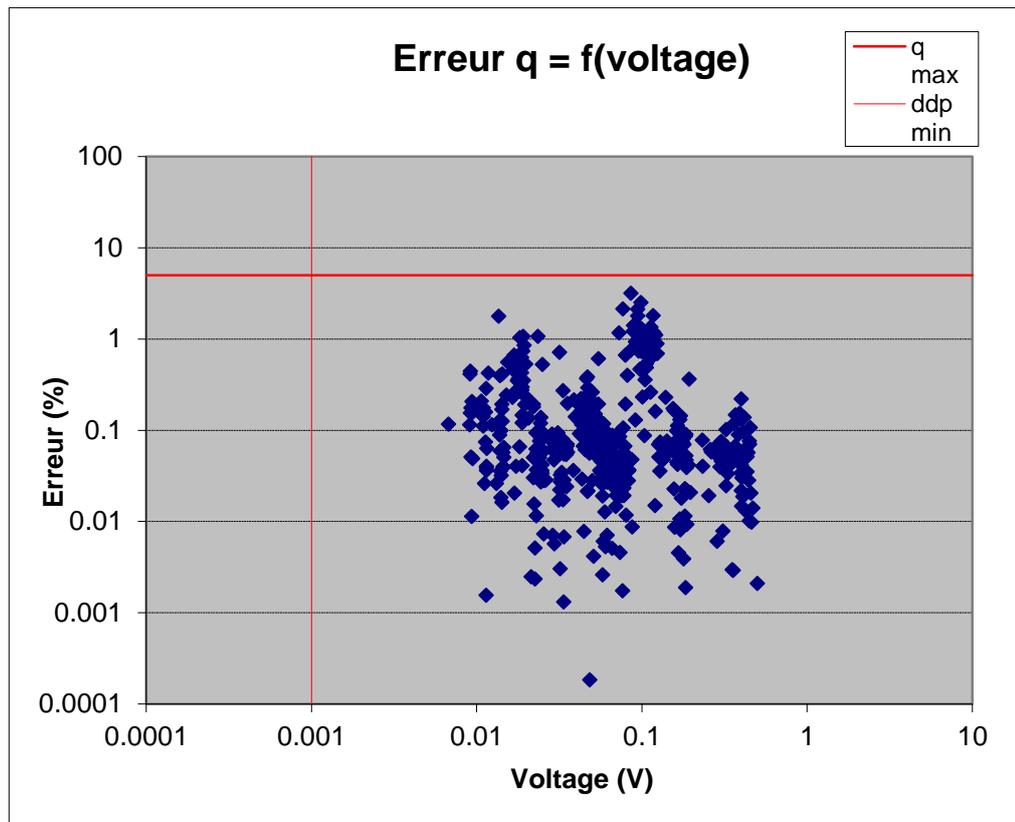
L'électrode à l'infini est à au moins 3600 m de EF1-2.

Un artefact « courte longue d'onde » est observé au niveau de l'électrode 53. Y-a-t-il sur le terrain des indices de surface susceptibles d'expliquer cette réponse ? Il est recommandé de supprimer cet effet qui affecte visiblement le résultat. Différents procédés de filtrage pourront être testé (édition manuelle, filtrage X2IPI, ...). Le filtrage réalisé pour l'inversion préliminaire paraît insuffisant.

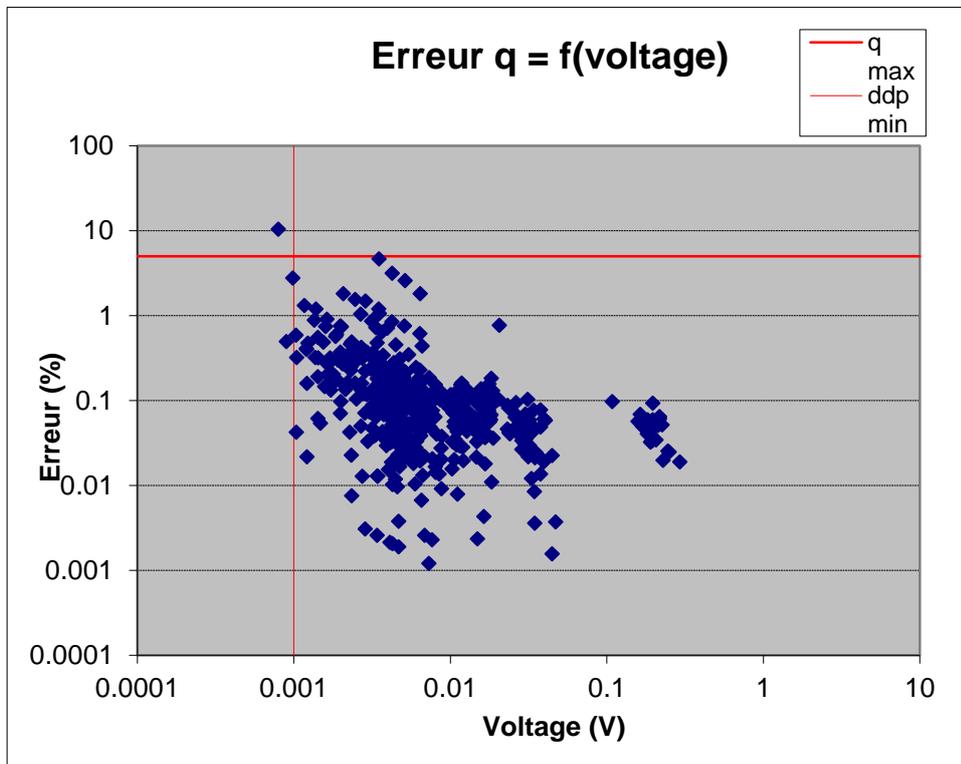
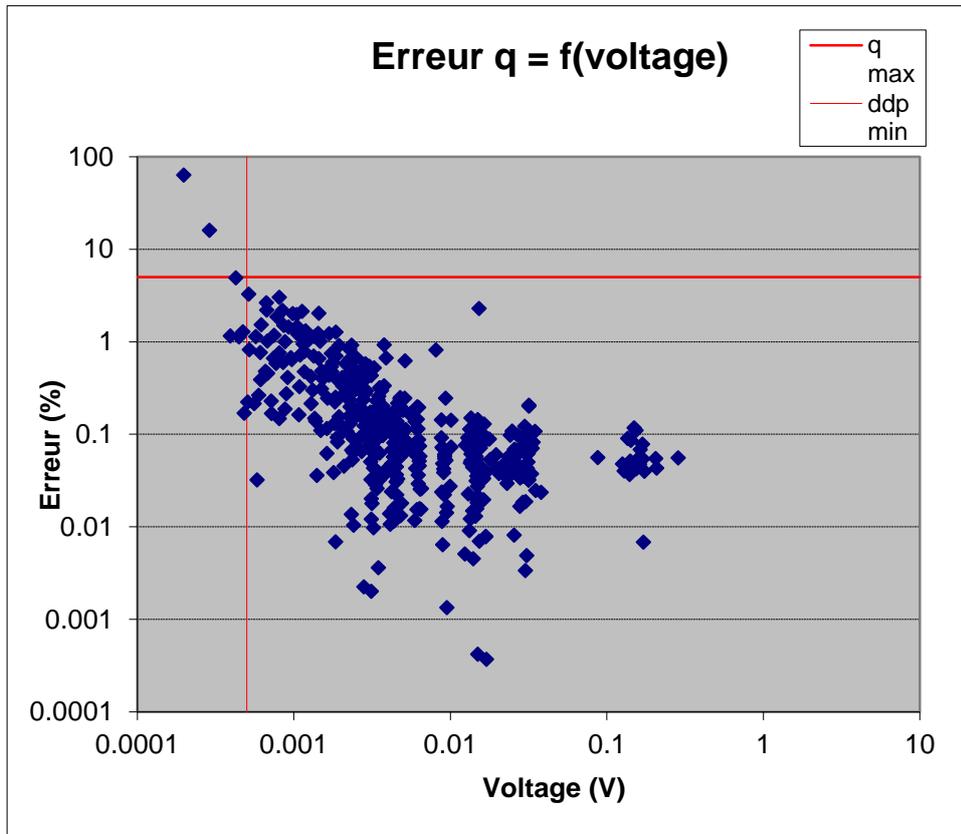
On n'observe pas de réponse sensible au passage de la canalisation connue vers l'électrode 40.

Les données mesurées (voltage, erreur) sont de bonne qualité.

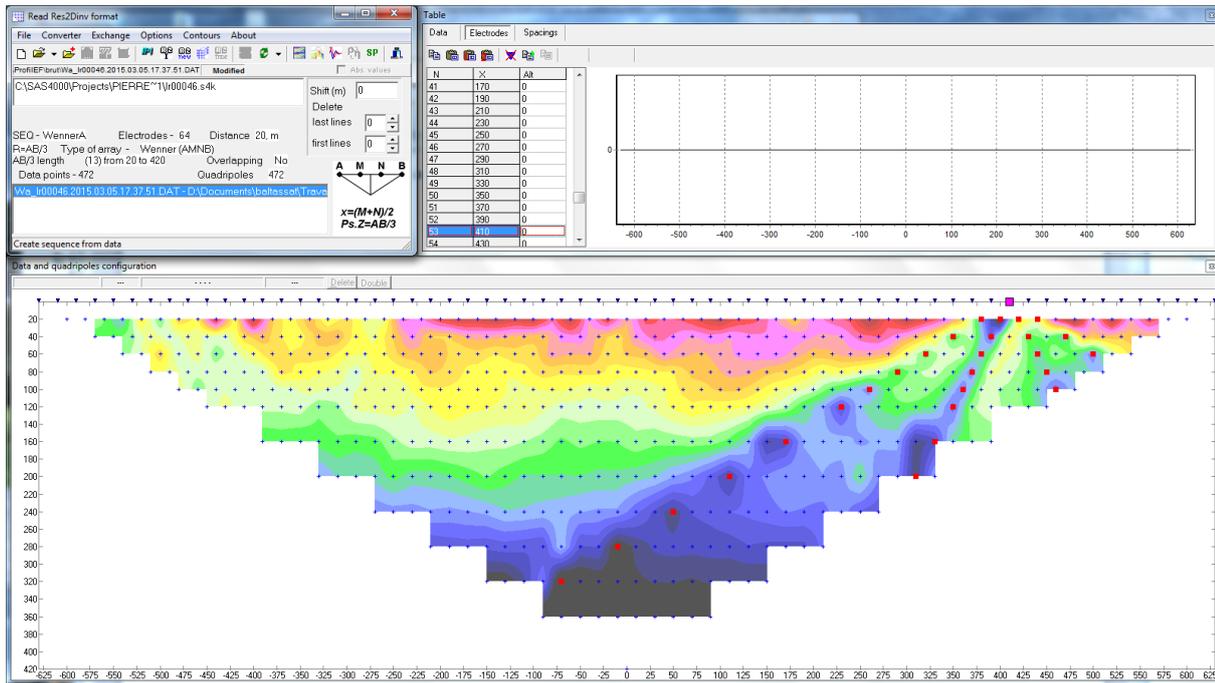
EF1 Wenner Alpha



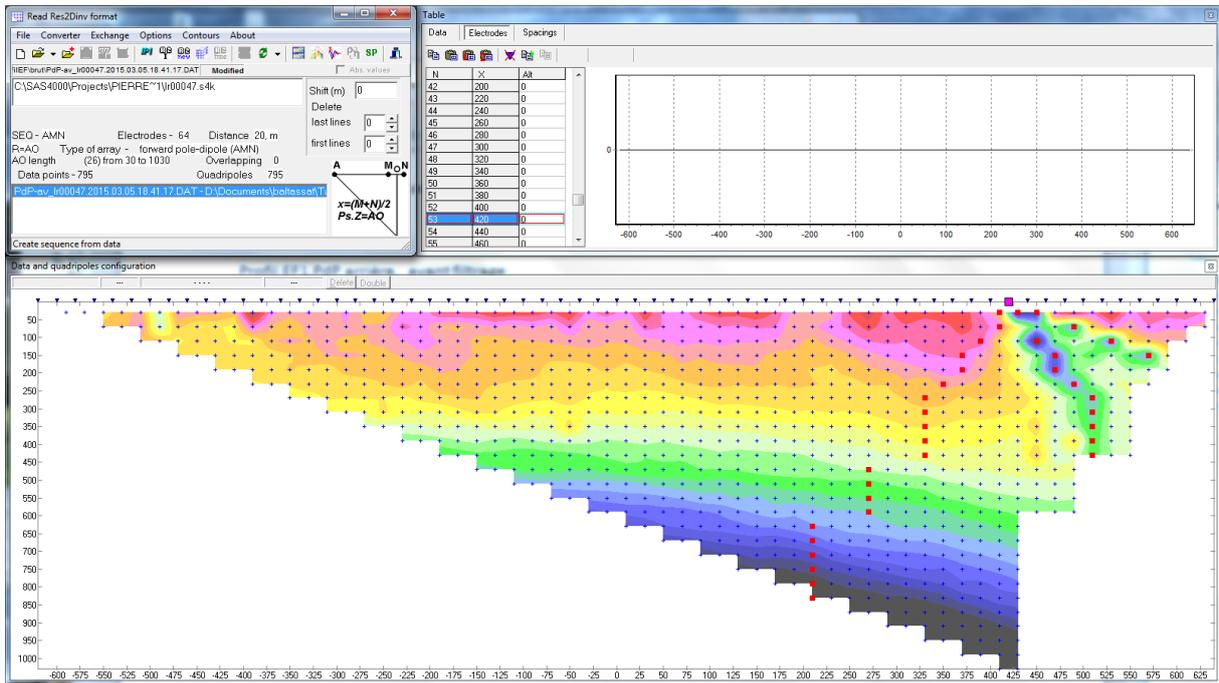
EF1 PdP avant (en haut) et arrière (en bas)



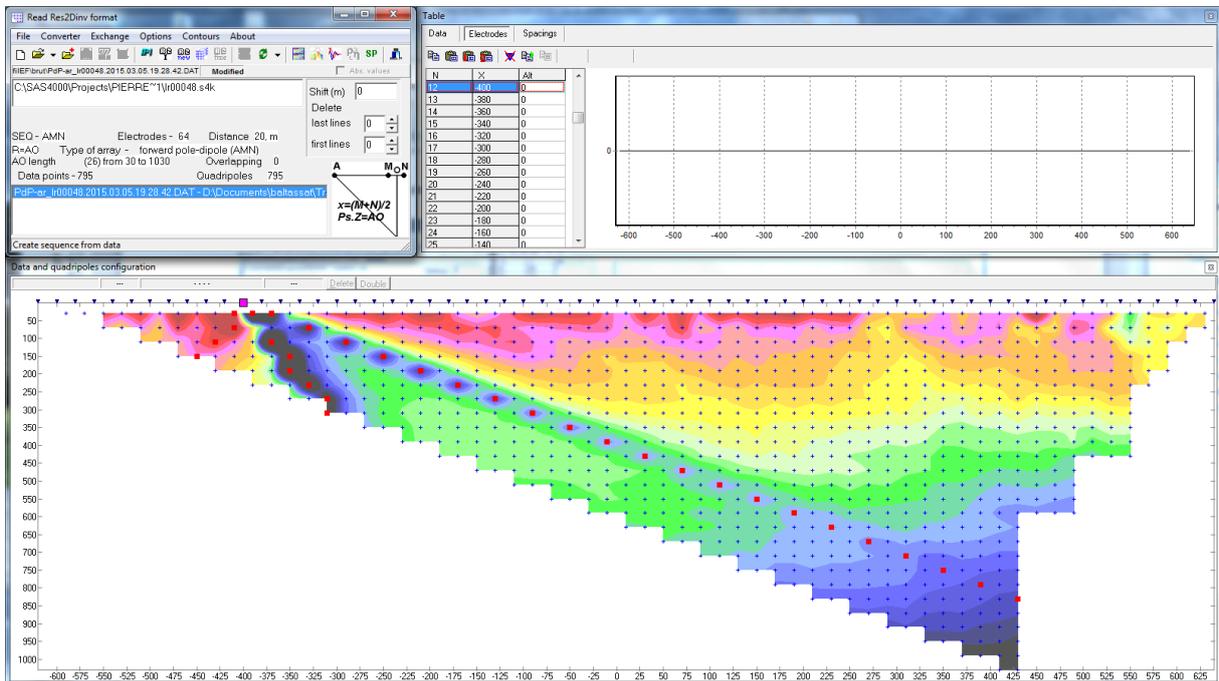
Profil EF1 Wenner alpha avant filtrage (mesures avec électrode 53 en rouge)



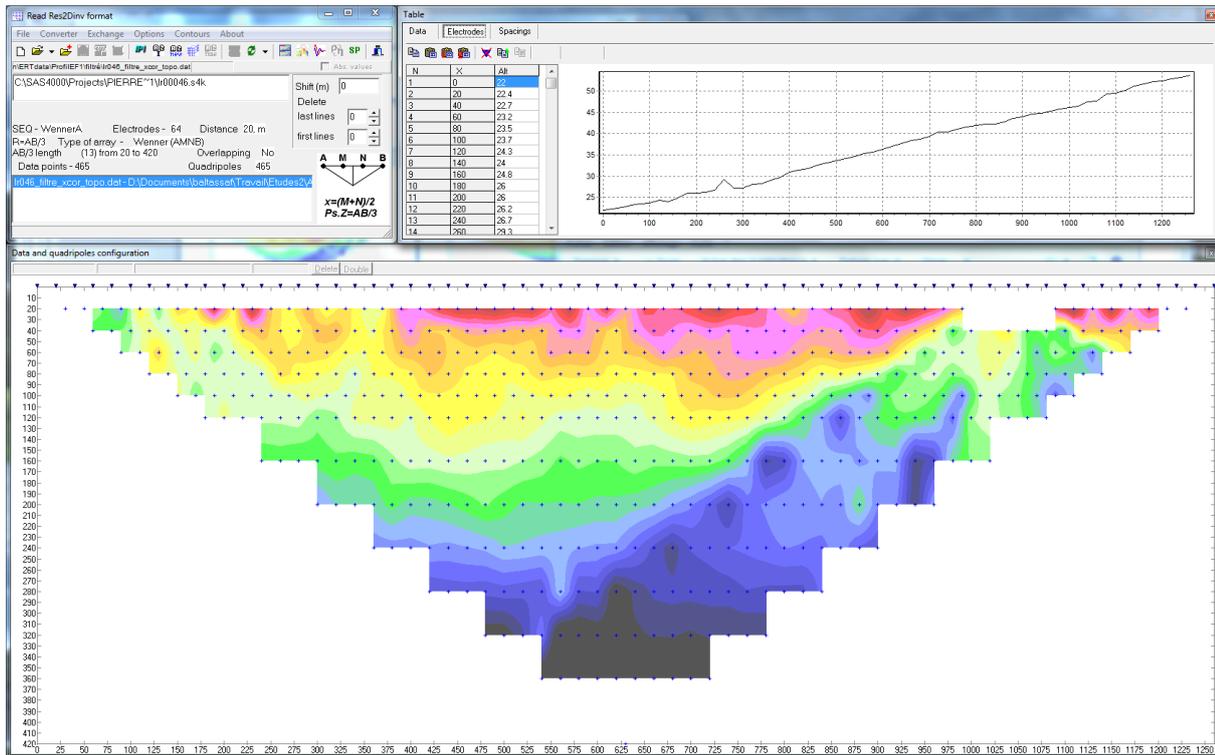
Profil EF1 PdP avant, avant filtrage (mesures avec électrode 53 en rouge)



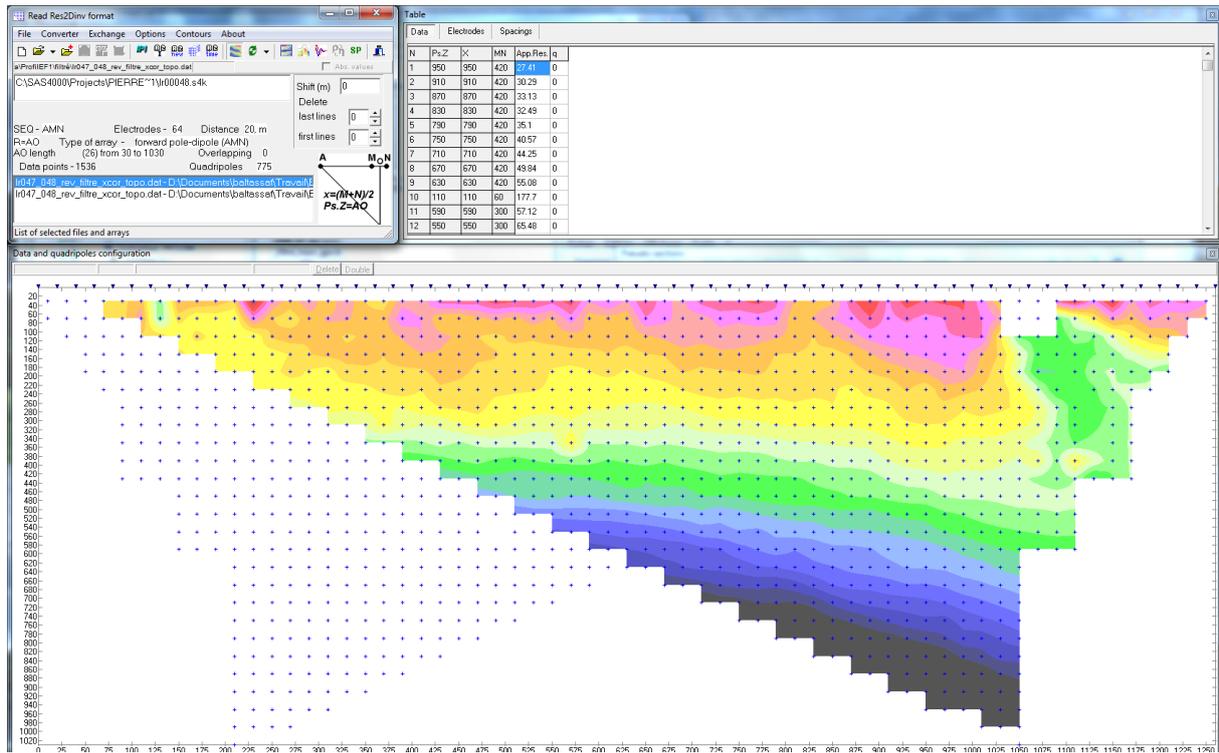
Profil EF1 PdP arrière, avant filtrage (mesures avec électrode 53 en rouge)



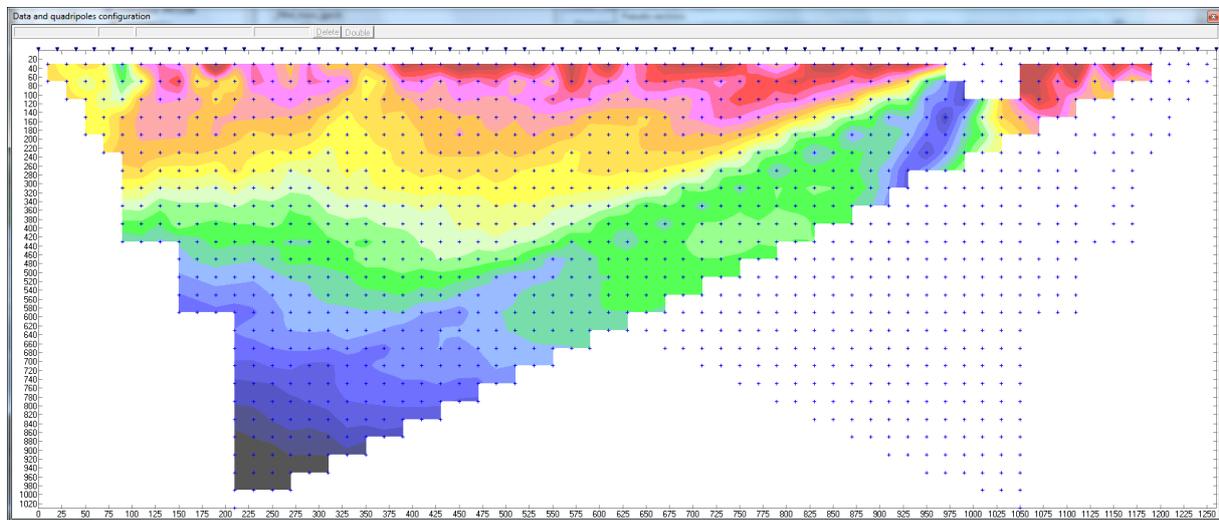
Profil EF1 Wenner alpha, après filtrage



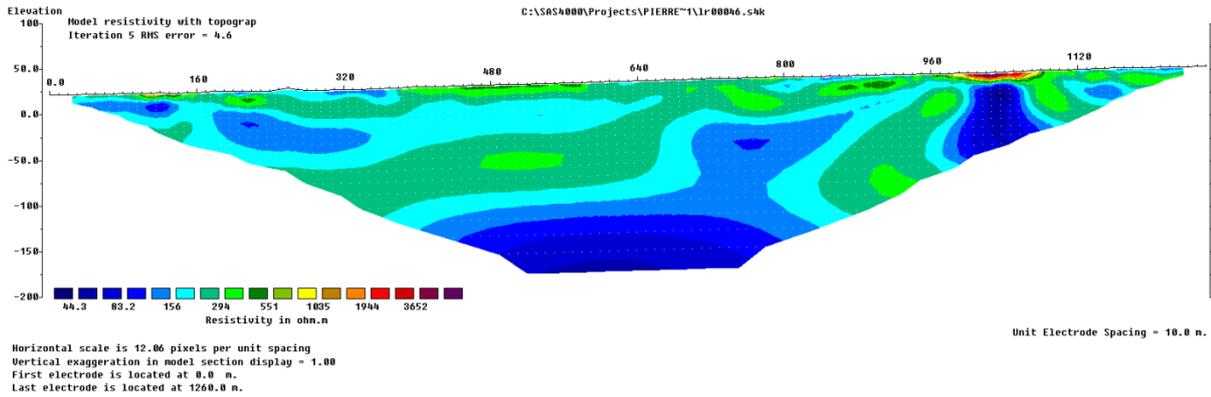
## Profil EF1 PdP avant, après filtrage



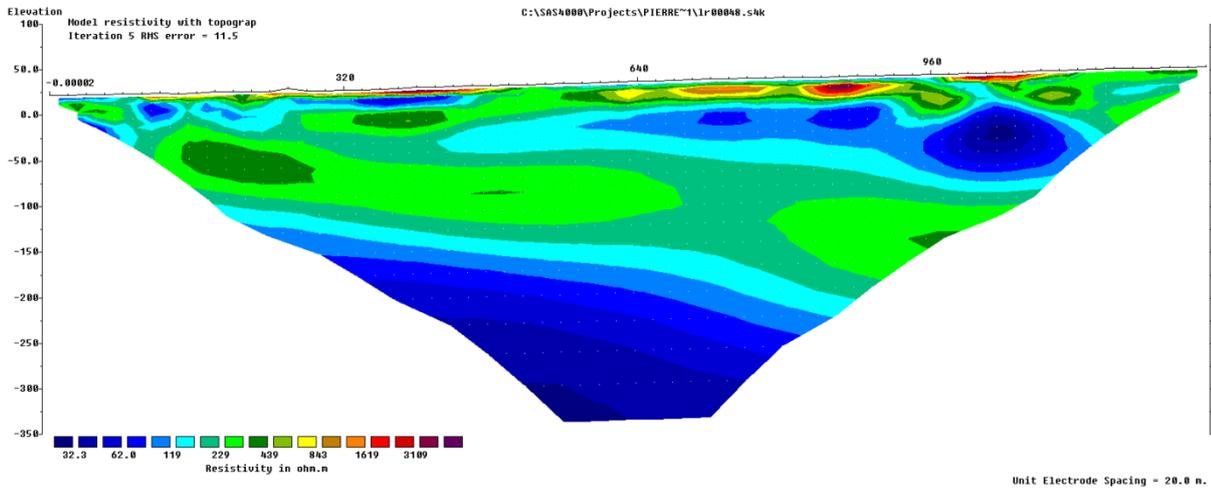
## Profil EF1 PdP arrière, après filtrage



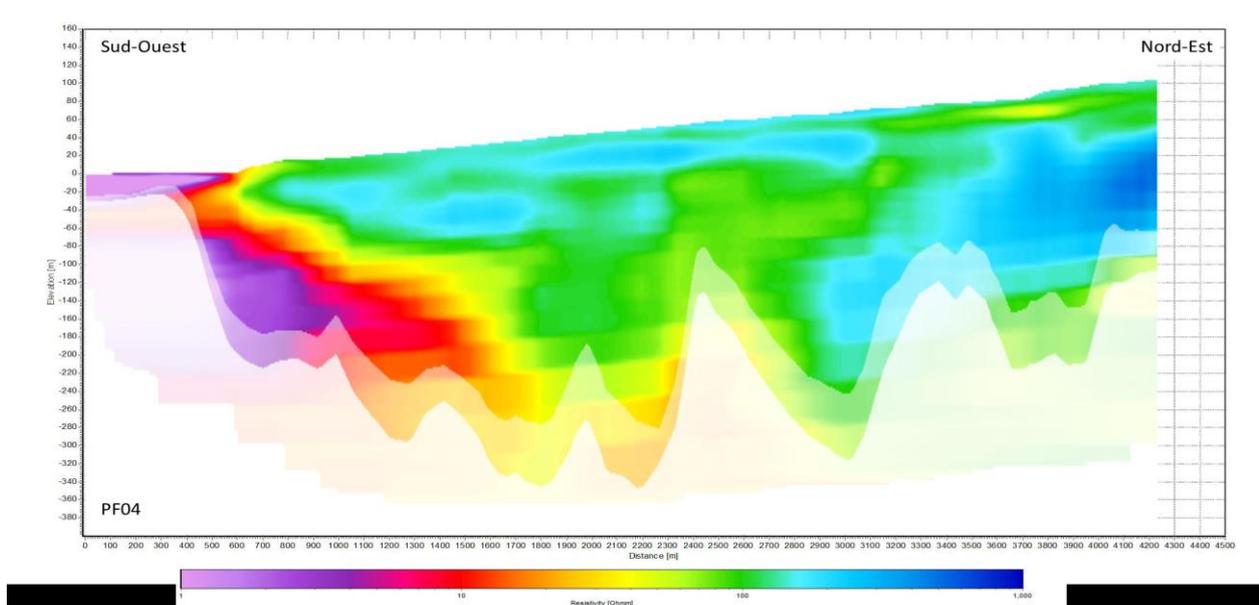
Profil EF1 Wenner, inversion préliminaire



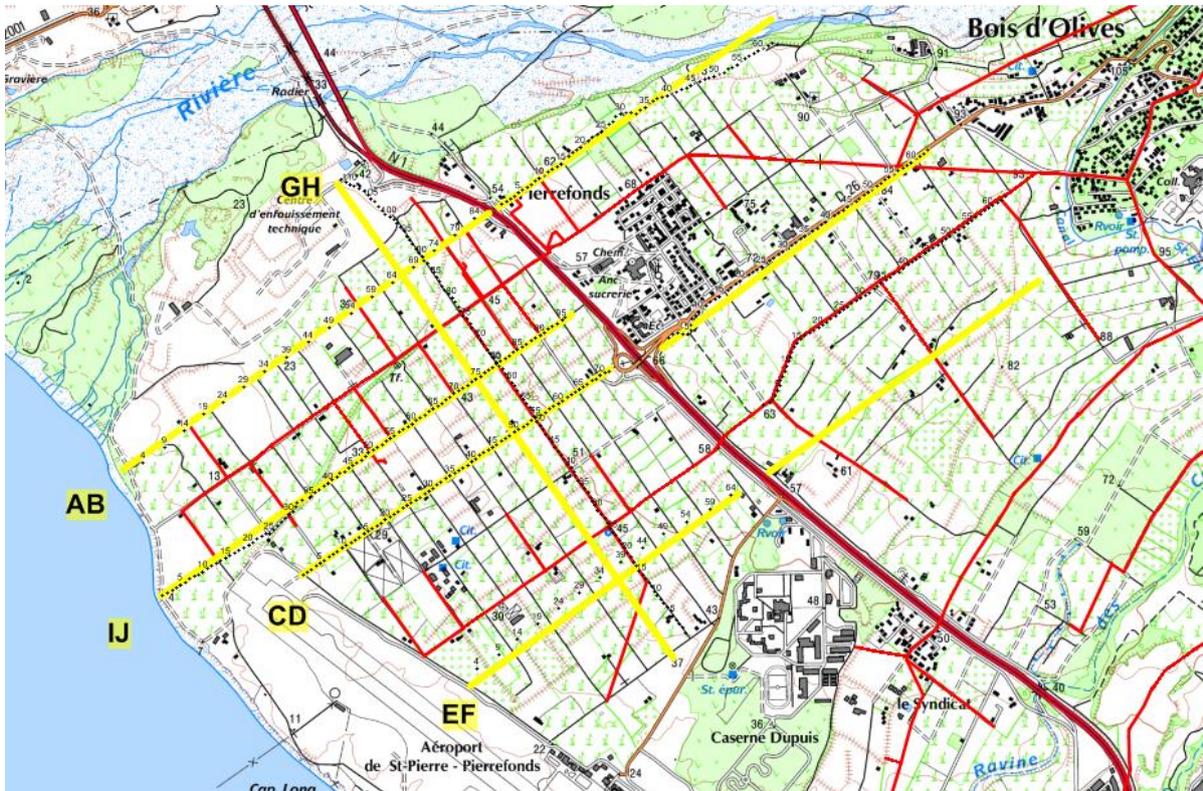
Profil EF1 pôle-dipôle, inversion préliminaire



Profils TEM encadrant



Localisation





## **Annexe 7**

### **Compte-rendu d'analyse qualité du profil EF2**



L'ensemble des données pole-dipole (PdP) et Wenner du profil EF2 avec leur localisation a été réceptionnée le 20/03/2015.

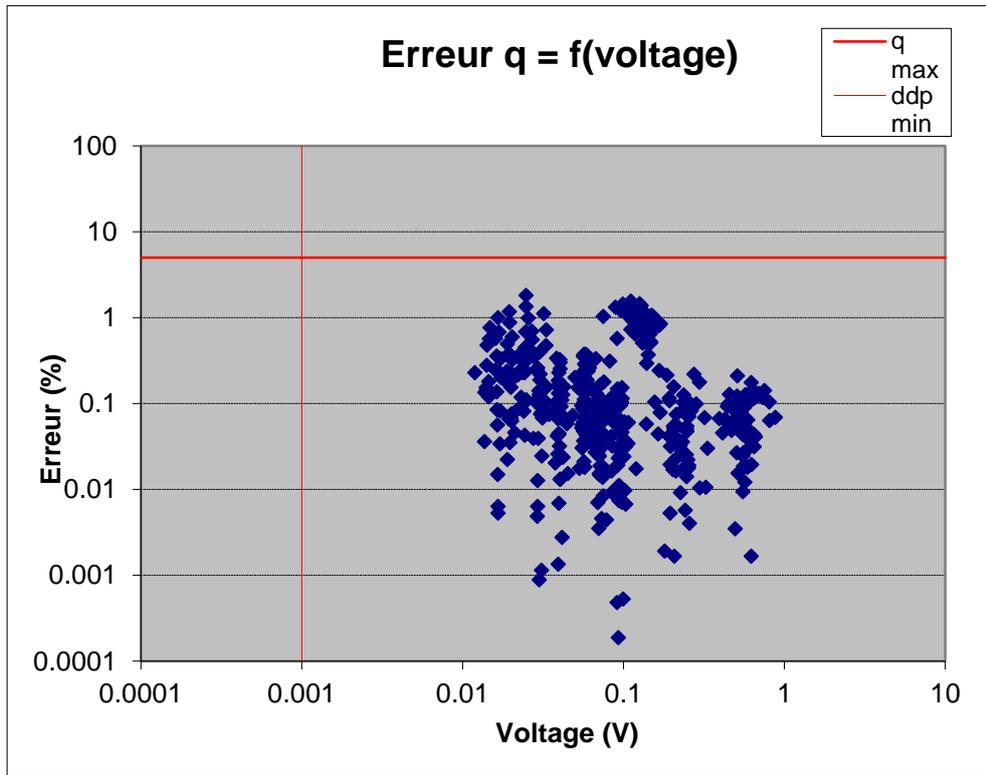
L'implantation du profil est conforme aux prévisions après déplacement d'env 300 m au NW en accord entre les parties suite à un problème de permutage (cf. carte en fin de document). Le profil EF amont suit un chemin d'exploitation et une canalisation en fonte sur tout son parcours amont.

L'électrode à l'infini est à au moins 3780 m de EF2.

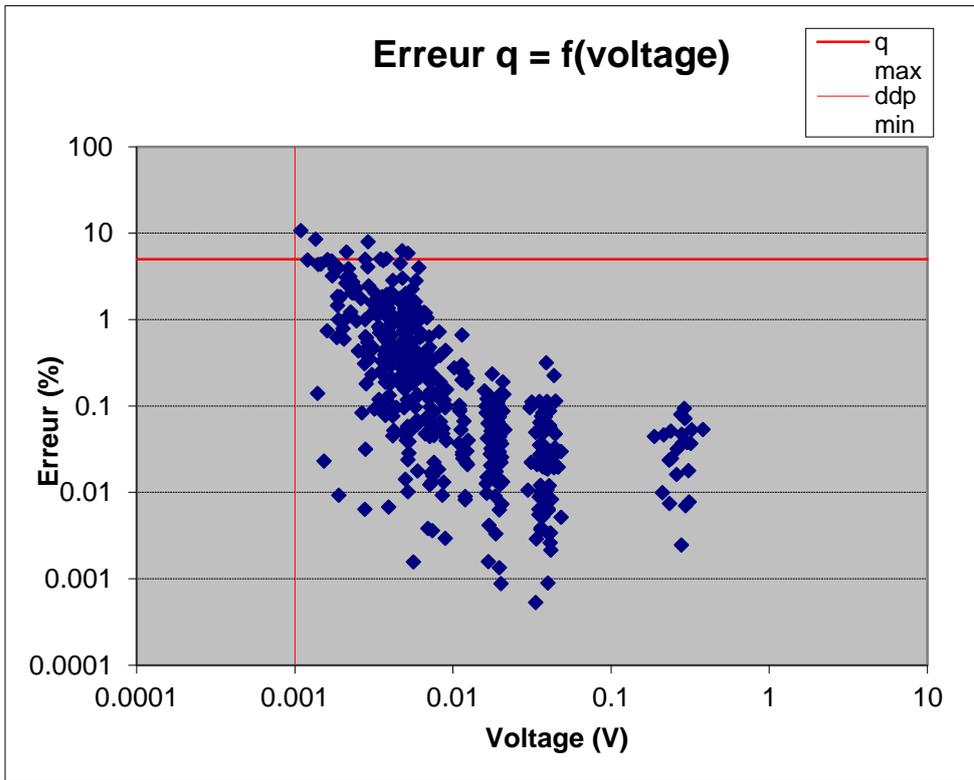
Des artefacts « courte longueur d'onde » sont suspecté au niveau des électrodes 32, 59-61. Ces positions d'électrodes sont proches d'intersections de canalisation. Est-il possible de préciser l'existence et la position des canalisations dans ces régions ? A filtrer le cas échéant après confirmation de la présence et de la position de la canalisation.

Les données mesurées (voltage, indice qualité) sont de bonne qualité.

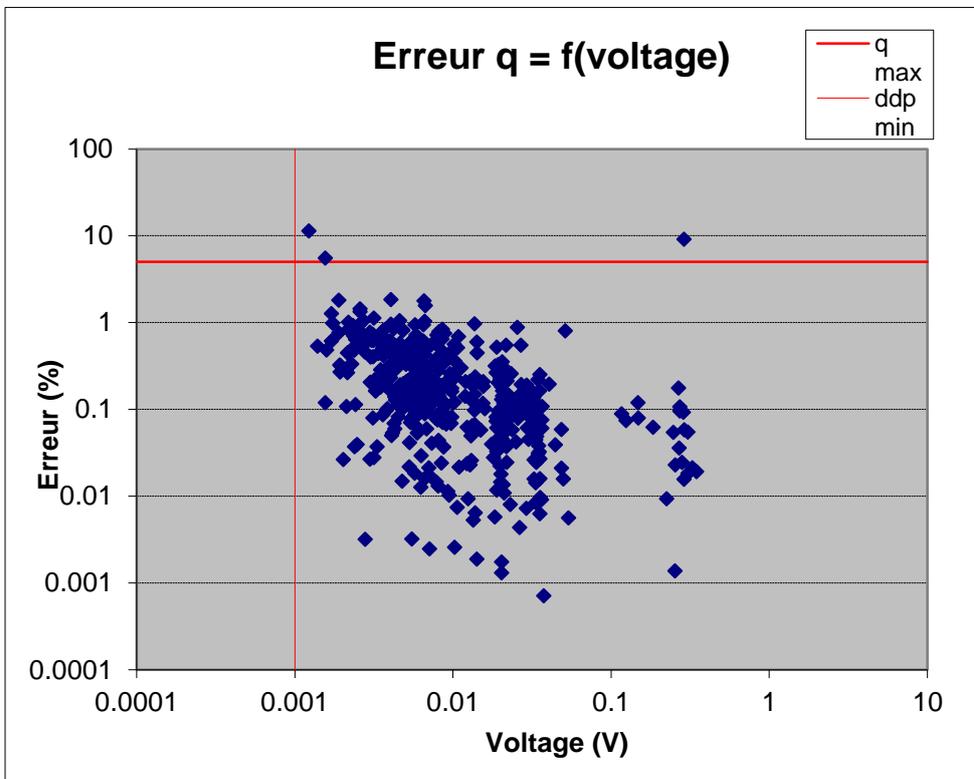
EF2 Wenner Alpha



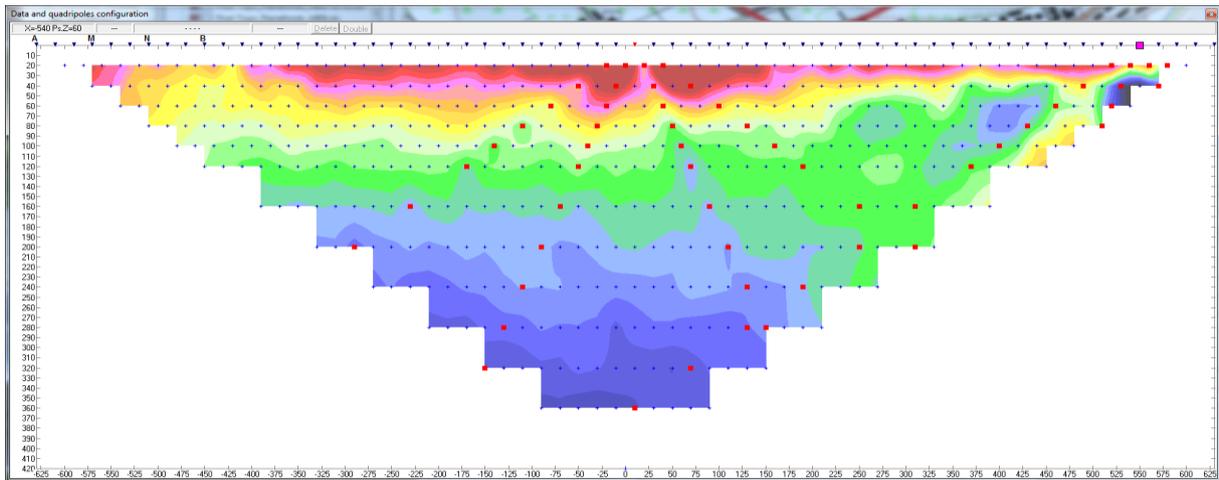
EF2 PdP- avant



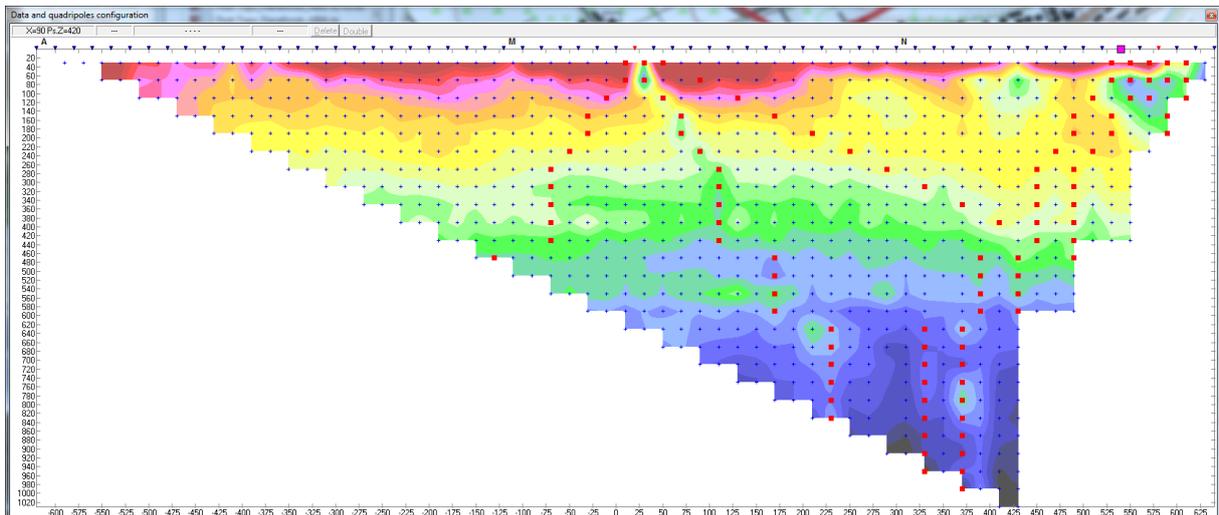
EF2 PdP- arrière



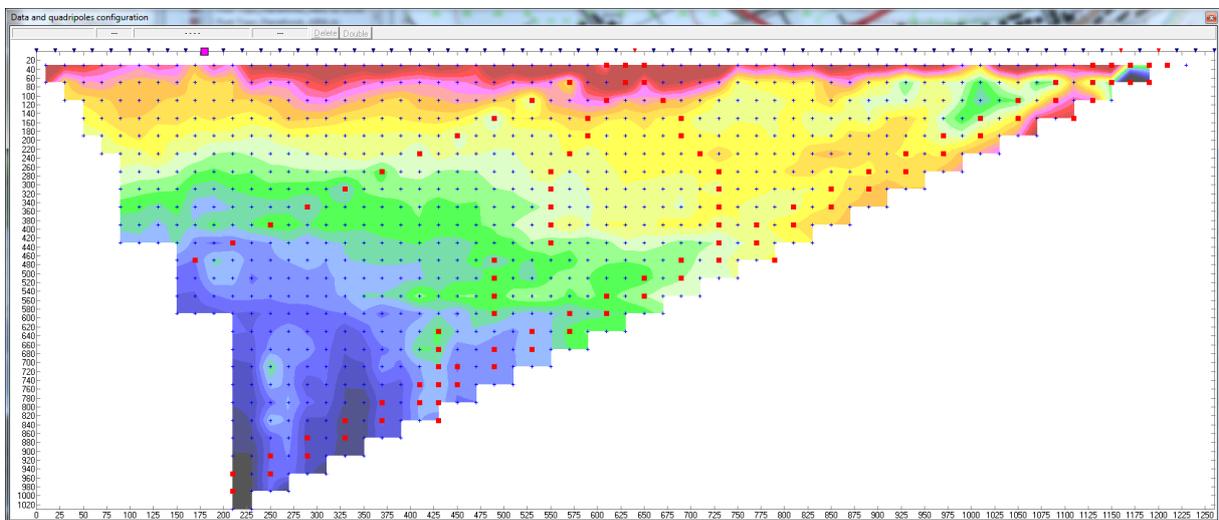
EF2 Wenner Alpha, avant filtrage (mesures correspondant aux électrodes 32 et 60 en rouge)



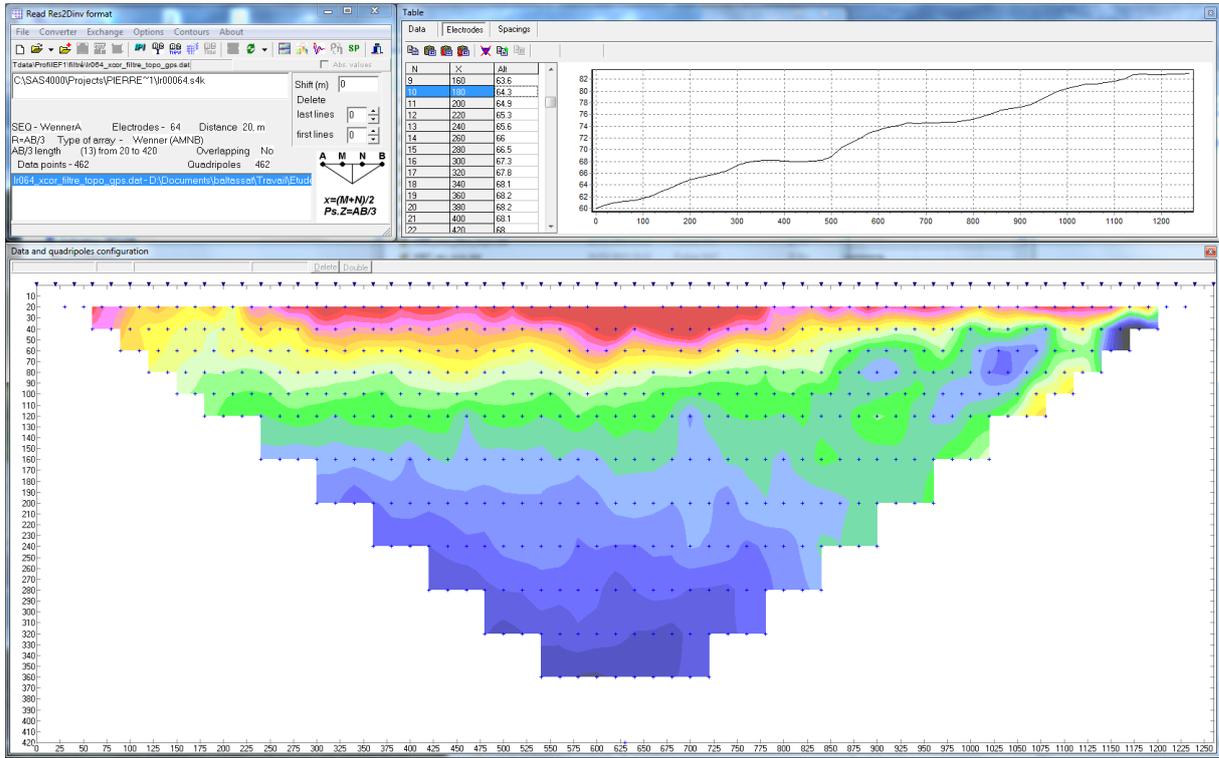
Profil EF2 PdP avant, avant filtrage (électrodes 32, 59 et 61 en rouge)



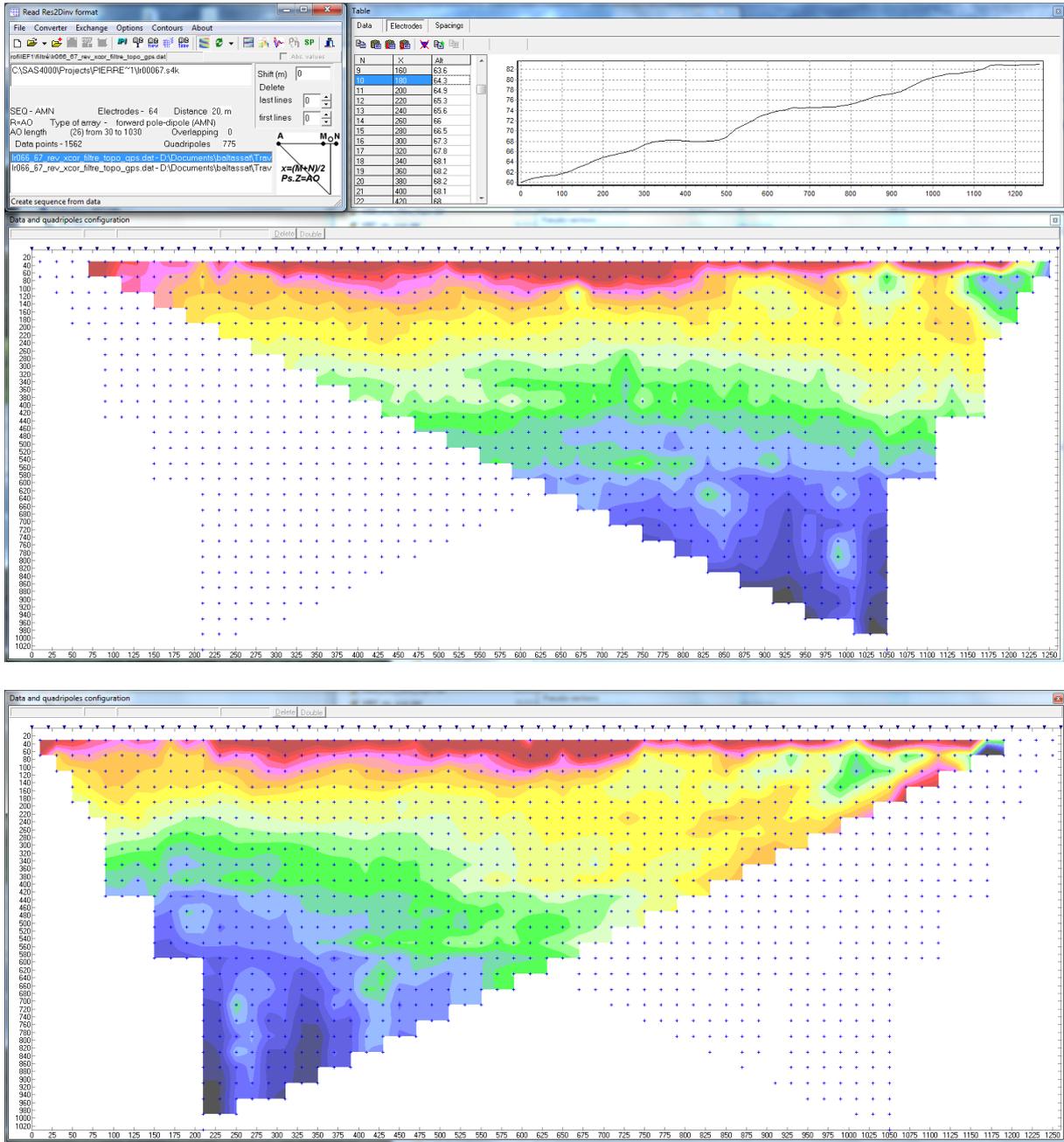
Profil EF2 PdP arrière, avant filtrage (électrodes 33, 59 et 61 en rouge)



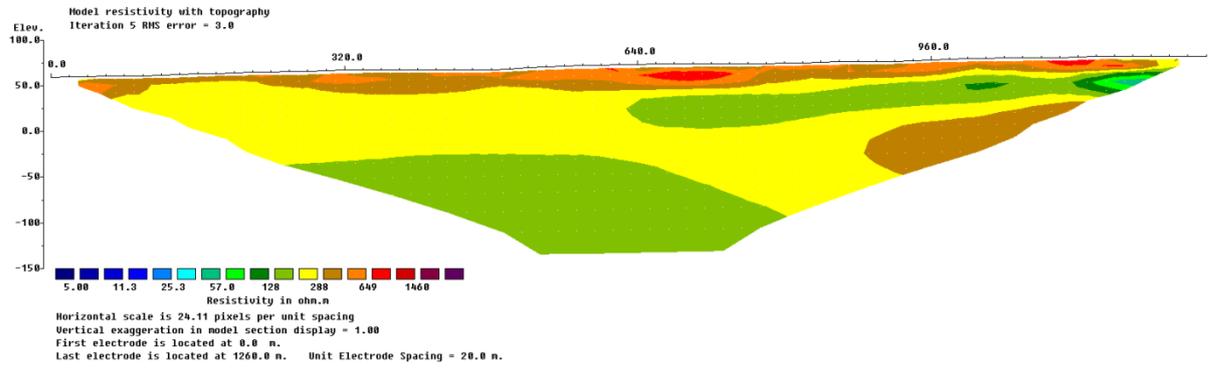
## Profil EF2 Wenner alpha, après filtrage



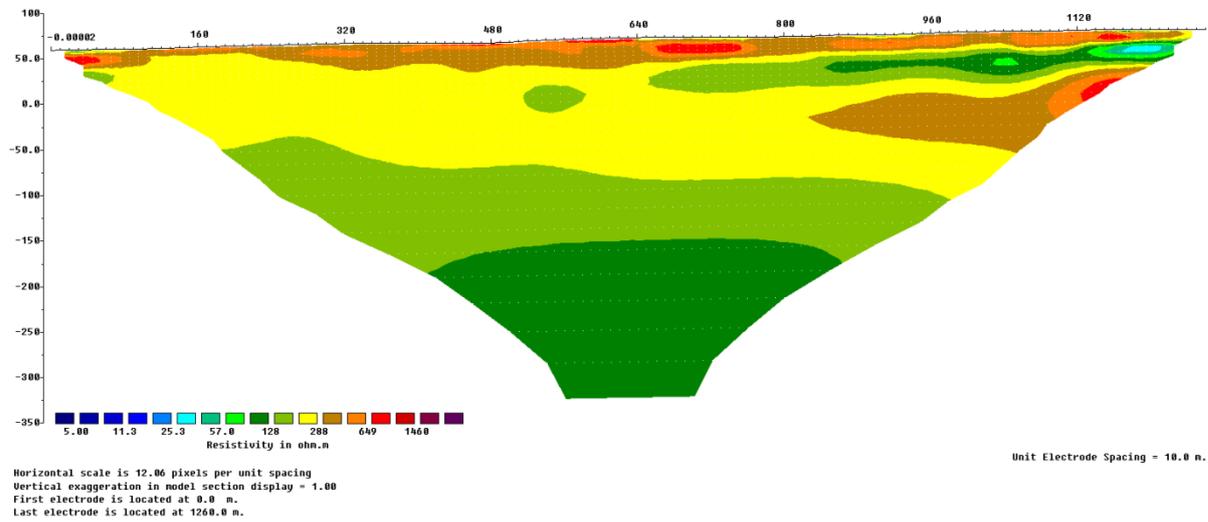
Profil EF2 PdP, après filtrage,



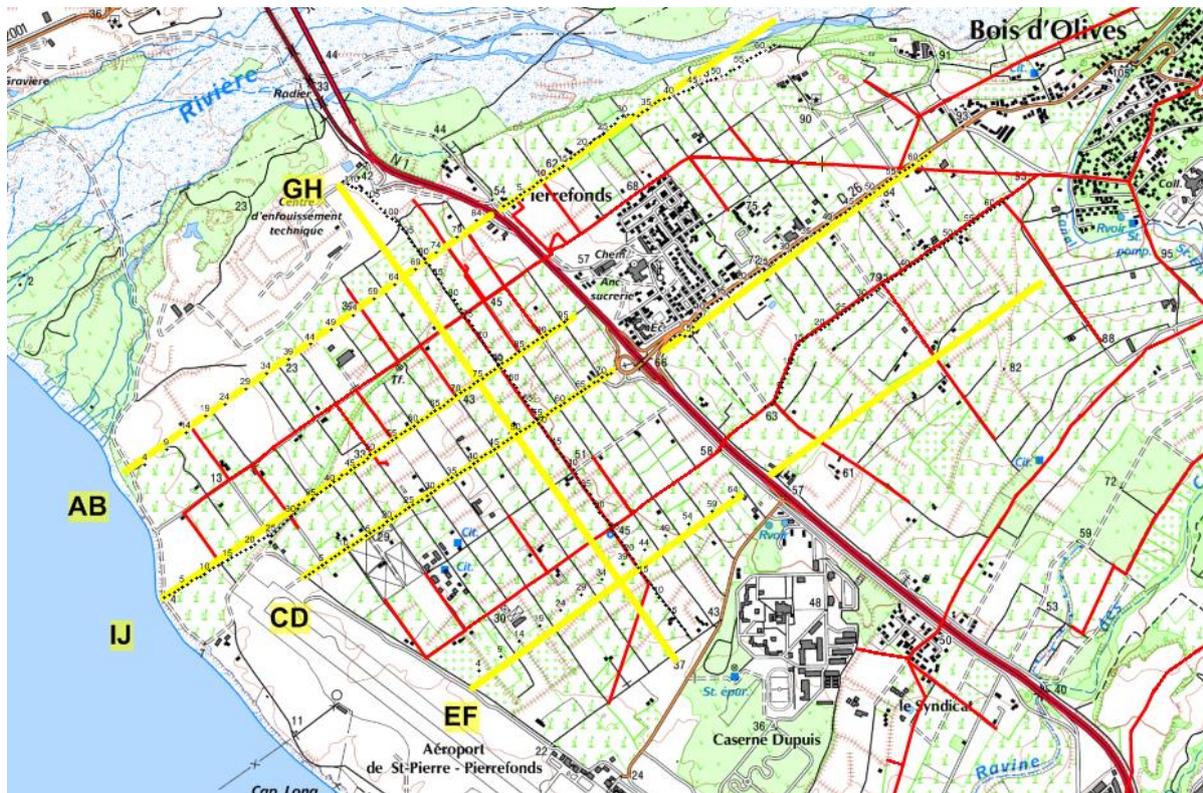
Profil EF2 Wenner, inversion préliminaire



Profil EF2 PdP, inversion préliminaire



Localisation



## **Annexe 8**

### **Compte-rendu d'analyse qualité du profil GH01-2-3-4**



L'ensemble des données pole-dipole (PdP) et Wenner du profil GH1-2-3-4 avec leur localisation a été réceptionnée le 20/03/2015 (envoi le 18/03/2015 mais pb de réception).

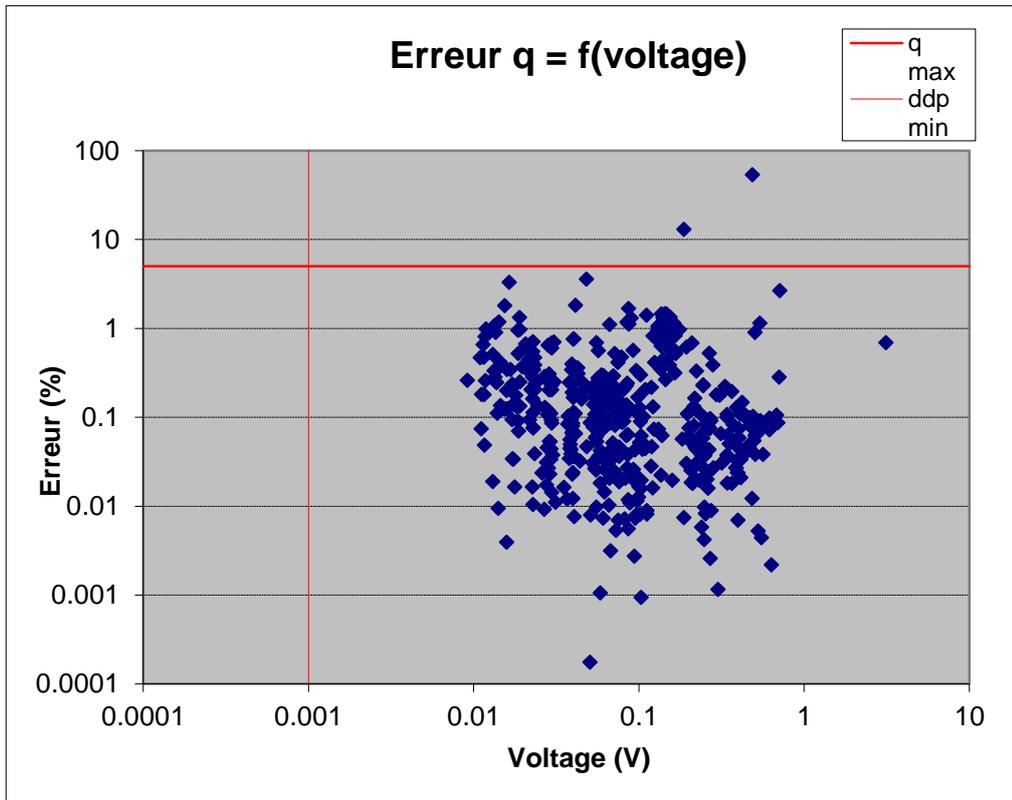
L'implantation du profil est conforme aux prévisions après déplacement de 80 m au NE en accord entre les parties suite à un problème de permutage (cf. carte en fin de document). Le profil GH suit un chemin d'exploitation qui est rejoint au SE par une canalisation en fonte 250 m après le début du profil (électrode 1).

L'électrode à l'infini est à au moins 3420 m de GH1-2-3-4.

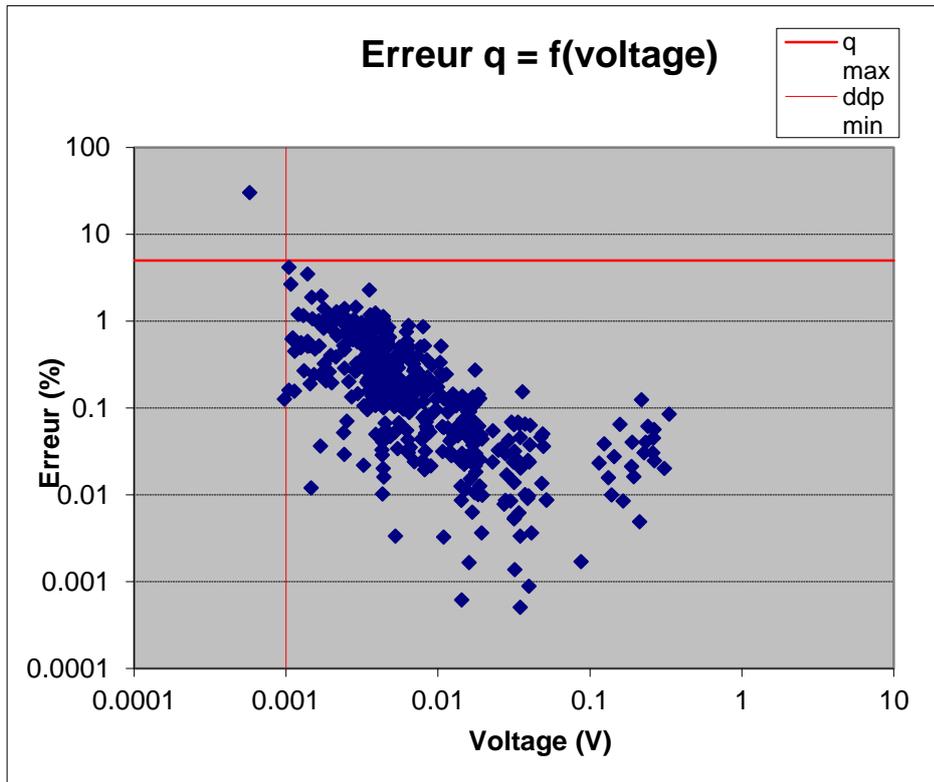
Un artefact affecte les mesures réalisées avec l'électrode 30 du Wenner GH1 et des mesures isolées sur le PdP avant de GH2. Ces artefacts bien isolés sont aisément filtrés et ne posent pas de problème. Il y a aussi des artefacts « courte longueur d'onde » moins apparents sur les sections GH4 mais qu'il faudra peut-être filtrer (en base de section en particulier).

**Les données mesurées (voltage, indice qualité) sont de bonne qualité.**

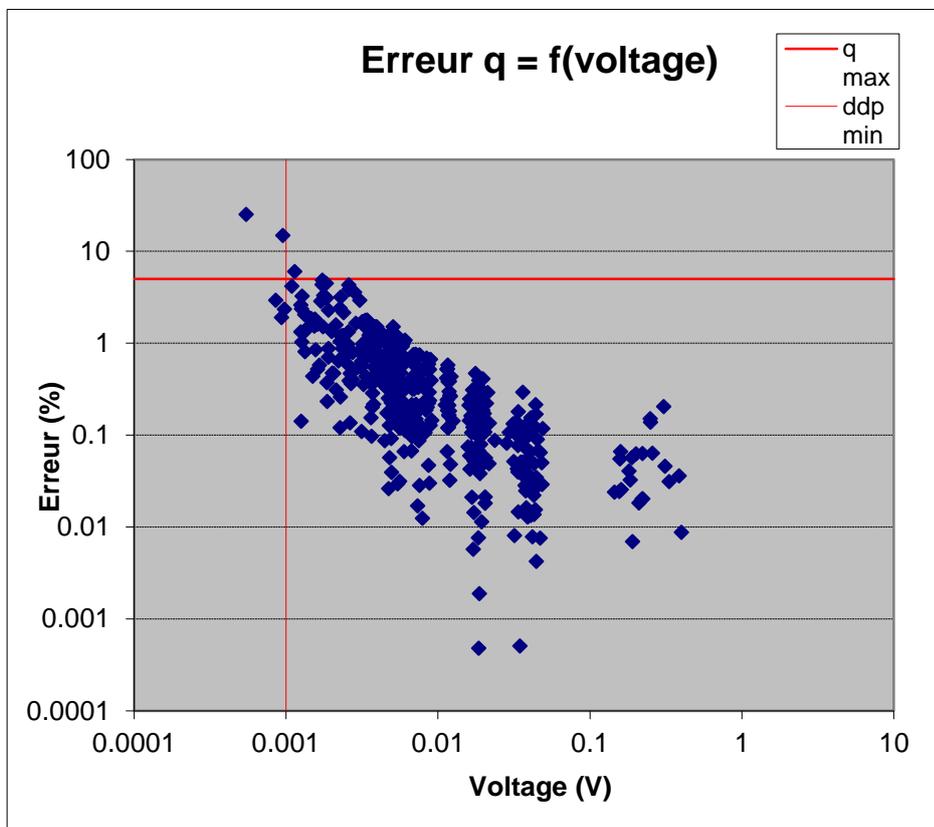
GH1 Wenner Alpha



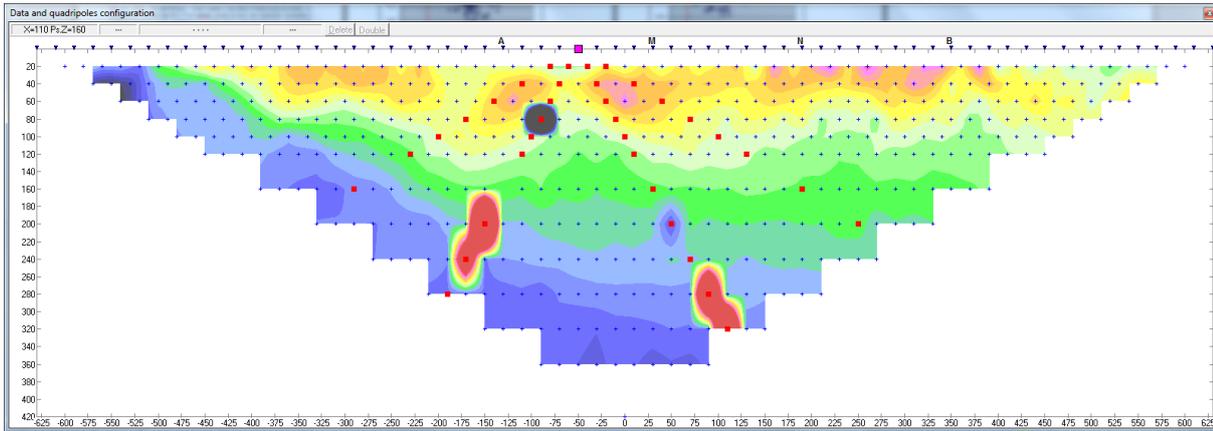
GH1 PdP- avant



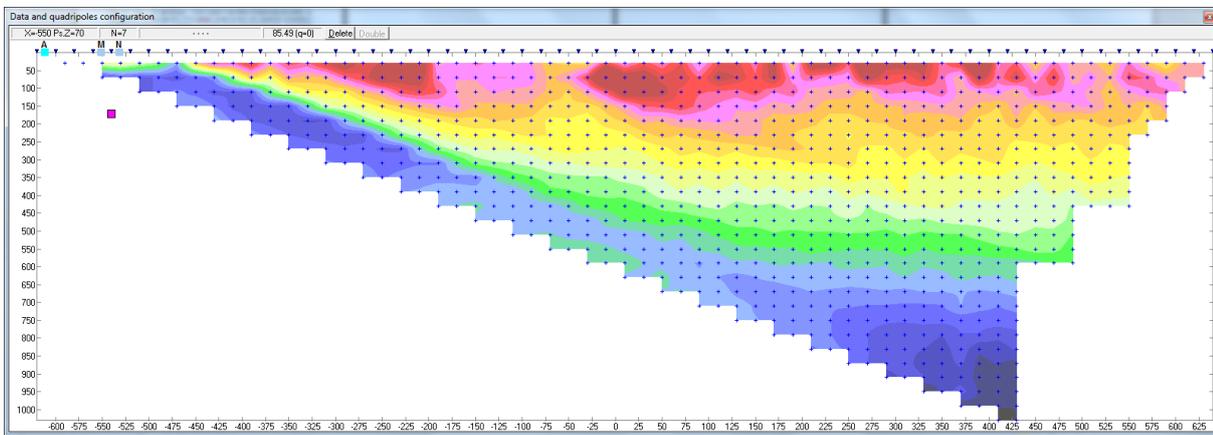
GH1 PdP- arrière



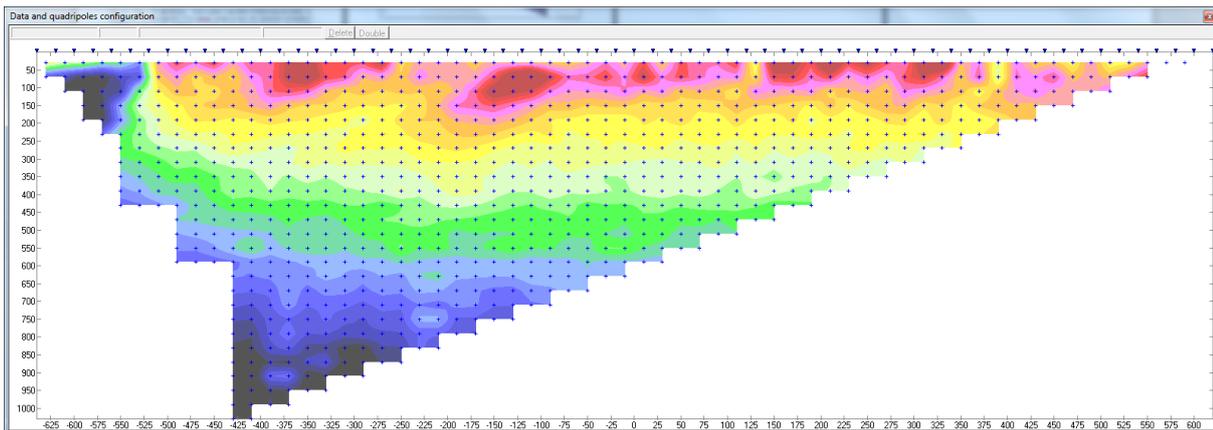
GH1 Wenner Alpha, avant filtrage (mesures correspondant à l'électrode 30 en rouge)



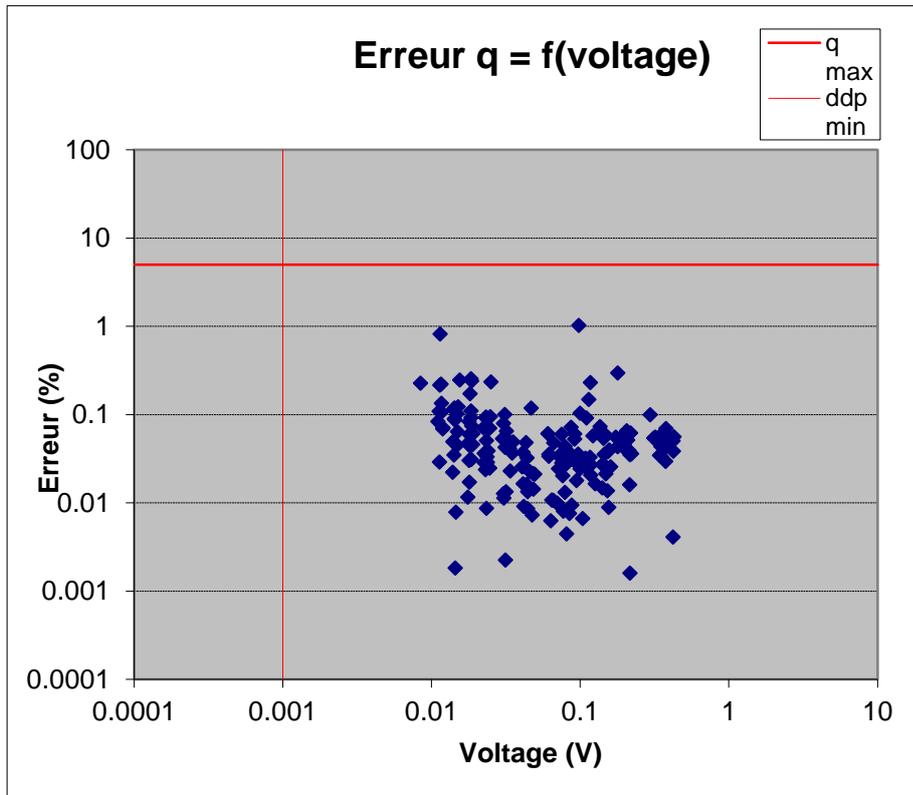
Profil GH1 PdP avant, avant filtrage



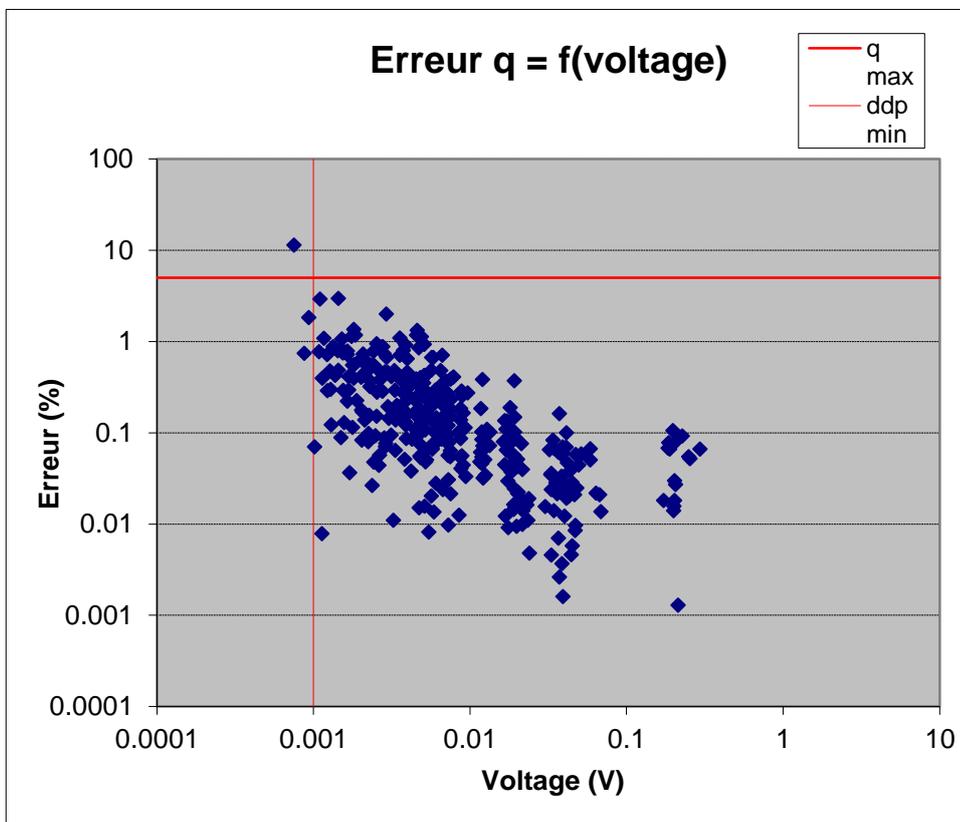
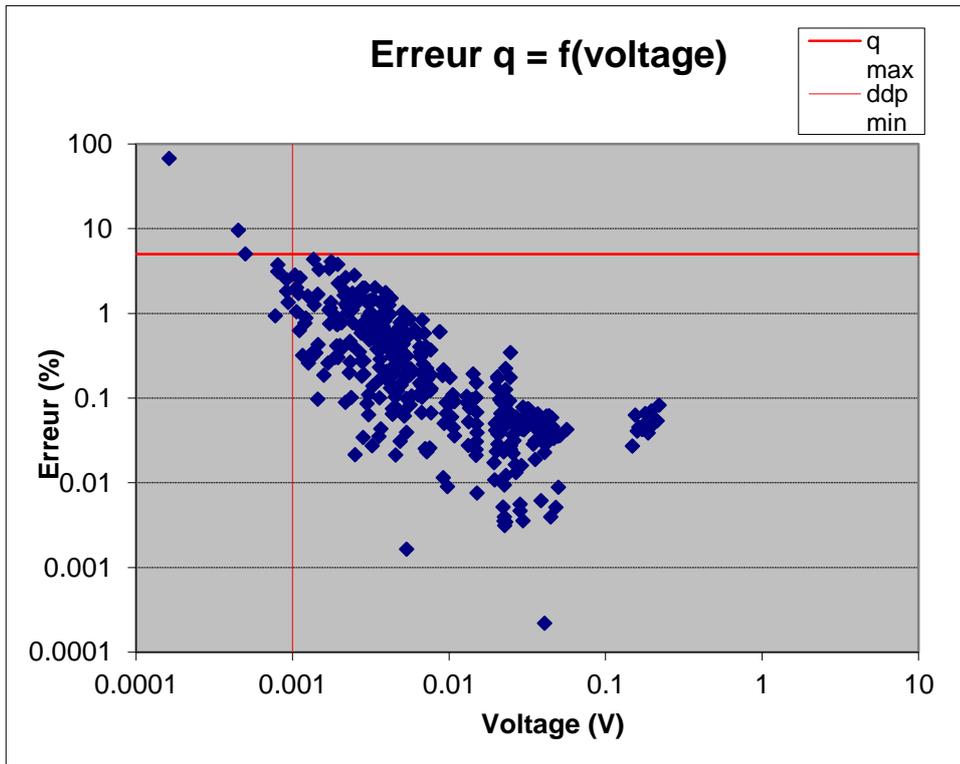
Profil GH1 PdP arrière, avant filtrage



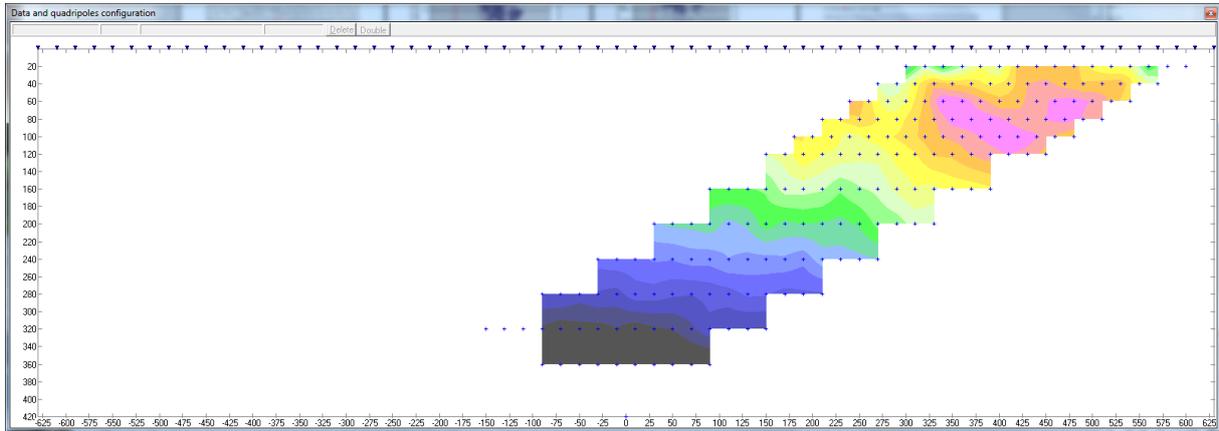
GH2 Wenner alpha



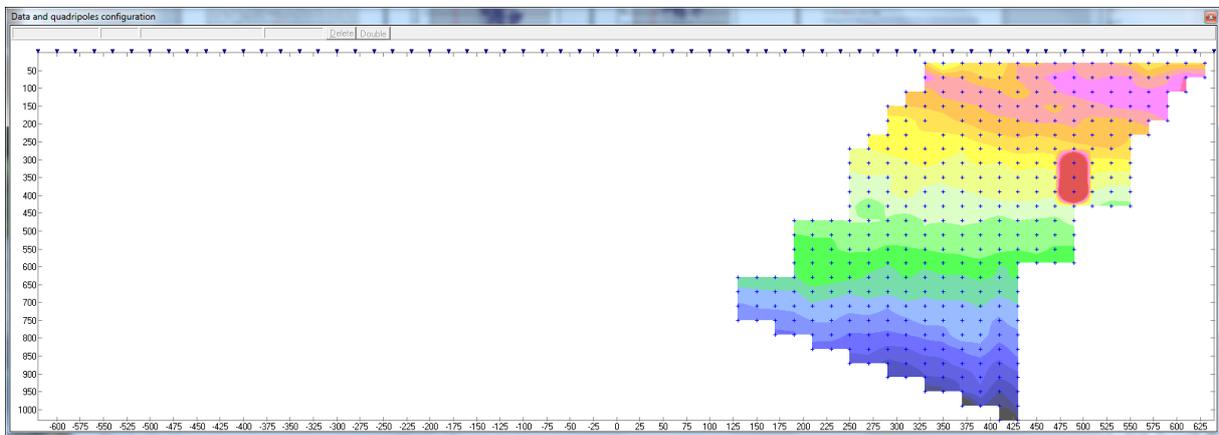
GH2 PdP avant (en haut), arrière (en bas)



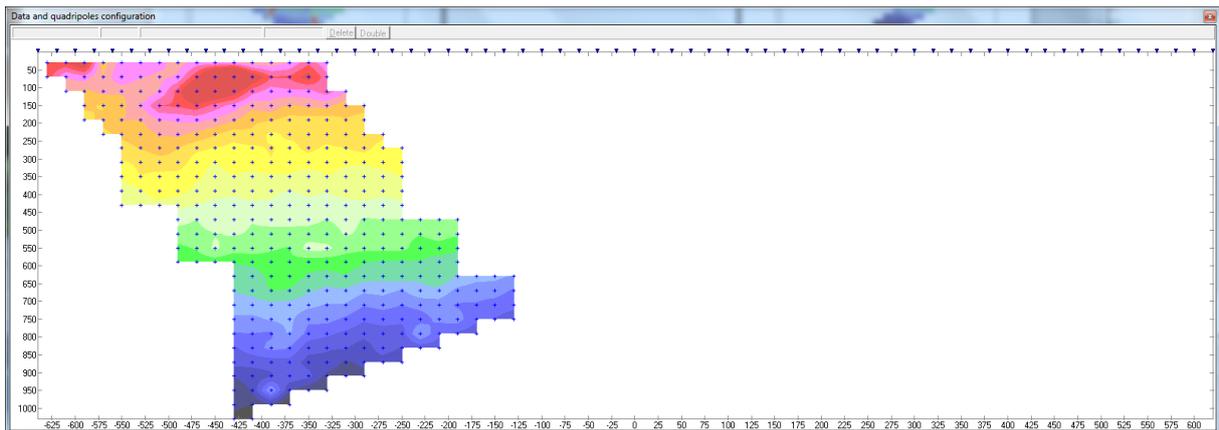
Profil GH2 Wenner alpha, avant filtrage



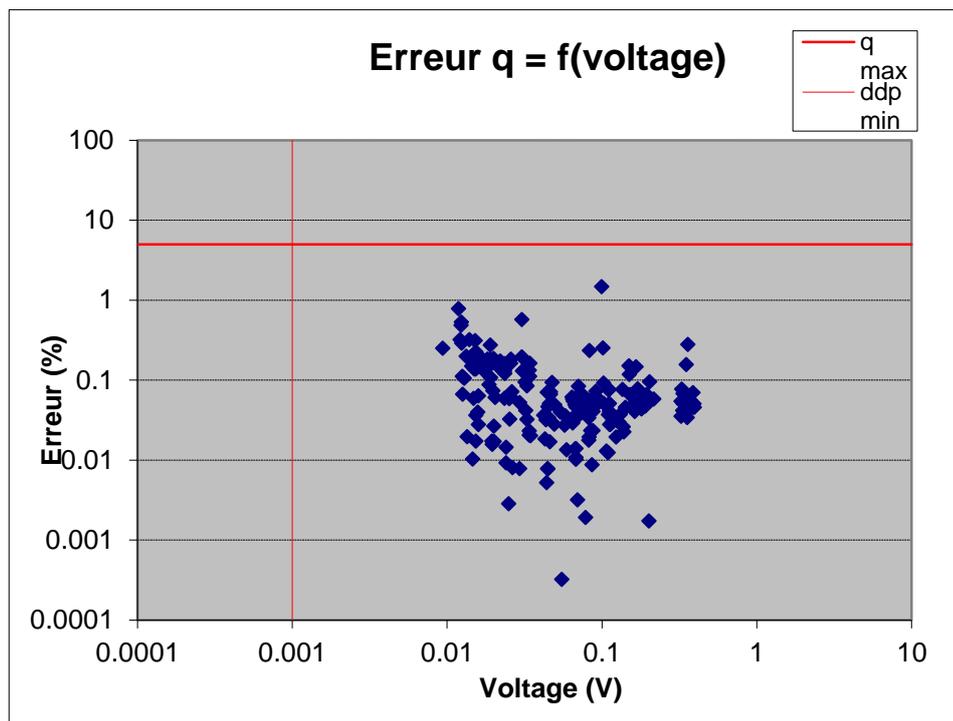
Profil GH2 PdP avant, avant filtrage



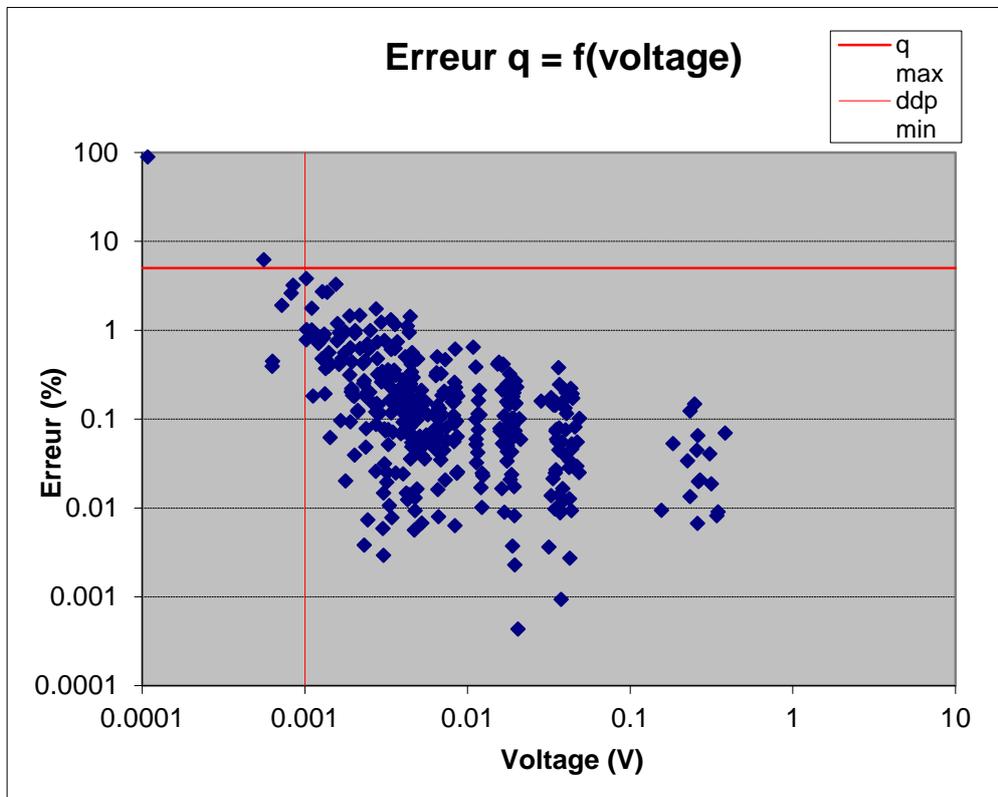
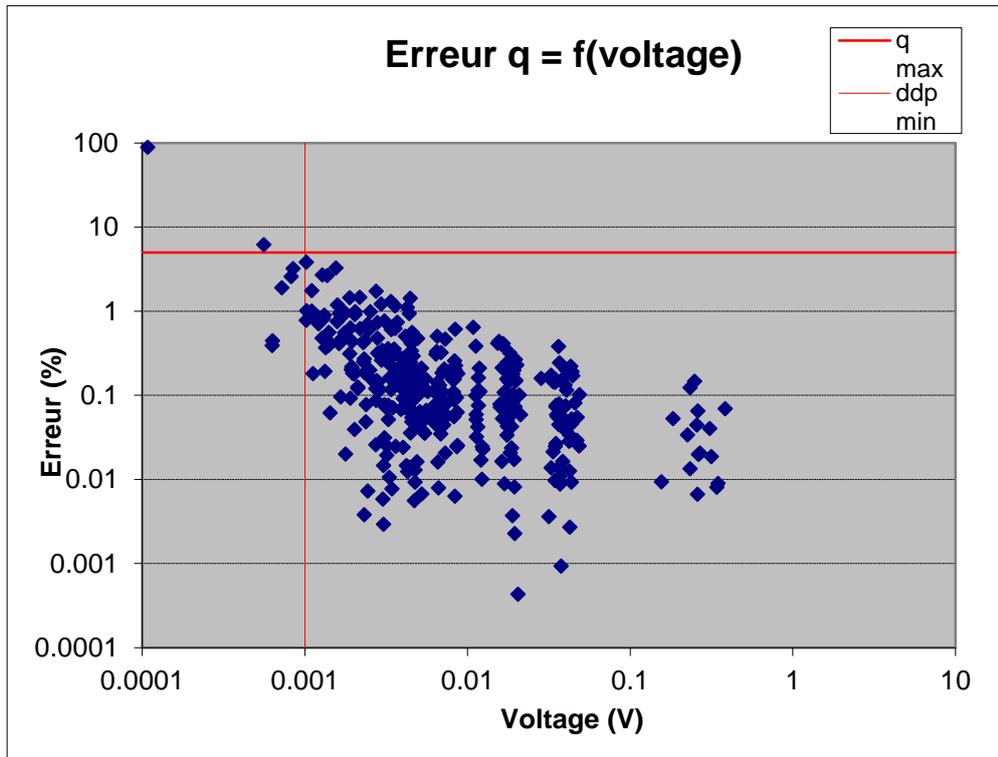
Profil GH2 PdP arrière, avant filtrage



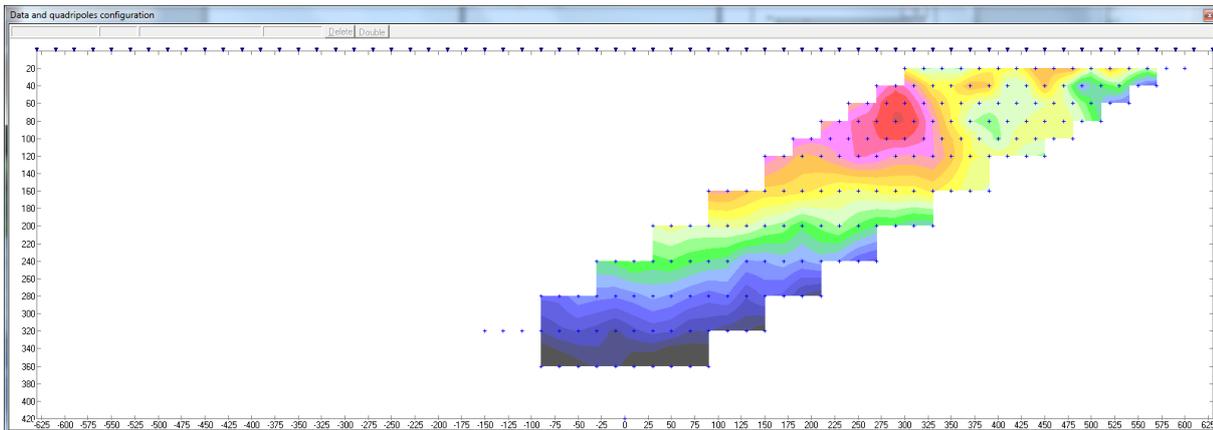
Profil GH3, Wenner Alpha



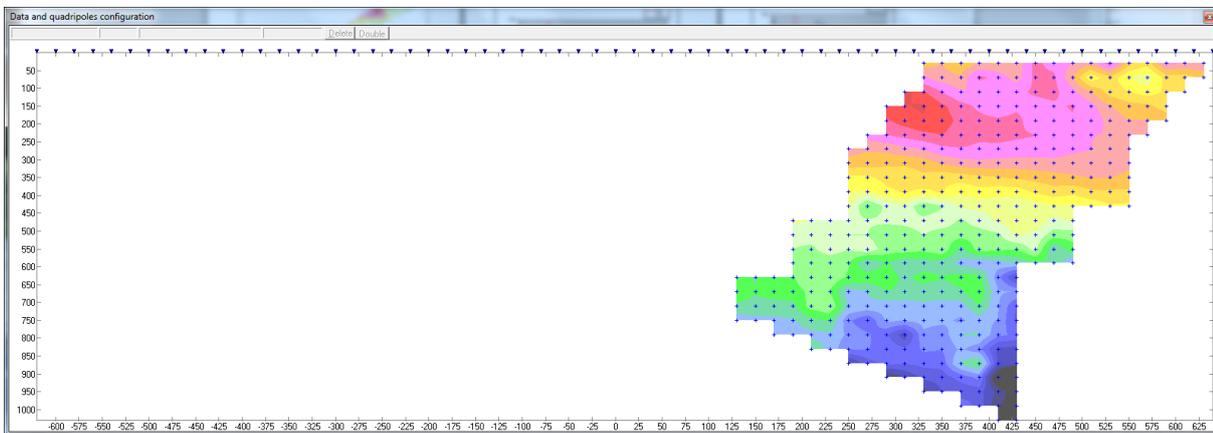
Profil GH3, PdP avant (en haut) et arrière (en bas)



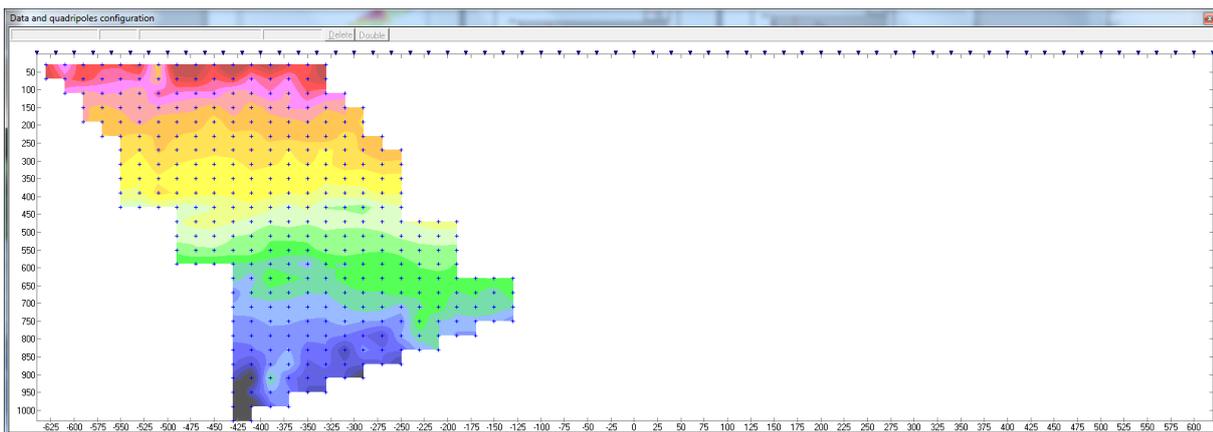
Profil GH3, Wenner alpha, avant filtrage



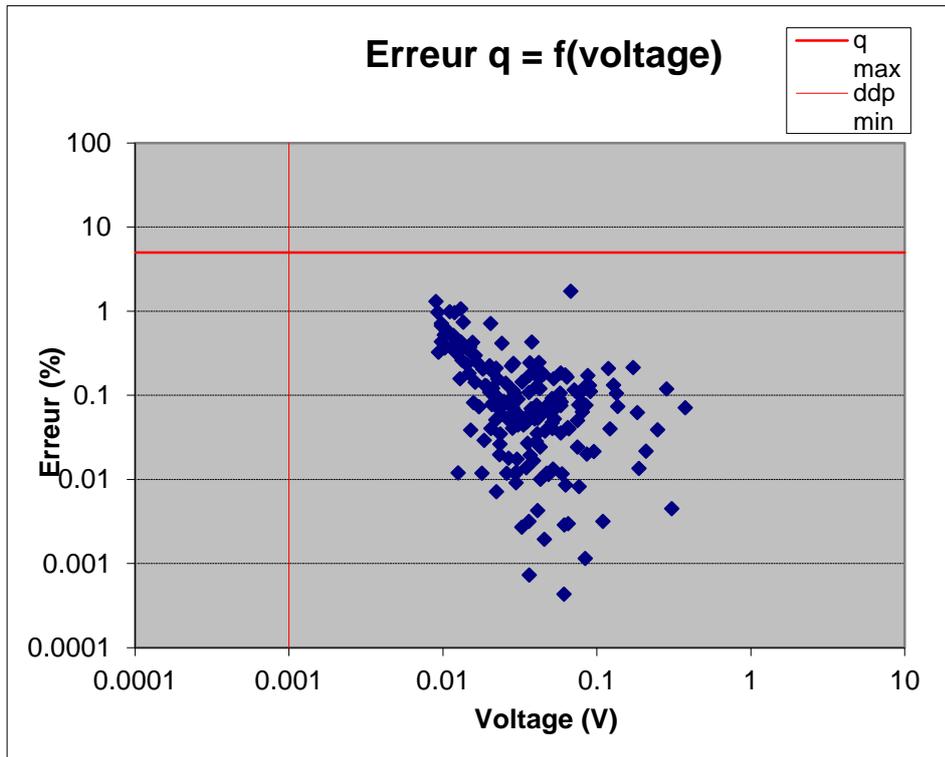
Profil GH3, PdP avant, avant filtrage



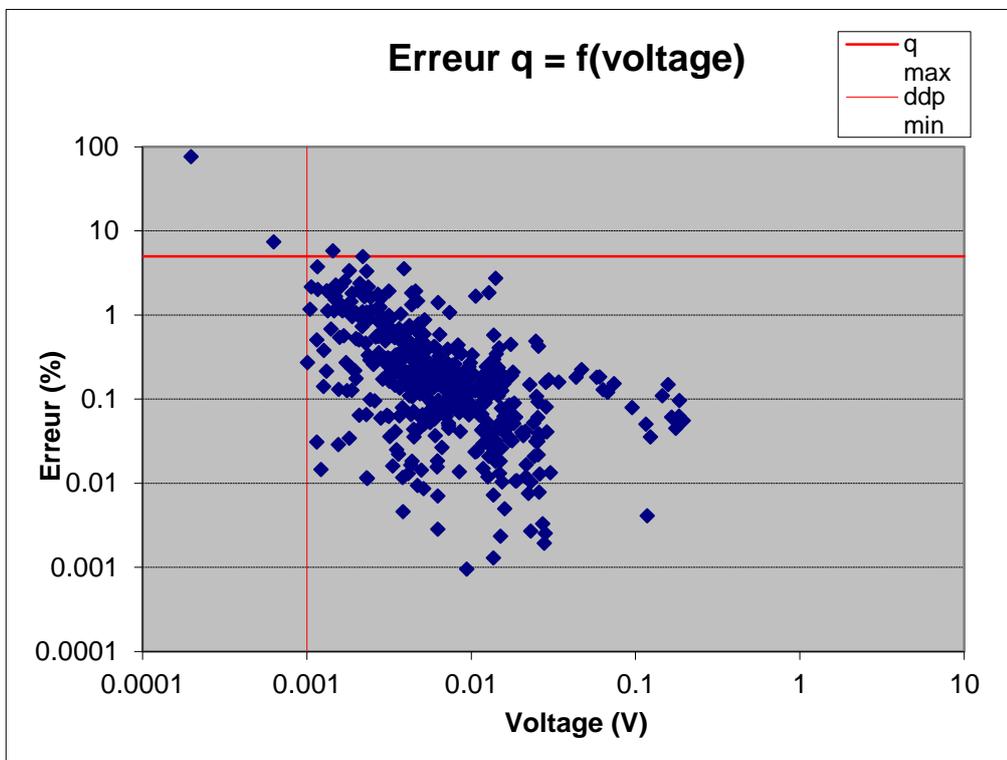
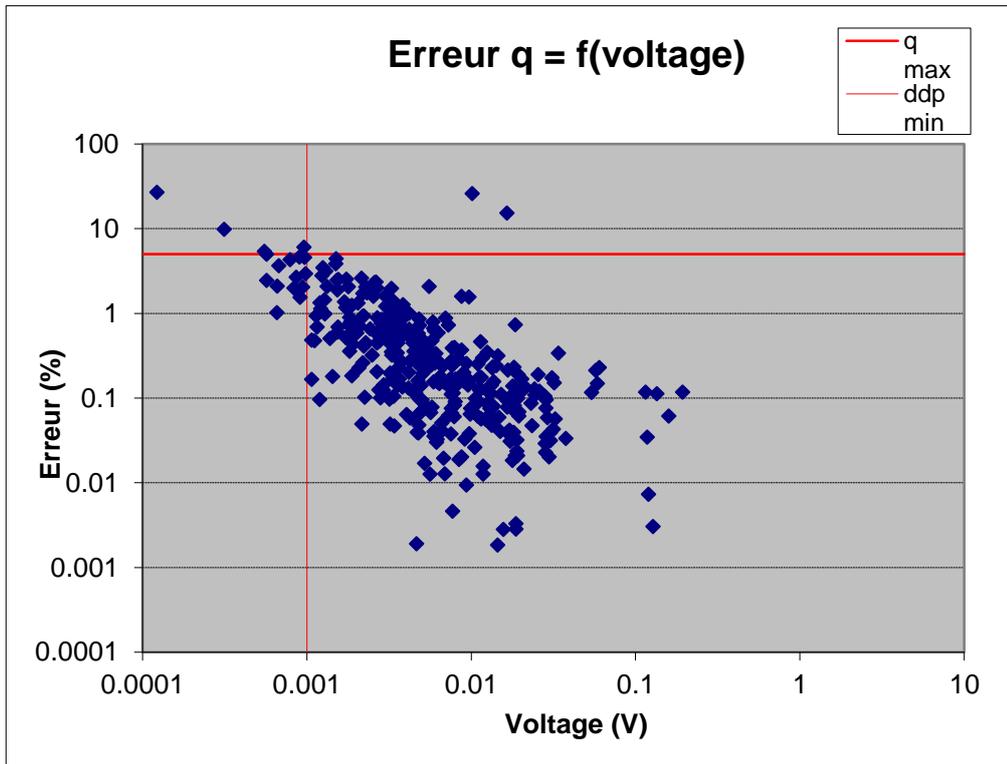
Profil GH3, PdP arrière, avant filtrage



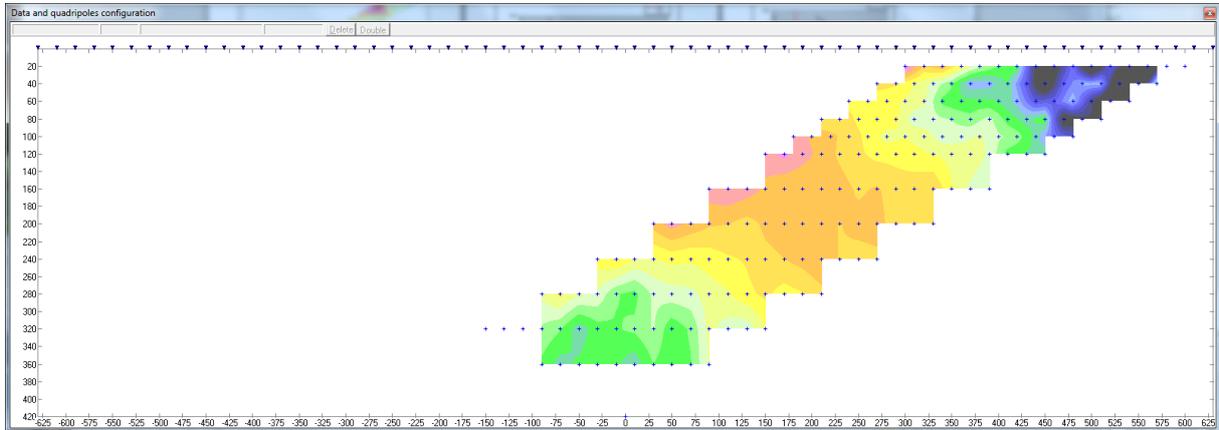
## Profil GH4, Wenner Alpha



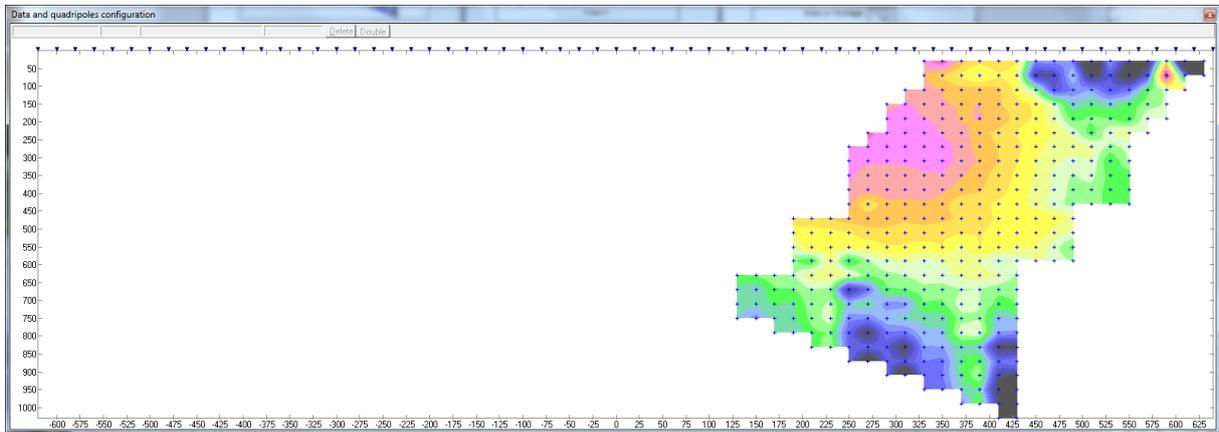
Profil GH4, PdP avant (en haut) et arrière (en bas)



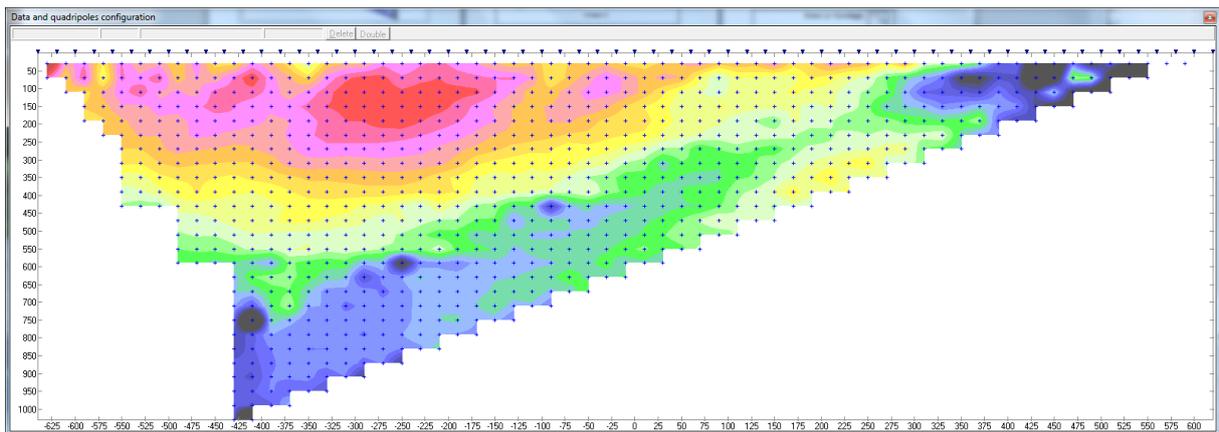
Profil GH4, Wenner alpha, avant filtrage



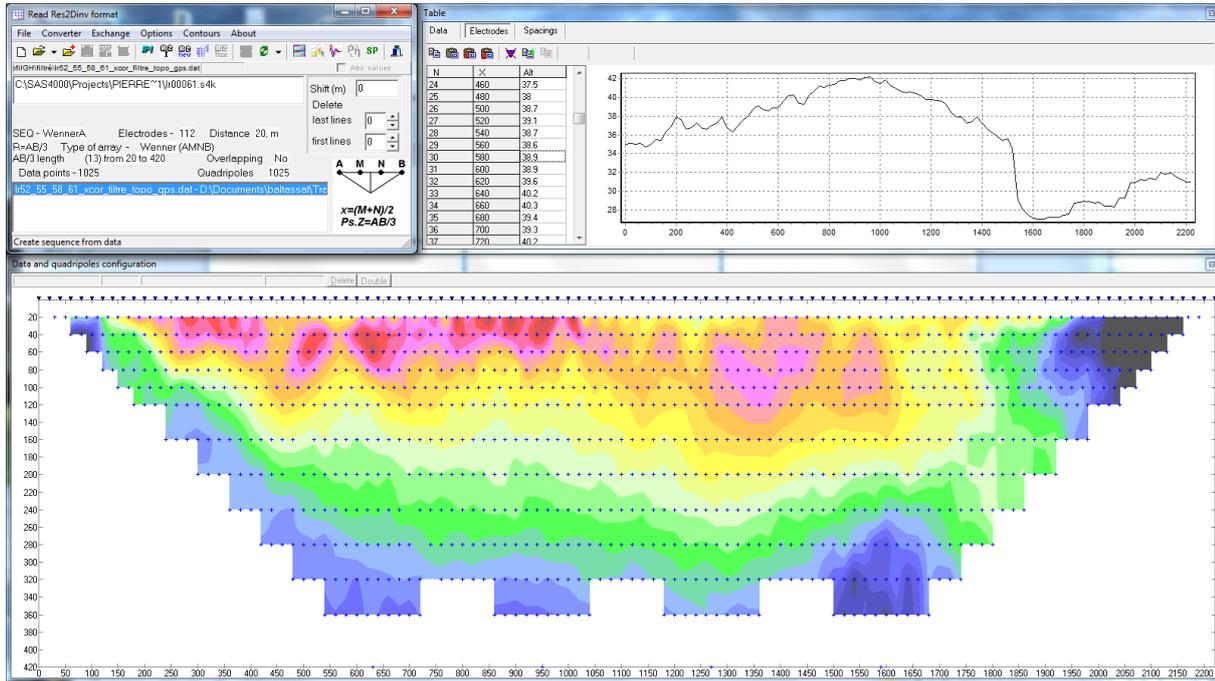
Profil GH4, PdP avant, avant filtrage



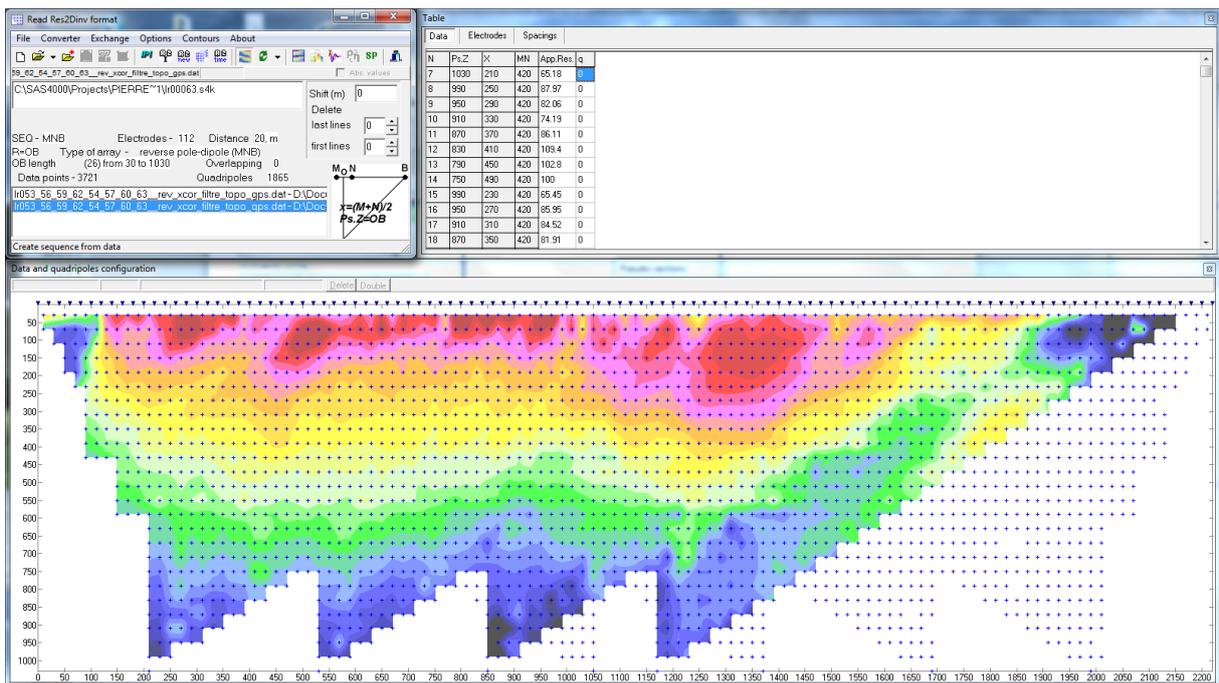
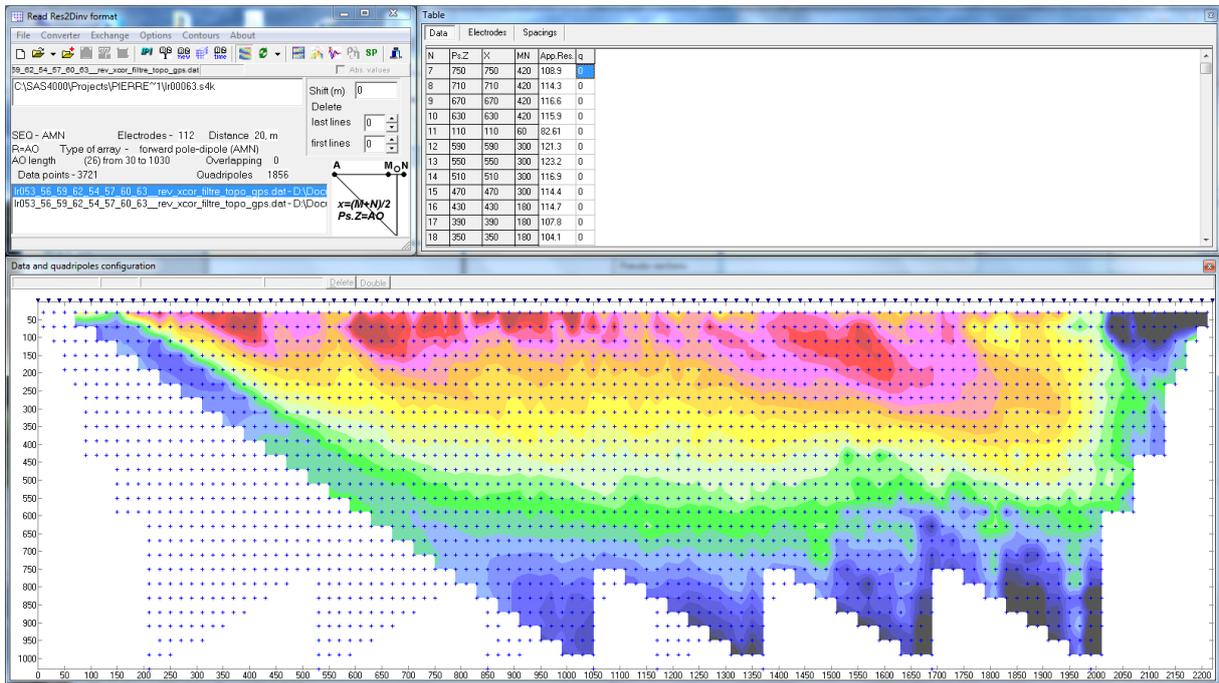
Profil GH4, PdP arrière, avant filtrage



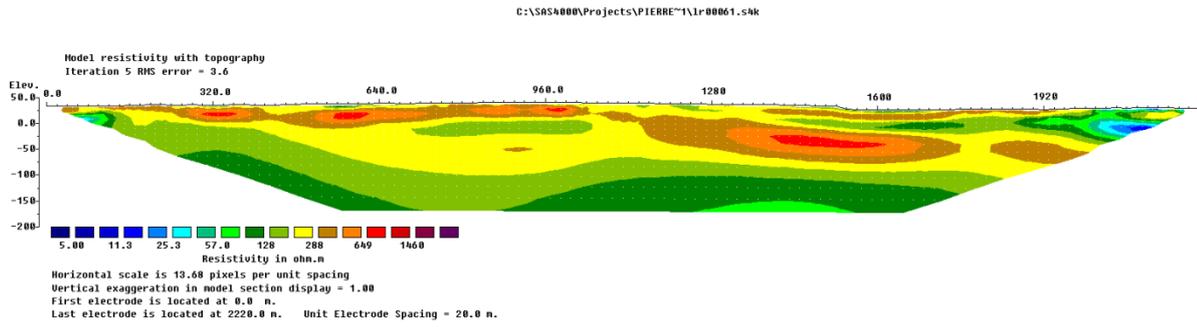
Profil GH1-2-3-4 Wenner alpha, après filtrage



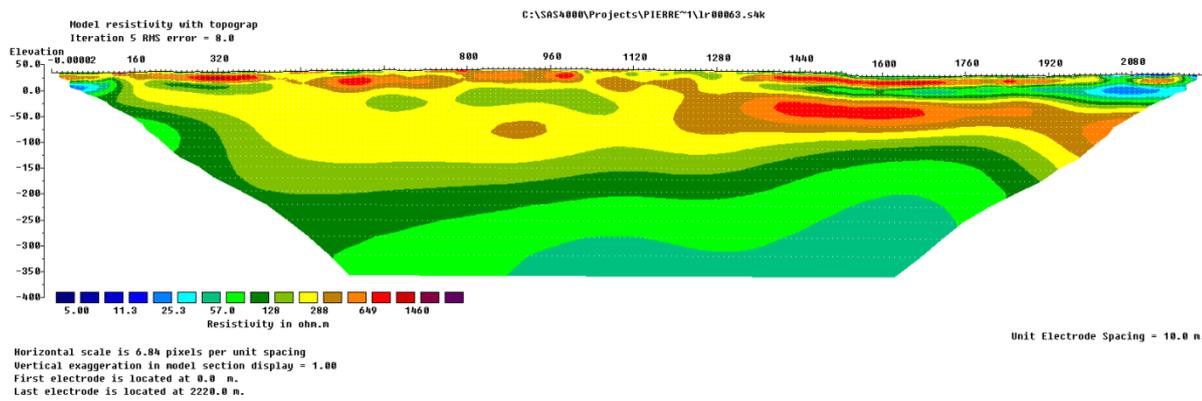
Profil GH01-2-3-4 PdP, après filtrage,



### Profil GH01-2-3-4 Wenner, inversion préliminaire

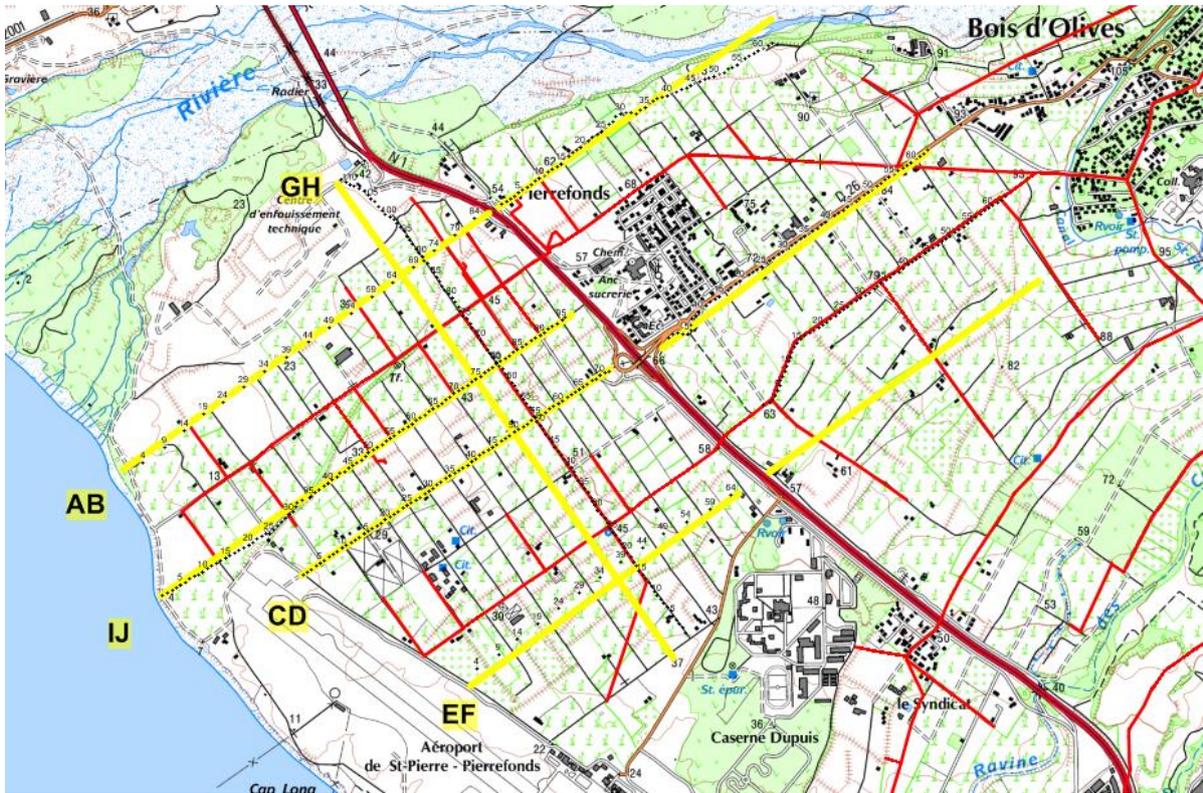


### Profil GH01-2-3-4 PdP, inversion préliminaire



### Profil TEM correspondant

Localisation





## **Annexe 9**

### **Compte-rendu d'analyse qualité du profil IJ01-02-03**



L'ensemble des données pole-dipole (PdP) et Wenner du profil IJ01-2-3 avec leur localisation a été réceptionnée le 16/03/2015 (envoi le 04/03/2015 et envois partiels antérieurs mais pb de réception des dernières livraisons).

L'implantation du profil est conforme aux prévisions (cf. carte en fin de document).

L'électrode à l'infini est à au moins 4560 m de IJ01-2-3.

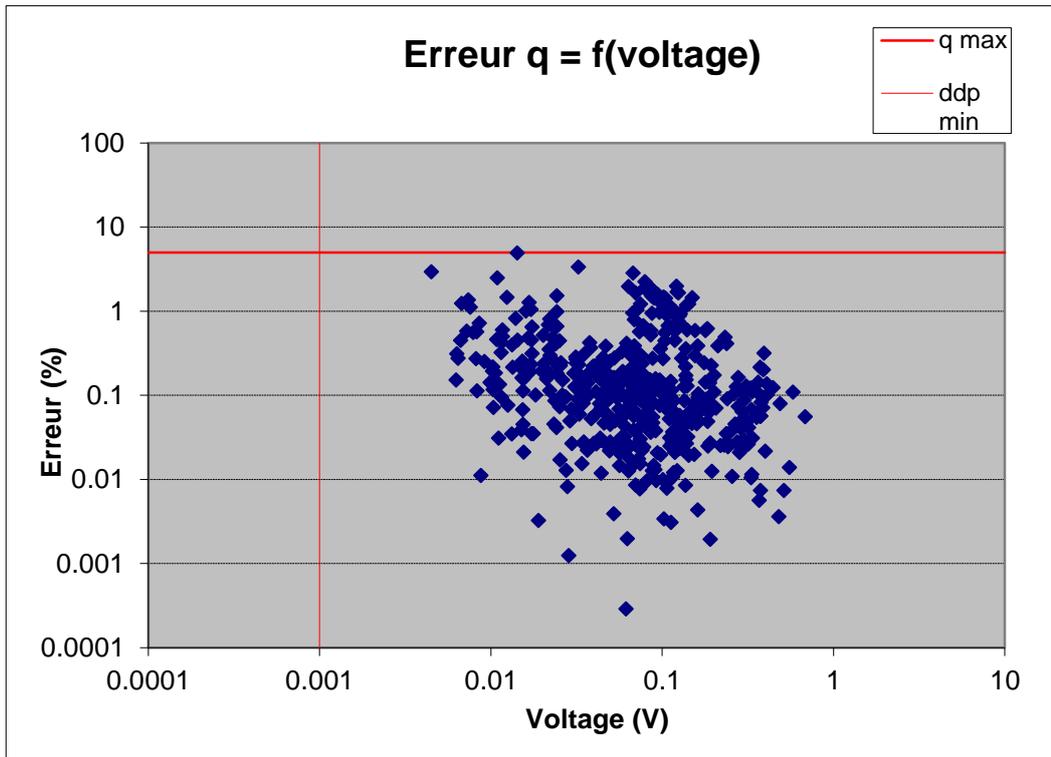
Les mesures avec les électrodes 50 et 54 (marquées en rouge sur le Wenner alpha et le PdP arrière) sont potentiellement affectées par des artefacts de mesure qui sont toutefois moins apparents que sur les profils CD. Ce pourraient aussi être des réponses de contacts dans le sous-sol superficiel, très contrastés ou des canalisations intersectées (les positions d'électrodes 50 et 54 correspondent à des canalisations). Ces artefacts génèrent apparemment des perturbations limitées en profondeur. Toutefois, il est recommandé de retirer ces mesures et d'analyser l'effet sur le résultat d'inversion. A priori l'ajustement devrait être amélioré. Il est intéressant de regarder si le résultat en profondeur est affecté. Des effets similaires mais moins marqués sont observés au niveau des électrodes 71 et 81 qui sont proches de la position de canalisation. Il serait utile que STRATAGEM précise les positions des canalisations par rapport à ses implantations d'électrode à partir de ses carnets de terrain et de relevés par détecteur EM sur ces positions.

La mesure PdP IJ01 présente globalement un niveau de signal significativement plus bas et un facteur qualité significativement moins bon qu'à l'habitude avec des mesures assez nombreuses inférieures à 0.001 mV et des facteurs qualité supérieurs à 10. Ces mesures doivent être retirées. D'une manière générale les graphes qualités des mesures PdP avant sont moins bonnes que celles des PdP arrière : quelle explication à cela ?

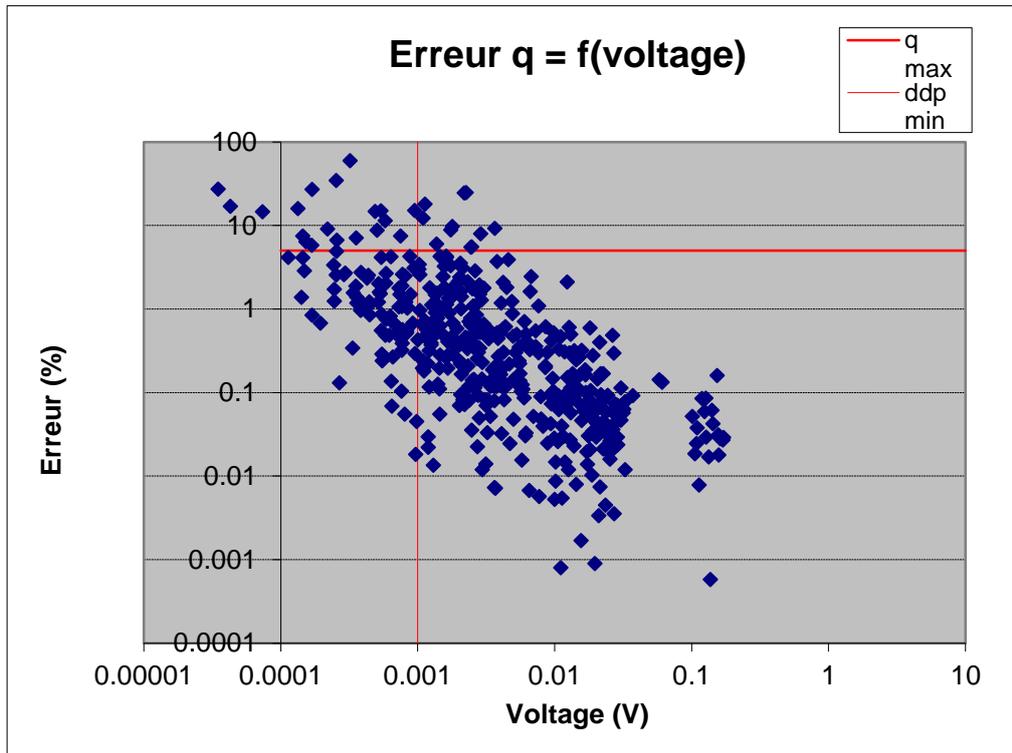
Les résultats préliminaires d'inversion montrent un conducteur profond en cohérence avec les cibles recherchées.

Sous réserve que les éléments complémentaires à produire par STRATAGEM974, les tests de filtrage et les résultats d'inversion après filtrage plus approfondi n'apportent pas d'éléments nouveaux significatifs invalidant cette analyse préliminaire, **l'acquisition des tomographies IJ01-2-3 est validée.**

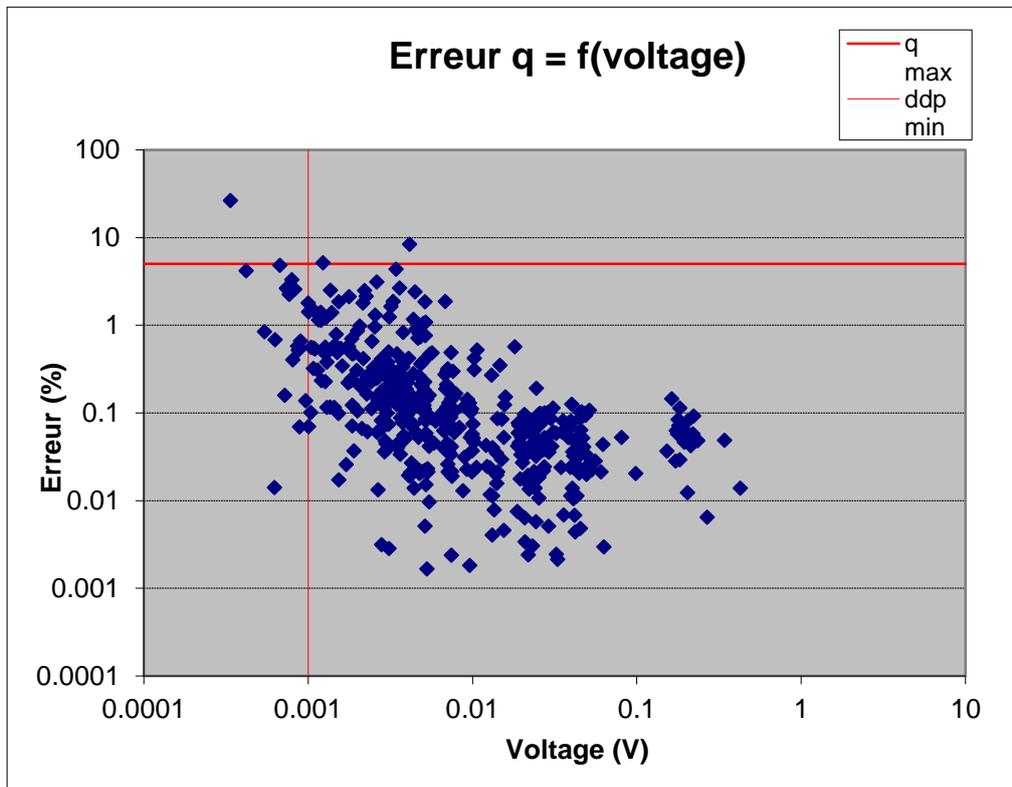
IJ1 Wenner Alpha



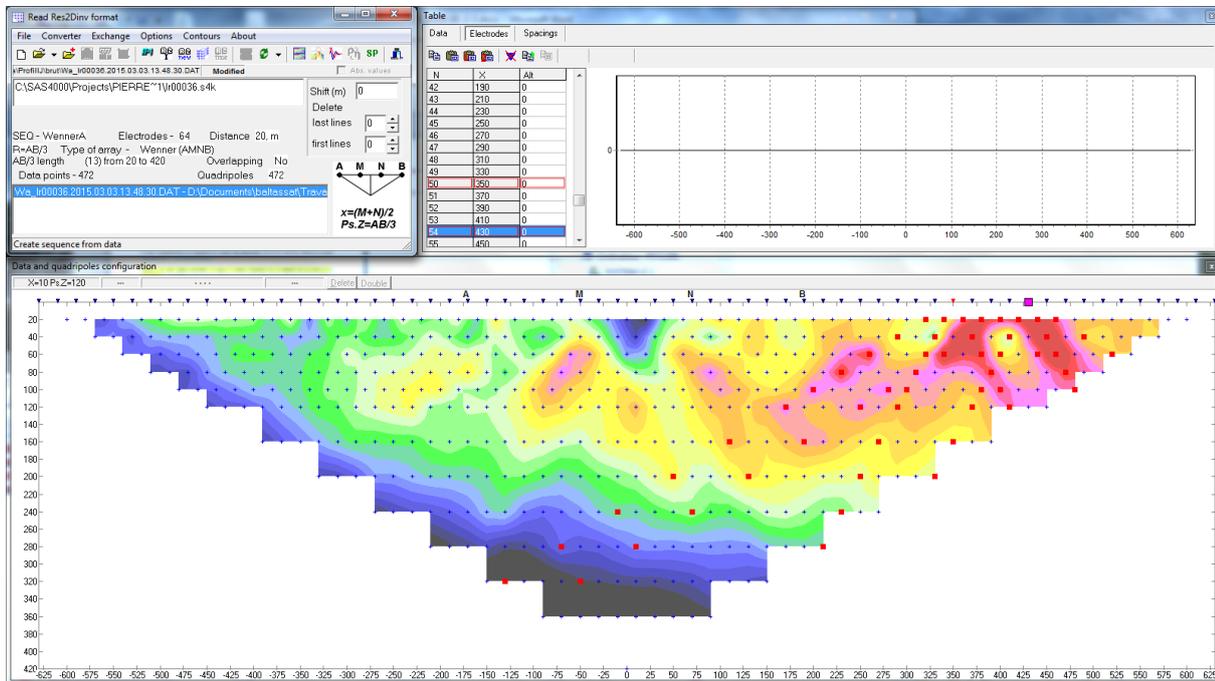
IJ1 PdP- avant



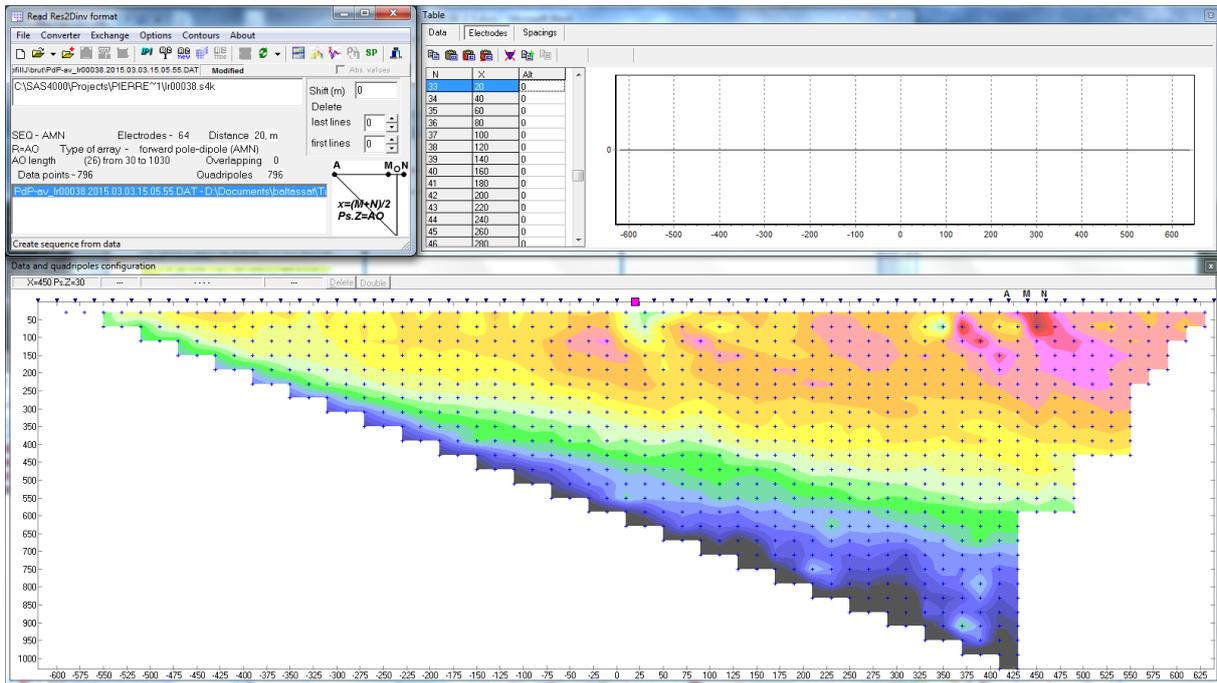
IJ1 PdP- arrière



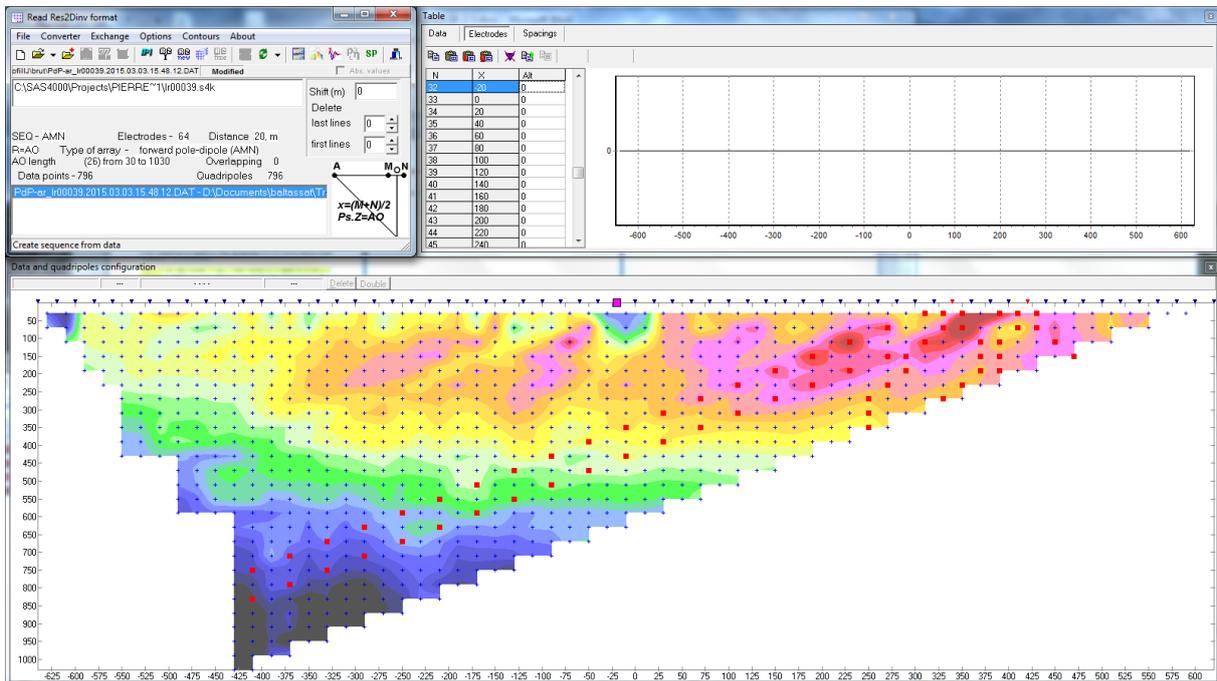
Profil IJ1 Wenner Alpha avant filtrage (mesures correspondant aux électrodes 50 et 54 en rouge).



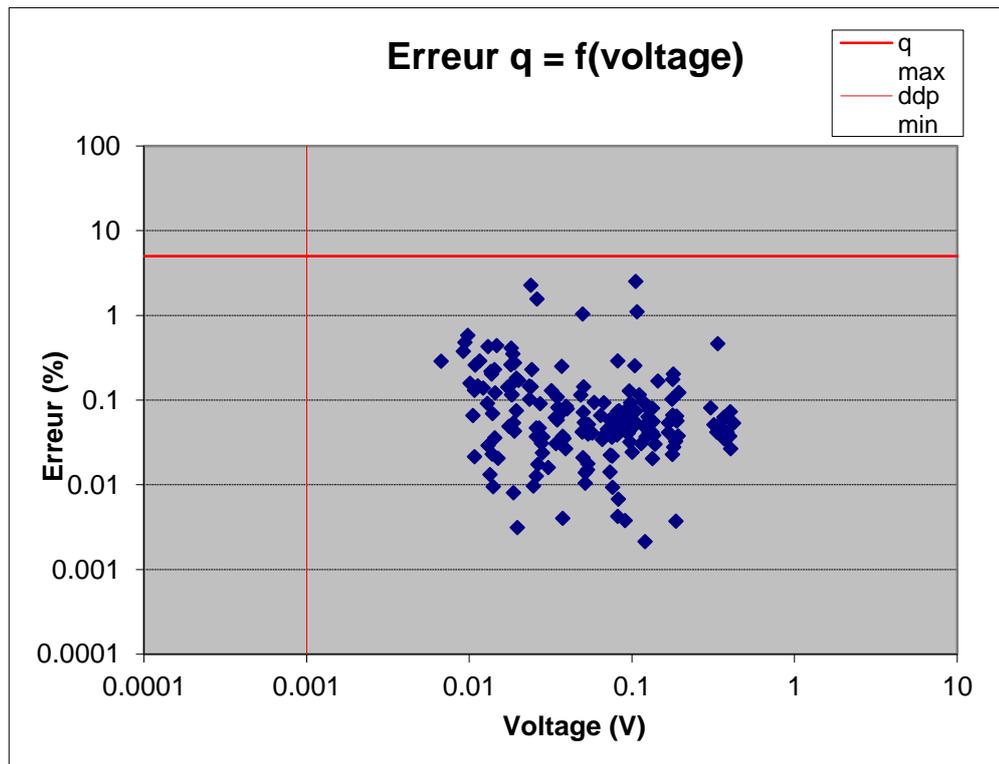
## Profil IJ1 PdP avant, avant filtrage



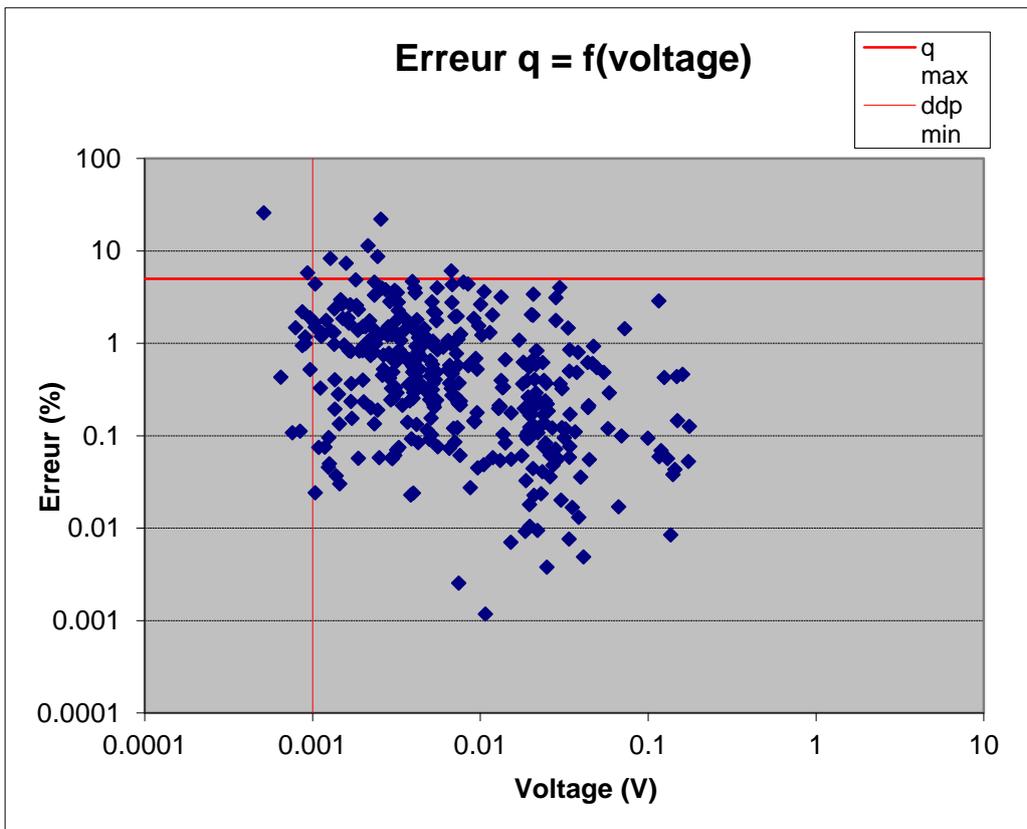
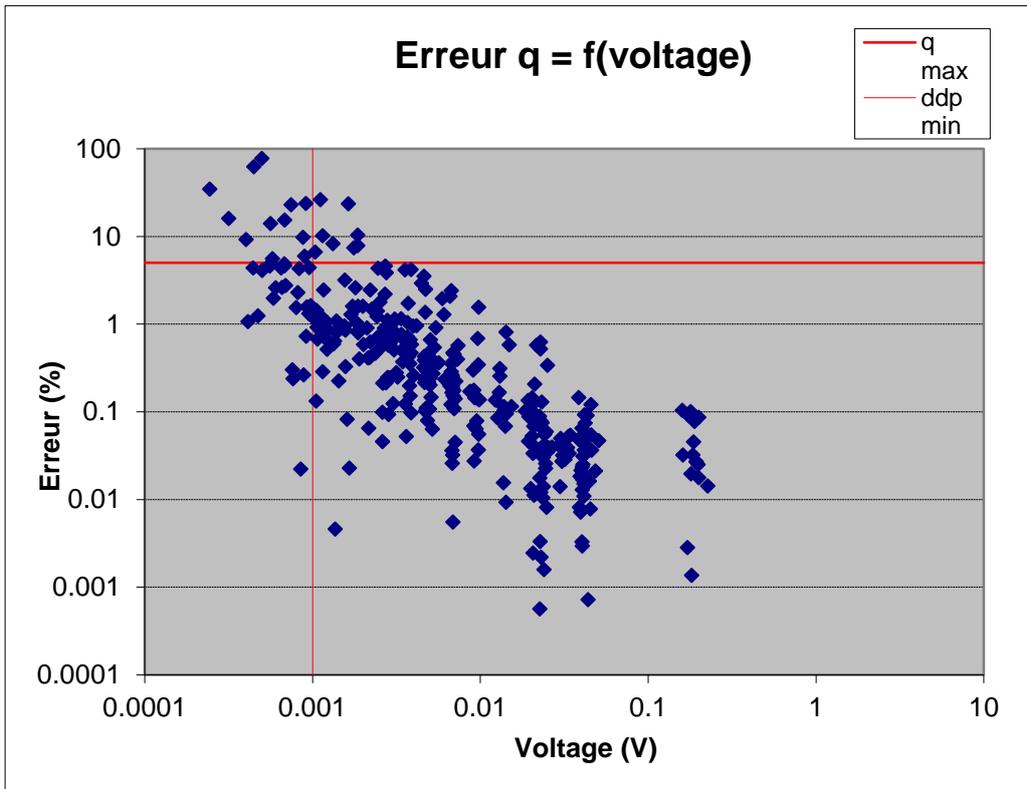
## Profil IJ1 PdP arrière, avant filtrage (mesures correspondant aux électrodes 50 et 54 en rouge).



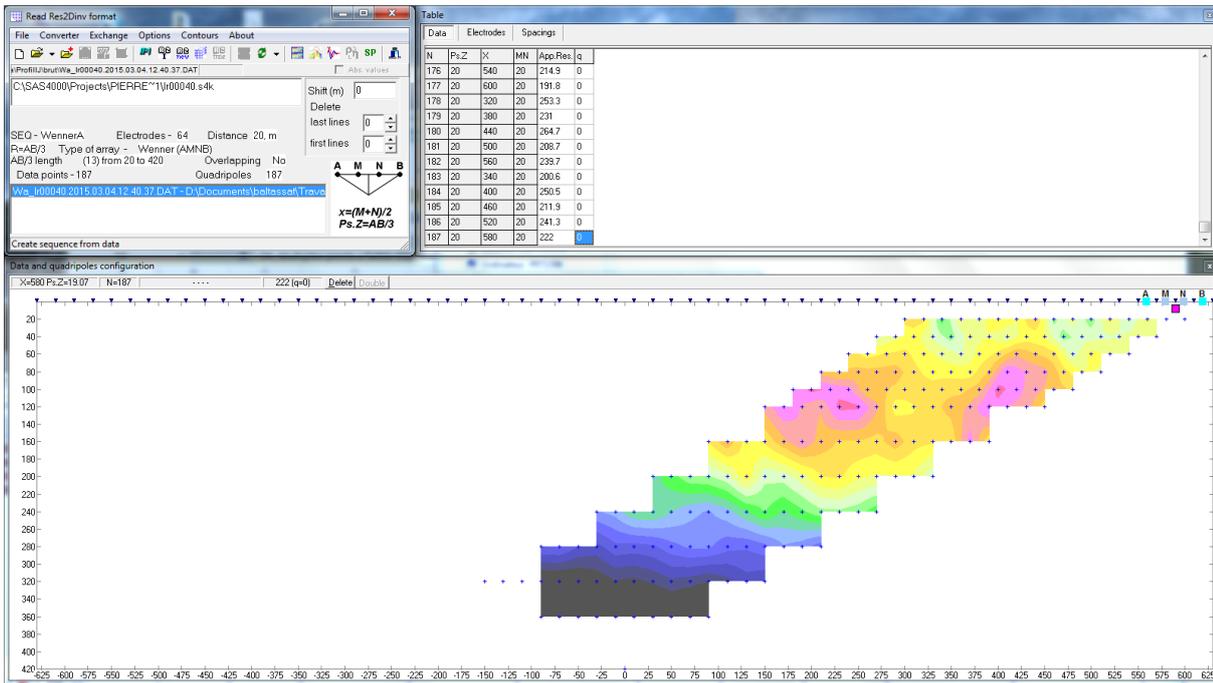
IJ2 Wenner alpha



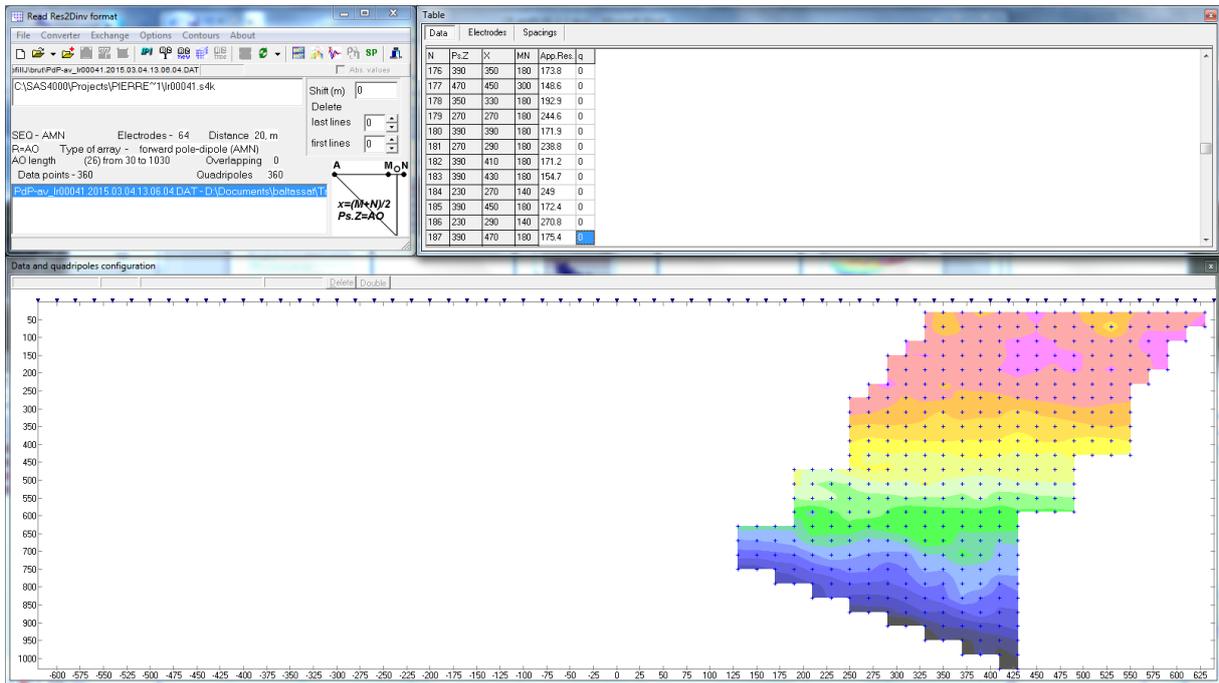
IJ2 PdP avant (en haut), arrière (en bas)



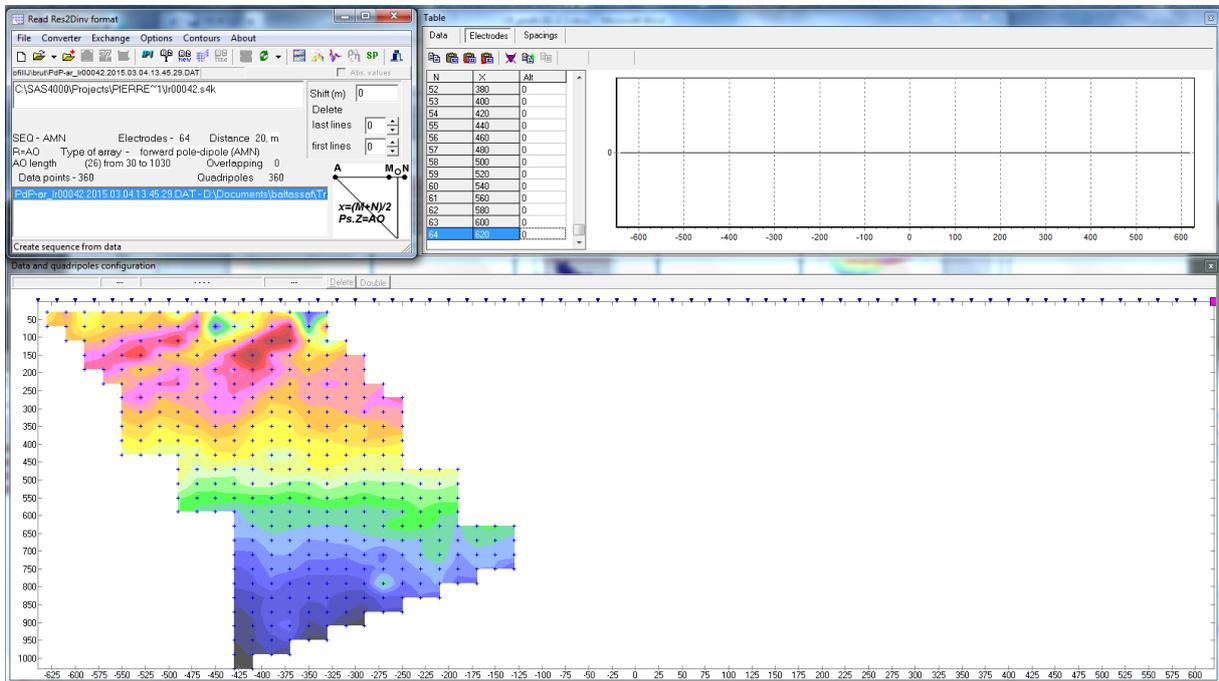
Profil IJ2 Wenner alpha, avant filtrage



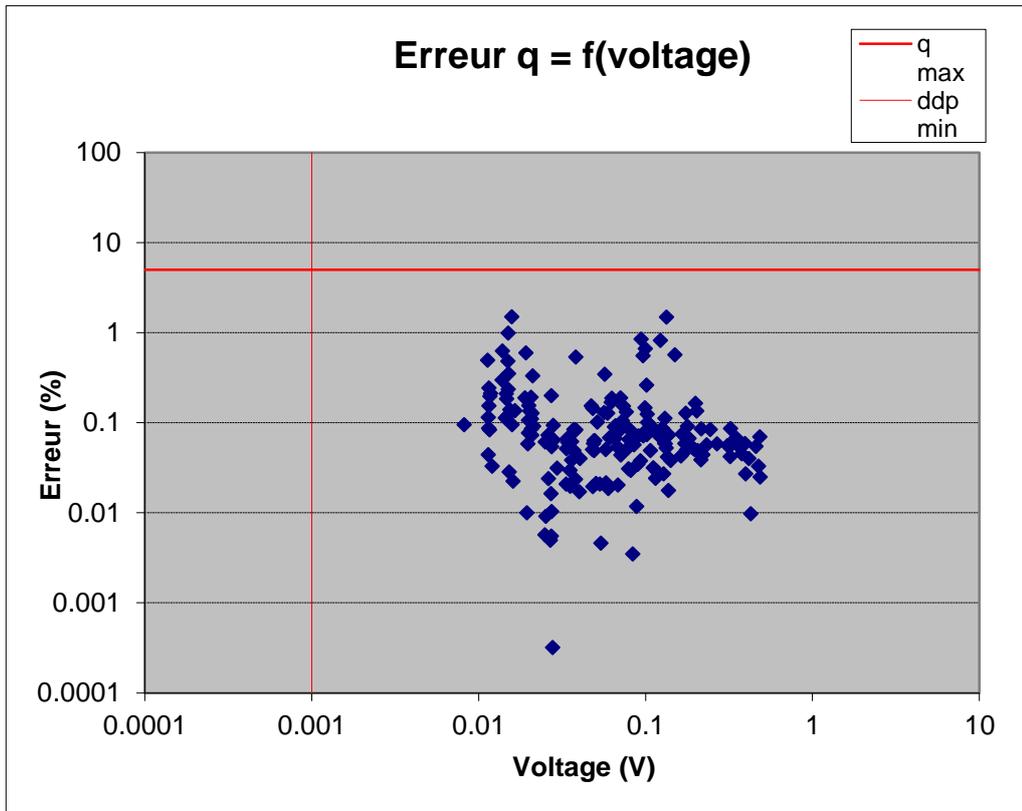
Profil IJ2 PdP avant, avant filtrage



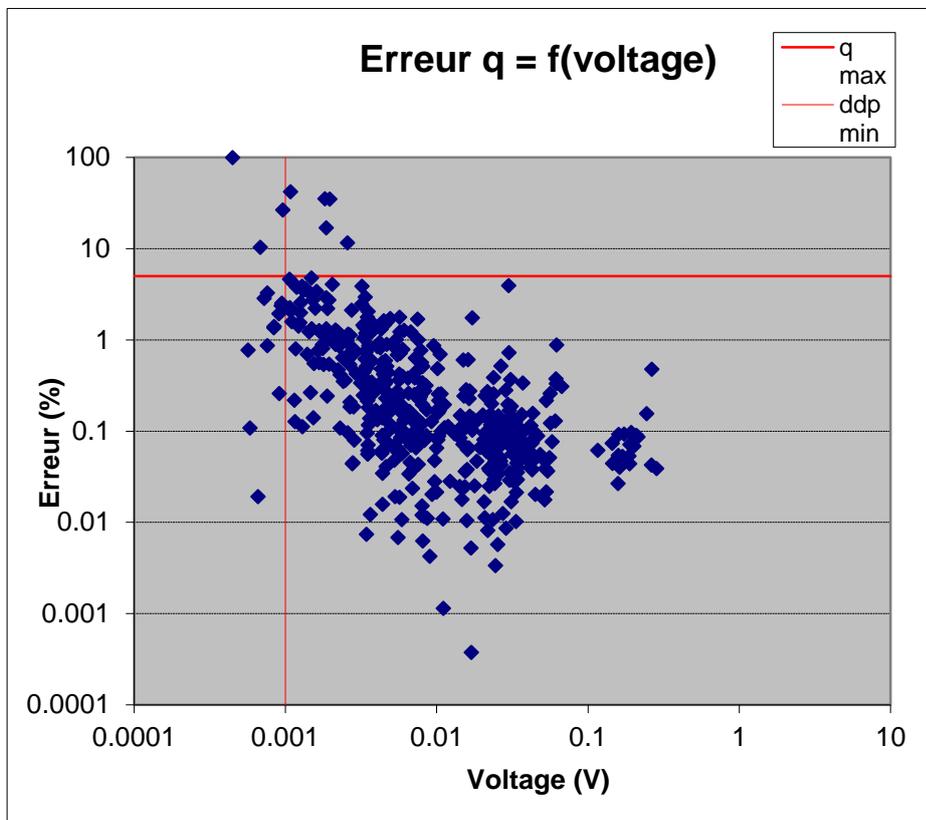
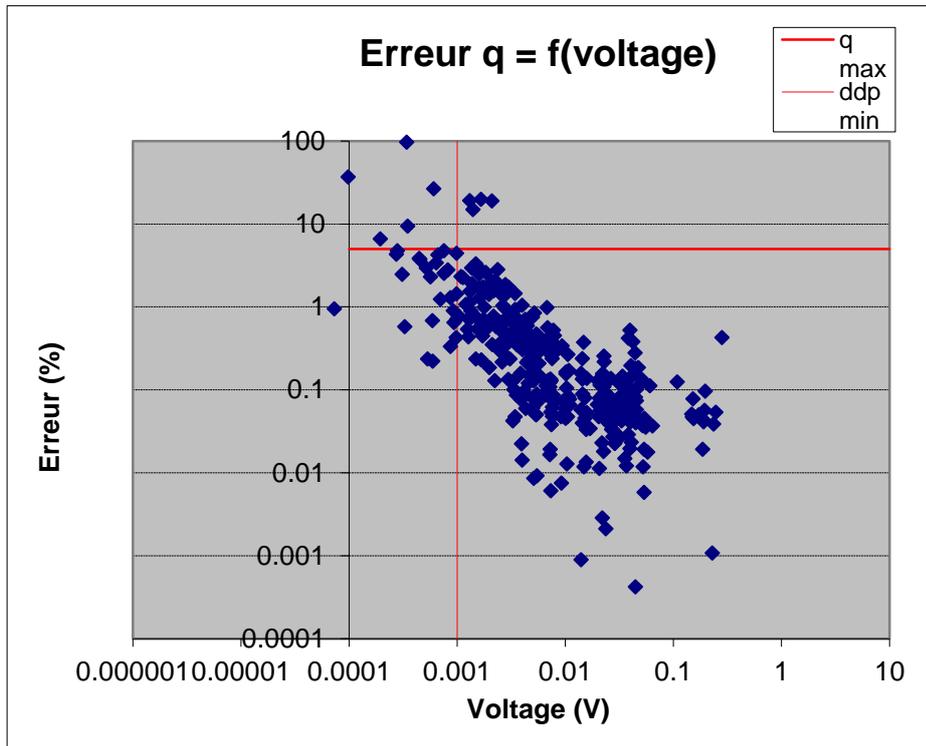
Profil IJ2 PdP arrière, avant filtrage



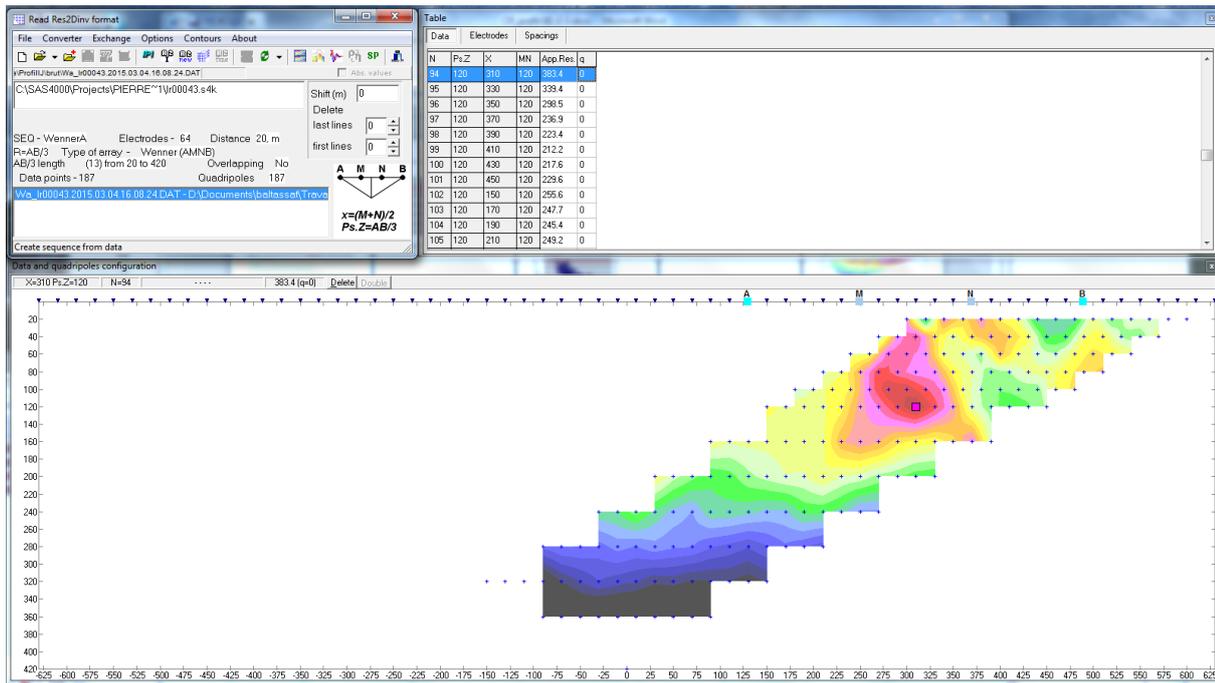
Profil IJ3, Wenner Alpha



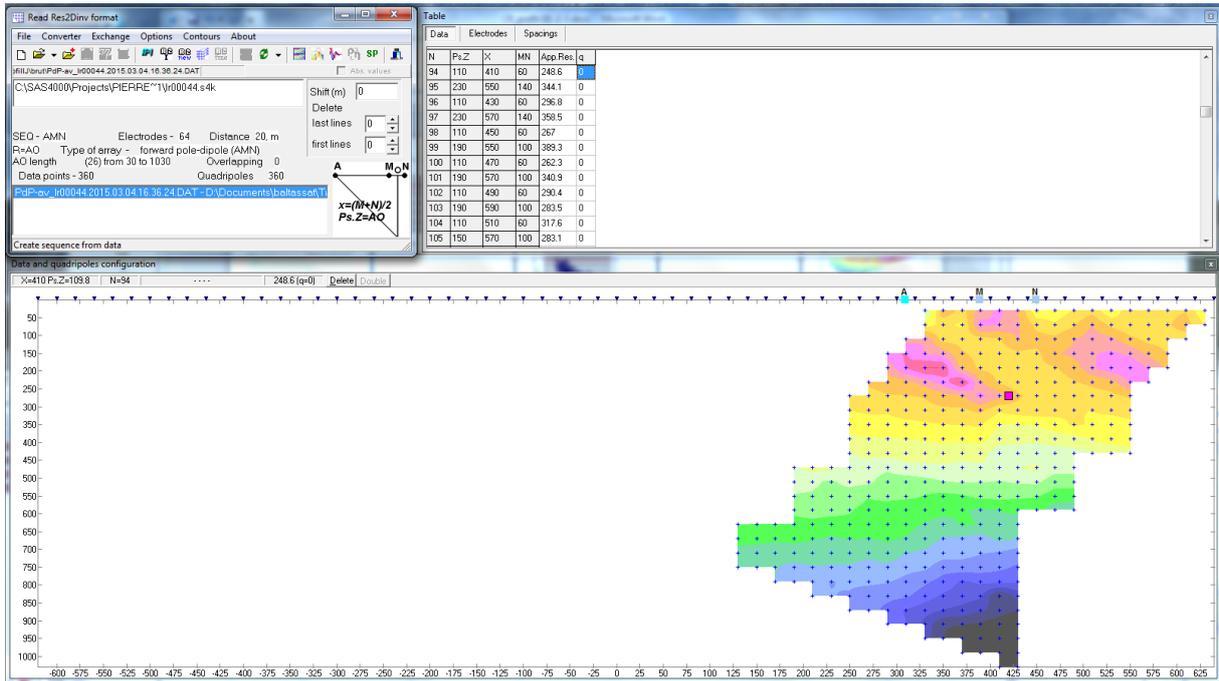
Profil IJ3, PdP avant (en haut) et arrière (en bas)



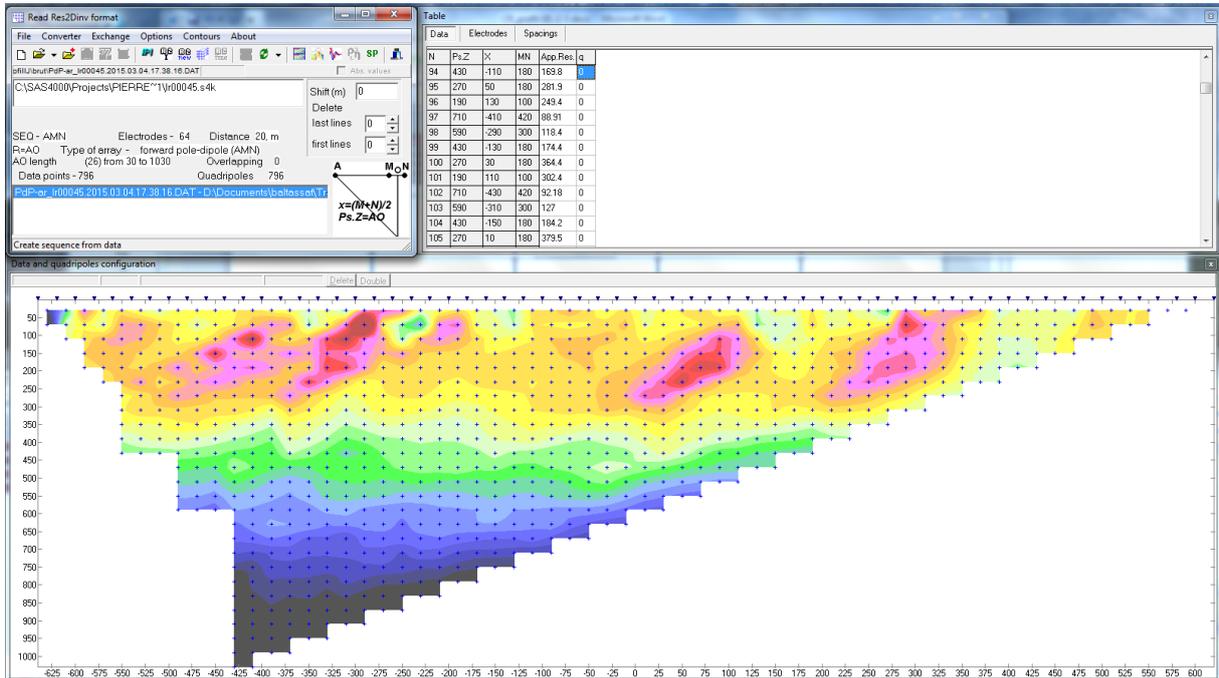
Profil IJ3, Wenner alpha, avant filtrage



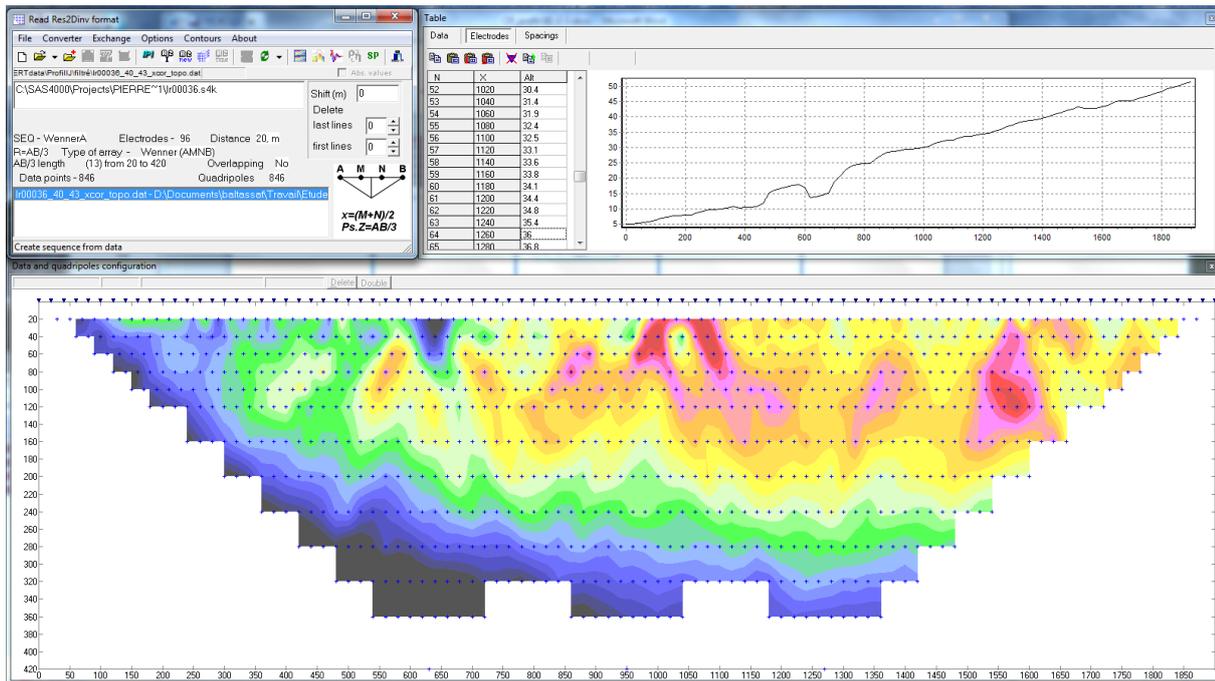
Profil IJ3, PdP avant, avant filtrage



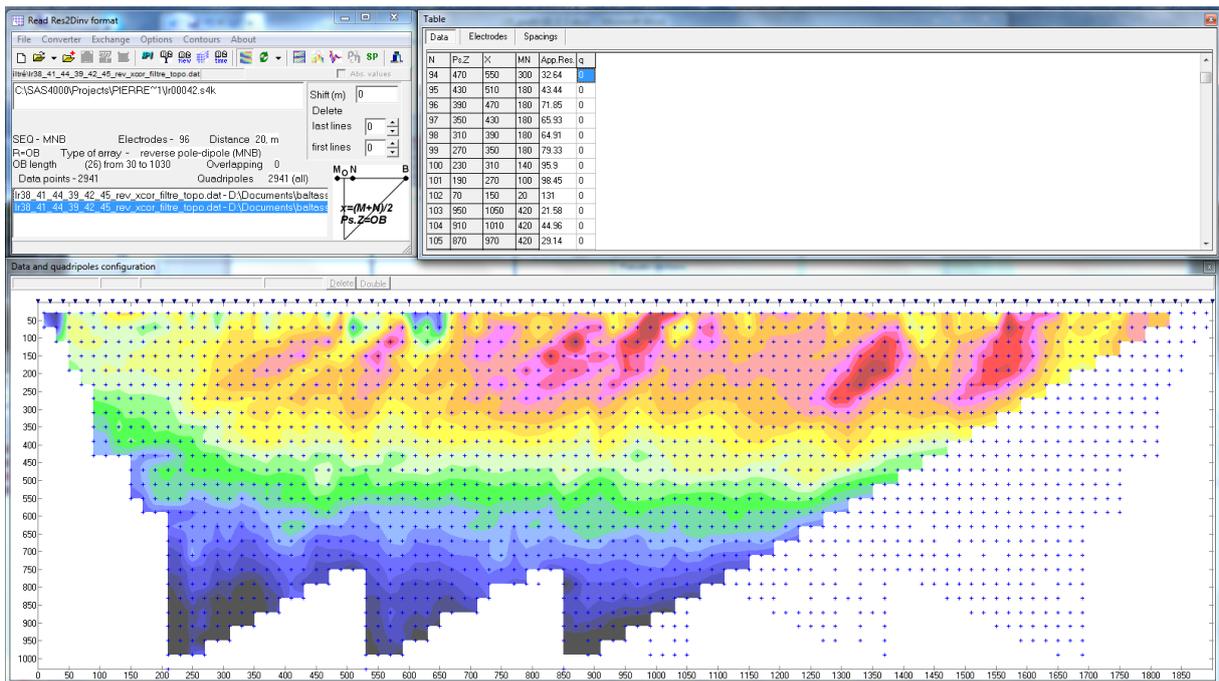
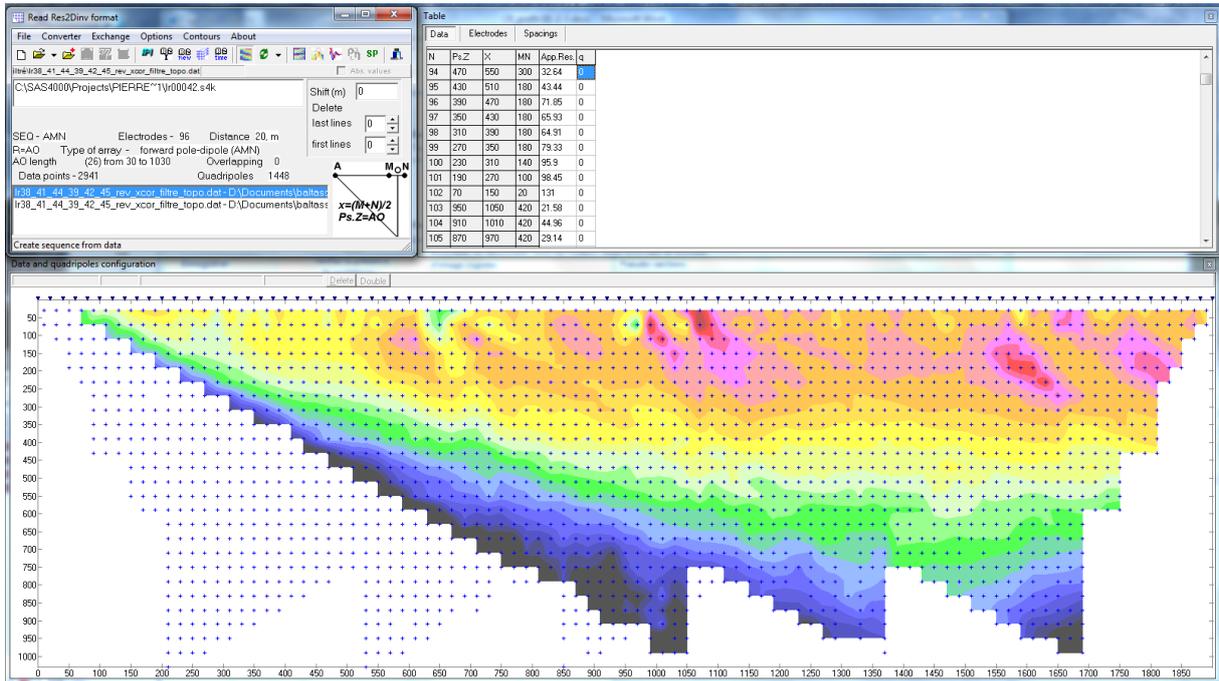
Profil IJ3, PdP arrière, avant filtrage



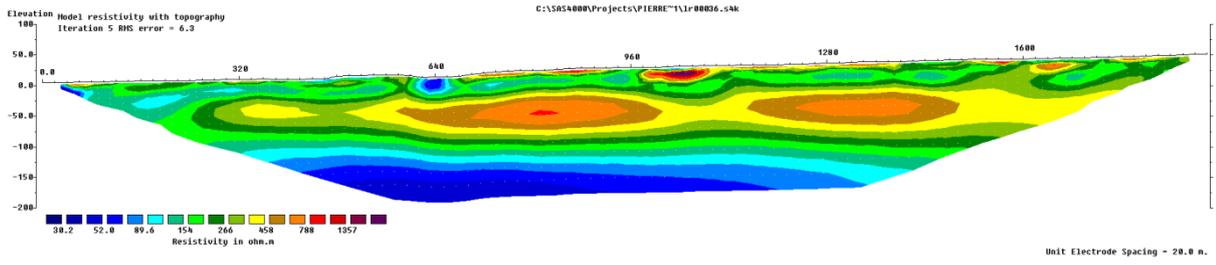
Profil IJ01-2-3 Wenner alpha, après filtrage



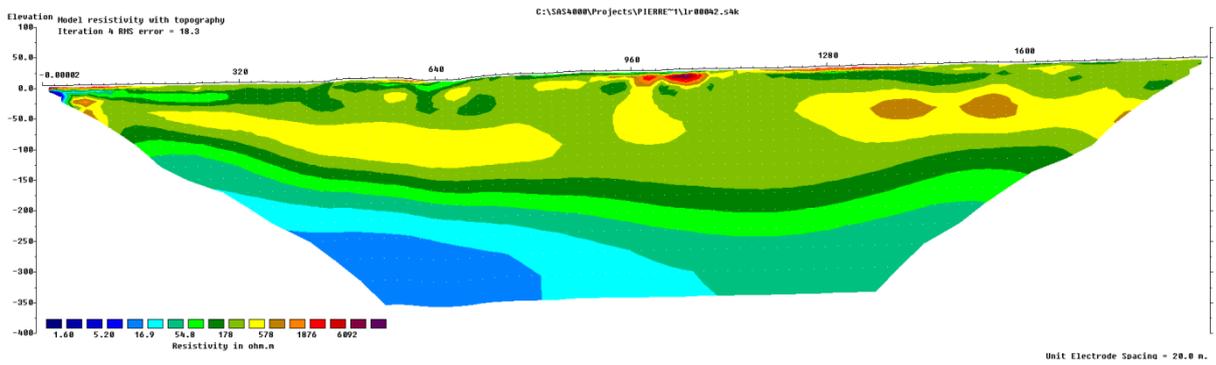
Profil IJ01-2-3 PdP, après filtrage,



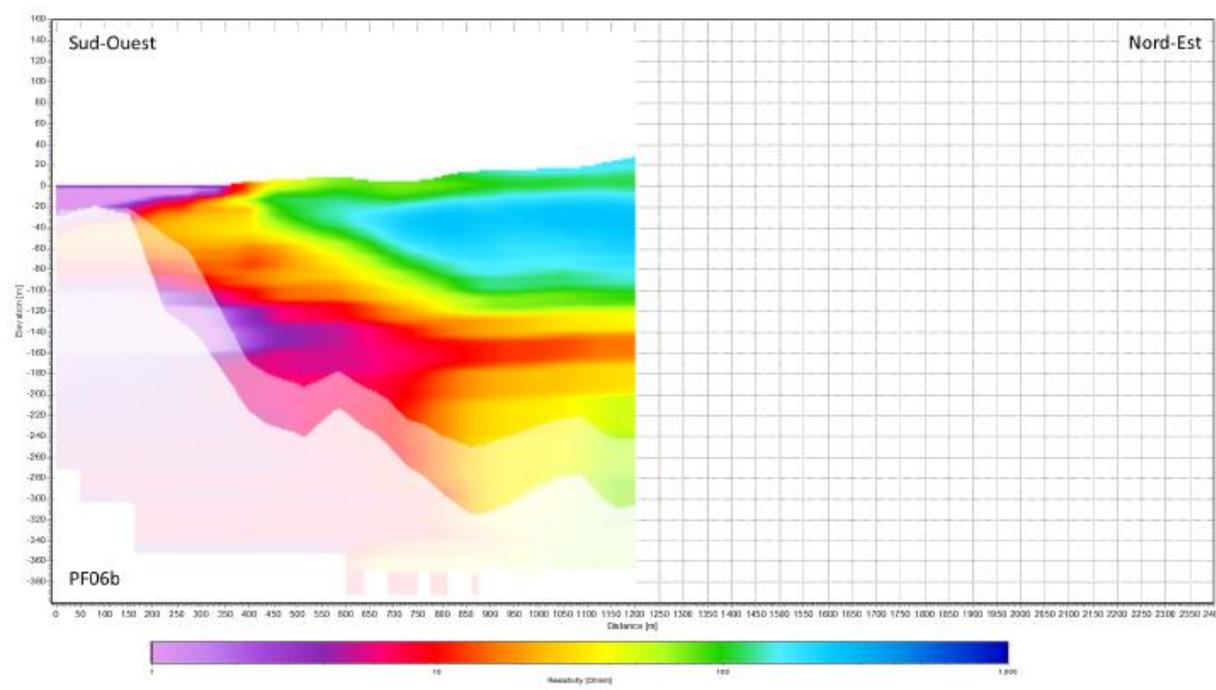
### Profil IJ01-2-3 Wenner, inversion préliminaire



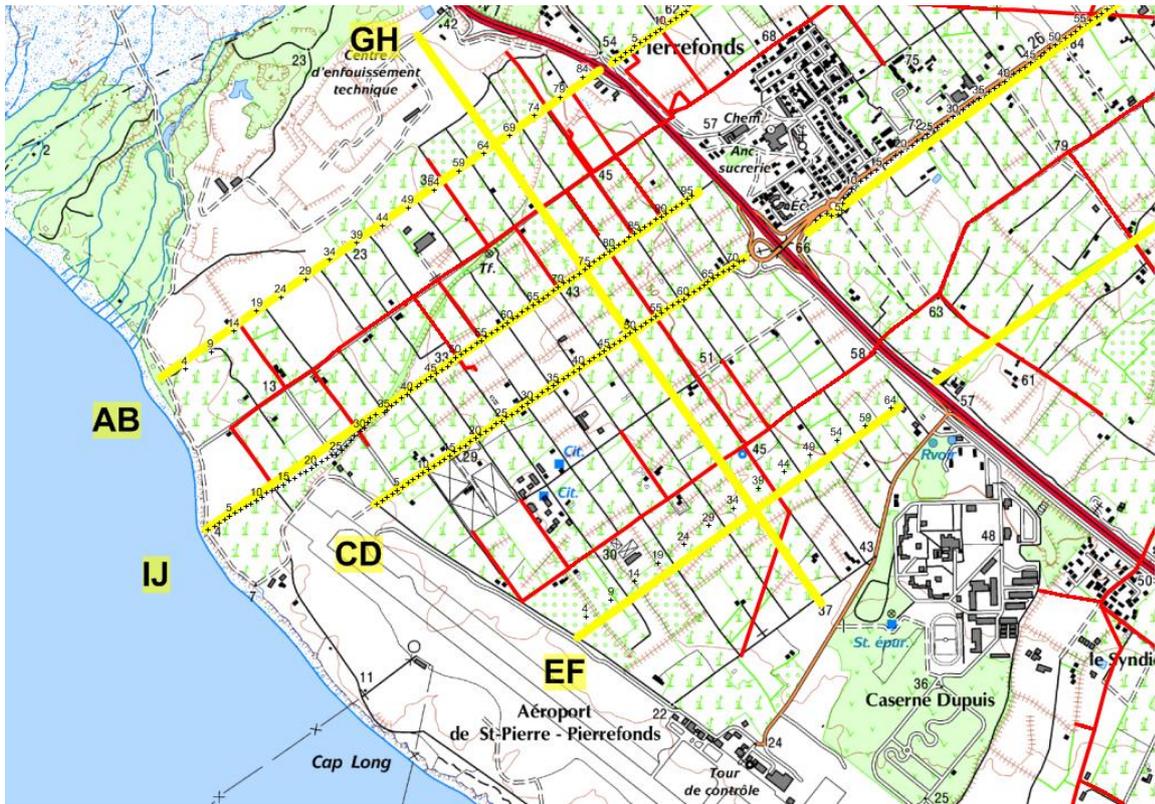
### Profil IJ01-2-3 PdP, inversion préliminaire



### Profil TEM correspondant



Localisation



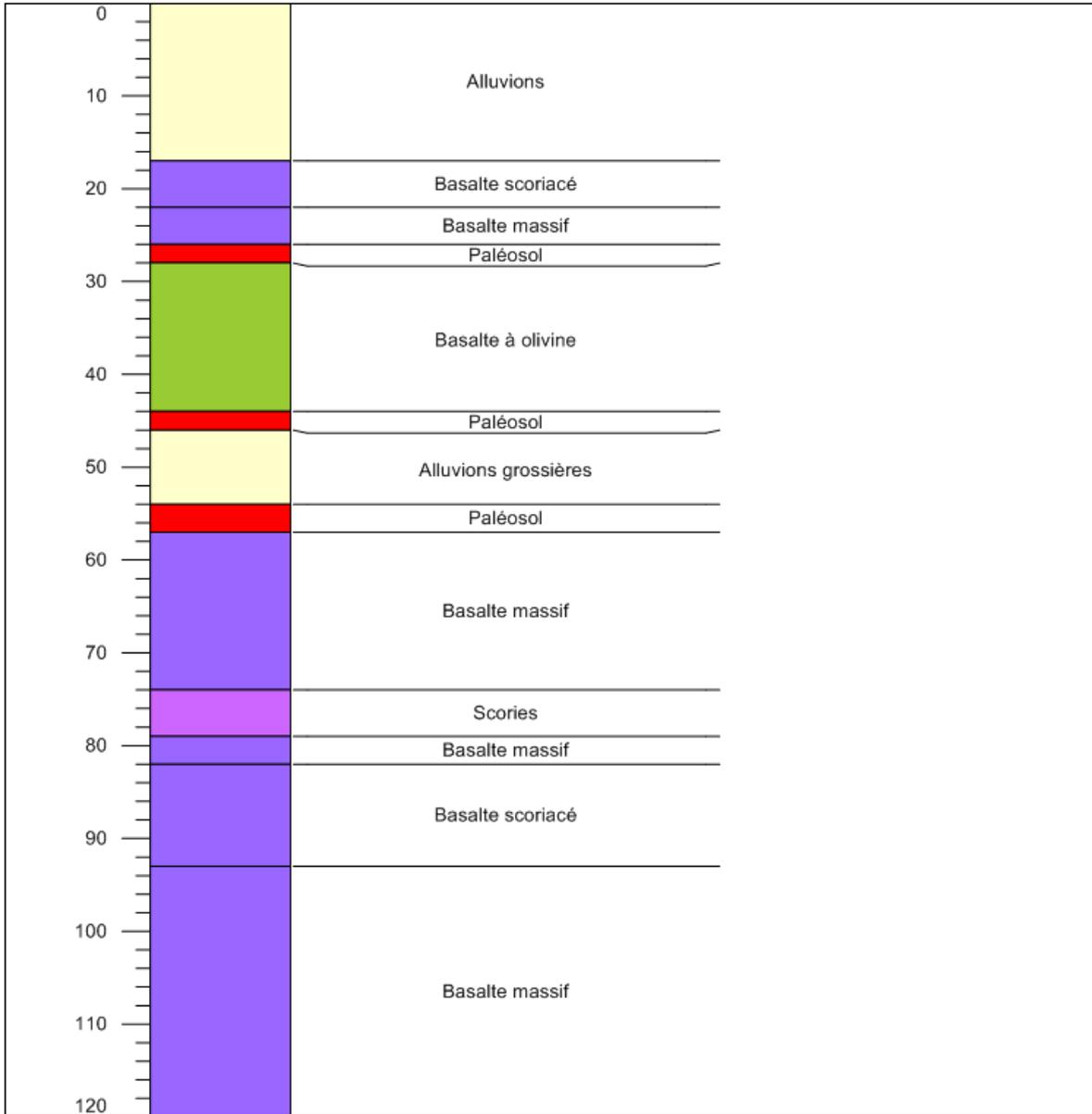


## **Annexe 10**

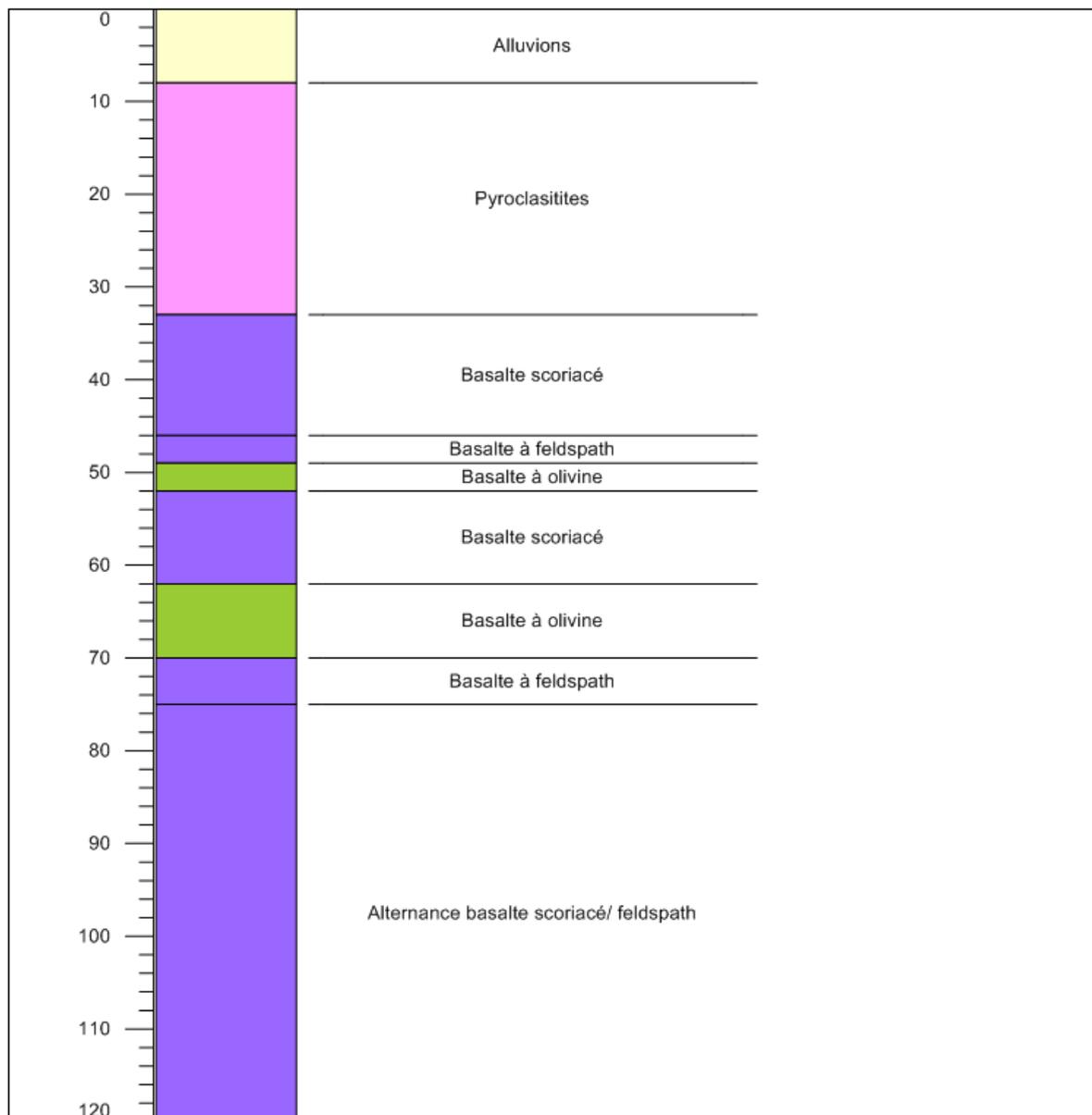
### **Logs forages du secteur de Pierrefonds – Compléments par rapport à ceux présentés dans le rapport Stratagem974**



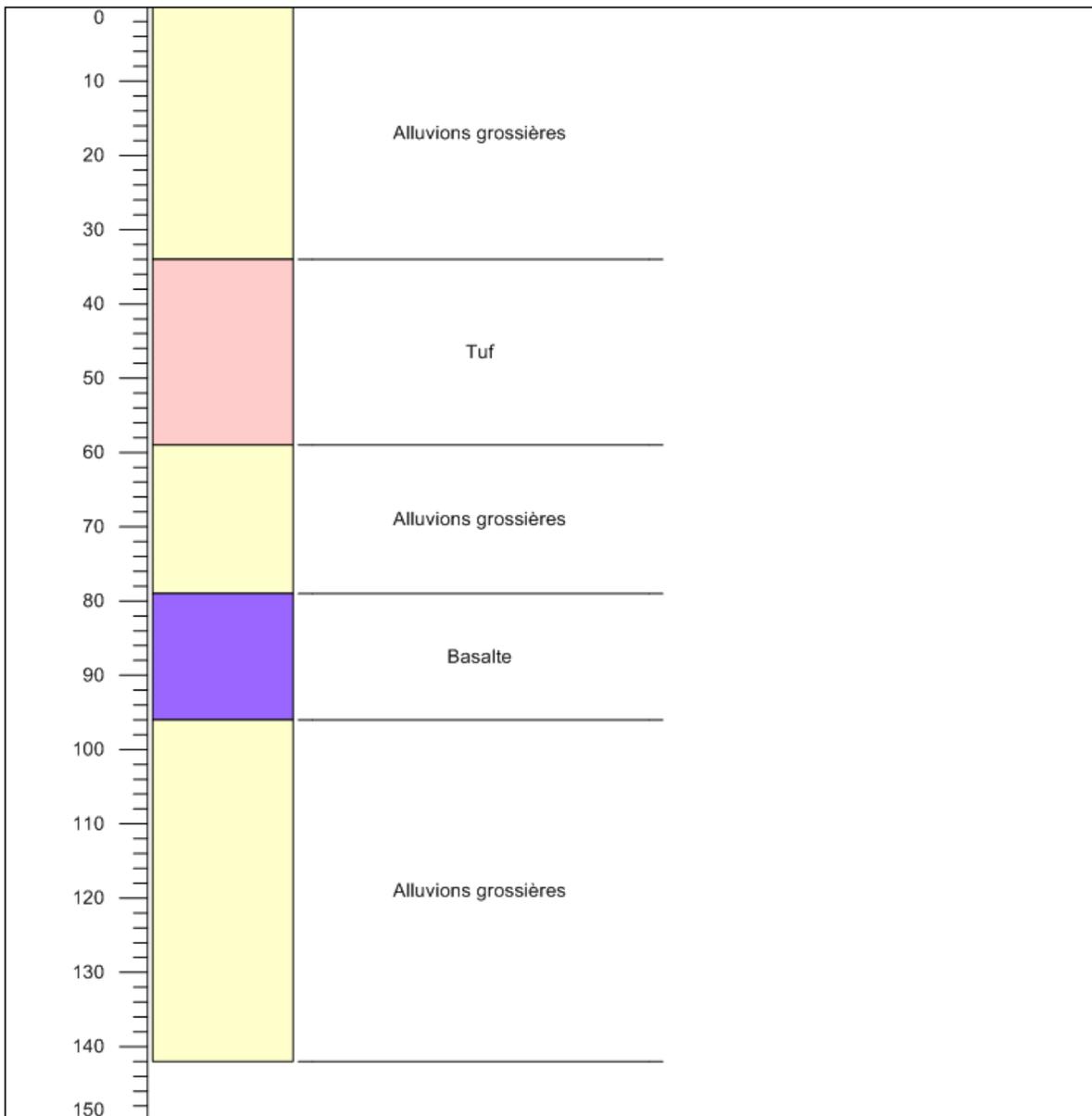
# 12288X0078



# 12288x0065



**12288X0087**





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale La Réunion**

5, rue Sainte Anne

CS 51016

97404 Saint-Denis Cedex

Tel. : 0262 21 22 14