

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 : **Interprétation hydrogéologique des données de géophysique aéroportée sur le secteur de Pierrefonds**

Rapport final

BRGM/RP-65621-FR
Mai 2016

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques du BRGM 2014 – PS14REU27

Aunay B., Reninger P.-A., Dumont M.

Vérificateur :

Nom : Yvan Caballero

Fonction : Responsable scientifique de programme

Date : 02/05/2016

Signature :



Approbateur :

Nom : Mompelat Jean-Marc

Fonction : Directeur adjoint DAT

Date : 11/05/2016

Signature :



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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

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

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.

Synthèse

En amont de la réalisation d'une modélisation numérique par l'Office de l'eau, le BRGM a été sollicité afin d'interpréter les données de géophysique héliportée sur le secteur de Pierrefonds. Il s'agit ici des données acquises au cours de l'hiver austral 2014 lors du projet REUN_EM, financé par les fonds FEDER, la Région et le BRGM.

Les objectifs du présent projet d'interprétation des données sont les suivants :

- Adaptation du modèle Skytem de géophysique électromagnétique héliportée (AEM) au contexte hydrogéologique de Pierrefonds en procédant à l'extraction, puis à l'inversion des données afin de les confronter aux connaissances géologiques et hydrogéologiques du secteur de Pierrefonds ;
- Elaboration de cartes permettant de présenter les données en termes d'iso-profondeur, iso-résistivité, iso-hydrogéologie...

Dans un premier temps, les données de navigation et AEM ont été traitées (filtrage et inversion spécifiques) afin d'adapter le modèle Skytem au contexte de Pierrefonds. Elles ont été ensuite communiquées à l'Office de l'eau sous forme d'un modèle numérique 3D, de cartes de résistivité et de coupes de résistivité.

Dans un second temps, une analyse croisée des données AEM et des données hydrogéologiques (logs de conductivité électrique de l'Office de l'eau (CE), piézométrie) a été réalisée. Ce type de comparaison est limité en raison de (i) l'inversion lissée par défaut, (ii) de l'acquisition diachrone des logs de CE et des sondages EM et (iii) de la distance entre le sondage AEM et le log de conductivité électrique. Néanmoins, la comparaison des données logs de CE et AEM permet de mettre en évidence la signature géophysique d'une intrusion saline.

Ce travail a permis de préciser l'hydrogéologie du secteur de Pierrefonds, sur la base de l'analyse des données de géophysique : la position et la géométrie de l'intrusion saline sont bien imagées et permettent de mettre en évidence (i) un phénomène de dédoublement de l'intrusion saline dans la partie côtière Sud-Est de Pierrefonds et (ii) une intrusion saline repoussée par la recharge relative à la Rivière Ste-Etienne au droit de son embouchure. Cette analyse est relativement robuste dans la mesure où la densité des données permet d'imager de manière quasi-continu la géométrie de l'interface eau douce / eau salée. De plus, cette image est fréquemment disponible jusqu'à une profondeur de plus de 200 m au minimum.

Par ailleurs, les corrélations entre les différentes formations géologiques et les corps résistants et conducteurs ne sont pas aisées. En effet, le manque de données AEM non bruitées dans la partie centrale de Pierrefonds ne permet pas la caractérisation d'entités géologiques sur la base des contrastes de résistivité en l'absence d'intrusion saline (imagée par l'AEM).

Sur la base des comparaisons des données AEM et de géophysique au sol, il apparaît que les informations issues des diverses campagnes de terrain sont très complémentaires : l'AEM

permet de bénéficier d'une image quasi-continu du continuum terre-mer, permettant ainsi d'appréhender logiquement les conditions aux limites d'un aquifère (absence d'effet de bord), tandis que les autres méthodes permettent d'investiguer plus en profondeur.

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

1. Introduction	7
1.1. CONTEXTE	7
1.2. OBJECTIFS	8
2. Levé d'électromagnétisme hélicoptère.....	9
2.1. PRINCIPE DE MESURE	9
2.2. TRAITEMENTS DES DONNEES	10
2.2.1. Données de navigation	10
2.2.2. Données EM	10
3. Interprétation des données.....	13
3.1. COMMUNICATIONS DES DONNEES	13
3.1.1. Modèle numérique 3D.....	13
3.1.2. Cartes de résistivité	13
3.1.3. Coupes de résistivité.....	13
3.2. ANALYSE CROISEE DES DONNEES AEM ET HYDROGEOLOGIQUES.....	16
3.2.1. Données hydrogéologiques disponibles.....	16
3.2.2. Limites de l'exercice de corrélation entre les mesures in-situ et l'AEM....	18
3.2.3. Corrélations expérimentales	18
3.3. INTERPRETATIONS DES DONNEES.....	23
3.4. APPORT DES DONNEES DE GEOPHYSIQUES AU SOL	31
4. Conclusion.....	37
4.1. SYNTHESE DES RESULTATS	37
4.2. PERSPECTIVES	38
5. Bibliographie	39

Liste des figures

Illustration 1 - Vues du système SkyTEM® ; (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en plein vol	9
Illustration 2 – Sondages EM de la campagne Skytem sur le secteur de Pierrefonds.	11
Illustration 3 – Sondages de résistivité obtenus après inversion.	12
Illustration 4 – Bloc 3D de résistivité sur 200 m de profondeur sur le secteur de Pierrefonds....	14
Illustration 5 – Localisation des profils de résistivité électrique (en rouge) sur le secteur Pierrefonds.	15
Illustration 6 – Logs de CE sur le F10 Ravine des Cabris.....	17
Illustration 7 – Comparaison des logs de CE et du sondages AEM (haut gauche) pour le piézomètre P11 (38078 – 12288X0078/P11)	20
Illustration 8 – Comparaison des logs de CE et du sondages AEM (haut gauche) pour le piézomètre P11 (38078 – 12288X0078/P11)	21
Illustration 9 – Evolution de la charge hydraulique (haut), de la marée (milieu) et de la CE à différentes profondeurs (bas) sur l’ouvrage P12 aérogare (Bourhane et al., 2015)	22
Illustration 10 – Coupes géologiques parallèles à la côte dans la plaine de Pierrefonds (Bourhane et al., 2015)	25
Illustration 11 – Carte géologique du secteur d’étude (BRGM et LGSR, 2006).....	26
Illustration 12 – Cartes de résistivité en fonction de la profondeur	27
Illustration 13 – Coupes verticales de résistivité issues du bloc 3D	28
Illustration 14 – Augmentation de la profondeur du conducteur correspondant à l’intrusion saline.	29
Illustration 15 – Synthèse des observations effectuées à partir des données AEM	30
Illustration 16 - Synthèse des études géophysiques sur le secteur de Pierrefonds (Belle & Bonnier, 2014)	32
Illustration 17 – Localisation des profils ERT récents réalisés par Stratagem (2015).....	34
Illustration 18 - Représentation 3D des résultats de tomographie de résistivité électrique Pôle-Dipôle obtenus sur le secteur de Pierrefonds (Stratagem, 2015)	35

Liste des annexes

Annexe 1 Coupes de résistivité perpendiculaires à la côte.....	41
Annexe 2 Coupes de résistivité parralèles à la côte	47

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Les besoins en eau du secteur sud de La Réunion sont croissants depuis plusieurs décennies. Cependant, les aquifères littoraux exploités actuellement pour y répondre sont soumis aux phénomènes d'intrusion saline. Parallèlement, la part de l'alimentation en eau potable assurée par les prises d'eau en rivière n'assure pas un approvisionnement sûr et permanent, en raison de la vulnérabilité de cette dernière aux épisodes pluvieux intenses (exemple des problèmes de turbidité à la prise d'eau du Bras de la Plaine – Aunay *et al.*, 2010).

Parmi les ressources exploitées actuellement, l'aquifère de Pierrefonds apparaît relativement protégé vis-à-vis des intrusions salines, en lien avec un contexte géologique et hydrogéologique particulier. Par conséquent, la gestion optimale de cet aquifère constitue un enjeu majeur pour l'alimentation en eau potable du secteur sud. Il apparaît nécessaire aujourd'hui d'évaluer la possibilité d'y augmenter les prélèvements.

Dans ce contexte, l'Office de l'eau et le Conseil Général ont identifié, dans le cadre du contrat d'objectif 2012-2016, la masse d'eau de Pierrefonds comme prioritaire pour la définition d'un plan de gestion basé sur des indicateurs pertinents. Le développement d'un modèle maillé sur le secteur de Pierrefonds est envisagé pour tester de nouveaux scénarii d'exploitation. La réalisation de ce type de modèle requiert, entre autres, une connaissance approfondie (i) de la structure du milieu géologique constituant l'aquifère et (ii) de la géométrie de l'interface eau douce / eau salée.

En amont de la réalisation du modèle déterministe, le BRGM a été sollicité par l'Office de l'eau afin d'interpréter les données de géophysique héliportée sur le secteur de Pierrefonds. Il s'agit ici des données acquises au cours de l'hiver austral 2014 lors du projet REUN_EM, financé par les fonds FEDER, la Région et le BRGM.

1.2. OBJECTIFS

Les objectifs du présent projet d'interprétation des données sont les suivants :

- Adaptation du modèle Skytem géophysique REUN_EM au contexte hydrogéologique de Pierrefonds en procédant à l'extraction, puis à l'inversion des données afin de les confronter aux connaissances géologiques et hydrogéologiques du secteur de Pierrefonds ;
- Elaboration de cartes permettant de présenter les données en termes d'iso-profondeur et iso-résistivité.

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, et sont rappelés ci-après :

- Appui technique pour la réalisation d'une campagne de géophysique profonde réalisée par un tiers. Cet appui technique consistait apporter des éléments techniques au dossier de consultation des entreprises, d'analyser les offres en relation avec l'Office de l'eau, à suivre la campagne de géophysique profonde en analysant les résultats. Le prestataire retenu était la société Stratagem (Stratagem 2015). L'analyse des résultats est présentée dans le rapport « Supervision et interprétation des tomographies électriques réalisées sur le site de Pierrefonds par la société Stratagem974 - BRGM/RP-65573-FR (Baltassat *et al.*, 2016). Au-delà de la supervision, une analyse géologique de ces récentes données géophysiques est proposée par Baltassat *et al.* (2016). Enfin, une comparaison des données de géophysique au sol et des données AEM est également effectuée par Baltassat *et al.* (2016) ;
- Appui technique pour la modélisation du fonctionnement de l'hydrosystème de Pierrefonds, consistant principalement à des réunions d'échange technique et à des relectures de rapports rédigés par l'Office de l'eau.

2. Levé d'électromagnétisme hélicoptère

Le bilan d'acquisition du levé géophysique hélicoptère est présenté dans le rapport BRGM/RP-63818-FR (Martelet et al., 2014).

2.1. PRINCIPE DE MESURE

La théorie de l'EM appliquée à la géophysique est documentée dans différents ouvrages tels que Ward et Hohmann (1988) et Nabighian et Macnae (1991)

Les grands principes de l'EM se basent sur les équations de Maxwell (19^e siècle), et plus particulièrement sur celles du domaine diffusif (i.e. les courants de conduction dominant) dans le cas d'un levé EM en domaine temporel. Ceci se traduit, au premier ordre, par une sensibilité de la méthode à la conductivité/résistivité électrique du milieu.

Le système de mesure utilisé est le système SkyTEM[®] (<http://skytem.com>). Il est composé d'une boucle émettrice, d'une boucle réceptrice, d'un générateur, ainsi que différents instruments de navigation tels que GPS, inclinomètres et altimètres laser afin de positionner à tout moment la mesure dans l'espace (Illustration 2). On note également la présence d'un magnétomètre à l'avant du système ; les mesures magnétiques n'ont pas été utilisées dans la présente étude et ne sont donc pas discutées ici.

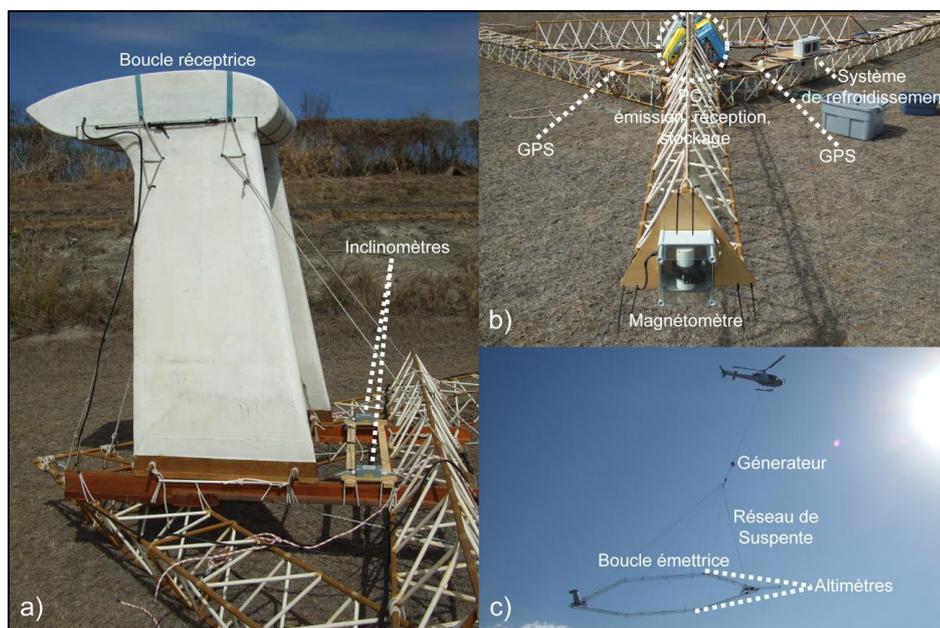


Illustration 1 - Vues du système SkyTEM[®] ; (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en plein vol

Un courant est injecté dans la boucle émettrice, ce qui crée un champ magnétique (primaire). Ce même courant est ensuite coupé de façon brusque entraînant alors une variation de ce champ primaire. Cette dernière résulte en l'induction de courants de Foucault dans le sous-sol, qui vont à leur tour créer un champ magnétique (secondaire), mesuré au niveau de la boucle

réceptrice. Les courants se dissipant dans le sous-sol, la donnée recueillie informera sur la décroissance du champ secondaire en fonction du temps, directement liée à la conductivité du milieu. La profondeur d'investigation de la méthode, de l'ordre de 200-250 m dans le cadre de la mission menée sur La Réunion, dépend de l'intensité du courant injecté, de l'aire de la boucle d'émission, du niveau de bruit de la mesure ainsi que de la conductivité du sous-sol.

2.2. TRAITEMENTS DES DONNEES

2.2.1. Données de navigation

a) Données GPS

La position du dispositif est mesurée toutes les secondes grâce aux GPS différentiels installés à la fois sur la boucle et à la station de base. La donnée GPS est alors interpolée par ajustement polynomial et les mesures de navigation sont échantillonnées sur un pas de 0.5 s.

b) Données d'inclinaison

L'inclinaison est mesurée suivant l'axe de vol et sa perpendiculaire horizontale grâce aux deux inclinomètres placés sur la boucle. Un filtre médian permettant de retirer les valeurs aberrantes a été appliqué.

c) Données d'altitude

Il existe deux moyens de connaître l'altitude du dispositif, d'une part, grâce aux deux altimètres situés sur la boucle, d'autre part, par traitement du GPS différentiel et soustraction du modèle numérique de terrain. La première solution étant complexe et subjective, la seconde a été préférée.

2.2.2. Données EM

a) Acquisition des données

Le levé EM de l'île de la Réunion, effectué par SkyTEM ApS, sous maîtrise d'œuvre du BRGM, s'est déroulé du 2 mai au 23 juillet 2014. Il comprend 10 600 km linéaire principalement sous la forme d'un quadrillage de lignes de vol nord-sud et est-ouest espacées de 400 m. Lors d'un vol, la mesure est prise sans discontinuer et à pas régulier, ce qui, dans le cas du levé de l'île de la Réunion, représente un point de donnée tous les 30 m environ. Les points de mesure acquis dans la région de Pierrefonds sont présentés sur l'illustration 2.

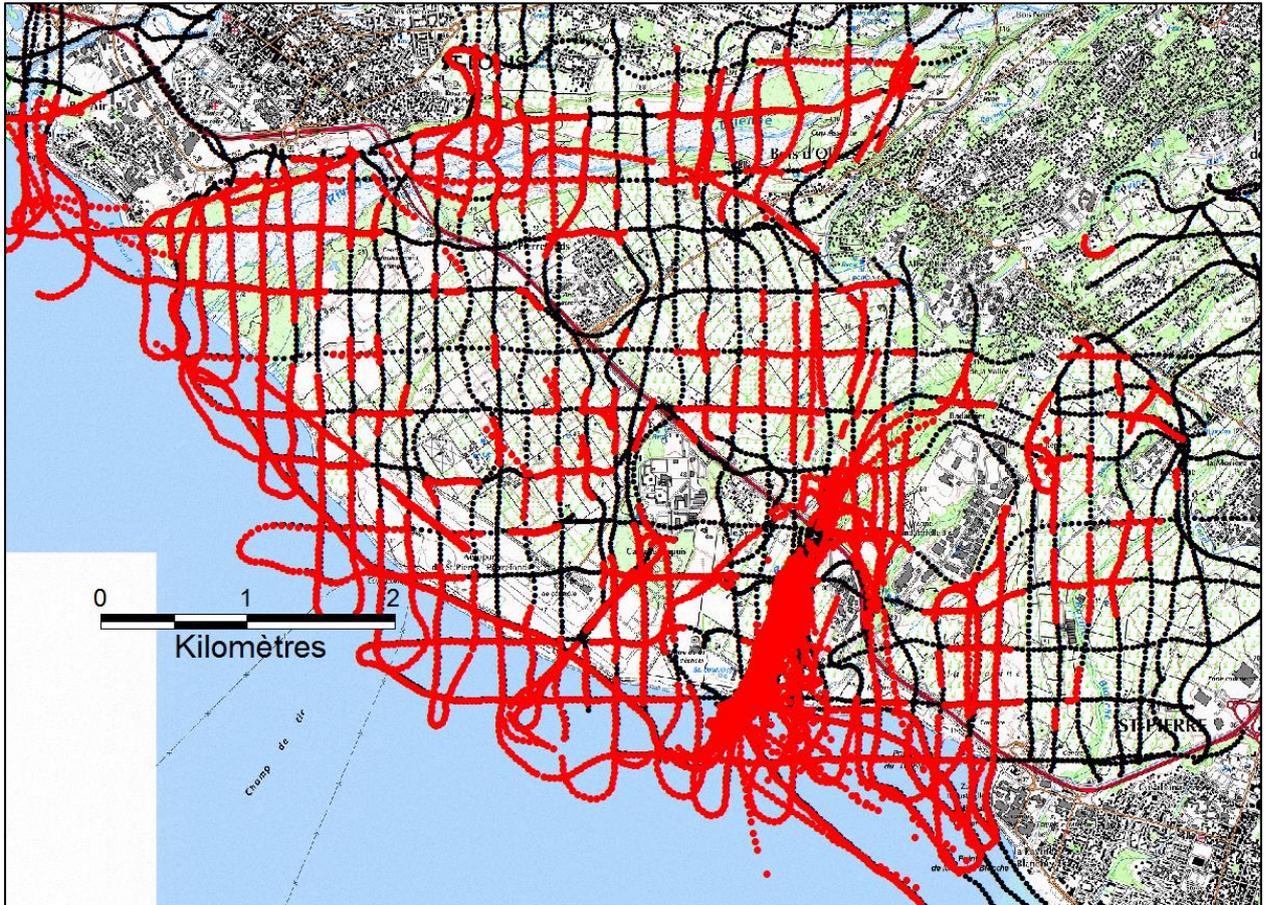


Illustration 2 – Sondages EM de la campagne Skytem sur le secteur de Pierrefonds. Les points mesurés sont en noir. Les points conservés après le filtrage réalisé dans cette étude sont en rouge

b) Filtrage des données

La mesure EM est extrêmement sensible aux champs EM « ambiants », aussi bien naturels qu'artificiels, ces derniers induisant un bruit sur la donnée. Comme source de bruit naturel, on peut citer les « sphériques », ondes EM issues de l'activité orageuse et se propageant dans l'ionosphère ; les sources de bruits artificiels comprennent quant à elles toutes les installations humaines interagissant avec ou produisant un champ électromagnétique.

Afin d'obtenir des mesures exploitables, il est donc nécessaire d'appliquer un filtre dans le but de « débruiter » le jeu de données. Dans le cas de la Réunion, un traitement basé sur l'utilisation de la décomposition en valeurs singulières a été utilisé (Reninger et al., 2011).

A l'issue de cette étape, les données sont prêtes à être interprétées d'un point de vue géophysique par inversion afin d'imager les contrastes de résistivité du sous-sol.

c) Inversion et préparation des données

Le principe de l'inversion en géophysique est de retrouver les propriétés physiques du sous-sol grâce aux différents signaux mesurés (i.e. ici les décroissances EM), affectés par les

caractéristiques de celui-ci. Pour ce faire, il est nécessaire de trouver le modèle, schématisant le sous-sol, qui minimise la différence entre les données mesurées et celles prédites par la théorie ; celui-ci est obtenu par itération de modélisations EM et comparaisons à la donnée mesurée. Les modèles pris en considération à cette étape permettent d'imager les contrastes de résistivité dans le sous-sol.

Dans le cadre de cette étude, l'inversion utilisée considère des modèles 1D (selon la profondeur) constitués d'un nombre de couches n , chacune caractérisée par une épaisseur et une résistivité. Afin de stabiliser le processus, des contraintes spatiales entre les différentes couches des différents modèles sont également appliquées lors de l'inversion (*cf.* Spatially Constrained Inversion ; Viezzoli et al., 2008). Au cours de cette inversion, la profondeur d'investigation de chaque mesure est également testée afin de calculer une limite basse (hypothèse pessimiste ; profondeur d'investigation la plus faible) et une limite haute (hypothèse optimiste ; profondeur d'investigation la plus importante).

A l'issue de l'étape d'inversion, nous obtenons, à l'emplacement de chaque mesure, un modèle 1D constitué de n couches et défini par n épaisseurs et résistivités, censé rendre compte des contrastes de résistivité existants en subsurface. Le nombre n n'est pas fixé avant l'inversion et dépend de notre appréhension de l'environnement géologique et de la complexité de celui-ci. Dans le cadre de cette étude, une inversion de type « Smooth » (i.e. de nombreuses couches d'épaisseur fixe, ici 25, dont seule la résistivité peut varier) a été réalisée. Ce type d'inversion a l'avantage d'être moins dépendant de l'a priori défini pour initialiser le calcul (i.e. reflétant notre appréhension de la géologie) mais le désavantage d'imager des variations lissées de la résistivité selon la profondeur.

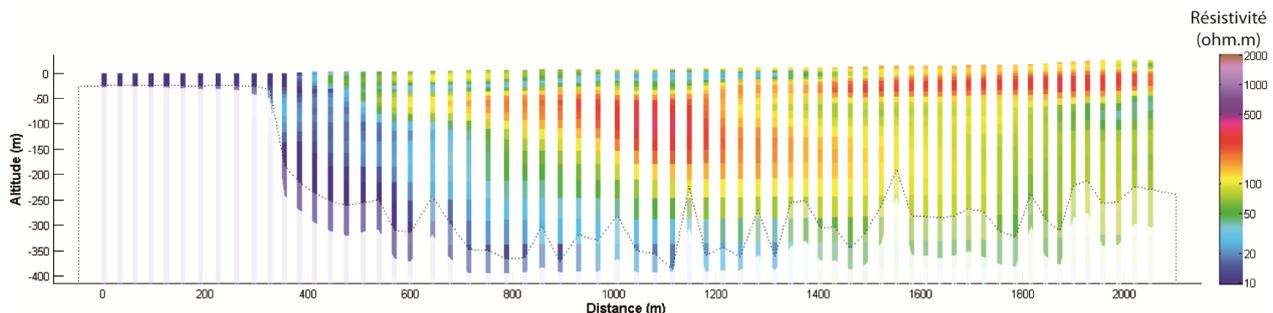


Illustration 3 – Sondages de résistivité obtenus après inversion.

La profondeur d'investigation de la méthode EM est représentée par une tranche en légère transparence reflétant l'incertitude obtenue sur ce paramètre et définie par une limite haute et une limite basse (pointillée), sous la limite haute, la transparence appliquée étant nettement plus importante.

Cela nous permet d'obtenir un premier niveau d'information en termes de résistivité sur la zone d'étude, cependant la continuité 2D et 3D y est difficilement lisible.

L'information 2D est obtenue en interpolant, sur des grilles, la résistivité des couches des différents modèles incluse dans une tranche de profondeur ou d'altitude souhaitée. En répétant l'opération pour chaque tranche possible, nous obtenons une information 2D sur toute la gamme d'investigation.

L'information 3D est obtenue en agrégeant les différentes grilles interpolées au sein d'un même cube. Ce résultat nous permet alors de tracer des profils dans n'importe quelle direction et de calculer des surfaces d'iso valeur.

3. Interprétation des données

3.1. COMMUNICATIONS DES DONNEES

Les données de géophysique aéroportée acquise sur le secteur de Pierrefonds ont été communiquées à l'Office de l'eau au cours du 1^{er} trimestre 2015. Il s'agit de données issues du modèle délivré par Aarhus Geophysics suite au levé dans un 1^{er} temps (Illustration 2), puis des données retraitées spécifiquement dans le cadre du présent projet (Illustration 5).

3.1.1. Modèle numérique 3D

Un modèle numérique a été communiqué à l'Office de l'eau sous la forme d'un bloc 3D (Illustration 4) exploitable sous le logiciel open-source Paraview (<http://www.paraview.org/>). Les principes d'utilisation de ce logiciel ont également été expliqués à l'Office de l'eau.

3.1.2. Cartes de résistivité

A partir des données inversées spécifiquement pour ce projet, les cartes de résistivités géoréférencées (format ascii QGIS) ont été communiquées à l'Office de l'eau. Ces 62 cartes contiennent la résistivité sur une épaisseur de 5 m en fonction de l'altitude et se distribuent de -200 m NGR à +110 m NGR. La maille de ces grilles de résistivité est de 50 m.

3.1.3. Coupes de résistivité

A partir des données délivrées par Aarhus Geophysics, puis des données inversées spécifiquement pour ce projet, 14 coupes de résistivités ont été communiquées à l'Office de l'eau (Illustration 5). L'emplacement de ces coupes a été déterminé en fonction des données AEM disponibles et de localisation des points de calage (piézomètre ou forage).

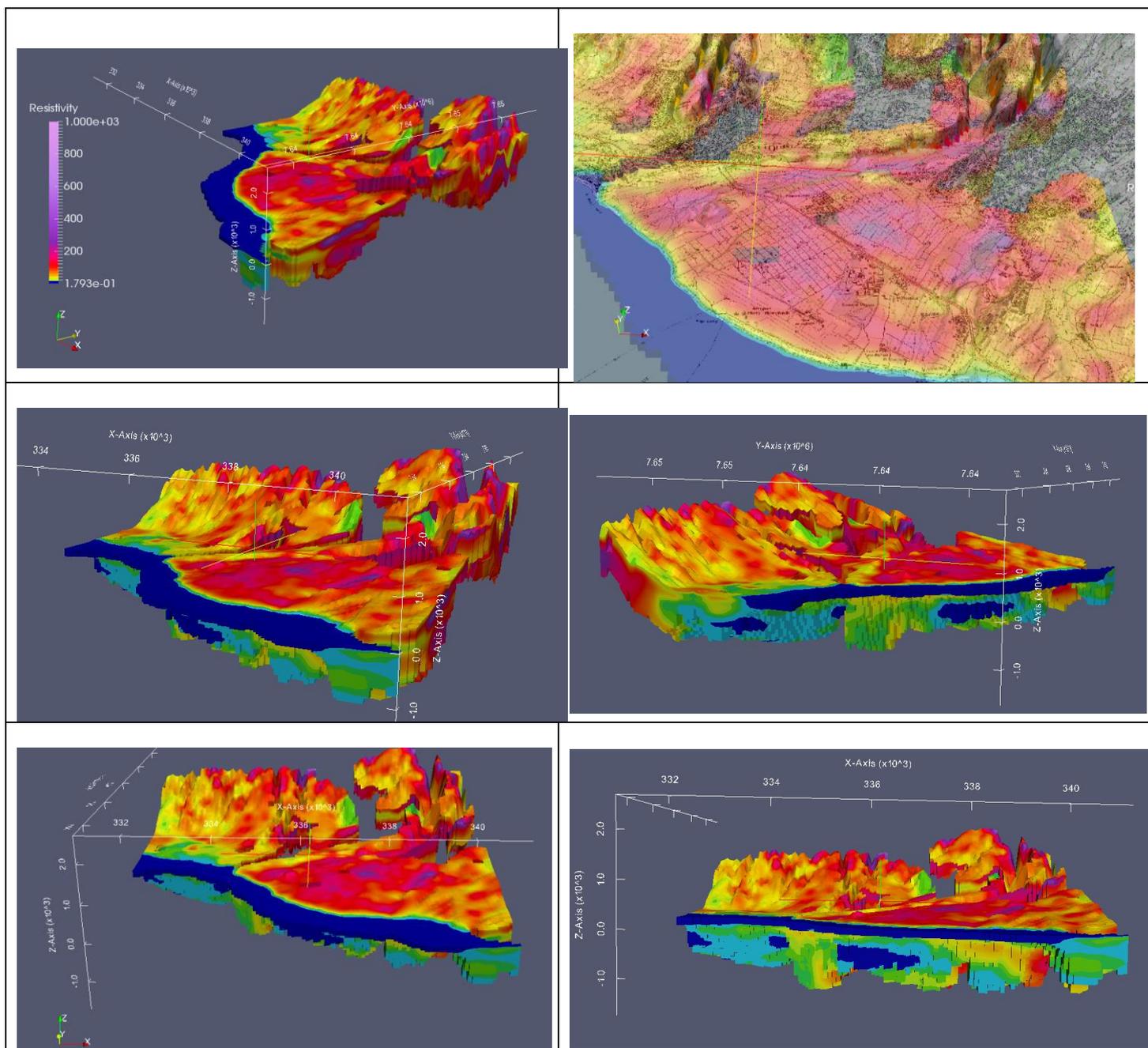


Illustration 4 – Bloc 3D de résistivité sur 200 m de profondeur sur le secteur de Pierrefonds
 Coordonnées en WGS84 - UTM40S ($.10e^3$ pour les axes X et Z ; $.10e^3$ pour l'axe Y)

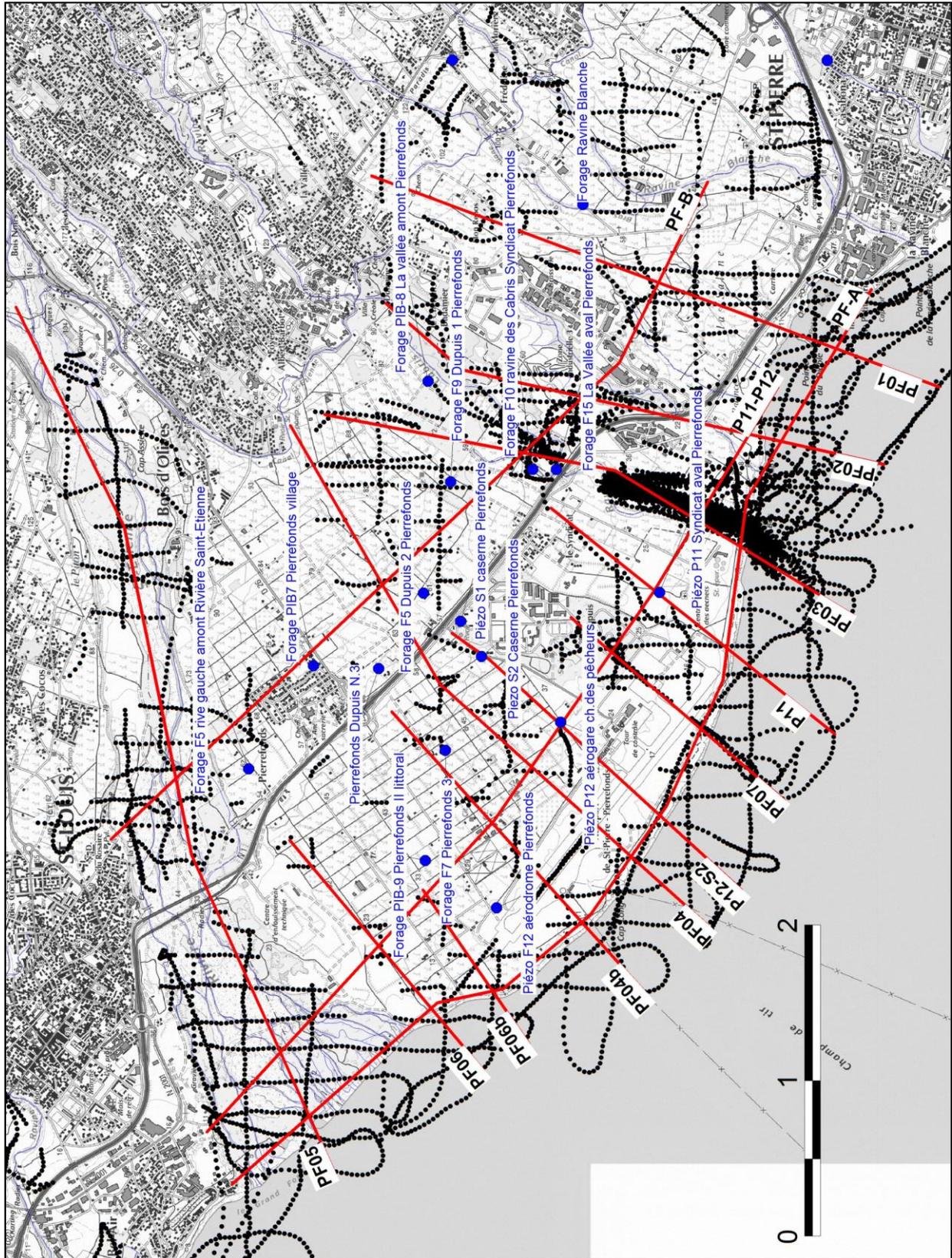


Illustration 5 – Localisation des profils de résistivité électrique (en rouge) sur le secteur Pierrefonds. Les points présentant les données utilisées lors de l'inversion spécifique au présent projet sont en noir.

3.2. ANALYSE CROISEE DES DONNEES AEM ET HYDROGEOLOGIQUES

Pour mémoire, les formations géologiques en présence dans le secteur de Pierrefonds sont les suivantes : laves plus ou moins altérées en profondeur, surmontées par des pyroclastites et/ou des alluvions.

3.2.1. Données hydrogéologiques disponibles

Les logs de conductivité électrique (CE) acquis par l'Office de l'eau sur les différents piézomètres du secteur permettent d'obtenir une calibration des données AEM.

Sur le secteur de Pierrefonds, des logs de CE sont régulièrement réalisés par l'Office de l'eau sur 14 piézomètres. La périodicité d'acquisition est de l'ordre de 1 à 4 logs par an depuis plus de vingt ans pour certains points.

Néanmoins, seuls deux piézomètres recoupent des eaux dont la minéralisation peut être directement associée à une intrusion saline. Il s'agit des points piézomètres :

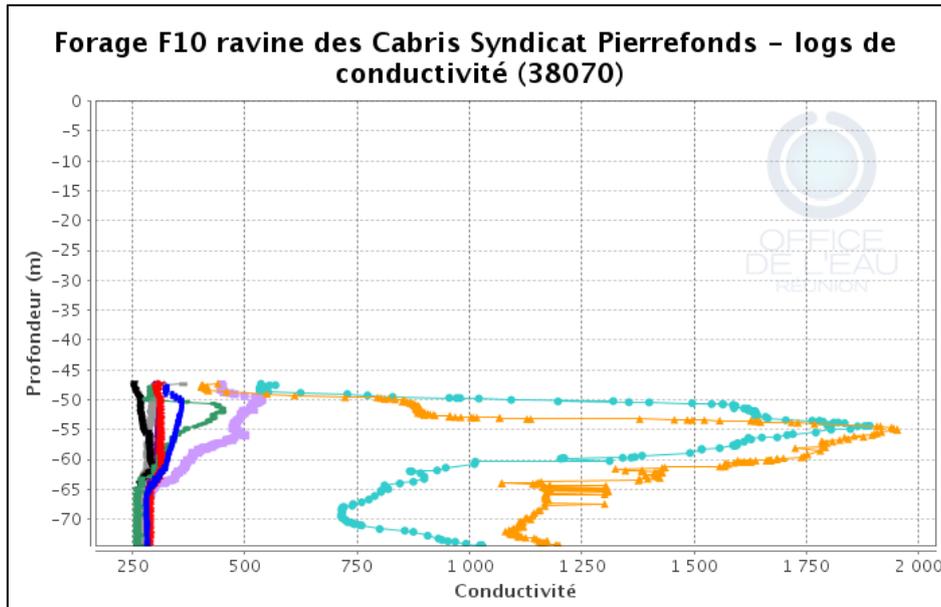
- 38078 - 12288X0078/P11 - Piézo P11 Syndicat aval Pierrefonds (Illustration 7 - <http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=12288X0078/P11>) ;
- 38077 - 12288X0077/P12 - Piézo P12 aérogare ch.des pêcheurs (Illustration 8 - <http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=12288X0077/P12>).

Le piézomètre 38070 (12288X0070/F10 – Forage F10 ravine des Cabris Syndicat Pierrefonds) est ponctuellement marqué par des anomalies de minéralisation (Illustration 6). Toutefois, les données du log de CE réalisé le 20/08/2014¹ ne montrent pas d'anomalie². Ce point ne peut donc être utilisé pour la calibration des données.

Les CE moyennes mesurées sur les autres piézomètres ne recoupant pas l'intrusion saline sont de l'ordre de 300 à 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec un maximum à 800-1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le piézomètre 38217 (12288X0217/P - Piezo S2 Caserne Pierrefonds).

¹ Les données AEM ont été acquises entre juillet et août 2014.

² Moyenne des CE mesurées dans l'ouvrage = 309 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et maximum = 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



*Illustration 6 – Logs de CE sur le F10 Ravine des Cabris
Données Office de l'eau. Log du 20/08/2014 : courbe bleu foncé*

3.2.2. Limites de l'exercice de corrélation entre les mesures in-situ et l'AEM

Pour mémoire, les données AEM présentées ci-après sont issues d'une **inversion « smooth »**. Ce modèle de résistivité est discrétisé en de nombreuses couches ($\approx 25/30$) dont les limites verticales sont fixées. La régularisation pénalise les variations verticales de résistivité, permettant de lisser le modèle de résistivité 1D obtenu. Cette inversion, la moins dépendante du modèle a priori, est obtenue plus aisément mais lisse les résultats en complexifiant l'interprétation des interfaces géologiques ou de l'intrusion saline dans le cas présent.

En conséquence, l'imagerie géophysique d'un gradient de salinité pourrait être améliorée avec l'utilisation d'un modèle d'inversion plus adaptée (*few layer* ou *sharp*). Ce type d'approche sera développé dans le cadre de la thèse de Marc Dumont.

Au-delà du choix du modèle d'inversion, la comparaison des données AEM et des données de logs de CE réalisés par l'Office de l'eau est également délicate en raison des deux critères ci-dessous :

- **Acquisition diachrone des logs de CE et des sondages EM** : en fonction de son évolution temporelle, la position de l'interface eau douce / eau salée n'est pas nécessairement comparable entre les logs de CE in-situ et les sondages AEM ;
- **Distance entre le sondage EM et le log de CE** : en fonction de sa distribution spatiale, la position de l'interface eau douce / eau salée n'est pas nécessairement comparable entre les logs de CE in-situ et les sondages AEM

3.2.3. Corrélations expérimentales

Malgré les différents points évoqués ci-dessus, la comparaison des données logs de CE et AEM permet toutefois d'appréhender la réponse géophysique à une intrusion saline (Illustration 7 - Illustration 8). Les ordres de grandeurs cités ci-après ne doivent pas être retenus comme « valeurs d'incertitude » ou « précision attendue », mais permettent de poser les premiers principes de comparaison :

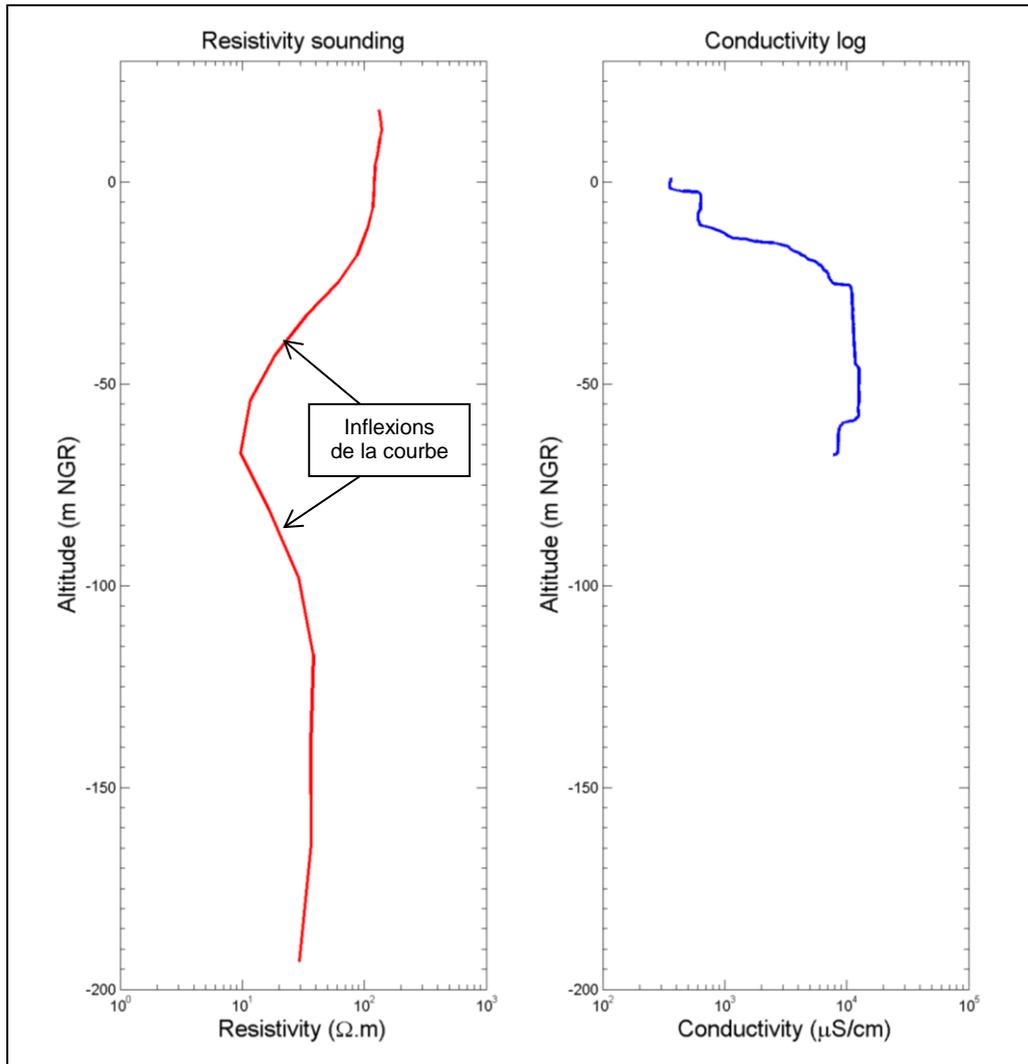
- Des résistivités de l'ordre de 10 Ω .m issues du sondage AEM se traduisent par des CE de 10 000 à 12 000 μ S/cm sur l'ouvrage P11 (Illustration 7). Il est néanmoins noté un décalage vertical de l'ordre de 20 à 30 mètres. En considérant les points d'inflexion³, les données AEM tendent à approfondir l'anomalie de faible résistivité (de -40 à -90 m NGR) qui correspond logiquement à l'anomalie de forte CE qui se développe entre -25 et -60 m NGR ;
- Des résistivités de l'ordre de 25-30 Ω .m issues du sondage AEM se traduisent par des CE de 1 600 à 1 700 μ S/cm sur l'ouvrage P12 (Illustration 8). En ce qui concerne cet ouvrage, le log effectué le 20/08/2014 ne se corrèle pas à la mesure effectuée lors du survol. Il est préférable de consulter les logs du 11/02/2014 ou du 19/11/2014 pour effectuer la comparaison. Ce choix se justifie par le fait que l'ouvrage « P12 aérogare » présente des variations quasiment instantanées de plus de 1 000 μ S/cm en fond de l'ouvrage (Illustration 9).

³ Il est délicat de comparer des valeurs maximums entre elles car le modèle smooth lisse les données.

Sur la base de ces éléments et des illustrations suivantes, il apparaît que les gradients de salinité de l'interface eau douce / eau salée sont relativement bien reproduits malgré les différentes limites évoquées au paragraphe 3.2.2. L'incertitude la plus significative semble se rattacher à l'utilisation du modèle smooth (qui pourrait notamment expliquer le décalage en profondeur de l'anomalie observée avec l'AEM) et pourrait probablement être réduite avec un modèle d'inversion plus adaptée (few layer ou sharp).

L'incertitude sur la relation entre CE et résistivités des terrains ne peut être appréhendée sur la base des données disponibles. Toutefois, il peut être prudemment considéré que :

- les résistivités inférieures à 10 Ω .m correspondent à des terrains saturés où prédomine l'eau salée ;
- les résistivités de l'ordre de 20 à 30 Ω .m correspondent à des terrains saturés sous influence d'une intrusion saline (zone de diffusion). Cette gamme de résistivité peut également correspondre à des formations volcaniques altérées notamment celles rencontrées dans les cirques et sur la côte au vent (Dumont & Aunay, 2016).



Piézo P11 Syndicat aval Pierrefonds – logs de conductivité (38078)

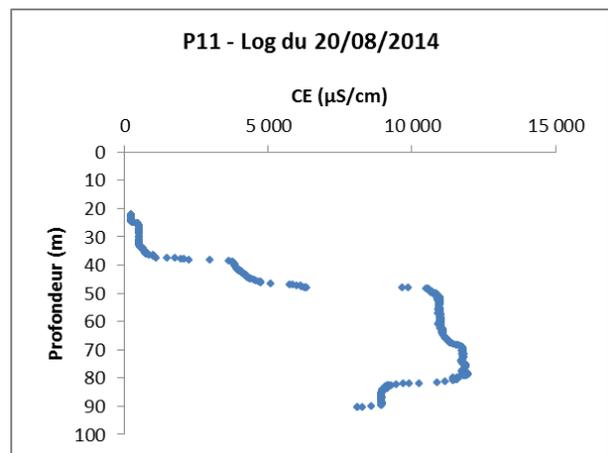
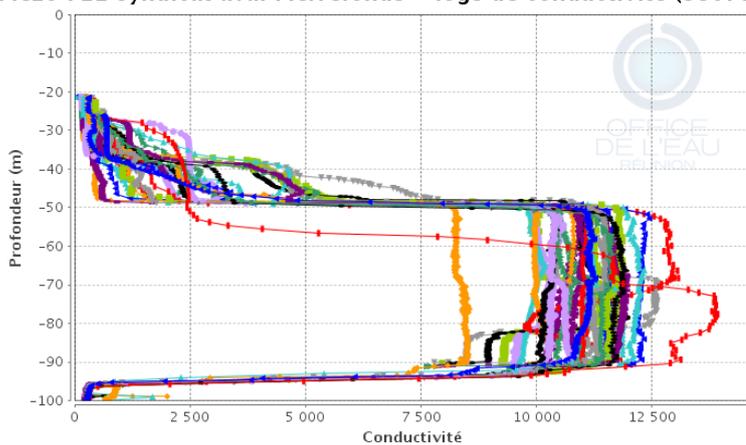
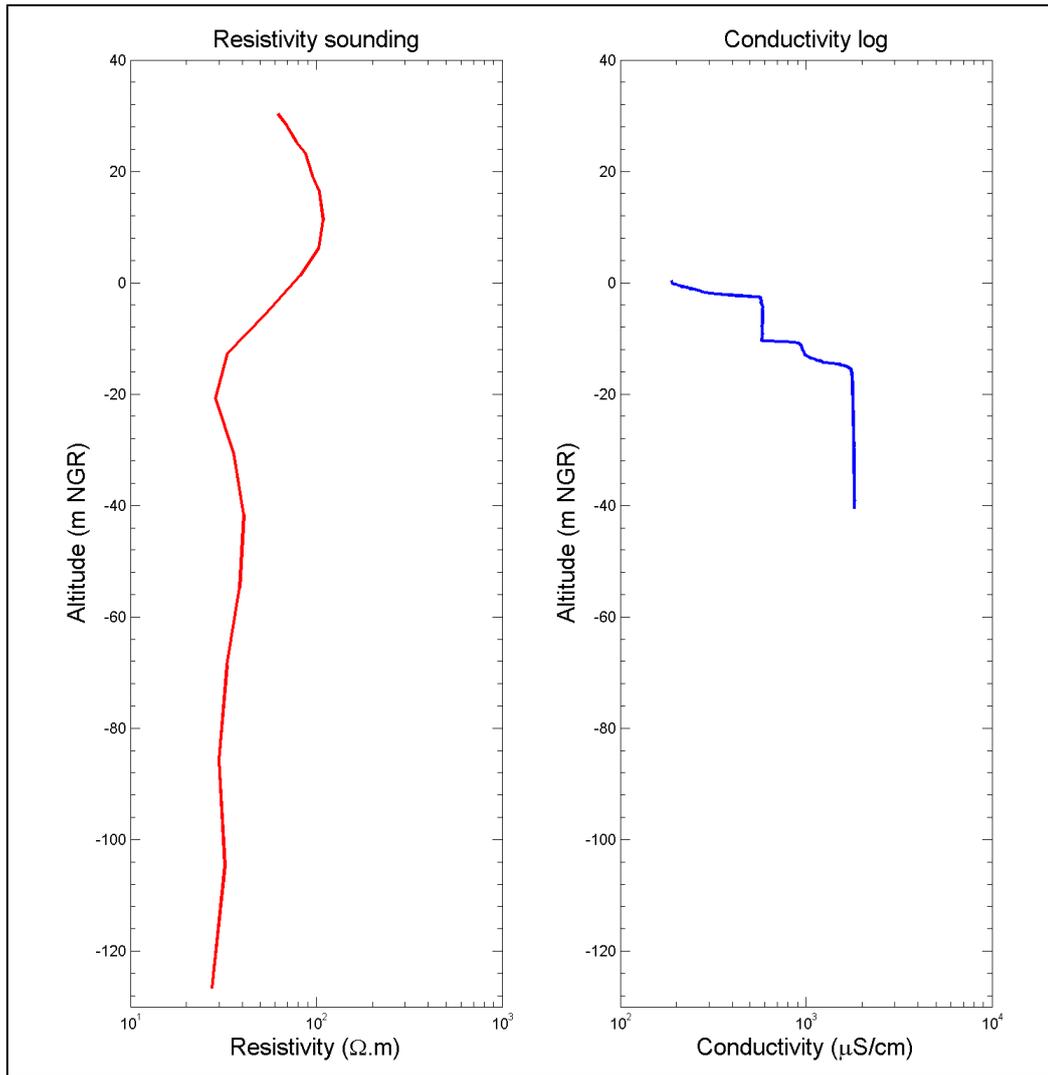


Illustration 7 – Comparaison des logs de CE et du sondages AEM (haut gauche) pour le piézomètre P11 (38078 – 12288X0078/P11)

Logs de CE : mesures de terrain effectuées par l'Office de l'eau. Le log dont la date est la plus proche de la campagne AEM (Juillet – aout 2014) est présentée sur la figure du haut.



Piézo P12 aérogare ch.des pêcheurs – logs de conductivité (38077)

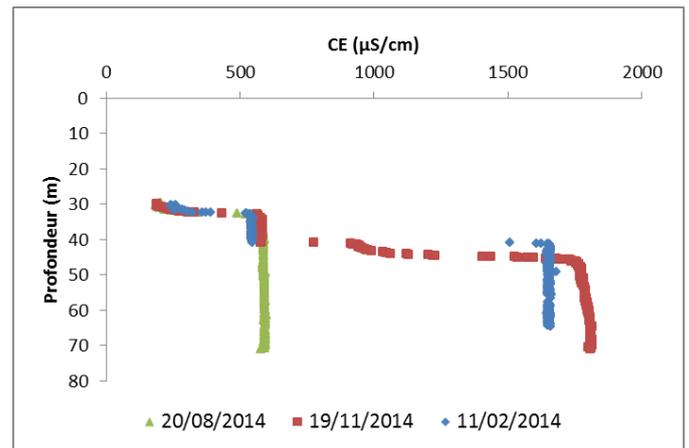
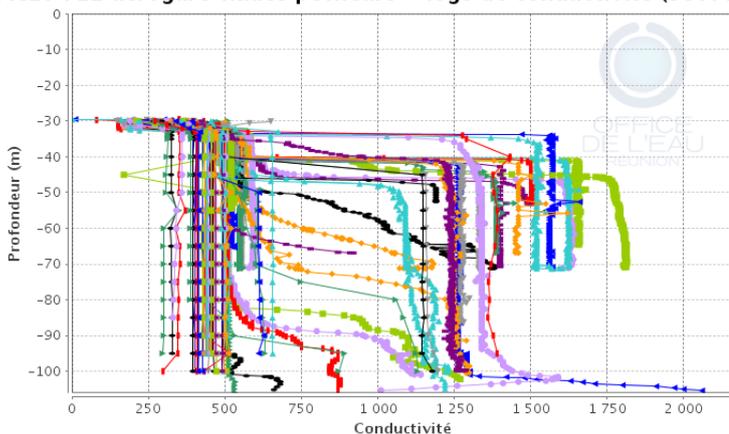


Illustration 8 – Comparaison des logs de CE et du sondages AEM (haut gauche) pour le piézomètre P11 (38078 – 12288X0078/P11)

Logs de CE : mesures de terrain effectuées par l'Office de l'eau. Le log du 19/11/2014 est présenté sur la figure du haut.

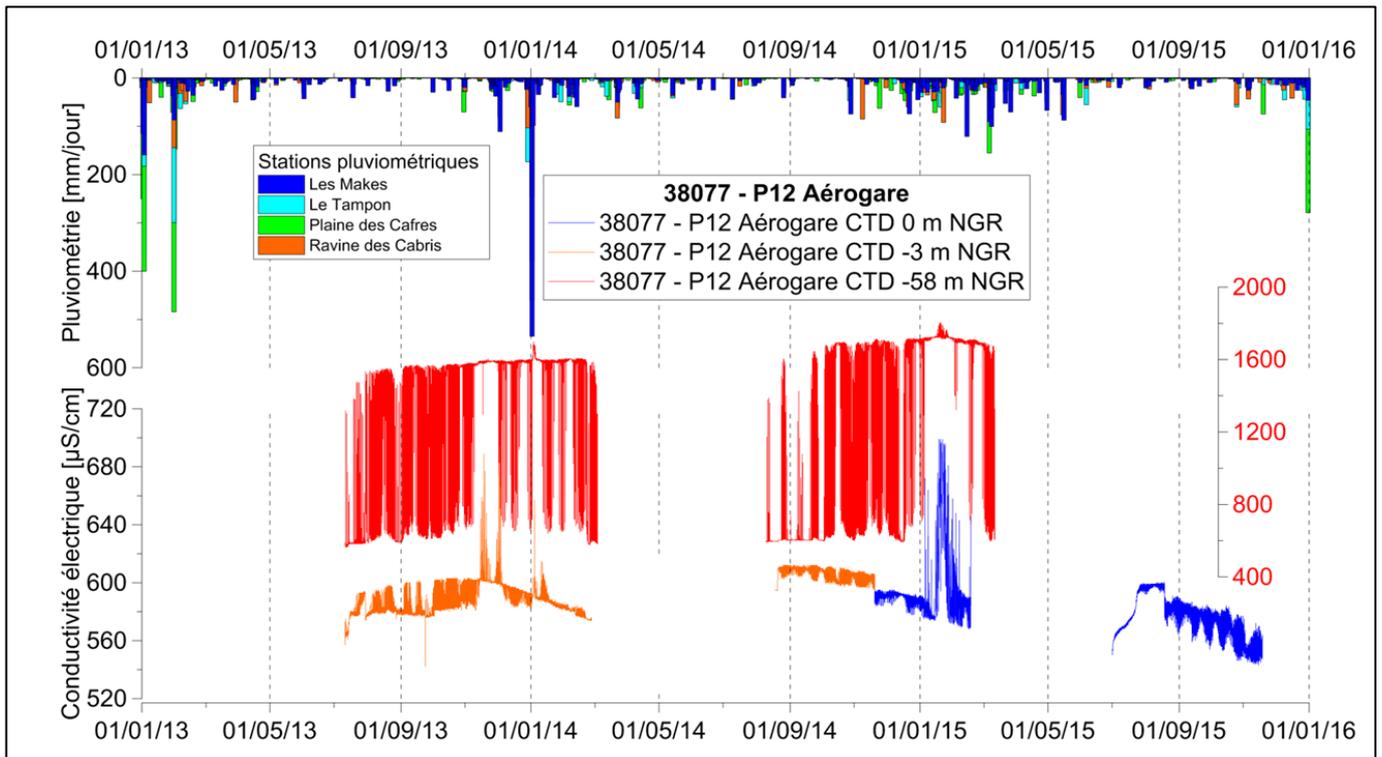
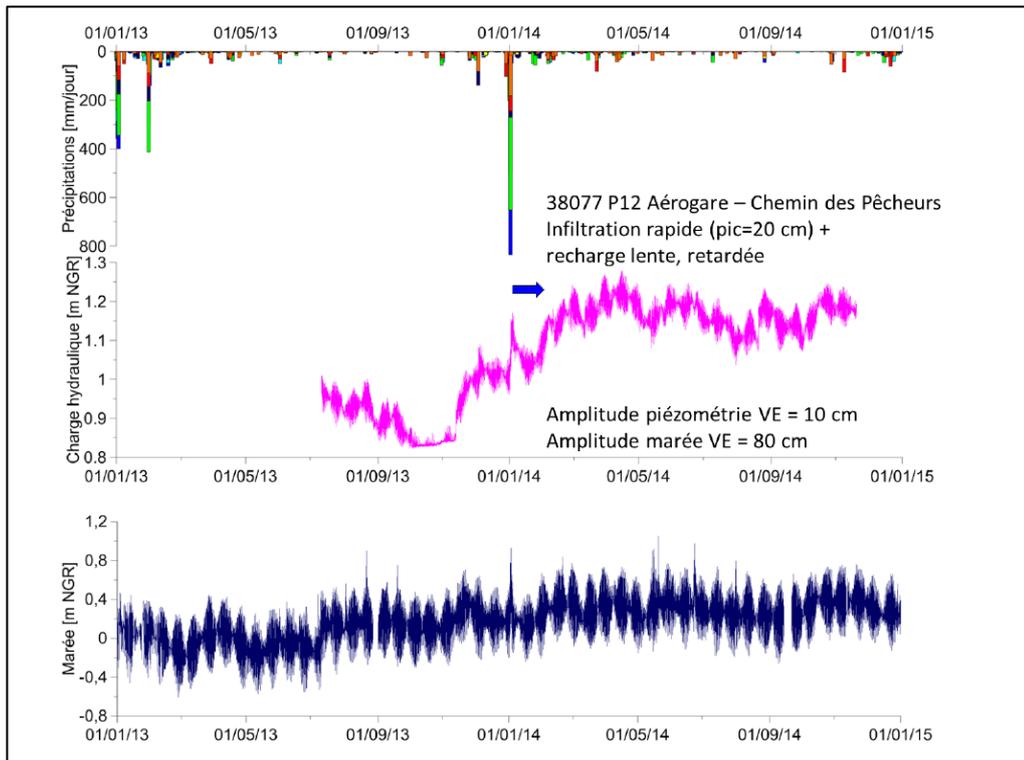


Illustration 9 – Evolution de la charge hydraulique (haut), de la marée (milieu) et de la CE à différentes profondeurs (bas) sur l'ouvrage P12 aérogare (Bourhane et al., 2015)

En fond d'ouvrage (courbe rouge - sonde à -58 m NGR), la CE présente des variations quasiment instantanées de plus de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Une analyse fréquentielle ou spectrale sur les données de l'Office de l'eau pourrait permettre de caractériser la dynamique de l'interface eau douce / eau salée sur cet ouvrage. Il s'agirait de vérifier que les fréquences caractéristiques de la marée sont identifiées sur les chroniques de CE.

3.3. INTERPRETATIONS DES DONNEES

Le bloc de résistivité en 3D et les coupes de résistivité permettent de mettre en évidence les observations suivantes (Illustration 13 à Illustration 15) :

- Les corrélations entre les différentes formations géologiques et les corps résistants et conducteurs ne sont pas aisées visuellement (très dépendant de l'échelle de couleur retenue) et nécessiterait au minimum une analyse croisée entre les forages/observations géologiques et la résistivité. Pour mémoire, les formations géologiques en présence dans le secteur de Pierrefonds sont les suivantes : laves plus ou moins altérées en profondeur, surmontées par des pyroclastites et/ou des alluvions (Illustration 11).
 - L'épaisseur des alluvions décroît vers l'est, en s'éloignant de la Rivière Ste-Etienne (Illustration 10 - Bourhane *et al.*, 2015) : de 46 m sur le piézomètre F12 (12288X0067 - 38067) à 17 m sur le piézomètre P11 (12288X0078 - 38078). Des contrastes de résistivités sont effectivement observés sur les données AEM (profil P11-P12 en annexe du présent rapport) notamment, assez proche de la coupe géologique de l'illustration 10), mais, sans une analyse plus poussée nécessitant un traitement des données géophysiques, la délimitation précise des alluvions n'est pas évidente. Pour mémoire, les sondages AEM sont relativement peu nombreux dans la partie ouest de Pierrefonds (Illustration 5), ce qui ne permet probablement pas de spatialiser correctement les contrastes de résistivités imagées ;
 - En ce qui concerne les pyroclastites, un contraste de résistivité subparallèle à la topographie est observé sur le profil PF01 (Illustration 12, $\approx 100 \Omega.m$ en surface, puis 200-300 $\Omega.m$ entre 20 et 40 m de profondeur). Ce contraste observé à l'échelle d'un profil n'est pas observé lors de l'analyse des données cartographiques, et notamment la courbe enveloppe des pyroclastites. Un traitement spécifique des données pourrait permettre de préciser ces observations (non prévu dans le cadre du présent projet) ;
- L'intrusion saline est matérialisée par la présence d'un conducteur plus ou moins profond et épais au droit du trait de côte. Le terme intrusion saline est qualitatif dans la mesure où les données documentées ne permettent pas de mener une analyse de sensibilité spécifique dans le cadre de la présente étude⁴. Concrètement, la relation entre la résistivité calculée des profils AEM et la conductivité électrique mesurée du fluide contenu dans les pores n'est pas quantifiée (voir § 3.2.3- p. 18). Néanmoins, il peut être prudemment considéré que les résistivités inférieures à 10 $\Omega.m$ ($\rho < 10 \Omega.m$) correspondent à des terrains saturés où prédomine l'eau salée. Cette valeur correspond aux mailles de couleur bleu foncé du bloc 3D (Illustration 13) ;
- Au-delà de la valeur de résistivité obtenue sur les profils AEM, la géométrie du contact entre les horizons conducteurs et résistants permet d'orienter les interprétations. Concrètement, si le contact est penté vers les terres et en continuité avec l'Océan, comme c'est le cas sur le secteur de Pierrefonds, il est très probable qu'il s'agisse de la limite de l'intrusion saline (flèches noires sur l'illustration 13) ;

⁴ Une analyse de sensibilité plus poussée sur le signal de résistivité géophysique à l'intrusion saline est réalisée à l'échelle de La Réunion (Dumont & Aunay, 2016).

- L'intrusion saline ($\rho < 10 \Omega.m$) présente une géométrie hétérogène entre la partie ouest (Rivière St-Etienne) et la partie est du secteur de Pierrefonds :
 - o L'intrusion saline est « repoussée » vers l'Océan au droit de la Rivière St-Etienne (flèche jaune sur l'illustration 13). Ce phénomène est probablement expliqué par la recharge préférentielle de l'aquifère par la Rivière St-Etienne sur une zone qui s'étend sur près de 500 m du lit majeur au SE de l'embouchure. Ce phénomène est observé sur les profils PF05 et PF06. A partir du profil PF06b, cet effet de recharge n'est plus observé. Dubreuil (1984) avait déjà évoqué cette dissymétrie et l'avait associé à un apport plus important d'eau douce en raison de la présence de la Rivière Ste-Etienne ;
 - o D'après les données du bloc 3D, la profondeur du conducteur augmente entre le secteur au droit de la piste de l'aéroport et le secteur à l'est de la Ravine des Cabris (Illustration 14). Le conducteur ($\rho < 10 \Omega.m$) est identifié à -160/-180 m NGR dans le secteur au droit de la piste de l'aéroport et au-delà de -220 m NGR pour le secteur à l'est de la Ravine des Cabris. Cette observation est relativement aisée sur le bloc 3D. Néanmoins, cette information est plus complexe à extraire des coupes de résistivité pour des questions de visualisations en 2D. Pour mémoire, le contact entre les formations du remplissage alluvionnaire de Pierrefonds et les coulées basaltiques⁵ est probablement dans ce secteur ;
 - L'intrusion saline adopte une géométrie particulière de « double intrusion superposée » dans la partie SE de Pierrefonds. L'intrusion d'eau saumâtre ($\rho \approx 10$ à $50 \Omega.m$) la plus proche de la surface est observée à partir de la tour de contrôle de l'aéroport (profil PF07), jusqu'à la limite SE du modèle AEM (Pointe du Diable – profil PF01). Son développement est d'environ 1 km vers les terres. La profondeur de cette intrusion saline décroît du NW (-80 m NGR sur le profil PF07) vers le SE (-30 m NGR sur le profil PF01) : le toit de l'intrusion saline est donc penté vers le W. Les informations géologiques disponibles ne permettent pas de justifier cette double intrusion⁶. Au point de vue hydrogéologique, cette double intrusion peut être expliquée par la présence de contraste de perméabilité (phénomène pouvant être illustré également sur le piézomètre P11 syndicat - Illustration 7) ;
 - o Une intrusion saline simple se développe vers -160/-180 m NGR sur les profils PF06b, PF04b, PF04 et P12-S2. La propagation vers les terres de ce conducteur profond est de l'ordre d'un km. Il est important de rappeler que les données AEM ne permettent pas d'imager correctement la prolongation de ce conducteur plus en profondeur et plus à l'intérieur des terres.

⁵ β 7 de la série de la Plaine des Cafres (65 000 à 5 000 ans)

⁶ La présence d'un paléo-exutoire de la Rivière Ste-Etienne est évoquée en raison de la présence d'alluvions en profondeur (Bourhane et al., 2015). En effet, sous les coulées différenciées, les ouvrages les plus profonds (comme le forage 38087 - Dupuis 3) recoupent des alluvions anciennes bien conservées. Ces formations tapissent une paléo-vallée dans laquelle l'ancien lit du Bras de Cilaos se serait mis en place. Par ailleurs, des études portant sur l'évolution sédimentaire de la plaine de Pierrefonds (Saint-Ange et al. 2011 et Sisavath et al. 2011) démontrent que le paléo-exutoire de la Rivière Ste-Etienne se localise à proximité du secteur marqué par la double intrusion saline.

Il apparaît néanmoins que ces informations géologiques sont très imprécises par rapport à la localisation effective de la double intrusion saline dérivée de l'AEM. Par ailleurs, la double intrusion se développerait sous les pyroclastites alors que le paléo-exutoire est à l'ouest des pyroclastites.

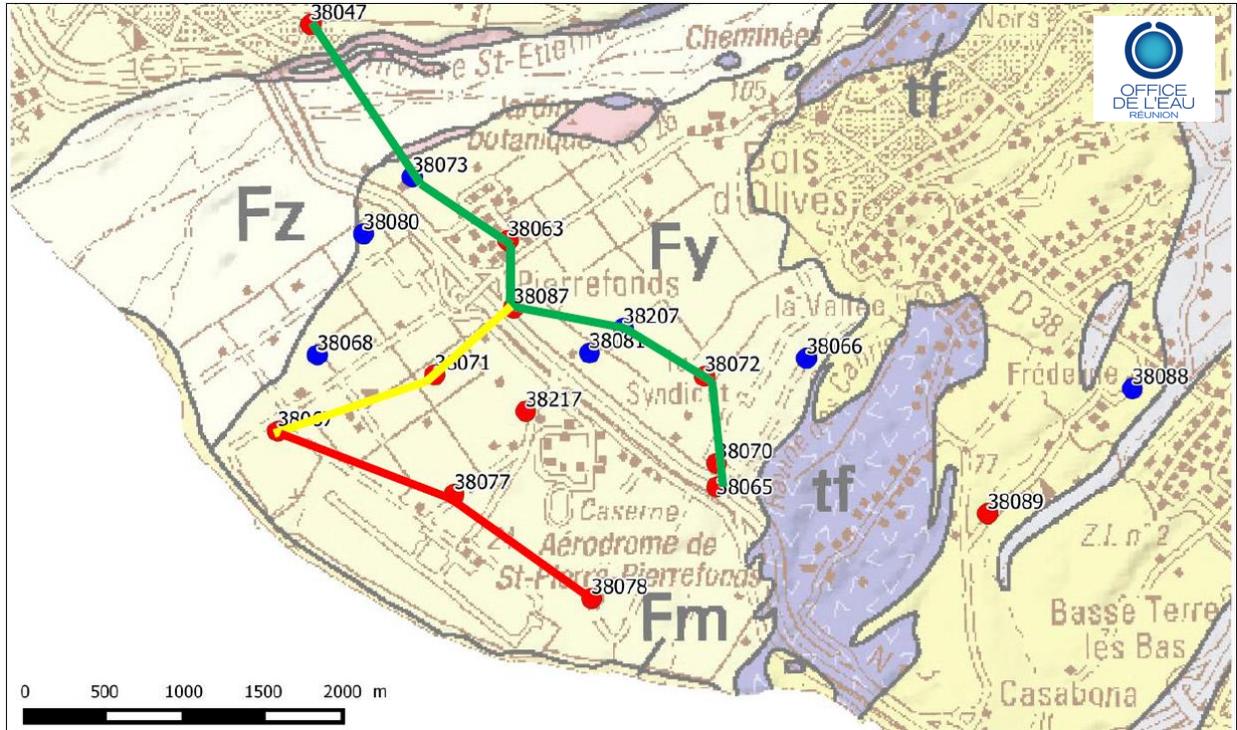
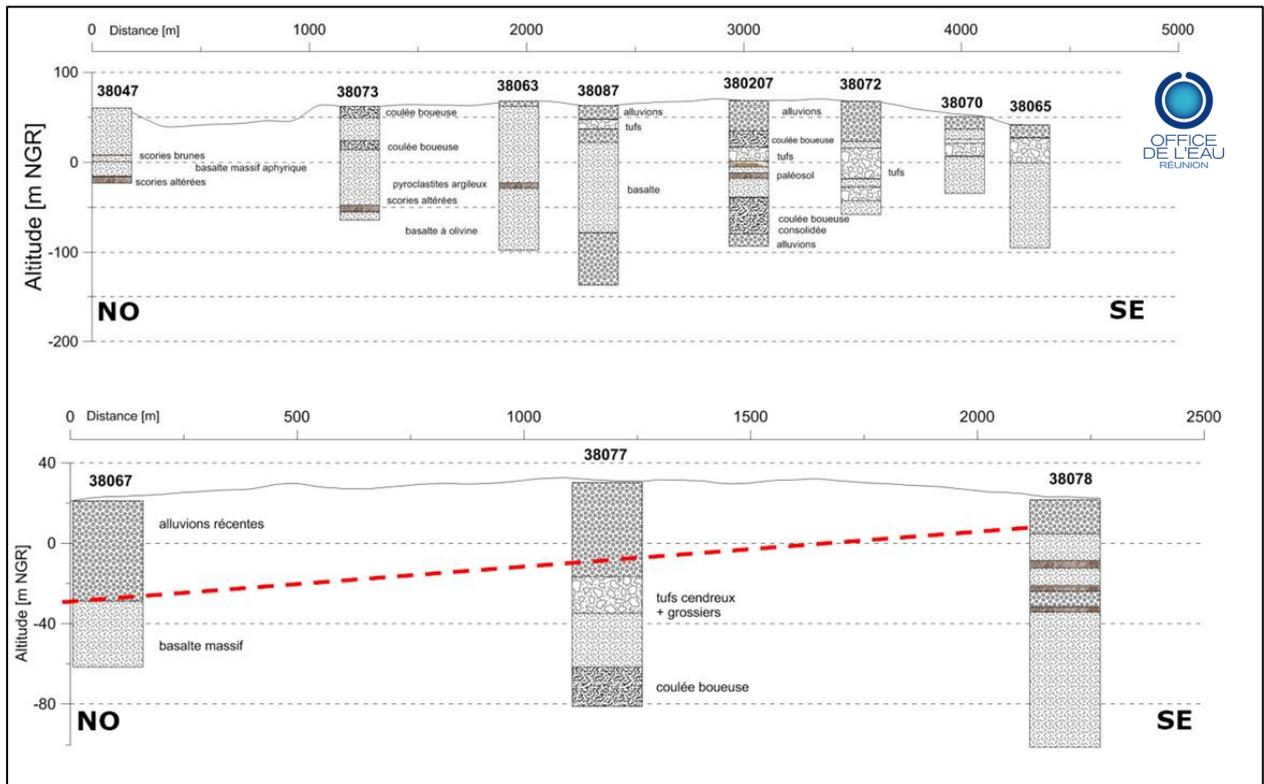


Illustration 10 – Coupes géologiques parallèles à la côte dans la plaine de Pierrefonds (Bourhane et al., 2015)

Coupe géologique du haut : coupe verte
 Coupe géologique du bas : coupe rouge

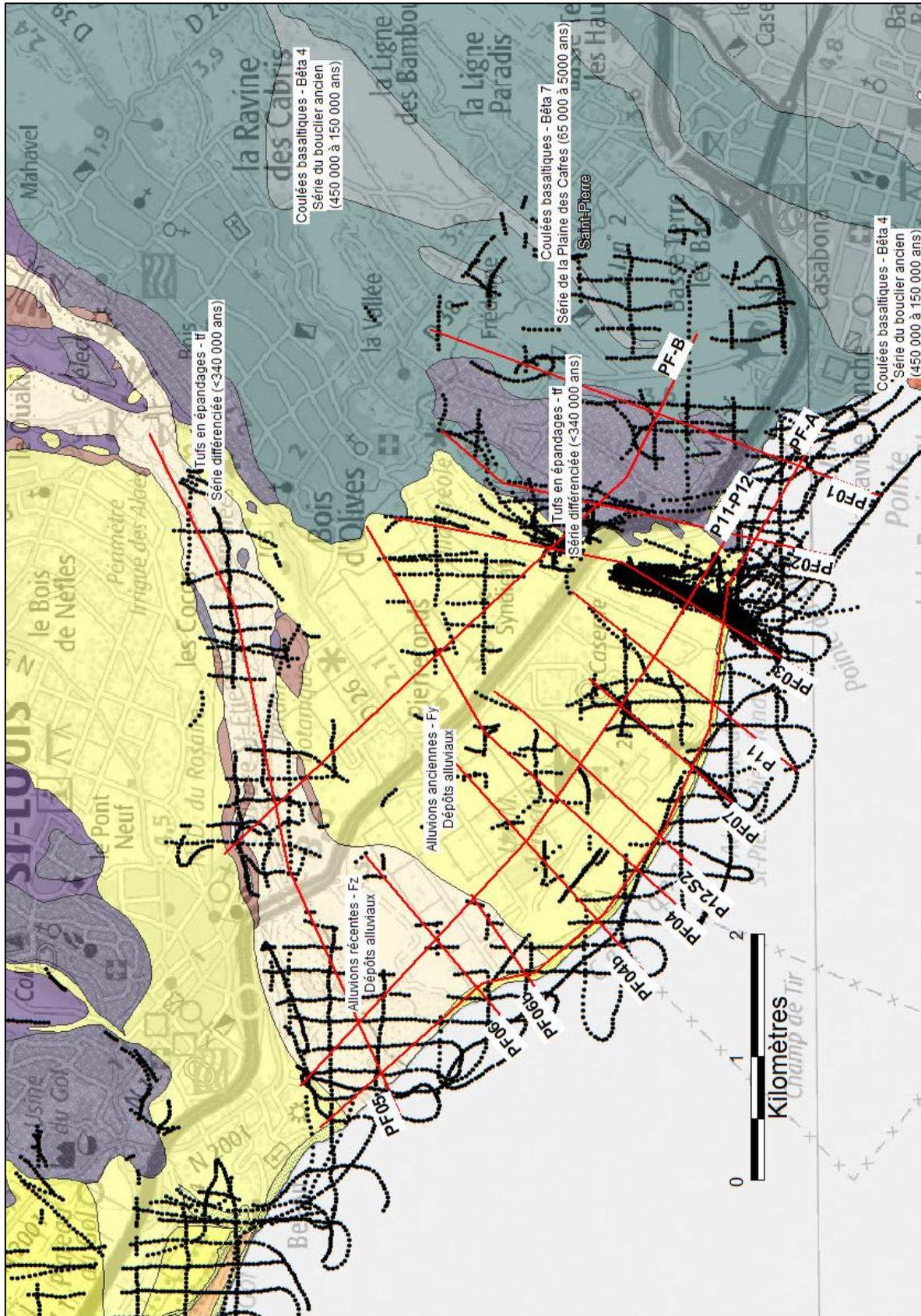


Illustration 11 – Carte géologique du secteur d'étude (BRGM et LGSR, 2006)

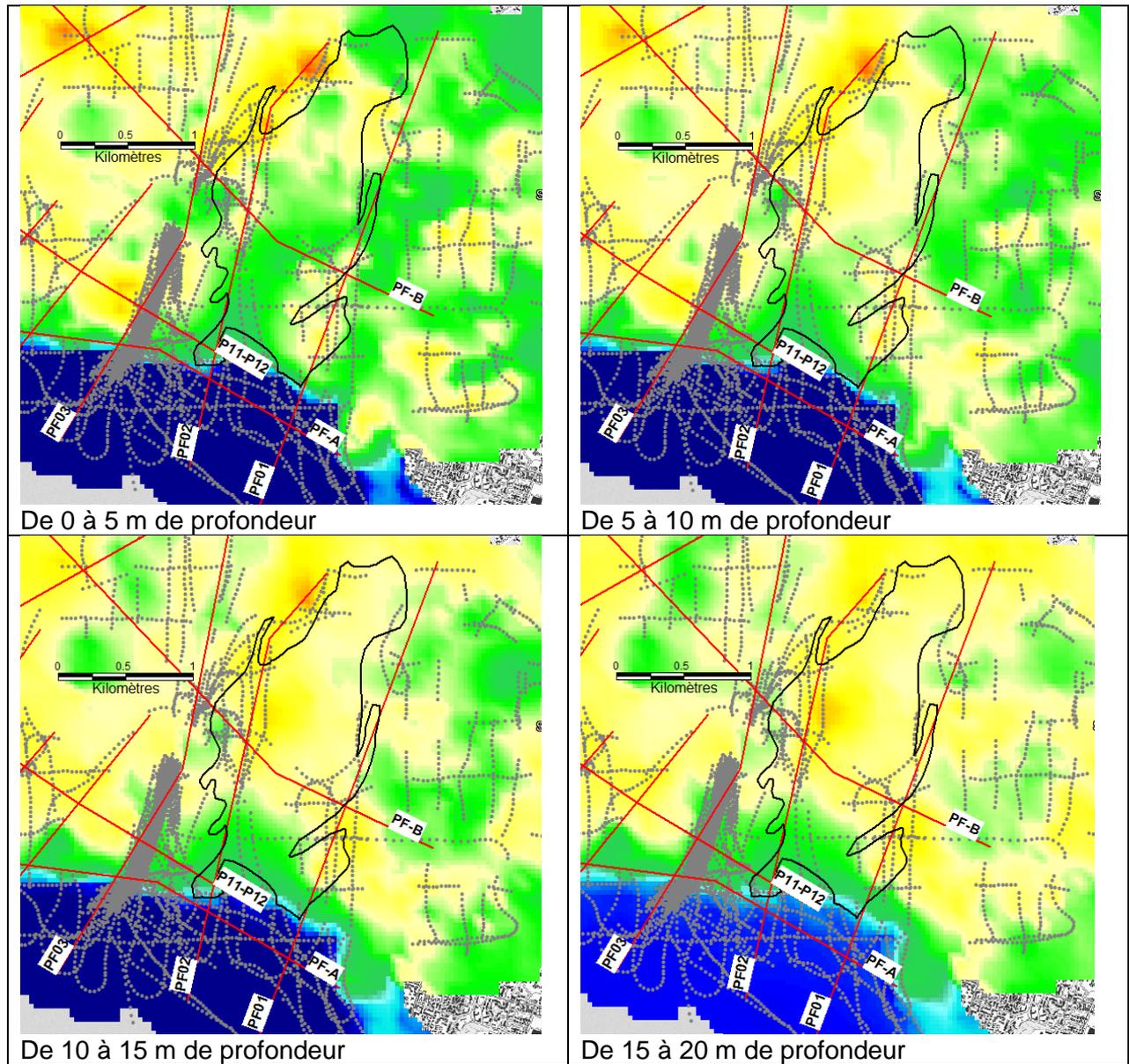


Illustration 12 – Cartes de résistivité en fonction de la profondeur
 L'emprise des pyroclastites (tufs en épandages) est figurée par la courbe enveloppe noire. Les contrastes de résistivité ne sont pas cohérents avec l'emprise des formations pyroclastiques. On peut néanmoins noter que la densité des sondages AEM est relativement faible

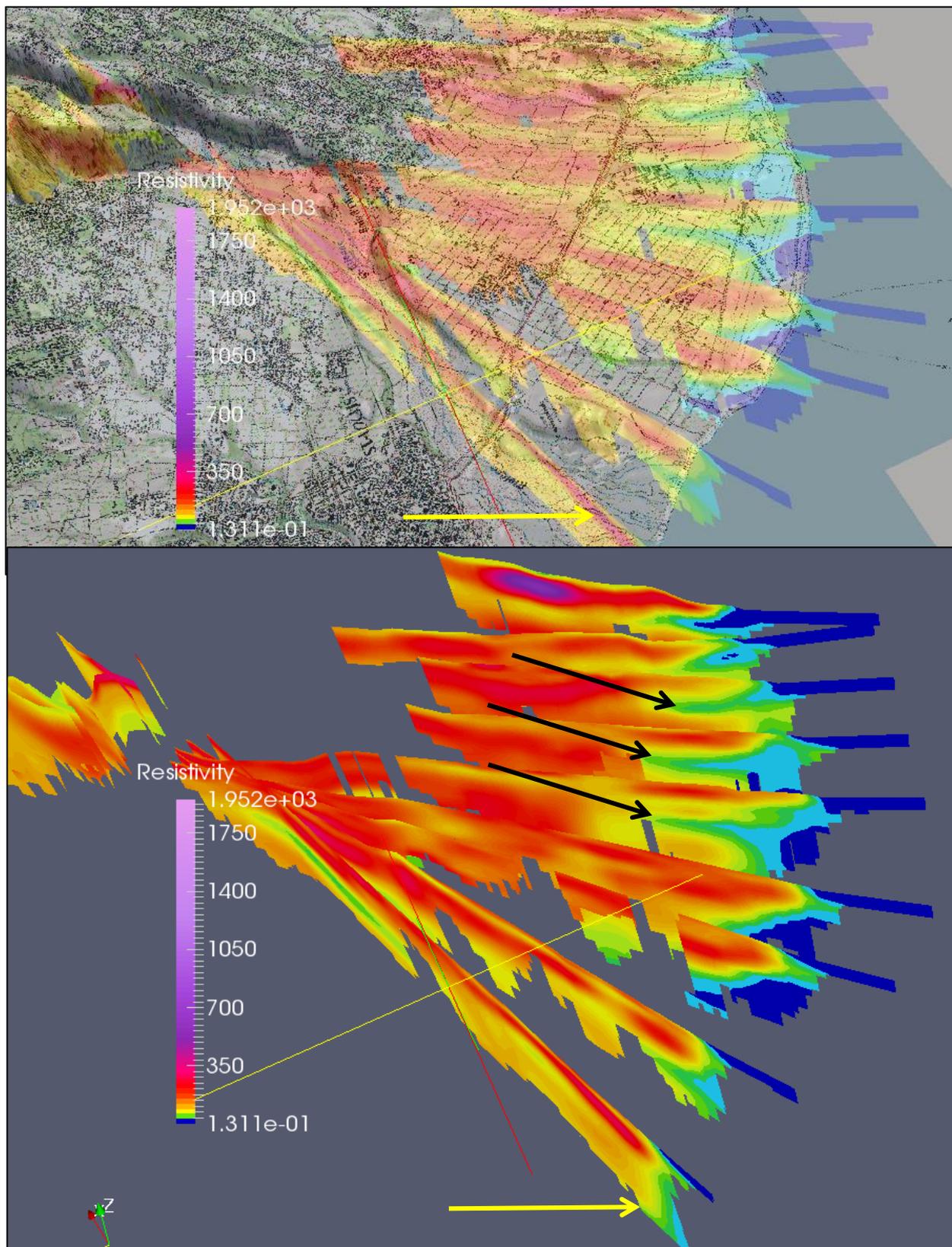


Illustration 13 – Coupes verticales de résistivité issues du bloc 3D

L'intrusion saline est matérialisée par la présence du conducteur au droit du trait de côte (bleu foncé > 10 Ω.m)

L'intrusion saline est repoussée au droit de la Rivière St-Etienne (flèche jaune) – L'intrusion saline adopte une géométrie particulière de double intrusion superposée (flèches noires)

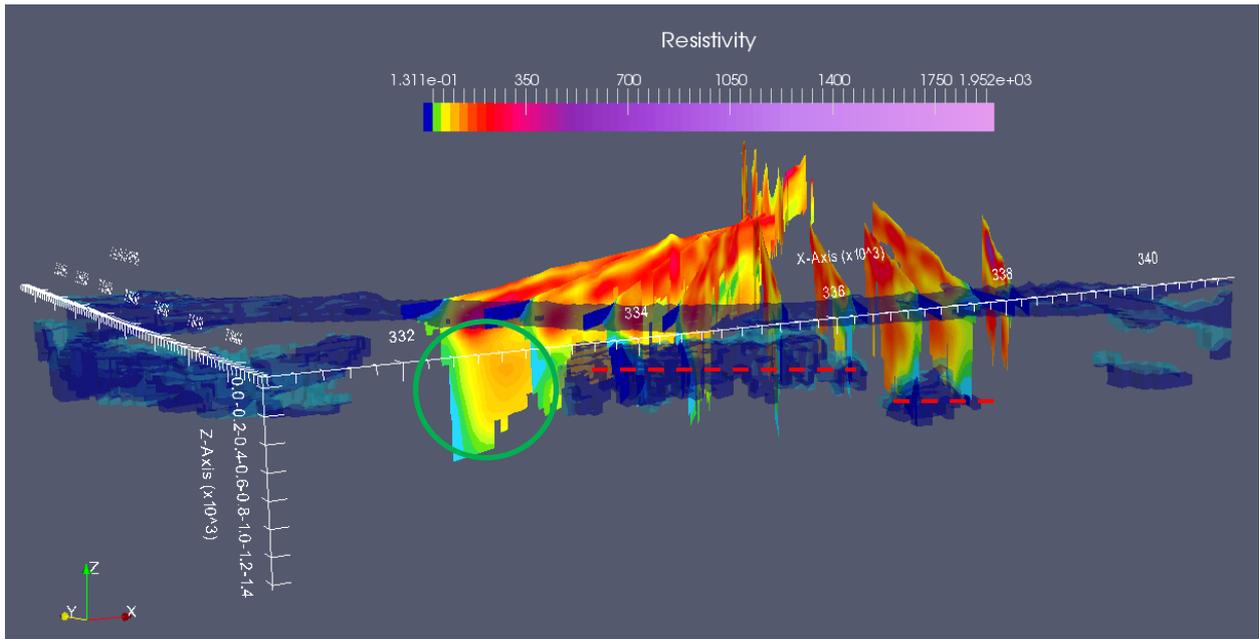


Illustration 14 – Augmentation de la profondeur du conducteur correspondant à l'intrusion saline. Les volumes de couleur bleue représentent les mailles dont la résistivité est inférieure à 10 $\Omega.m$. Le cercle vert marque l'absence de conducteur au droit la Rivière Sainte-Etienne (intrusion saline repoussée par la nappe d'accompagnement)

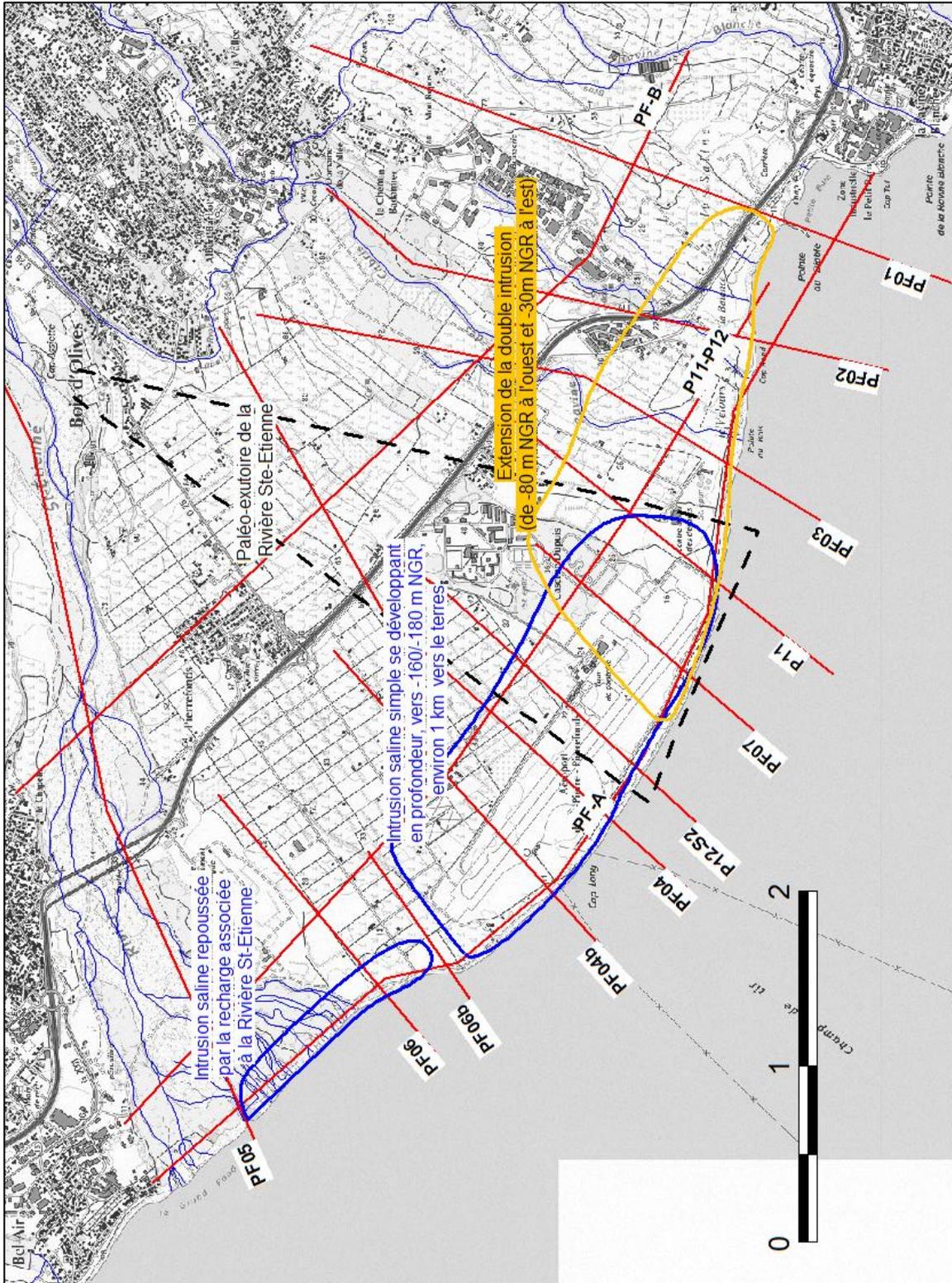


Illustration 15 – Synthèse des observations effectuées à partir des données AEM

3.4. APPORT DES DONNEES DE GEOPHYSIQUES AU SOL

Le secteur de Pierrefonds a largement été investigué par des méthodes géophysiques. Une synthèse des diverses campagnes géophysiques a été réalisée par l'Office de l'eau (Belle & Bonnier, 2014). Les principaux éléments de conclusions de cette synthèse sont repris ici :

« Le secteur de Pierrefonds et ses alentours ont fait l'objet de 7 études géophysiques de plus ou moins grande ampleur (Illustration 16). La méthode électrique a été généralement employée. De manière complémentaire, la méthode audiomagnétotellurique (AMT) a été utilisée sur le secteur de Saint-Pierre.

En termes de résultats, un horizon conducteur (80-100 ohm.m) est couramment mis en évidence en base de profil, entre 100 et 200 mètres de profondeur sous 0 m NGR. Il est interprété comme des formations peu perméables, correspondant à des coulées altérées.

Il est surmonté par des horizons plus résistants (150-600 ohm.m) dont l'épaisseur varie en fonction des secteurs, pouvant atteindre localement plus de 200 m. Ces formations sont assimilées au réservoir aquifère, constitué de coulées peu altérées et des alluvions.

Plusieurs cartes de profondeur du toit du substratum conducteur ont été construites, montrant des zones de surcreusement marquées, interprétées comme des paléovallées incisant les coulées altérées. Plusieurs forages ont permis de valider ces interprétations. Les différents auteurs attribuent un rôle majeur à ces paléovallées dans le fonctionnement hydrogéologique du secteur de Pierrefonds, avec une concentration des flux d'eau souterraine dans les axes de surcreusement.

En bordure littorale, l'interface eau douce /eau salée est clairement mise en évidence avec des résistivités comprises entre 10 et 70 ohm.m. Par ailleurs, les acquisitions géophysiques montrent que cette interface est plus avancée dans les terres au sud-est qu'au nord-ouest. En revanche, l'observation du biseau salé est généralement restreinte à 200 ou 300 mètres du trait de côte en raison des faibles profondeurs d'investigation (< 250 m).

Les compléments d'investigations réalisés en 1987 (Daesslé and Gandolfi, 1987) permirent d'identifier la profondeur de l'interface eau douce / eau salée à 200 mètres de profondeur à environ 1000 mètres de la côte (secteur de Pierrefonds Littoral).

Sur le secteur du forage P11, un niveau plus résistant est observé sous l'intrusion saline grâce à de plus grandes profondeurs d'investigation (Girard et al., 2008). Ce niveau pourrait être attribué à la présence d'eau douce sous le biseau salé à cet endroit. »

Date	Secteur	Méthode	Type de dispositif	Nombre points de mesure	Profondeur moyenne d'investigation (m)	Auteurs
1984	Pierrefonds	Sondage électrique (SE)	Schlumberger	87	250	(Dubreuil, 1984)
1987	Pierrefonds	SE	Schlumberger	10	250	(Daesslé et Gandolfi, 1987)
1988	Pierrefonds	SE	Schlumberger	11	250	(Daesslé and Verdier, 1988)
1988	Nord de Pierrefonds	Réinterprétation de l'existant				(Verdier and Stieltjes, 1988)
1988	Saint-Pierre	SE	Schlumberger	70	250	(Join et al., 1988)
1989	Saint-Pierre	AMT	-	21	> 600	(Duchamps and Daesslé, 1989)
2008	Pierrefonds	Tomographie 2D / 3D	Dipôle-Dipôle	187	400	(Girard et al., 2008)
2015	Pierrefonds	Tomographie 2D	Wenner et Pôle-Dipôle	> 10 000	400	Stratagem

Illustration 16 - Synthèse des études géophysiques sur le secteur de Pierrefonds (Belle & Bonnier, 2014)

Suite à cette synthèse des données, une campagne d'investigations complémentaires, pilotée par l'Office de l'eau, a été réalisée par Stratagem en 2015. Huit profils de tomographie de résistivité électrique couvrant au total un linéaire de plus de 12 km ont été réalisés pour une profondeur d'investigation de l'ordre de 400 m (Illustration 17 - Illustration 18).

Le schéma conceptuel géophysique du secteur de Pierrefonds est conservé à la suite de cette nouvelle campagne de géophysique (Stratagem, 2015). Il est précisé notamment en raison d'informations localement distribuées en 3D.

Il ressort néanmoins une certaine complexité à traduire les différentes données géophysiques en un schéma conceptuel géologique (épaisseur des alluvions sur le substratum volcanique, emprise des formations pyroclastiques). Une analyse géologique de ces récentes données géophysiques est proposée par Baltassat *et al.* (2016).

Par ailleurs, une comparaison des données de géophysique au sol et des données AEM est également effectuée par Baltassat *et al.* (2016). Une certaine cohérence est présente entre les données. Au-delà de données géophysiques variées, les informations issues de ces diverses campagnes de terrain sont très complémentaires et s'enrichissent mutuellement :

- L'AEM permet d'obtenir une information précise sur la géométrie de l'intrusion saline au niveau du littoral. Il s'agit ici de bénéficier d'une image du continuum terre-mer, permettant ainsi d'appréhender logiquement les conditions aux limites d'un aquifère (absence d'effet de bord). Cette image est fréquemment disponible jusqu'à une profondeur de plus de 200 m au minimum. Cette information géométrique pourrait être largement précisée en modifiant le modèle d'inversion des données AEM dans la mesure où le modèle « Smooth » tend à lisser les forts contrastes de résistivité rencontrés sur le domaine littoral. Par contre, le manque de données non bruitées dans la partie centrale de Pierrefonds ne permet pas la caractérisation d'entités géologiques sur la base des contrastes de résistivité. Pour mémoire, des formations géologiques ont néanmoins pu être caractérisées sur d'autres secteurs de La Réunion ;
- Les données de géophysique au sol, et plus particulièrement, les deux dernières campagnes, permettent d'obtenir de l'information géophysique jusqu'à 400 m de profondeur. Cette information est importante afin de déterminer la prolongation de l'intrusion saline à plus d'1 km à l'intérieur des terres dans le cas de Pierrefonds. Par contre les effets de bord sont significatifs et ne permettent pas d'imager le continuum terre-mer, permettant ainsi d'appréhender logiquement les conditions aux limites d'un aquifère.



Illustration 17 – Localisation des profils ERT récents réalisés par Stratagem (2015)

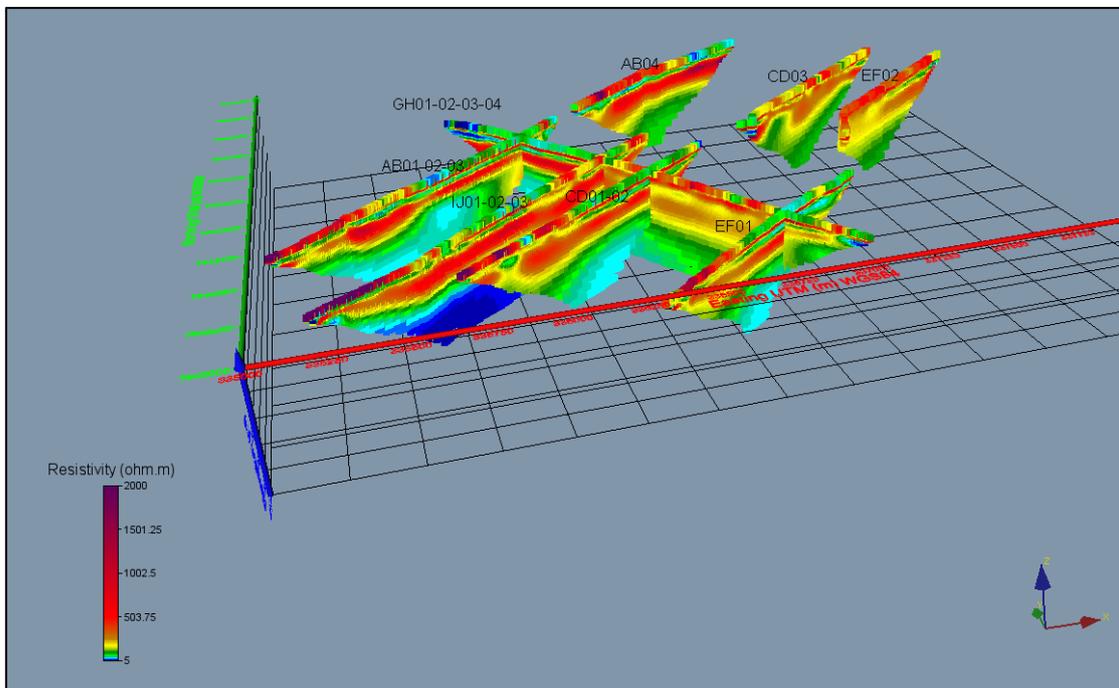
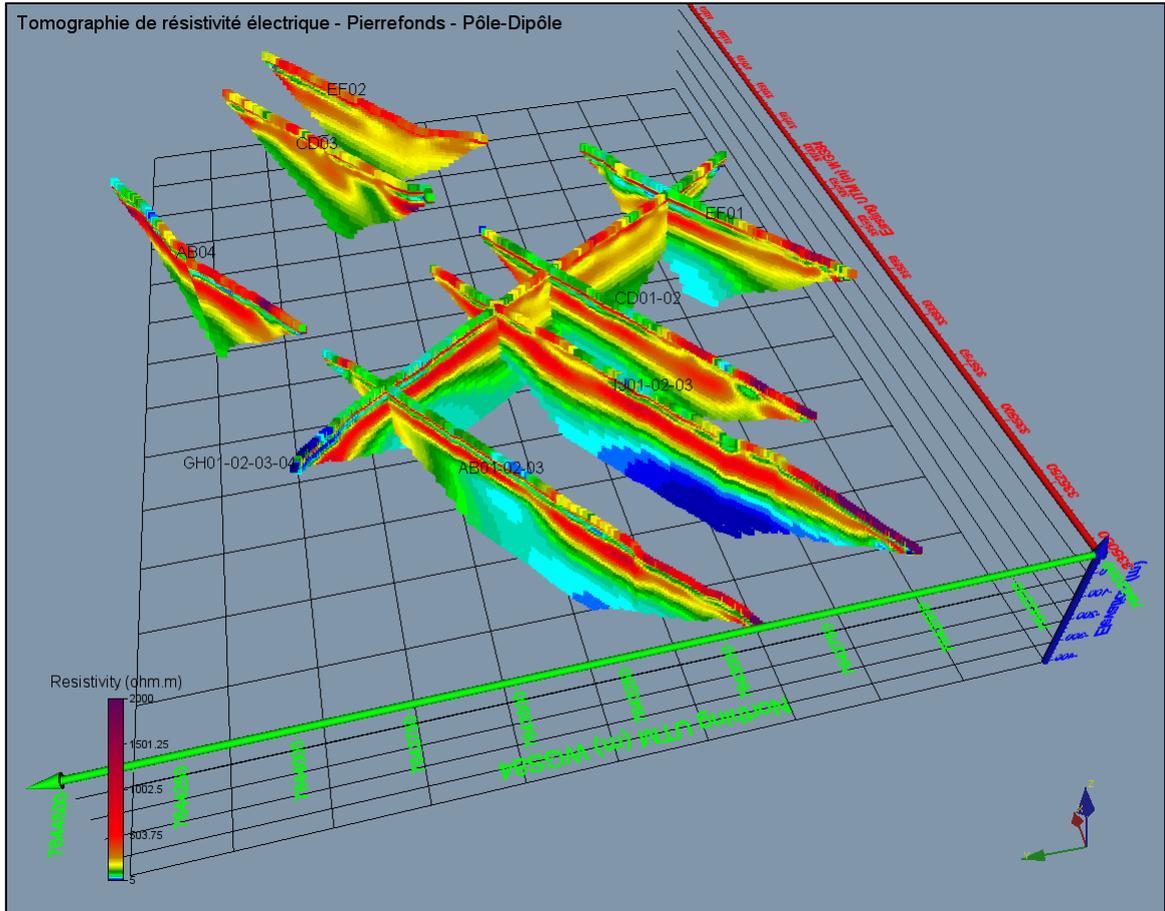


Illustration 18 - Représentation 3D des résultats de tomographie de résistivité électrique Pôle-Dipôle obtenus sur le secteur de Pierrefonds (Stratagem, 2015)

4. Conclusion

Dans le cadre du contrat d'objectif 2012-2016 avec le Conseil Départemental, l'Office de l'eau développe un modèle maillé pour tester de nouveaux scénarii d'exploitation.

Les données du levé géophysique hélicopté effectué au cours de l'hiver austral 2014 présentent un intérêt pour la construction d'un tel modèle.

Après un traitement spécifique des informations géophysiques, les données ont été communiquées à l'Office de l'eau sous forme d'un modèle numérique 3D, de coupes et de carte de résistivité.

4.1. SYNTHÈSE DES RESULTATS

Une analyse croisée des données des sondages AEM et des logs de conductivité électrique a été réalisée afin de déterminer les incertitudes relatives aux données géophysiques. Il apparaît que :

- les résistivités inférieures à 10 Ω .m correspondent à des terrains saturés où prédomine l'eau salée ;
- les résistivités de l'ordre de 20 à 30 Ω .m correspondent à des terrains saturés sous influence d'une intrusion saline (zone de diffusion). Cette gamme de résistivité peut également correspondre à des formations volcaniques altérées notamment celles rencontrées dans les cirques et sur la côte au vent.

L'analyse des résultats montre que :

- D'une part, l'hydrogéologie du secteur de Pierrefonds est précisée par l'analyse des données de géophysique : la position et la géométrie de l'intrusion saline sont bien imagées, ce qui permet de mettre en évidence (i) un phénomène de dédoublement de l'intrusion saline dans la partie côtière Sud-Est de Pierrefonds et (ii) une intrusion saline repoussée par la recharge apportée par la Rivière Ste-Etienne au droit de son embouchure. Cette analyse est relativement robuste dans la mesure où la densité des données permet d'imager de manière quasi-continue la géométrie de l'interface eau douce / eau salée. Cette image est fréquemment disponible jusqu'à une profondeur de plus de 200 m au minimum. Cette information géométrique pourrait être largement précisée en modifiant le modèle d'inversion des données AEM dans la mesure où le modèle « Smooth » tend à lisser les forts contrastes de résistivité rencontrés sur le domaine littoral.
- D'autre part, les corrélations entre les différentes formations géologiques et les corps résistants et conducteurs en l'absence d'intrusion saline ne sont pas aisées. En effet, le manque de données non bruitées dans la partie centrale de Pierrefonds ne permet pas la caractérisation d'entités géologiques sur la base des contrastes de résistivité. Pour mémoire, des formations géologiques ont néanmoins pu être caractérisées sur d'autres secteurs de La Réunion.

Sur la base des comparaisons des données AEM et de géophysique au sol, il apparaît que les informations issues des diverses campagnes de terrain sont très complémentaires : l'AEM

permet de bénéficier d'une image quasi-continue du continuum terre-mer, permettant ainsi d'appréhender logiquement les conditions aux limites d'un aquifère (absence d'effet de bord), tandis que les autres méthodes permettent d'investiguer plus en profondeur.

4.2. PERSPECTIVES

En raison du caractère innovant des données d'AEM et de leur utilisation dans le contexte des aquifères côtiers de La Réunion, la démarche du présent rapport conserve un caractère exploratoire et différents sujets n'ont pu y être traités. Ces sujets pourront éventuellement être abordés dans un cadre différent (thèse de Marc Dumont et/ou autre projet de recherche) sous-réserve d'une densité suffisante de données AEM.

Les éléments ci-dessous ont notamment été discutés entre le BRGM et l'Office de l'eau :

Courbes enveloppes des formations superficielles (alluvions et pyroclastites)

Cette tâche, qui nécessite des inversions spécifiques contraintes par les logs géologiques des forages et par les données de géologie de terrain, pourrait permettre de préciser la distribution 3D des alluvions et des pyroclastites. En ce qui concerne les alluvions, la démarche consisterait à évaluer la relation entre les intrusions salines multiples et les alternances alluvions / basalte. En ce qui concerne les pyroclastites, ces dernières sont situées au-dessus des horizons aquifères et ne jouent pas de rôle significatif sur la distribution des écoulements souterrains. Toutefois, il n'est pas exclu qu'elles contribuent localement à la captivité de l'aquifère (voir notamment le forage 12288X0091/SICABO⁷ sur lequel il n'y a que 5 m de différence entre le niveau piézométrique et le mur des pyroclastites.

Paléo-exutoire de la Rivière Ste-Etienne

Pour mémoire, le paléo-exutoire de la Rivière Ste-Etienne est évoqué dans la littérature (voir § 3.3 - Interprétations des données – p. 23) mais peu de données permettent d'approcher sa localisation et sa géométrie. Le rôle de ce paléo-exutoire sur l'hydrogéologie de Pierrefonds est probablement significatif. Sous réserve de la disponibilité des données et d'un contraste de résistivité, différentes inversions spécifiques pourraient permettre d'imager cette paléo-structure.

⁷ <http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=12288X0091/SICABO>

5. Bibliographie

Aunay B., Garnier C., Lucas E., Stollsteiner P., Lemahieu A. (2010) - Etude d'exposition des captages et des îlets habités du bras de la plaine (zone amont) et propositions de solutions - phase 1. Rapport final BRGM/RP-56664-FR. 133 p.

Baltassat J.M., Aunay B. & Dumont M. (2015) – 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.

Belle P. & Bonnier J. (2014) - Synthèse bibliographique des reconnaissances géophysiques sur le secteur de Pierrefonds. Rapport Office de l'eau

Bourhane A., Bonnier J., Belle P., Fadhula S. (2015) - Modélisation numérique de la masse d'eau de Pierrefonds. Rapport Office de l'eau. Etude 00982. 106 p.

BRGM – LGSR (2006) – Carte géologique de La Réunion au 1/100 000.

Daesslé, M., et Gandolfi, J.M., 1987, Reconnaissance du biseau salé par géophysique électrique. Optimisation de l'implantation du forage de Pierrefonds-littoral (commune de Saint Pierre): BRGM 87 REU 28, 11 p.

Daesslé, M., et Verdier, P., 1988, Implantation de forages. Géophysique complémentaire en rive gauche de la Rivière Saint-Etienne: BRGM 88 REU 08, 11 p.

Dubreuil, G., 1984, Etude géophysique par sondages électriques dans la plaine du Bras de Cilaos: BRGM84SGN307GPH, 12 p.

Duchamps, J.M., and Daesslé, M., 1989, Reconnaissance de la ressource en eau souterraine de la région de Saint-Pierre: complément d'investigation par sondages audio-magnétotelluriques: BRGM 89 REU 33, 24 p.

Dumont M. & Aunay B. (2016) – Eléments d'interprétation de la campagne Reun_EM sur la problématique de l'intrusion saline à La Réunion. Rapport BRGM en cours de rédaction. Parution prévue en 2016.

Girard, J.F., Miehé, J.M., Coppo, N., and Aunay, B., 2008, Méthodologie d'imagerie électrique haute résolution des aquifères côtiers en milieu volcanique à La Réunion: BRGM RP 56612 FR, 57 p.

Join, J.L., Daesslé, M., and Stieltjes, L., 1988, Reconnaissances de la ressource en eau souterraine de la région de Saint-Pierre: approches géologique et géophysique électrique: BRGM 88 REU 48, 50 p.

Martelet G., Reninger P.A., Perrin J., Deparis J. (2014) – Acquisition géophysique hélicoptérée de l'île de La Réunion. Rapp. BRGM/RP-63818-FR, 90 p

Nabighian M.N., Macnae J.C., 1991. Time domain electromagnetic prospecting methods. Nabighian, M.N. (Ed.), Electromagnetic methods in applied geophysics, Society of Exploration Geophysicists, 2, part A, 427-520

Reninger P.-A., Martelet G., Deparis J., Perrin J., Chen Y., 2011. Singular value decomposition as a denoising tool for airborne time domain electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics* 75, 264-276

Saint-Ange F, Savoye B, Michon L, Bachelery P., Deplus C., De Voogd B., Dymont J., Le Drezen E., Voisset M., Le Friant A., and Georges Boudon G. (2011) - A volcanoclastic deep-sea fan off La Réunion Island (Indian Ocean): Gradualism versus catastrophism. *Geology* 39, pp. 271–274. doi: 10.1130/G31478.1

Sisavath E, Babonneau N, Saint-Ange F, Bachelery P., Jorry S.J., Deplus C., De Voogd B., Savoye B. (2011) - Morphology and sedimentary architecture of a modern volcanoclastic turbidite system: The Cilaos fan, offshore La Réunion Island. *Mar Geol* 288:1–17. doi: 10.1016/j.margeo.2011.06.011

Viezzoli A., Christiansen A.V., Auken E., Sørensen K., 2008. Quasi-3D modeling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. *Geophysics* 73, F105-F113

Stratagem (2015) - Etude d'imagerie géophysique du sous-sol sur le secteur de Pierrefonds. Commanditaire : Office de l'eau (Marché 2014A), Chaput M., Durand F. 93 p.

Verdier, P., and Stieltjes, L., 1988, Implantation de forages en rive droite de la Rivière Saint-Etienne : interprétation d'une campagne de géophysique électrique: BRGM 88 REU 36, 10 p.

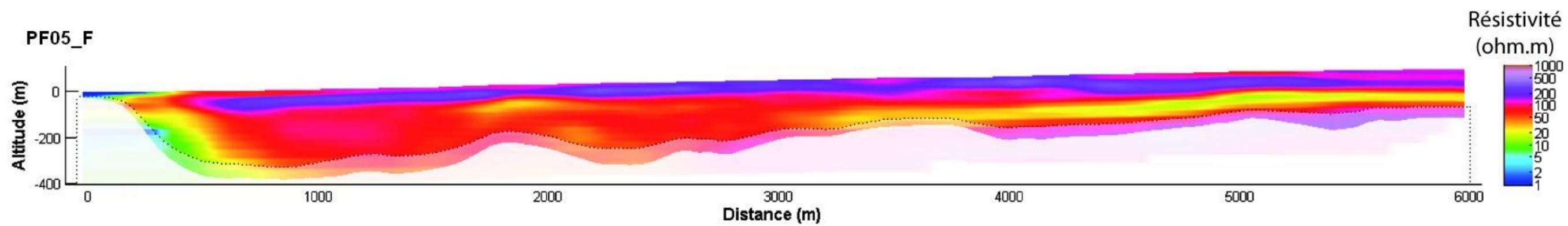
Ward S.H., Hohmann G.W., 1988. Electromagnetic theory for geophysical applications. Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Society of Exploration Geophysicists 1, 131-311

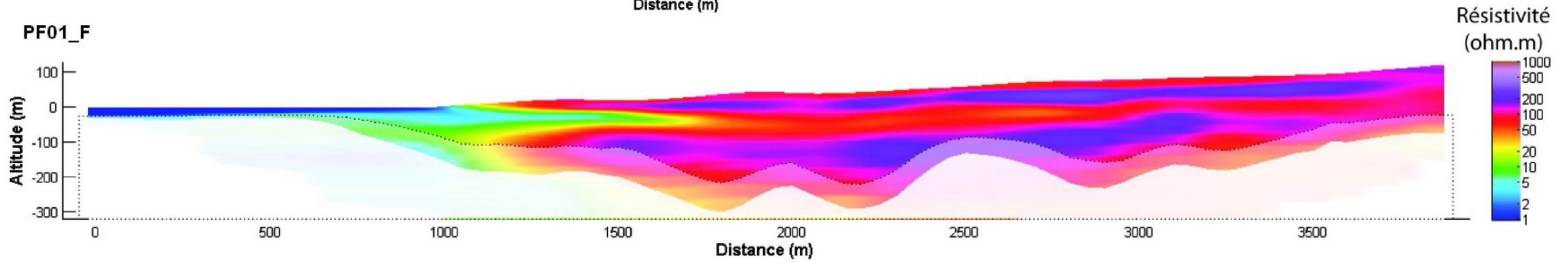
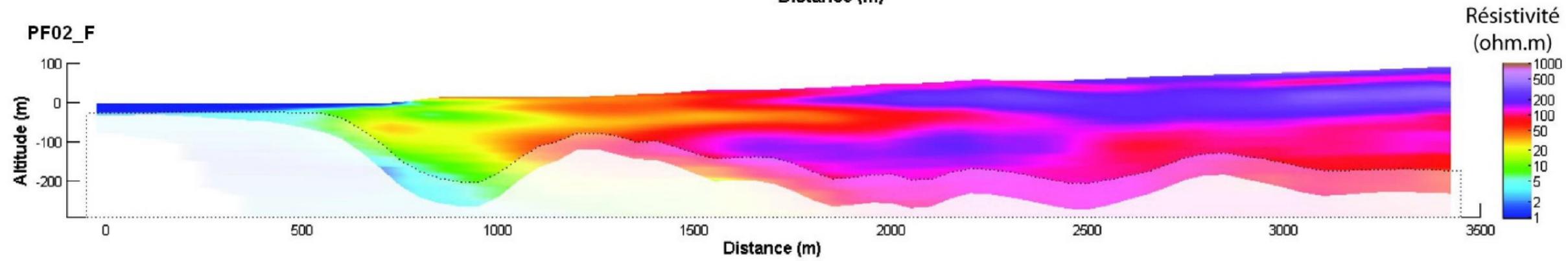
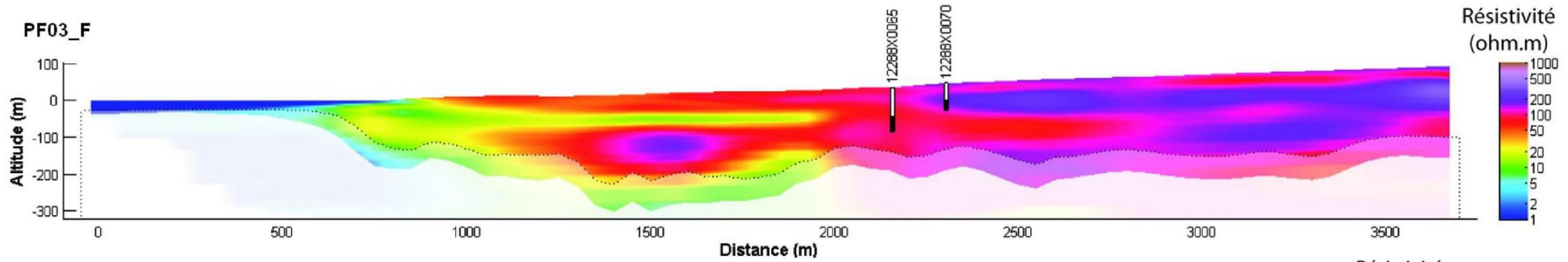
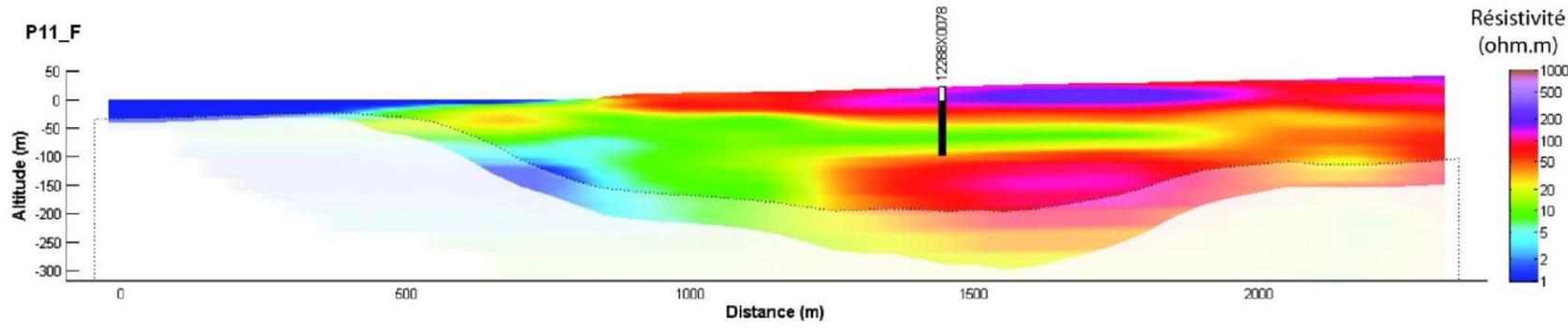
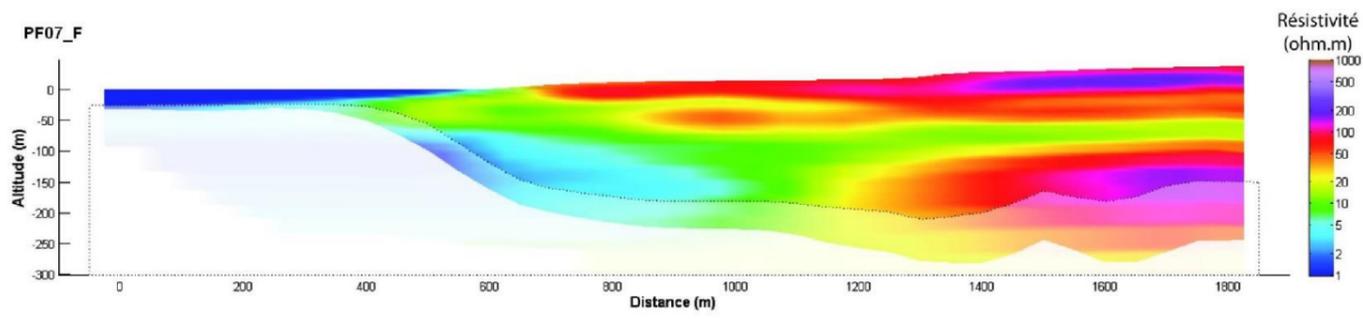
Annexe 1

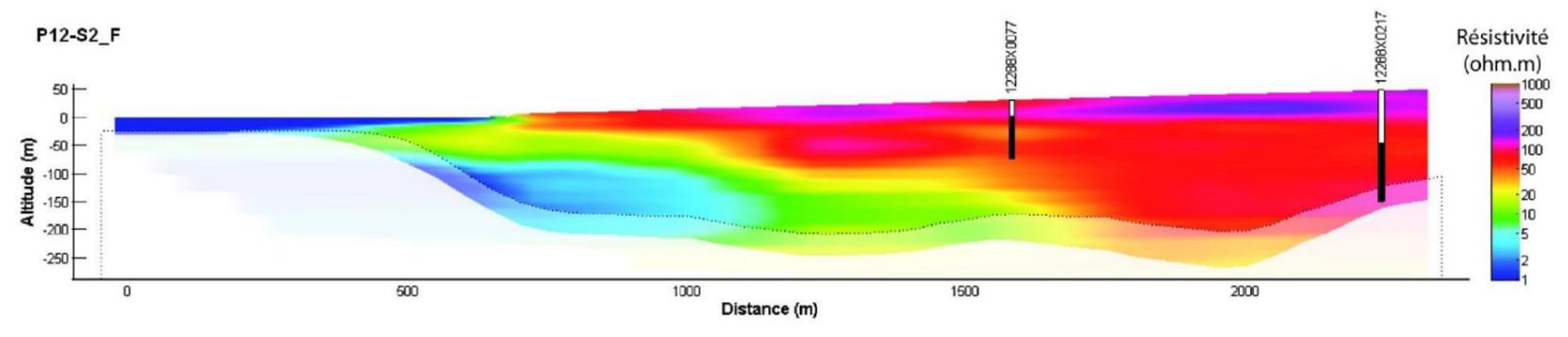
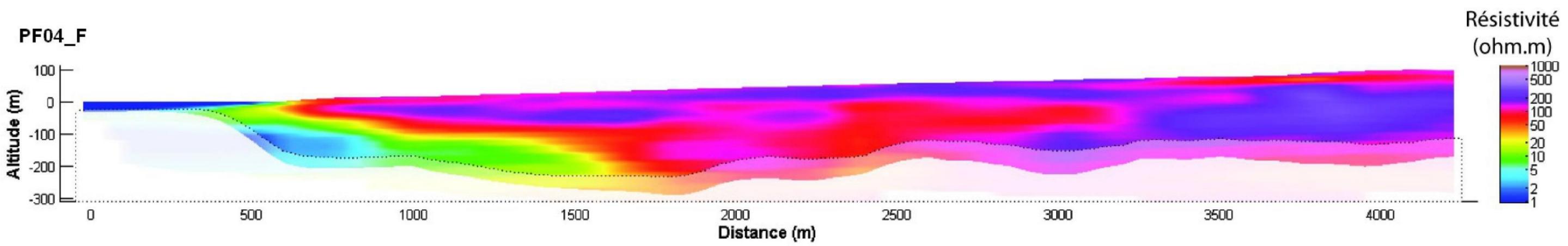
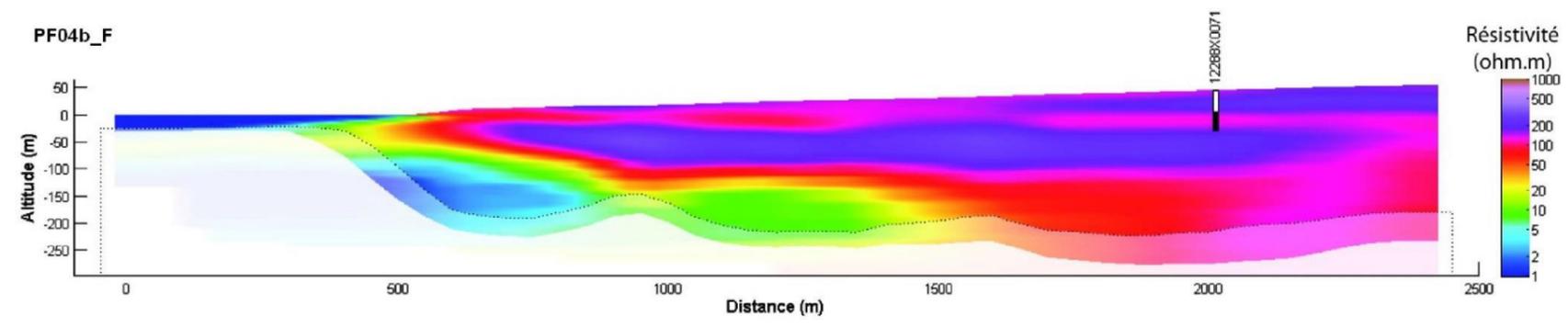
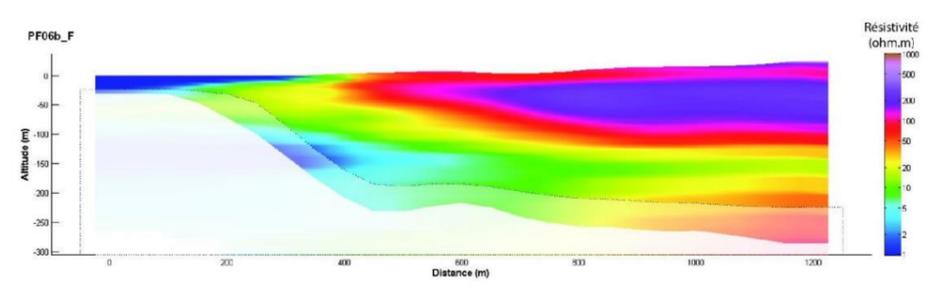
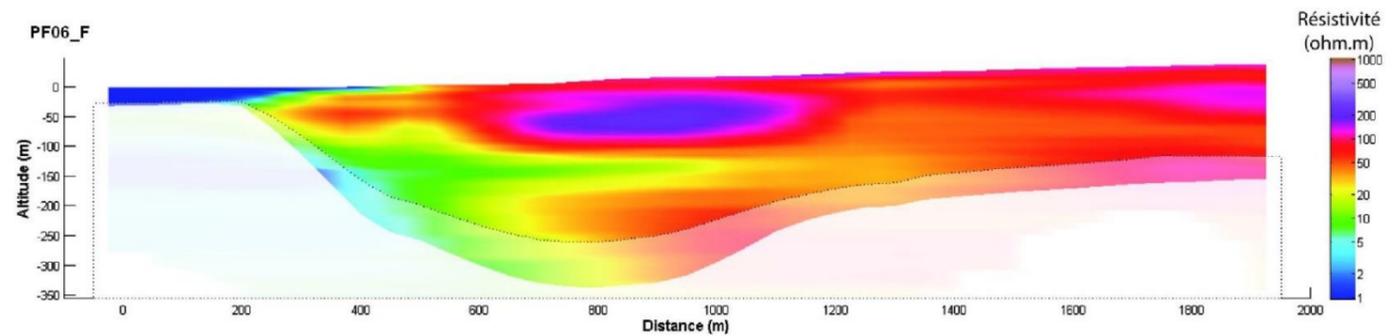
Coupes de résistivité perpendiculaires à la côte

Coupes classées du Nord-Ouest (Rivière sainte-Etienne) au Sud-Est (Saint-Pierre)

Les coupes sont représentées avec une unique échelle sur l'axe des abscisses (hormis pour la coupe PF05).



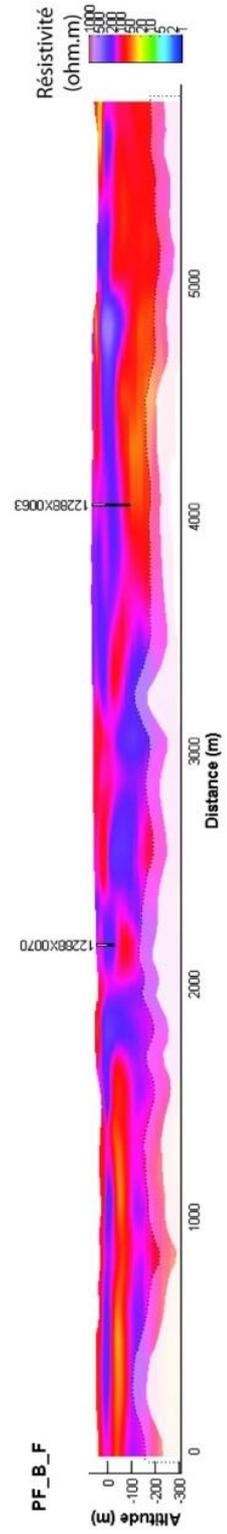
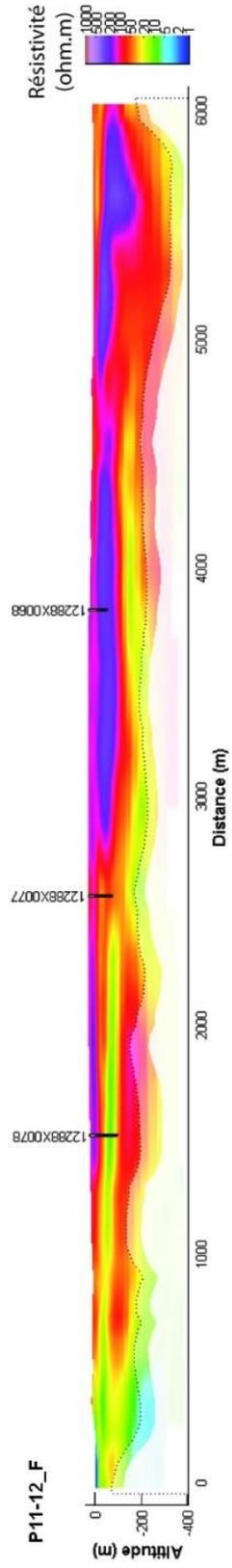
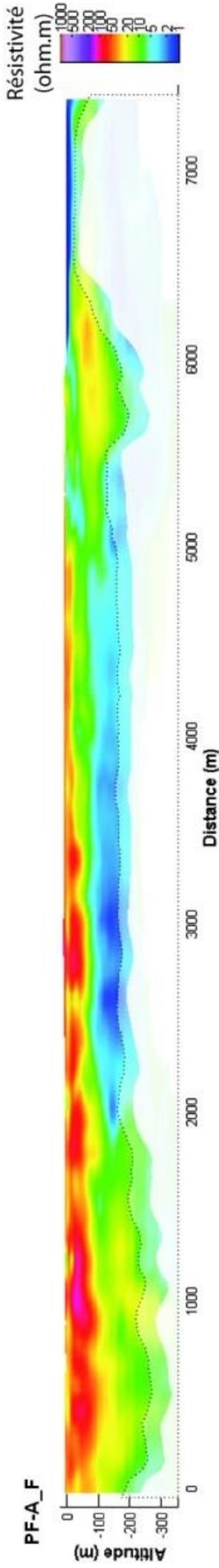




Annexe 2

Coupes de résistivité parralèles à la côte

Les coupes sont représentées avec une unique échelle sur l'axe des abscisses





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

Direction régionale Réunion
5, rue Sainte Anne
CS 51016
97404 Saint-Denis Cedex
Tél. : 0262 21 22 14