

Digues de Saint-Vaast-La-Hougue (50)

Reconnaissance géophysique multiméthodes : Electromagnétique (EM) & Electrique multi- électrodes (PE)

RCF6.J.061

Septembre 2019



GINGER CEBTP – Pôle Géophysique • 17 rue du Pré Comtal
Tél. 33 (0) 4 73 27 72 00 • Fax 33 (0) 4 73 27 74 57 • cebtp.clermont@groupe-cebtp.com



Date émission	version	Rédaction	Contrôle
09/09/2019	1	T. HOUTTEVILLE	F. CHALUS

SOMMAIRE

1.	Introduction	4
1.1	Généralités	4
1.2	Nature de la mission	4
1.3	Contexte géologique	4
1.4	Documents fournis.....	5
2.	Reconnaissance géophysique.....	6
2.1	Matériel de mesure mis en œuvre	6
2.2	Travaux réalisés	7
3.	Résultats de la reconnaissance.....	9
3.1	Documents remis en annexes.....	9
3.2	Synthèse de la reconnaissance	10
4.	Conclusion	16

ANNEXES

Annexe 1 : Reconnaissance géophysique

- Implantation & nomenclature de la reconnaissance géophysique
- Profils EM31
- Coupes géoélectriques
- Tableau des mesures EM et coordonnées GPS associées
- Coordonnées GPS des Panneaux électriques
- Sections PE brutes, calculées, modélisées – Logiciel Res2DInv

Annexe 2 : Principe des méthodes employées.

1. Introduction

1.1 Généralités

A la demande du service Géotechnique de la société GINGER CEBTP - Agence de Caen, 1 rue des Bourreliers, 14123 IFS, représenté par Nicolas LEROUX,

Le Pôle Géophysique de GINGER CEBTP, 17 rue du Pré Comtal, ZAC Les Gravanches, 63100 CLERMONT-FERRAND, a réalisé une reconnaissance géologique par méthodes combinées électromagnétique (EM31) & électrique multi-électrodes (ou panneaux électriques - PE), au droit de certaines digues (Tronçon de l'anse du Cul de Loup, tronçon des Galouettes, tronçon du Sillon, tronçon St-Vaast – Réville) situées sur la commune de Saint-Vaast-La-Hougue (50).

Les mesures in situ ont été effectuées du 05 au 07 Août 2019 par le personnel du Pôle Géophysique de GINGER CEBTP.

Le traitement des données et la rédaction du rapport ont été réalisés par T. HOUTTEVILLE, Ingénieur Géologue-Géophysicien du Pôle Géophysique de GINGER CEBTP.

Ce rapport a fait l'objet d'un contrôle par F. CHALUS, Ingénieur Géophysicien du Pôle Géophysique de GINGER CEBTP.

1.2 Nature de la mission

La prospection électromagnétique à émetteur proche contrôlé (EM31) a pour but, par une mesure de la conductivité apparente du sous-sol (résultant de la contribution de la conductivité de chaque horizon lithologique présent sur la tranche de sol concernée) sur 0/6m, de reconnaître la géologie générale du substratum de surface et subsurface et de mettre en évidence d'éventuelles hétérogénéités (Anomalies, variations de faciès, discontinuités...) qui affecteraient le sous-sol.

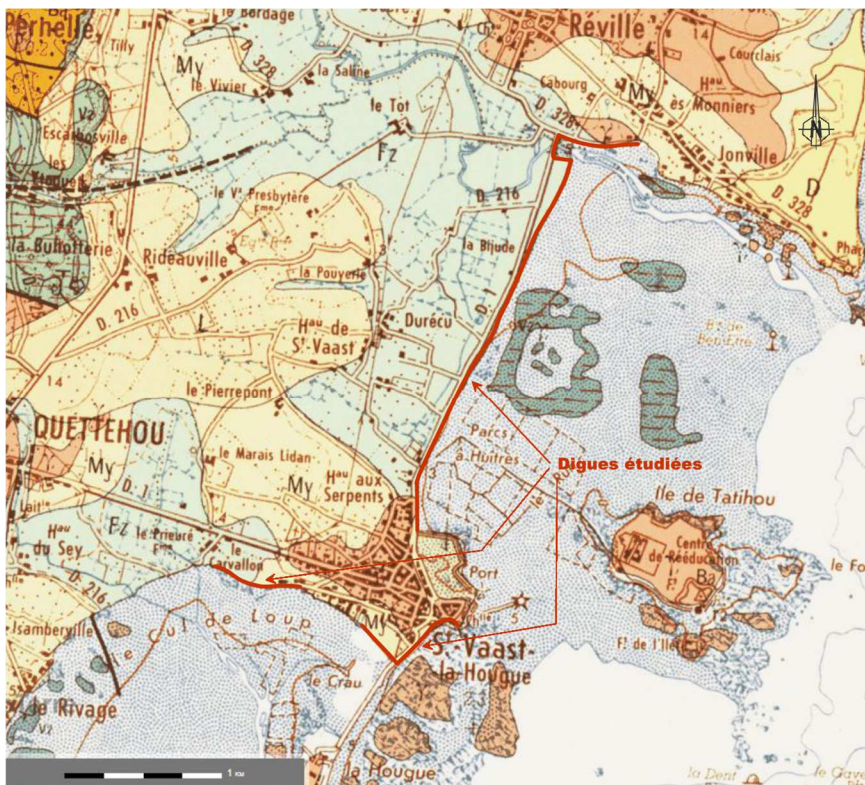
La prospection électrique permet de reconnaître le sous-sol d'une zone d'étude en termes d'unités lithologiques (couches, horizons, ensembles...) caractérisées par leur nature géoélectrique et leur épaisseur.

Divers paramètres peuvent être mesurés, comme la résistivité (Ohm.m) et/ou la chargeabilité électrique (ms)

Dans le cadre du diagnostic de digues, les méthodes mises en œuvre permettent de reconnaître la nature des matériaux constitutifs du corps de digue et de son sol de fondation, de préciser leur homogénéité et de localiser d'éventuelles anomalies de résistivité pouvant correspondre par exemple à des zones de faiblesse, à des infiltrations d'eau, ponctuellement à des galeries (par exemple : renards hydrauliques...).

1.3 Contexte géologique

Extrait de la carte géologique au 1/50000 établie par le BRGM drapée sur fond IGN.
- Feuille n°0073 – Saint-Vaast-La-Hougue (Source : Site internet Infoterre) -



Hormis les remblais et matériaux constitutifs des corps de digue, les principales formations géologiques naturelles susceptibles d'être rencontrées au droit et/ou à proximité des digues étudiées sont succinctement décrites ci-dessous, de la plus récente à la plus ancienne, sur la base des informations mentionnées dans la notice de la carte géologique :

Es (Estran) : Sables et vases saturés en eau salée.

Fz (Alluvions récentes holocènes) : Argiles avec lentilles de tourbes.

My (Terrasses marines du Normannien moyen) : Sables et galets marins.

y1 (Carbonifère) : Substratum rocheux constitué des granites de Barfleur, Fermanville, Saint-Vaast.

v2y1 (Briovérien moyen) : Schistes & grès métamorphisés par le granite de Barfleur - St-Vaast.

1.4 Documents fournis

- Plans d'accès et de situation.
- Plans détaillés des digues au format PDF.

2. Reconnaissance géophysique

2.1 Matériel de mesure mis en œuvre

Mesures électromagnétiques :

- ⇒ Appareil électromagnétique **EM31**, modèle D, de marque **GEONICS** (Référence CEBTP GPH07242).
- ⇒ DataLogger, modèle **Polycorder 600**, de marque **Wescor Inc.** (Référence CEBTP GPH07242-001).
- ⇒ GPS différentiel de marque **Leica**.

Panneaux électriques :

- ⇒ Résistivimètre de marque **ABEM**, de type **Terrameter SAS4000**. (Référence CEBTP GPH07244)
- ⇒ Système multi électrodes de marque **ABEM**, de type Lund **ES10-64**. (Référence CEBTP GPH07245)
- ⇒ Flûte de 62m , 32 électrodes inox & connexions. (Référence GPH 07272)



Matériel de mesure in situ (à gauche : EM31, à droite : Panneau électrique).

2.2 Travaux réalisés

Les mesures géophysiques ont été réalisées selon les référentiel AGAP, fiches n°92.1 EMA21 et n°92.1 ELE 31 du code de bonne pratique édité par l'Association pour la qualité en Géophysique Appliquée.

On se référera au plan d'implantation de la reconnaissance géophysique en annexe 1.

Electromagnétisme :

Il a été réalisé, pour chaque digue à investiguer, 1 profil en crête de digue ou 1 profil en pied de digue lorsque la crête était inaccessible du fait de la présence de propriétés privées.

Le linéaire total mesuré est de 4800 mètres. L'espacement moyen entre les points de mesures est compris entre 7 et 10m.

Digue	Localisation	Sens	Longueur mesurée (m)
Anse du Cul de Loup	Crête	Ouest - Est	592
Galouettes	Crête	NO - SE	309
Sillon	Crête	SO - NE	517
St-Vaast - Réville	Crête	Sud - Nord	3382

Pour chaque point de mesure ont été relevées :

- La valeur de la conductivité apparente (mS/m), retranscrite en résistivité apparente, représentative de la tranche 0/6m du sous-sol.
- La valeur de la composante en phase (ppt) du champ électromagnétique, représentative de la tranche 0/6m du sous-sol.

Les coordonnées GPS ont été recueillies à l'aide d'un GPS différentiel selon le système géodésique Lambert 2 étendu. Leur précision est de l'ordre de ± 3 m.

L'ensemble des données EM a été traité puis mis en forme à l'aide du logiciel **Grapher 13**, produit par la société **GOLDEN Software**.

Panneaux électriques :

Il a été réalisé 7 panneaux électriques terrestres notés PE01 à PE07, selon la configuration suivante :

Nom	Longueur	Nbre d'élec- trodes	Distance inter-électrodes	Configuration	Paramètre mesuré	Prof. théorique
PE01 à PE07	62m	32	2m	Wenner- Schlumberger	Résistivité	$\pm 12m$

Ces panneaux électriques ont été implantés en fonction des hétérogénéités mises en évidence par la reconnaissance EM.

Les coordonnées GPS des extrémités des panneaux électriques ont été recueillies à l'aide d'un GPS différentiel selon le système géodésique Lambert 2 étendu. Leur précision est de l'ordre de $\pm 3m$.

Les données obtenues lors de la prospection électrique ont été traitées et dépouillées à l'aide du logiciel 2D de modélisation par inversion **RES2DINV**, version 3.4 de Décembre 2001, produit par la société **GEOTOMO Software**.

L'ensemble des données PE a été mis en forme à l'aide du logiciel **SURFER 12**, produit par la société **GOLDEN Software**.

3. Résultats de la reconnaissance

3.1 Documents remis en annexes

➤ **Annexe 1 : Reconnaissance géophysique**

- Implantation & nomenclature de la reconnaissance géophysique (A1)
- Profils EM (4 x A1)
- Coupes géoélectriques (A2)
- Tableau des mesures EM et des coordonnées GPS associées (11 x A4)
- Coordonnées GPS des Panneaux électriques (A4)
- Sections brutes, calculées, modélisées avec le logiciel de traitement Res2DInv (8 x A4)

➤ **Annexe 2 : (17 pages)**

Principe des méthodes employées.

3.2 Synthèse de la reconnaissance

Reconnaissance électromagnétique (EM31) :

Sur l'ensemble du profil réalisé, la reconnaissance par méthode électromagnétique permet de caractériser en termes de résistivité apparente les matériaux du sous-sol investigué.

Le traitement des données a consisté en :

- Un lissage des courbes de mesure par moyenne glissante sur 5 pts permettant de délimiter les tronçons considérés comme plus ou moins homogènes et les classes de matériaux rencontrés.
- L'établissement d'un profil dit « résiduel » permettant de mettre en évidence les variations de résistivité ponctuelles (inférieures à 15m d'extension) ou peu étendues, susceptibles d'être attribuées à des hétérogénéités. A été considérée comme anomalie toute variation ponctuelle de résistivité supérieure ou égale à un seuil de prise en compte de la résiduelle.
- L'établissement d'un profil dit « de Phase » permettant de mettre en évidence les perturbations du champ dans l'environnement proche de l'appareil de mesure.

Environnement « métallique » (et/ou saturé en eau salée)

L'environnement est considéré comme « métallique » (perturbations liées à l'environnement anthropisé ...) lorsque la résistivité apparente mesurée est inférieure à 10 Ohm.m et lorsque la composante magnétique est supérieure à 15 ppt.

Lorsque seule la composante magnétique est supérieure à 15 ppt en valeur absolue, on considère qu'il y a perturbation du champ électromagnétique, sans en déterminer son origine.

Classe des matériaux (lithologie)

Le pas moyen d'échantillonnage (écart entre deux points de mesure de résistivité) pour l'ensemble de la reconnaissance est de l'ordre 5 m.

Une valeur de résistivité moyenne mobile, établie sur 5 échantillons (c'est-à-dire 5 mesures de résistivité), permet un lissage de la courbe brute tout en restant représentative de la lithologie.

C'est cette valeur moyenne qui a été utilisée afin d'établir 4 classes de matériaux constituant l'ouvrage :

-Lorsque la résistivité apparente moyenne est supérieure à 60 Ohm.m, les matériaux sur la tranche de sol 0/3m seront considérés comme à dominante sablo-graveleuse.

-Lorsque la résistivité apparente moyenne est comprise entre 25 et 60 Ohm.m, les matériaux sur la tranche de sol 0/3m seront considérés comme appartenant à un domaine mixte (argileuse à sablo-graveleuse).

-Lorsque la résistivité moyenne est comprise entre 10 et 25 Ohm.m, les matériaux sur la tranche de sol 0/3m seront considérés comme à dominante argileuse avec une éventuelle présence d'eau salée.

-Lorsque la résistivité moyenne est inférieure à 10 Ohm.m, les matériaux sur la tranche de sol 0/3m seront considérés comme appartenant au domaine saumâtre.

Classe matériaux sol	Résistivité
Domaine à dominante sablo-graveleuse	Supérieure à 60 Ohm.m
Domaine mixte	Comprise entre 25 et 60 Ohm.m
Domaine à dominante argileuse	Comprise entre 10 et 25 Ohm.m
Domaine métallique ou « saumâtre »	Inférieure à 10 Ohm.m

Détermination des anomalies de type 01 et 02

Parmi ce classement des matériaux, 2 types d'anomalies sont définissables :

- Anomalies de type 01 : Les variations de résistivités affectant plusieurs mesures au sein d'un ensemble considéré comme homogène. Ce type d'anomalie est attribué aux grandes variations de résistivités, changement de lithologie constituant de grandes unités au droit du tracé.
- Anomalies de type 02 : Les variations de résistivité affectant principalement une section peu étendue du tracé. Ce type d'anomalie est attribué à une modification ponctuelle et brusque du matériau constituant le sous-sol.

Détermination des anomalies résiduelles (type 03)

La résistivité résiduelle est la différence entre la résistivité brute mesurée et la résistivité moyenne décrite précédemment. Elle a été établie afin de faire ressortir les événements ponctuels et de haute fréquence. Ces événements sont considérés comme anomalies de type 3 (la composante magnétique doit être inférieure à 15 ppt pour qu'une anomalie soit définie comme résiduelle et non comme une anomalie due à un environnement métallique).

Pour ces anomalies de type 03, différents seuils ont été fixés en fonction des contrastes de résistivité (amplitude de l'anomalie).

Si la résistivité résiduelle est comprise entre 20 et 30 Ohm.m, on considère qu'il s'agit d'une anomalie de faible amplitude.

Si la résistivité résiduelle est comprise entre 30 et 50 Ohm.m, on considère qu'il s'agit d'une anomalie de moyenne amplitude.

Si la résistivité résiduelle est supérieure à 50 Ohm.m, on considère qu'il s'agit d'une anomalie de forte amplitude.

Anomalie de type 3	Résistivité résiduelle
Anomalie de forte amplitude	Supérieure à 50 Ohm.m
Anomalie de moyenne amplitude	Comprise entre 30 et 50 Ohm.m
Anomalie de faible amplitude	Comprise entre 20 et 30 Ohm.m

Ces anomalies de type 3 peuvent être attribuées à des défauts ou variations rapides du sous-sol. Elles peuvent correspondre à :

- des zones d'hétérogénéité avec de possibles variations rapides de faciès
- de fortes variations de résistivité au sein d'une même classe de matériaux
- des zones de remblais
- des zones de faiblesse...

Leur position est précisée par l'indication de la distance de l'anomalie par rapport au début du profil (en mètres) :

121.2

Nota Bene :

- Les profils de résistivité apparente et la moyenne glissante sont présentés en échelle semi-log. Les variations ne sont donc pas linéaires.
- La procédure conditionnelle de calcul a tendance à accentuer l'apparition d'anomalies de type 3 dans les domaines les plus résistants (sableux). La procédure a donc été adaptée de façon à mettre en évidence les anomalies en domaine conducteur sans saturer les anomalies en domaine résistants.

Panneaux électriques :

Les résistivités dites « vraies » obtenues par inversion sur les coupes géoélectriques s'intègrent dans une gamme étendue. Elles s'échelonnent pour l'essentiel entre 0.5 Ohm.m et 2000 Ohm.m, ce qui implique la présence de matériaux de nature géoélectrique bien contrastée.

Les coupes géoélectriques PE01 à PE07 présentent des contrastes significatifs permettant de définir les principaux ensembles (ou unités géoélectriques) suivants :

Unité Géoélectrique	Plage de Résistivité	Interprétation géophysique correspondante
A1	Résistivité faible à moyenne, globalement comprise entre 25 et 100 Ohm.m.	Unité de surface pouvant correspondre à un horizon attribué à une partie du corps de digue, à dominante sableuse supposée mais avec présence vraisemblable d'eau salée.
A2	Résistivité moyenne à forte, globalement comprise entre 100 et 2000 Ohm.m	Unité de surface pouvant correspondre à un horizon attribué à une partie du corps de digue, à dominante sableuse supposée (ou maçonneries et enrochements) sans présence d'eau salée.
B	Résistivité très faible à faible, globalement comprise entre 0.5 et 25 Ohm.m.	Unité de surface et/ou subsurface pouvant correspondre selon les cas : - A une partie du corps de digue à dominante argileuse, ou sableuse ± saturée en eau salé - Aux formations sédimentaires meubles vaseuses et/ou sableuses ± saturées en eau salée constituant le soubassement des digues investiguées.
C	Résistivité moyenne à forte, globalement comprise entre 100 et 2000 Ohm.m.	Unité profonde attribuée au substratum rocheux granitique.
D	Résistivité moyenne, globalement comprise entre 50 et 300 Ohm.m.	Unité intermédiaire à profonde (uniquement présente au droit des PE05 & PE06) pouvant correspondre soit : - A une partie du corps de digue à dominante sableuse peu saturée en eau salée (PE05). - A des lentilles sableuses (PE06).
E	Résistivité très faible à faible, globalement comprise entre 0.5 et 25 Ohm.m.	Unité profonde (uniquement présente au droit du PE06) attribuée à des matériaux vaseux et/ou sableux saturés en eau salée ou au substratum localement constitué de schistes.

Remarques concernant les coupes géoélectriques :

- Les sections de résistivité PE01, PE02, PE03, PE04, PE06, PE07 montrent une géométrie globalement multi-couche, modèle attendu pour ce type de reconnaissance. A contrario, le PE05, réalisé au droit d'une portion de digue dont les désordres ont été repris de nombreuses fois, ne présente pas de géométrie bien définie.
- Les profils géoélectriques présentés en annexe sont des modèles calculés par inversion mathématique des mesures. Les profondeurs et les limites supposées entre les différents ensembles sont donc théoriques.
- Les limites reportées sur les profils géoélectriques correspondent à des interfaces marquées liées aux gradients les plus significatifs. Elles déterminent donc les transitions supposées entre les différentes unités géoélectriques définies ci-dessus.
- Les passages entre les diverses formations géologiques, présentant à priori des propriétés de résistivité électrique contrastées, sont marqués par des gradients et non par des transitions brutales. Cela s'explique à la fois par la mesure géophysique et par le processus d'inversion du signal, qui concourent à lisser les interfaces contrastées.
- Les sections de mesure brutes, calculées et modélisées à l'aide du logiciel Res2DInv sont présentées en annexe.

Des sondages géotechniques de contrôle sont préconisés au droit des principales zones présentant des anomalies ou des variations significatives de résistivité. Elles sont listées dans les tableaux suivants :

Digue de l'Anse du Cul de Loup					
Anomalie	Coordonnée X – Lbt2e. du centre de l'anomalie	Coordonnée Y – Lbt2e du centre de l'anomalie	Distance (m) / début du profil EM	Type d'anomalie	Détection
1	338129.8197	2516020.761	130.41	Etendue (environ 50m), chgt litho ?	Profil EM
2	338276.8662	2515975.532	291.38	Etendue (environ 50m), chgt litho ?	Profil EM

Digue des Galouettes					
Anomalie	Coordonnée X – Lbt2e du centre de l'anomalie	Coordonnée Y – Lbt2e du centre de l'anomalie	Distance (m) / début du profil EM	Type d'anomalie	Détection
1	339119.0488	2515536.0979	90.28	Peu étendue (environ 5m), chgt litho ?	PE02

Digue du Sillon					
Anomalie	Coordonnée X – Lbt2e du centre de l'anomalie	Coordonnée Y – Lbt2e du centre de l'anomalie	Distance (m) / début du profil EM	Type d'anomalie	Détection
1	339340.8024	2515610.3434	217.5	Peu étendue (environ 10m), chgt litho ?	PE03
2	339564.6781	2515708.269	500.39	Etendue (environ 50m), chgt litho ?	Profil EM

Digue St-Vaast - Réville					
Anomalie	Coordonnée X – Lbt2e du centre de l'anomalie	Coordonnée Y – Lbt2e du centre de l'anomalie	Distance (m) / début du profil EM	Type d'anomalie	Détection
1	339308.8477	2516377.385	64.60	Peu étendue (environ 13m), chgt litho ?	Profil EM
2	339299.9126	2516575.859	264.54	Etendue (environ 100m), chgt litho ?	Profil EM
3	340085.6807	2518257.345	2133.78	Etendue (environ 60m), chgt litho ?	Profil EM
4	340196.3835	2518831.098	2872.65	Moy. étendue (environ 33m), chgt litho ?	Profil EM
5	340303.379	2518790.425	2988.10	Etendue (environ 60m), chgt litho ?	Profil EM
6	340564.8098	2518767.666	3254.72	Etendue (environ 210m), chgt litho ?	Profil EM
7	340678.8082	2518769.258	3369.26	Peu étendue (environ 19m), chgt litho ?	Profil EM
8	339303.2596	2516526.5316	249.72	Ponctuelle (environ 2m)	PE04
9	339301.5093	2516553.6623	242.10	Moy. étendue (environ 20m), surépaisseur ?	PE04
10	339812.7095	2517663.1961	1475.50	Toute la zone de reprise de digue	PE05
11	340151.4304	2518374.0826	2261.35	Peu étendue (environ 6m)	PE06

4. Conclusion

La prospection géophysique réalisée fournit une vision spatiale au droit des digues étudiées.

Elle permet un zonage en grands ensembles lithologiques et précise la géométrie du sol-support, ainsi que la nature et la qualité supposée des différentes unités en présence.



Elle met en évidence des hétérogénéités et/ou des anomalies affectant le corps des digues et/ou leur sous-bassement.

Cette prospection géophysique étant dite « aveugle » (car non destructive et réalisée depuis la surface), les caractéristiques indiquées précédemment (nature lithologique, limites entre différents ensembles...) ont un caractère représentatif mais non absolu.

Les caractéristiques géophysiques obtenues devront être corrélées avec les données géologiques, hydro-géologiques et géotechniques existantes ou futures, afin de confirmer les hypothèses émises.

Le détail des résultats obtenus est précisé dans le texte et en annexe.

Fait à Clermont - Ferrand,
Le 09/09/2019

Rédaction	Contrôle
 T. HOUTTEVILLE Ingénieur Géologue-Géophysicien	 F. CHALUS Ingénieur Géophysicien

ANNEXES

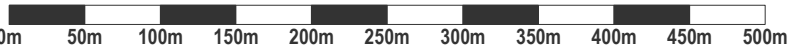
Annexe 1 : Reconnaissance géophysique

- Implantation & nomenclature de la reconnaissance géophysique (A1)
- Profils EM (4 x A1)
- Coupes géoélectriques (A2)
- Tableau des mesures EM et des coordonnées GPS associées (11 x A4)
- Coordonnées GPS des Panneaux électriques (A4)
- Sections brutes, calculées, modélisées avec le logiciel de traitement Res2DInv (8 x A4)

Implantation & nomenclature
de la reconnaissance géophysique
Localisation des anomalies significatives
(méthodes EM31 & Panneaux électriques)



Echelle : 1/5000



Classe matériaux selon EM

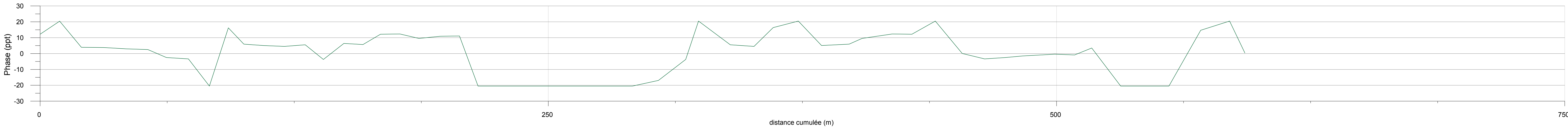
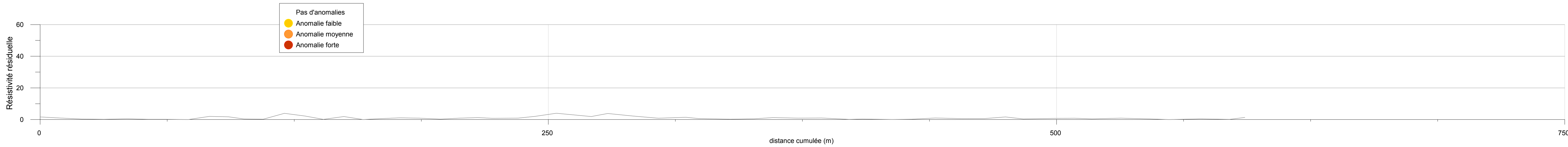
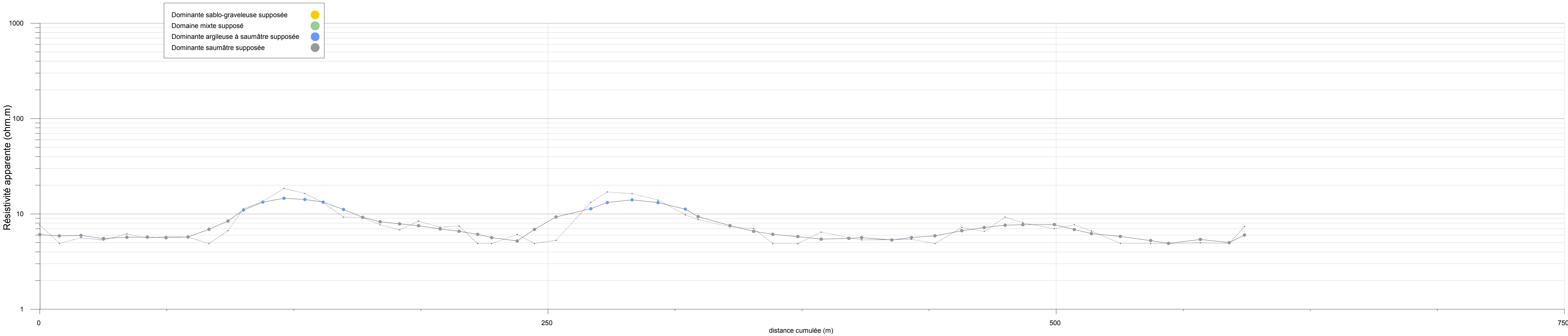


Anomalies significatives relevées

Date	Réalisé/modifié par	GINGER-CEBTP Atte. Géophysique
Sept. 2019	HOUTTEVILLE T.	12 rue du Pape Coeur 50100 Saint-Vaast-la-Hougue Tel. 04.73.97.73.89

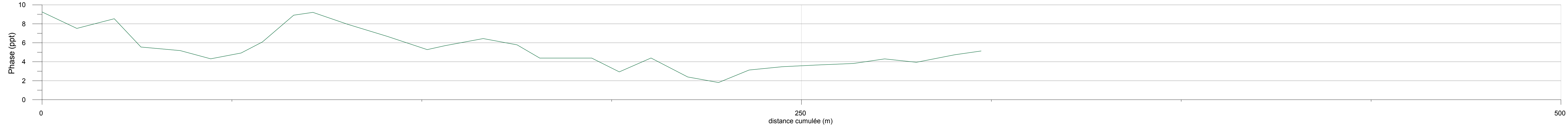
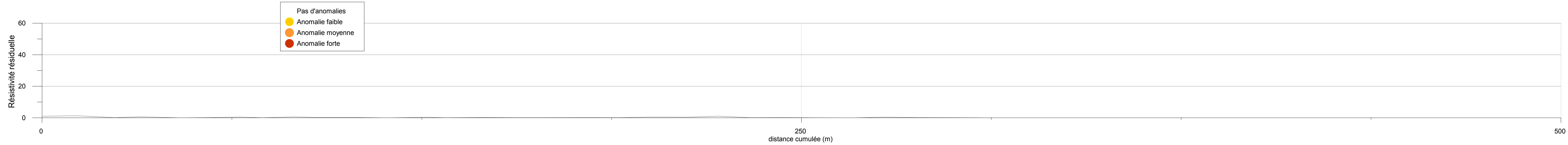
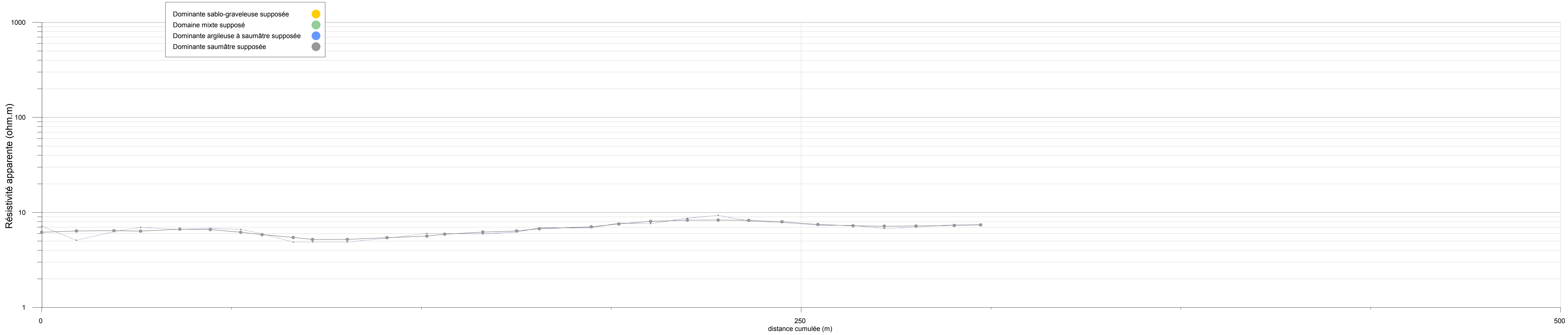
- Saint-Vaast-La-Hougue -
Reconnaissance par méthode EM

Profil en crête de la digue de l'Anse du Cul de Loup
Tranche de sol 0/6m
Orientation : Est - Ouest



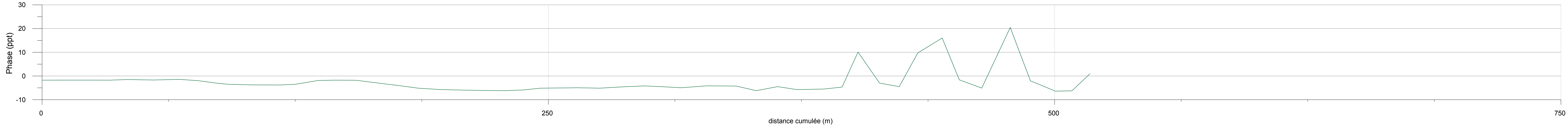
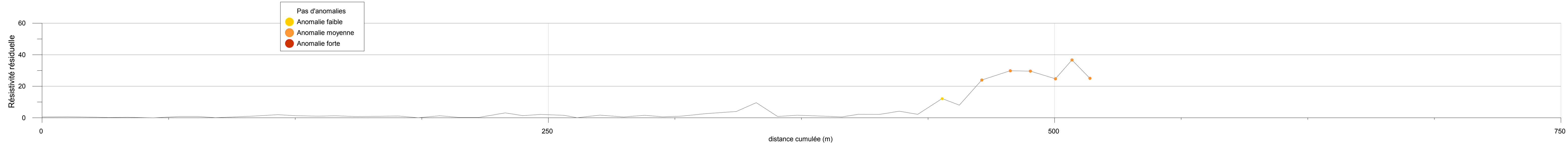
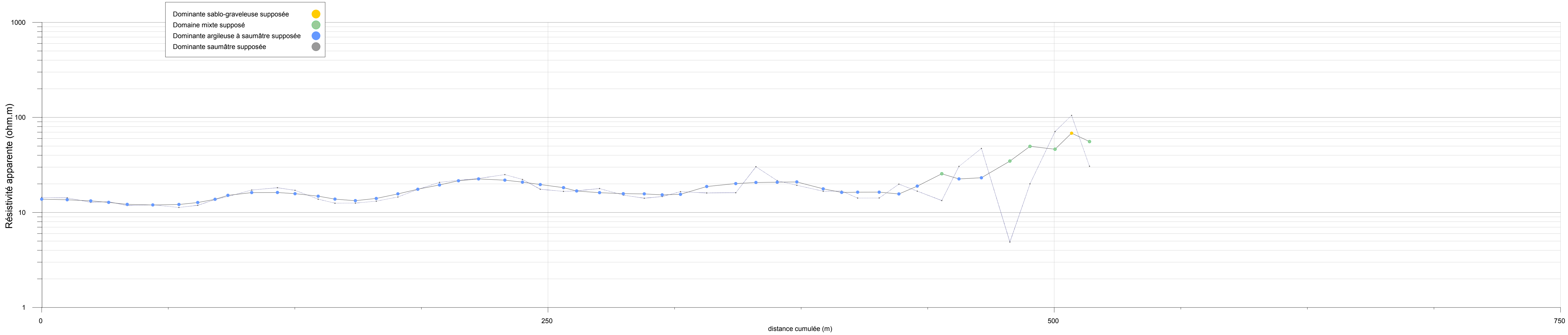
- Saint-Vaast-La-Hougue -
Reconnaissance par méthode EM

Profil en crête de la digue des Galouettes
Tranche de sol 0/6m
Orientation : SE - NO



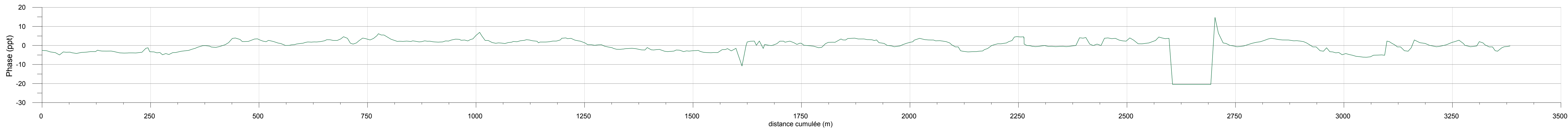
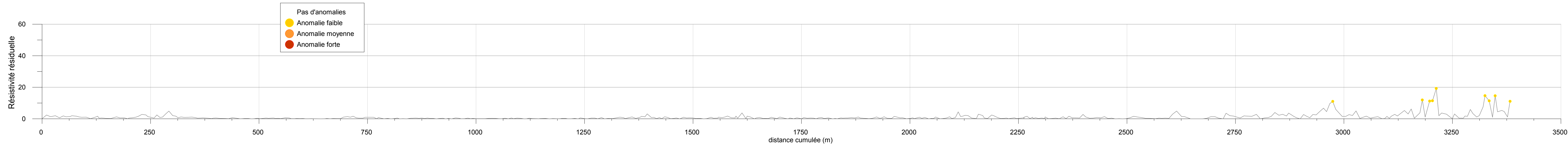
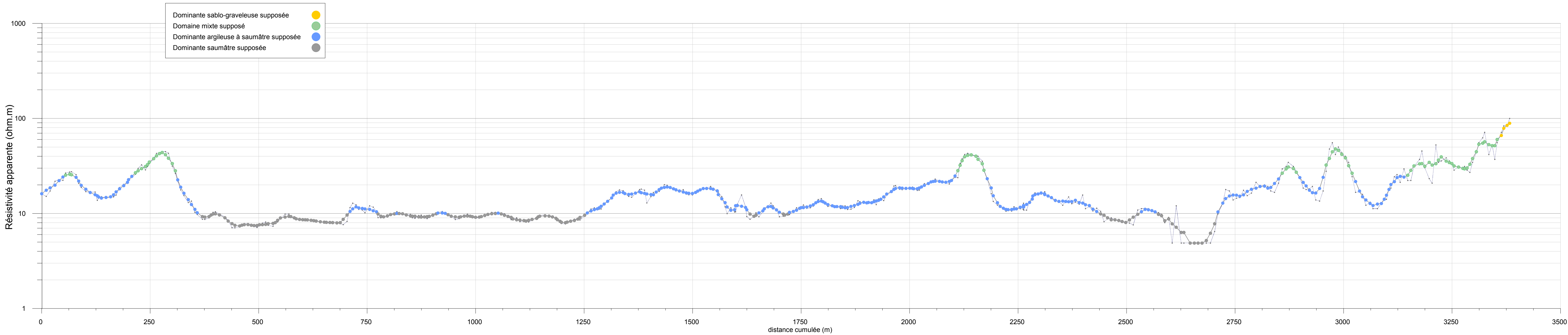
- Saint-Vaast-La-Hougue -
Reconnaissance par méthode EM

Profil en crête de la digue du Sillon
Tranche de sol 0/6m
Orientation : SO - NE



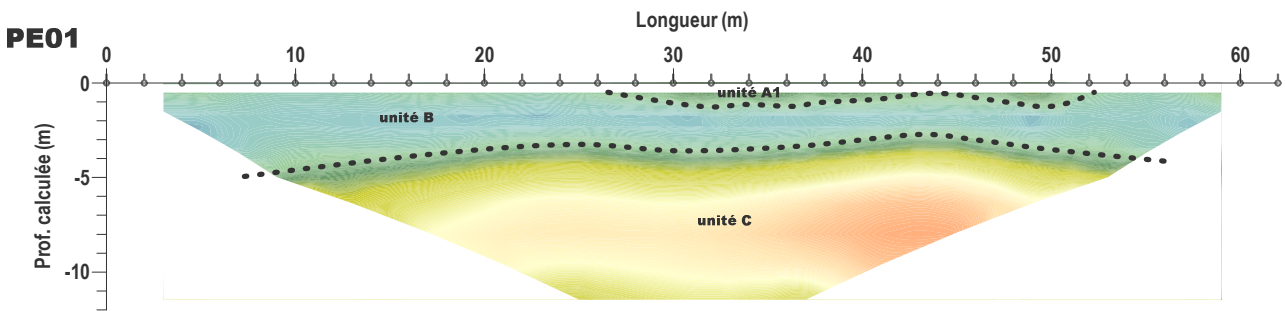
- Saint-Vaast-La-Hougue -
Reconnaissance par méthode EM

Profil en crête des digues St-Vaast - Réville
Tranche de sol 0/6m
Orientation : Sud - Nord

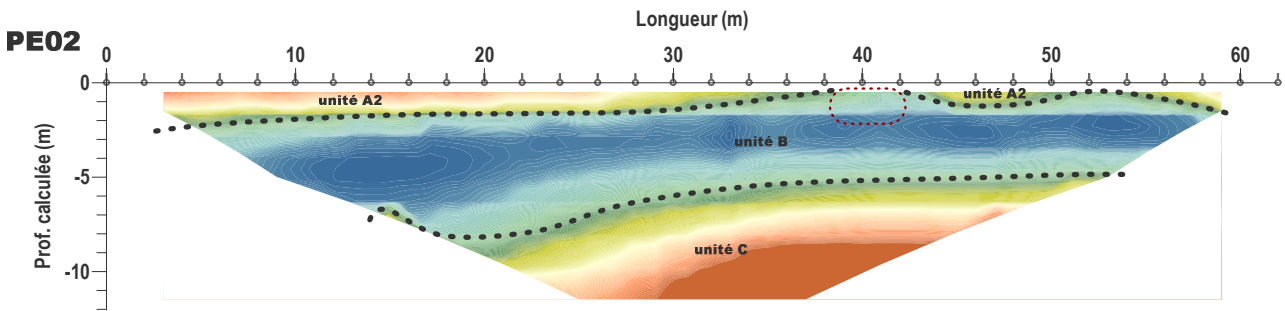


Coupes géoélectriques

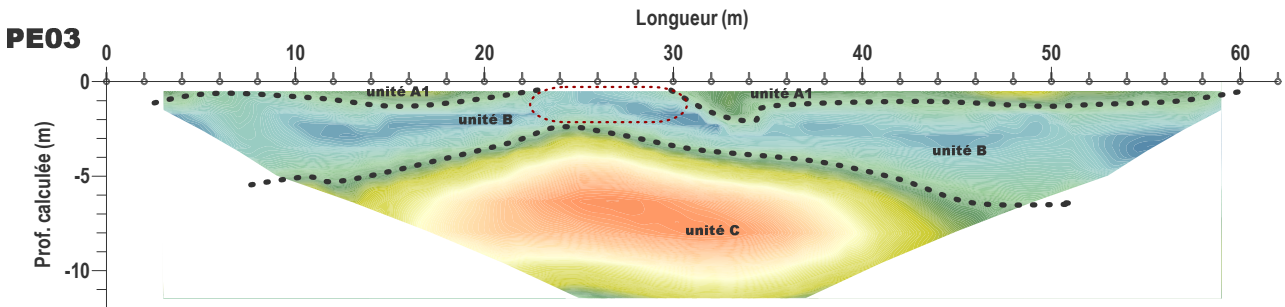
Digue de l'Anse du Cul de Loup



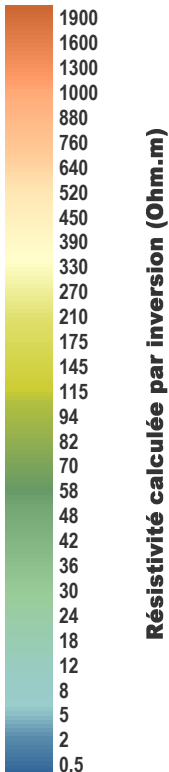
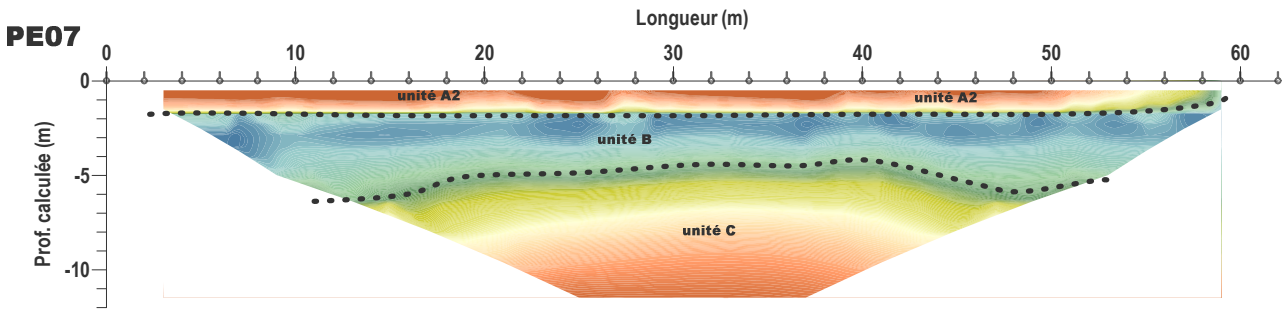
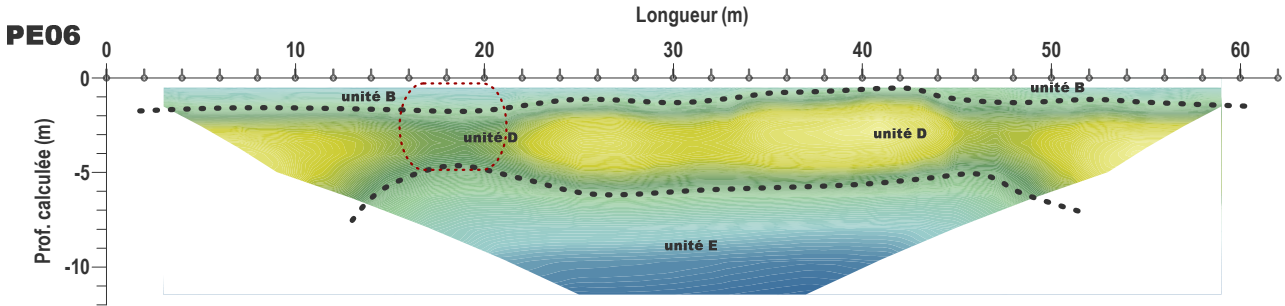
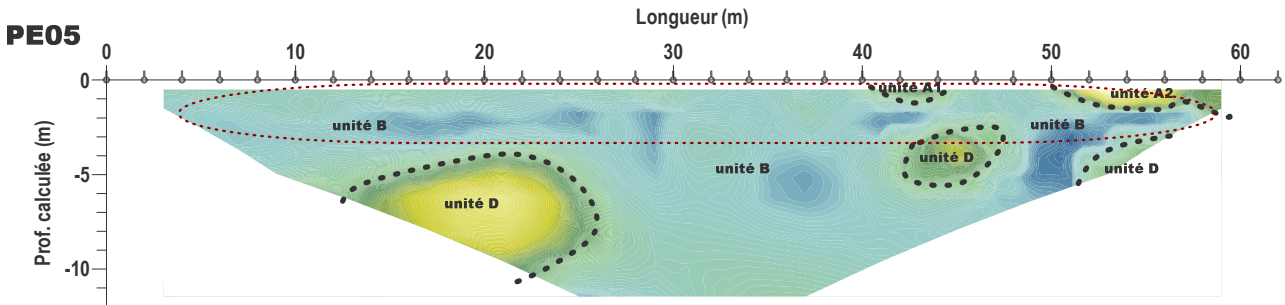
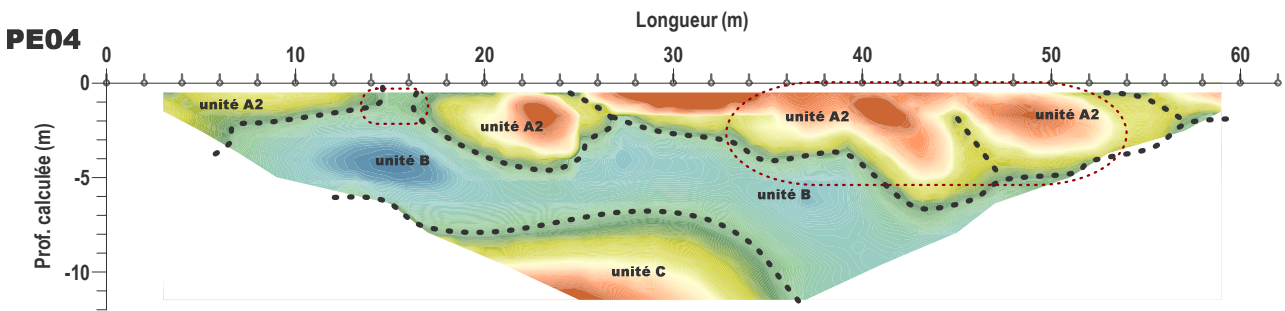
Digue des Galouettes



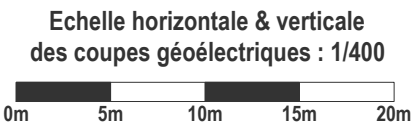
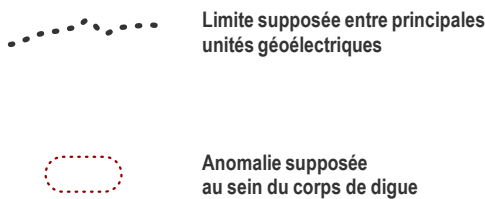
Digue du Sillon



Digues St-Vaast - Réville



Unité Géoélectrique	Plage de Résistivité	Interprétation géophysique correspondante
A1	Résistivité faible à moyenne, globalement comprise entre 25 et 100 Ohm.m.	Unité de surface pouvant correspondre à un horizon attribué à une partie du corps de digue, à dominante sableuse supposée mais avec présence vraisemblable d'eau salée.
A2	Résistivité moyenne à forte, globalement comprise entre 100 et 2000 Ohm.m	Unité de surface pouvant correspondre à un horizon attribué à une partie du corps de digue, à dominante sableuse supposée (ou maçonneries et enrochements) sans présence d'eau salée.
B	Résistivité très faible à faible, globalement comprise entre 0.5 et 25 Ohm.m.	Unité de surface et/ou subsurface pouvant correspondre selon les cas : - A une partie du corps de digue à dominante argileuse, ou sableuse ± saturée en eau salé - Aux formations sédimentaires meubles vaseuses et/ou sableuses ± saturées en eau salée constituant le soubassement des digues investiguées.
C	Résistivité moyenne à forte, globalement comprise entre 100 et 2000 Ohm.m.	Unité profonde attribuée au substratum rocheux granitique.
D	Résistivité moyenne, globalement comprise entre 50 et 300 Ohm.m.	Unité intermédiaire à profonde (uniquement présente au droit des PE05 & PE06) pouvant correspondre soit : - A une partie du corps de digue à dominante sableuse peu saturée en eau salée (PE05). - A des lentilles sableuses (PE06).
E	Résistivité très faible à faible, globalement comprise entre 0.5 et 25 Ohm.m.	Unité profonde (uniquement présente au droit du PE06) attribuée à des matériaux vaseux et/ou sableux saturés en eau salée ou au substratum localement constitué de schistes.



Commune :	St-Vaast-La-Hougue
Digues :	Anse du Cul de Loup
Coordonnées (LBT2étendu) :	
X	Y
Point de départ :	
338014.128	2516076.473
Point d'arrivée :	
338556.6039	2515952.511

Seuils	
Anomalie magnétique (< à) :	15
Anomalie résiduelle forte(> à) :	50
Anomalie résiduelle moy. (> à) :	30
Anomalie résiduelle faible (> à) :	20

Classe matériaux :	
Dominante sablo-graveleuse (> à) :	60
Domaine mixte (> à) :	25
Dominante argileuse ou saumâtre (< à) :	25
Domaine saumâtre (< à) :	10

n° mesure	Coordonnée X (m)	Coordonnée Y (m)	Distance cumulée par rapport au départ (m)	Classe matériaux	Environnement métallique ou saumâtre	Anomalies relevées	Résistivité mesurée (ohm.m)	Résistivité moyenne sur 5 points (ohm.m)	Résistivité résiduelle (ohm.m)	Composante magnétique (ppt)
612	338014.128	2516076.473	0				7.7	6.1	1.6	12.2
611	338021.6035	2516070.444	9.60		X		4.9	5.9	1.0	20.4
610	338030.1484	2516064.032	20.29				5.6	5.9	0.3	4.0
609	338039.9066	2516058.789	31.36				5.3	5.5	0.2	3.8
608	338050.9966	2516055.714	42.87				6.2	5.7	0.5	3.0
607	338060.4753	2516052.268	52.96				5.6	5.7	0.2	2.5
606	338069.272	2516049.744	62.11				5.8	5.6	0.2	-2.5
605	338079.0559	2516045.058	72.96				5.7	5.7	0.0	-3.4
604	338088.669	2516041.382	83.25		X		4.9	6.9	2.0	-20.5
603	338097.9815	2516040.619	92.59		X		6.7	8.4	1.8	16.2
602	338105.1874	2516038.169	100.21				11.4	11.0	0.4	5.9
601	338112.6682	2516032.251	109.74				13.5	13.3	0.2	5.1
600	338121.5486	2516026.826	120.15				18.5	14.6	3.9	4.5
599	338129.8197	2516020.761	130.41				16.4	14.2	2.2	5.5
598	338137.0421	2516015.523	139.33				13.2	13.3	0.1	-3.7
597	338144.8641	2516009.144	149.42				9.3	11.1	1.9	6.4
596	338152.3552	2516003.449	158.83				9.2	9.2	0.0	5.7
595	338158.8341	2515997.8	167.43				7.7	8.3	0.6	12.2
594	338166.6196	2515992.203	177.02				6.8	7.9	1.1	12.3
593	338173.1246	2515985.55	186.32				8.4	7.5	0.9	9.5
592	338183.2646	2515982.296	196.97				7.2	7.0	0.3	10.9
591	338192.4742	2515980.869	206.29				7.5	6.6	0.9	11.1
590	338201.5904	2515980.56	215.41		X		4.9	6.1	1.2	-20.5
1	338208.2629	2515982.259	222.30		X		4.9	5.6	0.8	-20.5
2	338220.8501	2515981.791	234.89		X		6.1	5.2	0.9	-20.5
3	338229.3104	2515981.401	243.36		X		4.9	6.9	2.0	-20.5
4	338239.8267	2515980.025	253.97		X		5.3	9.3	4.0	-20.5
5	338256.6346	2515976.798	271.08		X		13.2	11.3	1.9	-20.5
6	338264.7488	2515976.759	279.20		X		17.0	13.2	3.8	-20.5
7	338276.8662	2515975.532	291.38		X		16.3	14.1	2.2	-20.5
8	338289.5519	2515974.056	304.15		X		14.0	13.2	0.8	-16.9
9	338302.8883	2515972.55	317.57				9.8	11.2	1.4	-3.7
10	338309.164	2515971.927	323.88		X		8.7	9.4	0.6	20.5
11	338324.7574	2515970.651	339.52				7.3	7.5	0.2	5.5
12	338335.9924	2515967.57	351.17				7.0	6.6	0.5	4.5
13	338342.8694	2515961.123	360.60		X		4.9	6.1	1.2	16.4
14	338355.1201	2515962.788	372.96		X		4.9	5.8	0.9	20.5
15	338362.9224	2515954.404	384.41				6.4	5.4	1.0	5.1
16	338376.3505	2515956.461	398.00				5.6	5.5	0.1	5.9
17	338382.5686	2515957.735	404.35				5.3	5.6	0.3	9.5
18	338396.238	2515963.459	419.16				5.4	5.3	0.0	12.3
19	338401.3273	2515971.696	428.85				5.4	5.7	0.2	12.2
20	338412.8189	2515972.615	440.38		X		4.9	5.9	1.0	20.5
21	338425.7273	2515969.681	453.61				7.2	6.7	0.6	0.0
22	338436.698	2515968.73	464.62				6.5	7.2	0.7	-3.4
23	338445.909	2515964.182	474.90				9.3	7.6	1.6	-2.5
24	338454.5402	2515962.781	483.64				8.1	7.7	0.4	-1.5
25	338467.6713	2515970.982	499.12				7.0	7.7	0.8	-0.4
26	338475.9838	2515965.807	508.92				7.7	6.9	0.9	-0.9
27	338484.3514	2515964.976	517.32				6.6	6.2	0.4	3.5
28	338498.5908	2515965.77	531.59		X		4.9	5.8	0.9	-20.5
29	338512.9768	2515961.875	546.49		X		4.9	5.3	0.4	-20.5
30	338521.5875	2515960.03	555.30		X		4.9	4.9	0.0	-20.5
31	338535.0611	2515952.054	570.95				5.0	5.4	0.4	14.7
32	338549.2237	2515951.179	585.14		X		4.9	5.0	0.1	20.5
33	338556.6039	2515952.511	592.64				7.4	6.0	1.4	0.4

Commune :	St-Vaast-La-Hougue
Digues :	Digues St-Vaast - Réville
Coordonnées (LBT2étendu) :	
X	Y
Point de départ :	
339310.0195	2516312.908
Point d'arrivée :	
340692.2767	2518769.201

Seuils	
Anomalie magnétique (< à) :	15
Anomalie résiduelle forte(> à)	50
Anomalie résiduelle moy. (> à) :	30
Anomalie résiduelle faible (> à) :	20

Classe matériaux :	
Dominante sablo-graveleuse (> à) :	60
Domaine mixte (> à) :	25
Dominante argileuse ou saumâtre (< à) :	25
Domaine saumâtre (< à) :	10

n° mesure	Coordonnée X (m)	Coordonnée Y (m)	Distance cumulée par rapport au départ (m)
249	339574.7613	2517211.839	961.88
250	339576.572	2517214.988	965.51
251	339580.8022	2517221.928	973.64
252	339583.9378	2517228.695	981.09
253	339586.7383	2517234.474	987.52
254	339588.1968	2517239.423	992.68
255	339590.8212	2517246.101	999.85
256	339594.6482	2517253.728	1008.38
257	339596.2257	2517258.114	1013.05
258	339599.5986	2517265.316	1021.00
259	339602.7239	2517271.86	1028.25
260	339605.9981	2517280.07	1037.09
261	339609.1744	2517287.727	1045.38
262	339612.3863	2517293.489	1051.95
263	339613.8314	2517300.329	1058.96
264	339617.3733	2517306.968	1066.46
265	339620.6789	2517314.284	1074.49
266	339624.0883	2517320.704	1081.76
267	339625.9295	2517324.521	1086.00
268	339630.18	2517331.905	1094.52
269	339633.8215	2517338.649	1102.18
270	339638.7277	2517346.115	1111.12
271	339640.9609	2517350.582	1116.11
272	339643.9578	2517355.906	1122.22
273	339648.0229	2517362.408	1129.89
274	339654.7049	2517370.684	1140.53
275	339655.2193	2517374.004	1143.89
276	339657.3862	2517377.026	1147.60
277	339664.7952	2517386.941	1159.98
278	339669.7889	2517394.737	1169.24
279	339673.9985	2517401.232	1176.98
280	339678.5024	2517407.824	1184.96
281	339680.1633	2517410.869	1188.43
282	339682.876	2517416.318	1194.52
283	339684.1652	2517419.157	1197.64
284	339690.1455	2517426.35	1206.99
285	339691.336	2517430.197	1211.02
286	339695.8296	2517436.567	1218.81
287	339700.87	2517443.804	1227.63
288	339705.2965	2517450.289	1235.49
289	339707.4573	2517454.76	1240.45
290	339713.6534	2517463.504	1251.17
291	339716.3712	2517469.064	1257.36
292	339721.1123	2517476.092	1265.83
293	339725.6007	2517482.351	1273.54
294	339729.4854	2517488.08	1280.46
295	339731.8172	2517491.54	1284.63
296	339733.8079	2517495.462	1289.03
297	339737.7751	2517501.41	1296.18
298	339742.2839	2517508.114	1304.26
299	339747.2774	2517515.91	1313.52
300	339749.5735	2517518.592	1317.05
301	339753.3705	2517523.991	1323.65
302	339757.301	2517530.721	1331.44
303	339762.4604	2517537.396	1339.88
304	339763.8626	2517541.121	1343.86
305	339768.4844	2517548.711	1352.74
306	339772.71	2517553.979	1359.50
307	339776.1955	2517562.068	1368.30
308	339781.0648	2517570.316	1377.88
309	339781.9609	2517574.064	1381.74
310	339783.5984	2517581.346	1389.20
311	339787.04	2517585.312	1394.45
312	339789.487	2517594.451	1403.91
313	339791.327	2517599.829	1409.60

[illegible]

Résistivité mesurée (ohm.m)	Résistivité moyenne sur 5 points (ohm.m)	Résistivité résiduelle (ohm.m)	Composante magnétique (ppt)
8.8	9.1	0.3	3.2
9.3	9.2	0.1	2.7
9.5	9.4	0.1	2.9
9.8	9.4	0.4	2.4
9.5	9.4	0.1	3.1
9.0	9.3	0.3	3.5
9.0	9.1	0.1	5.2
9.0	9.2	0.1	6.9
9.1	9.3	0.1	5.2
9.7	9.5	0.1	2.7
9.5	9.8	0.2	2.6
10.3	9.9	0.3	1.5
10.3	10.0	0.3	1.1
10.0	10.1	0.1	1.3
10.0	9.9	0.1	1.2
9.9	9.6	0.4	1.0
9.4	9.3	0.1	1.6
8.6	9.1	0.5	1.7
8.6	8.8	0.1	2.1
9.0	8.6	0.4	2.0
8.2	8.5	0.3	2.5
8.4	8.4	0.0	2.7
8.4	8.3	0.1	3.0
8.1	8.5	0.3	2.9
8.5	8.7	0.1	2.5
9.0	8.9	0.1	2.2
9.3	9.2	0.1	1.4
9.5	9.4	0.2	1.8
9.7	9.4	0.3	1.8
9.4	9.4	0.0	2.0
9.4	9.2	0.1	2.3
9.0	8.9	0.1	2.3
8.6	8.6	0.0	2.5
8.2	8.3	0.1	3.0
7.8	8.1	0.3	3.8
7.8	8.0	0.3	4.0
8.0	8.1	0.1	3.6
8.3	8.3	0.0	3.8
8.7	8.4	0.3	2.8
8.7	8.7	0.0	2.4
8.5	9.1	0.6	2.2
9.4	9.6	0.1	1.3
10.1	10.1	0.1	0.4
11.1	10.6	0.5	0.4
11.4	11.0	0.5	0.1
11.1	11.2	0.1	0.3
11.1	11.5	0.4	0.4
11.1	11.9	0.8	0.4
12.5	12.6	0.0	-0.4
13.7	13.4	0.2	-0.8
14.4	14.6	0.1	-1.2
15.3	15.6	0.3	-1.6
16.9	16.3	0.6	-2.0
17.7	16.7	1.0	-2.0
17.3	16.6	0.7	-1.9
16.1	16.2	0.1	-1.7
15.1	15.9	0.8	-1.6
14.8	16.0	1.2	-1.5
16.1	16.4	0.3	-1.7
17.9	16.9	1.0	-2.2
18.1	16.5	1.5	-2.3
17.6	16.3	1.3	-2.4
12.9	16.0	3.1	-1.1
15.0	15.8	0.8	-2.3
16.7	15.7	0.9	-2.4

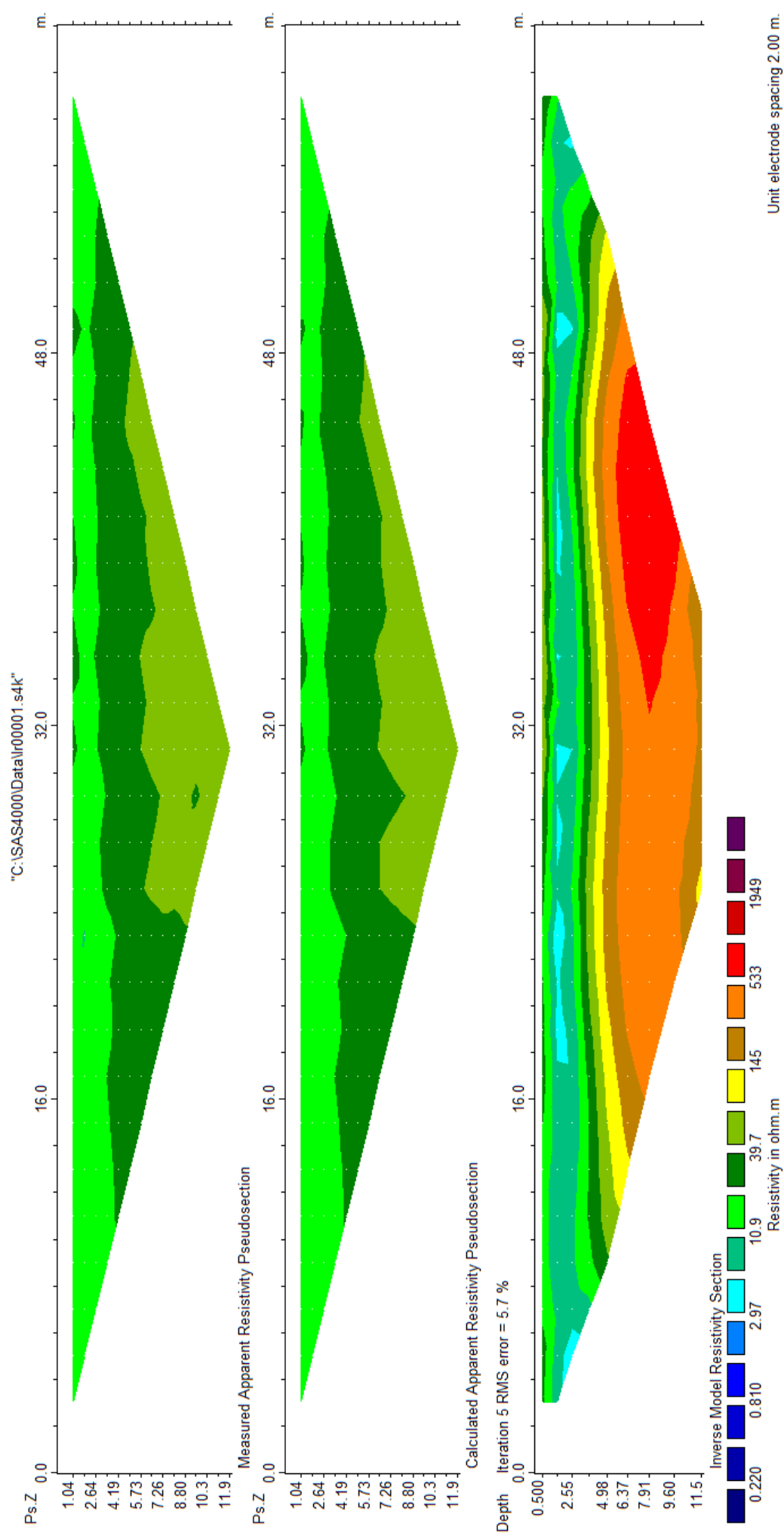
Commune :	St-Vaast-La-Hougue
Digues :	Digues St-Vaast - Réville
Coordonnées (LBT2étendu) :	
X	Y
Point de départ :	
339310.0195	2516312.908
Point d'arrivée :	
340692.2767	2518769.201

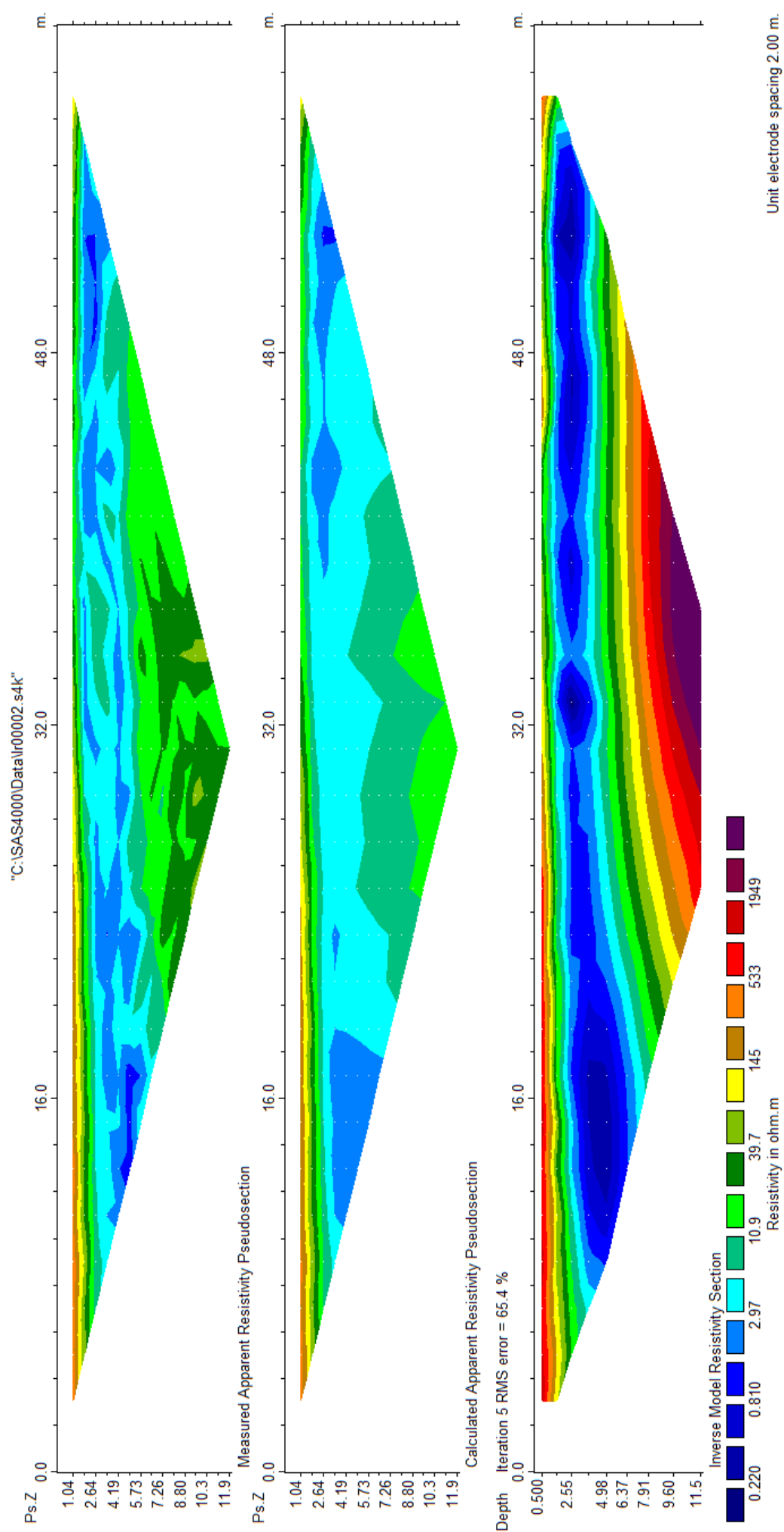
Seuils	
Anomalie magnétique (< à) :	15
Anomalie résiduelle forte(> à) :	50
Anomalie résiduelle moy. (> à) :	30
Anomalie résiduelle faible (> à) :	20

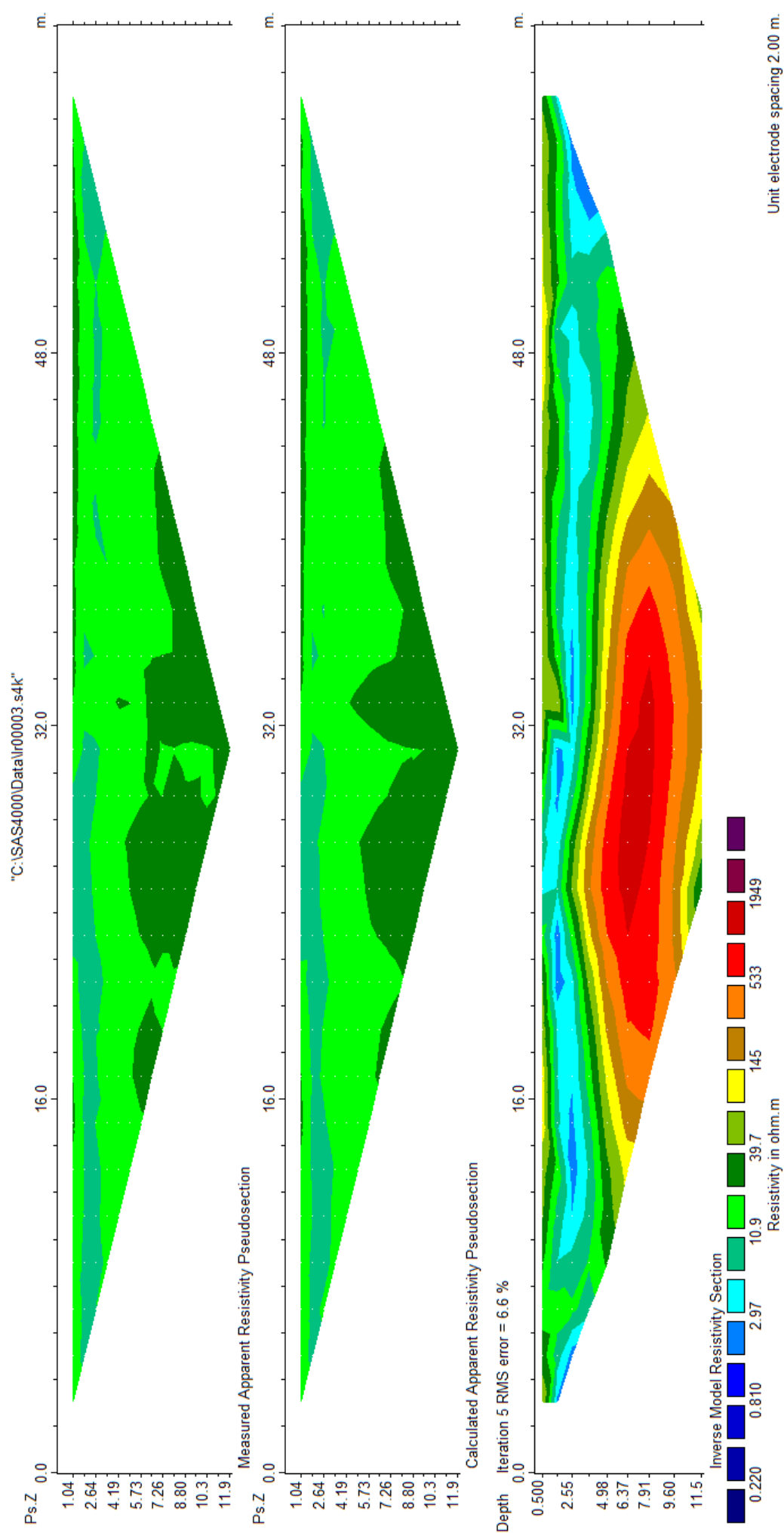
Classe matériaux :	
Dominante sablo-graveleuse (> à) :	60
Domaine mixte (> à) :	25
Dominante argileuse ou saumâtre (< à) :	25
Domaine saumâtre (< à) :	10

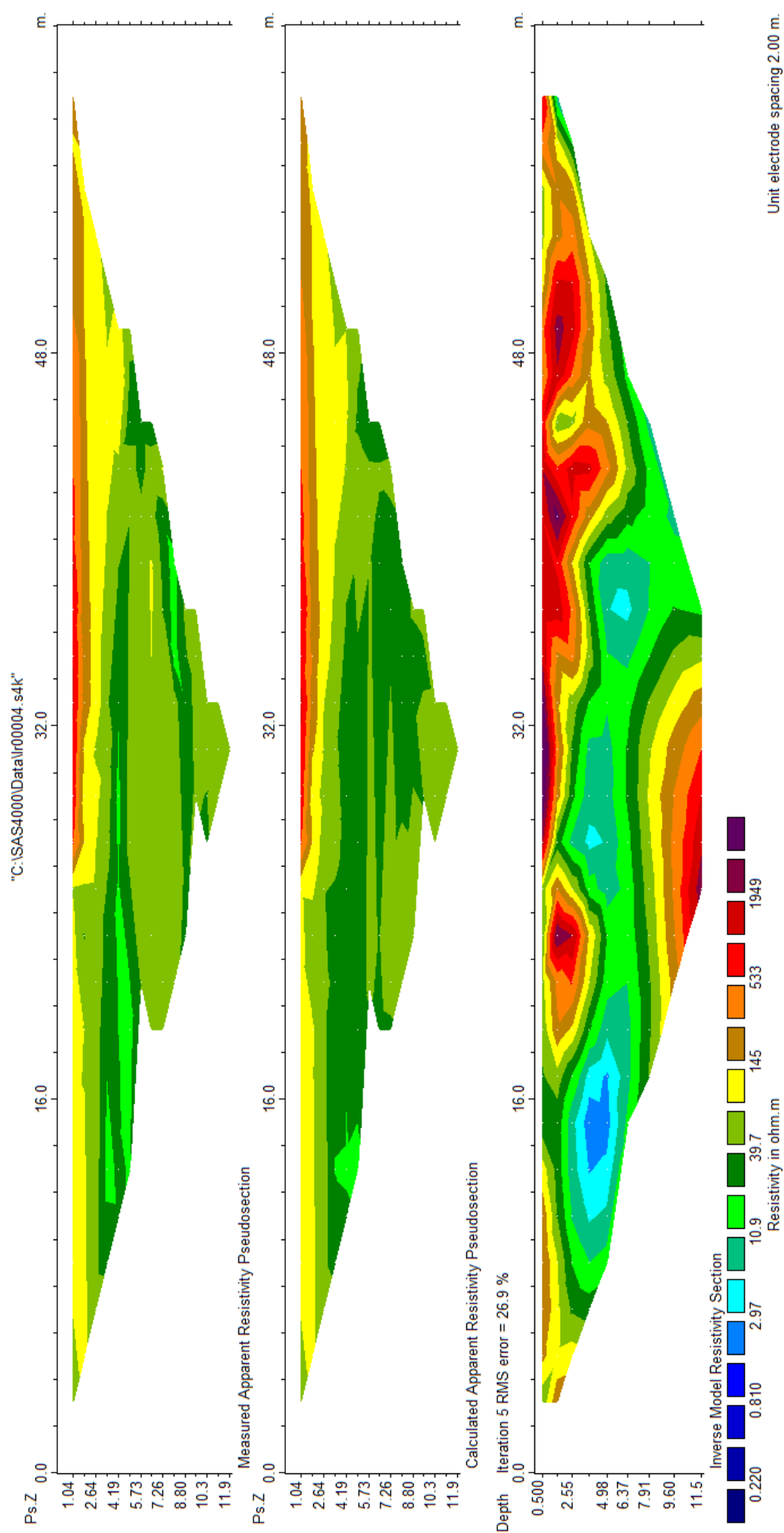
n° mesure	Coordonnée X (m)	Coordonnée Y (m)	Distance cumulée par rapport au départ (m)	Classe matériaux	Environnement métallique ou saumâtre	Anomalies relevées	Résistivité mesurée (ohm.m)	Résistivité moyenne sur 5 points (ohm.m)	Résistivité résiduelle (ohm.m)	Composante magnétique (ppt)
574	340588.8407	2518767.348	3278.86				31.3	29.5	1.7	0.1
575	340594.3945	2518768.432	3284.52				28.6	30.1	1.6	-0.2
576	340601.0223	2518769.244	3291.20				27.0	33.0	5.9	-0.7
577	340606.9325	2518770.2	3297.19				34.5	37.8	3.3	-0.6
578	340615.6981	2518770.246	3305.95				43.5	44.6	1.1	-0.3
579	340621.5574	2518770.089	3311.81				55.6	53.5	2.1	2.0
580	340630.3281	2518770.246	3320.59				62.5	54.9	7.6	1.3
581	340634.7724	2518770.823	3325.07				71.4	56.8	14.7	0.3
582	340644.3545	2518769.717	3334.71				41.7	53.1	11.4	-0.8
583	340651.9902	2518768.811	3342.40				52.6	51.7	1.0	-0.8
584	340658.0664	2518768.645	3348.48				37.0	51.7	14.6	-2.7
585	340663.5644	2518768.506	3353.98				55.6	60.0	4.4	-3.0
586	340673.2746	2518768.619	3363.69				71.4	66.1	5.3	-1.2
587	340678.8082	2518769.258	3369.26				83.3	78.7	4.6	-0.7
588	340686.397	2518768.912	3376.86				83.3	84.5	1.2	-0.6
589	340692.2767	2518769.201	3382.75				100.0	88.9	11.1	-0.3

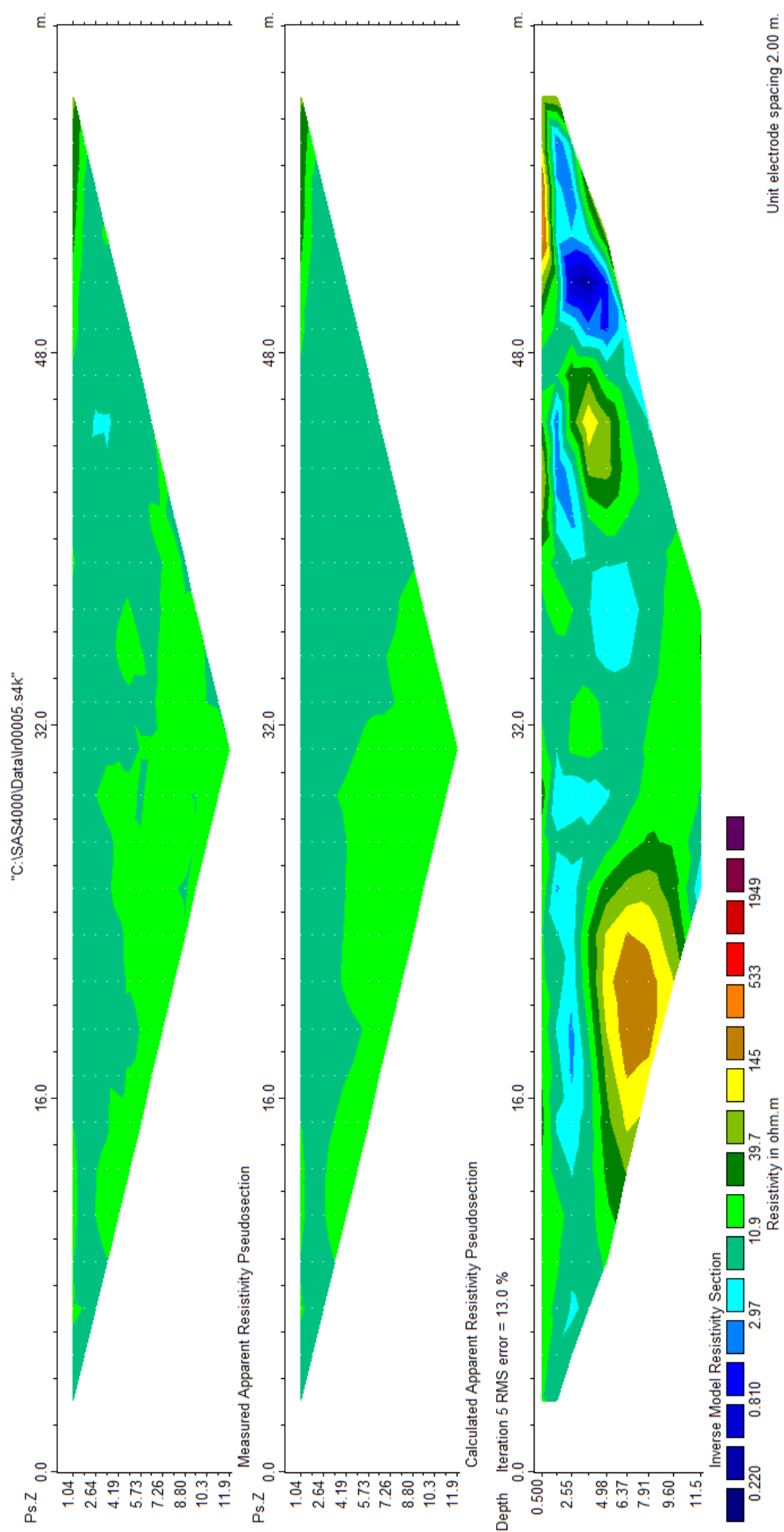
Coordonnées GPS des extrémités des Panneaux Electriques		
N° point GPS PE	X (m) - Lbt2étendu	Y (m) - Lbt2étendu
PE01-0m	338213.3257	2515981.801
PE01-62m	338274.4889	2515975.733
PE02-0m	339145.3617	2515505.587
PE02-62m	339104.8975	2515552.363
PE03-0m	339322.9443	2515590.061
PE03-62m	339366.6322	2515643.563
PE04-0m	339302.3762	2516509.539
PE04-62m	339300.4774	2516572.378
PE05-0m	339801.1961	2517630.251
PE05-62m	339823.8541	2517686.838
PE06-0m	340142.6829	2518358.619
PE06-62m	340174.7957	2518411.431
PE07-0m	340196.0844	2518822.975
PE07-62m	340254.3501	2518801.584

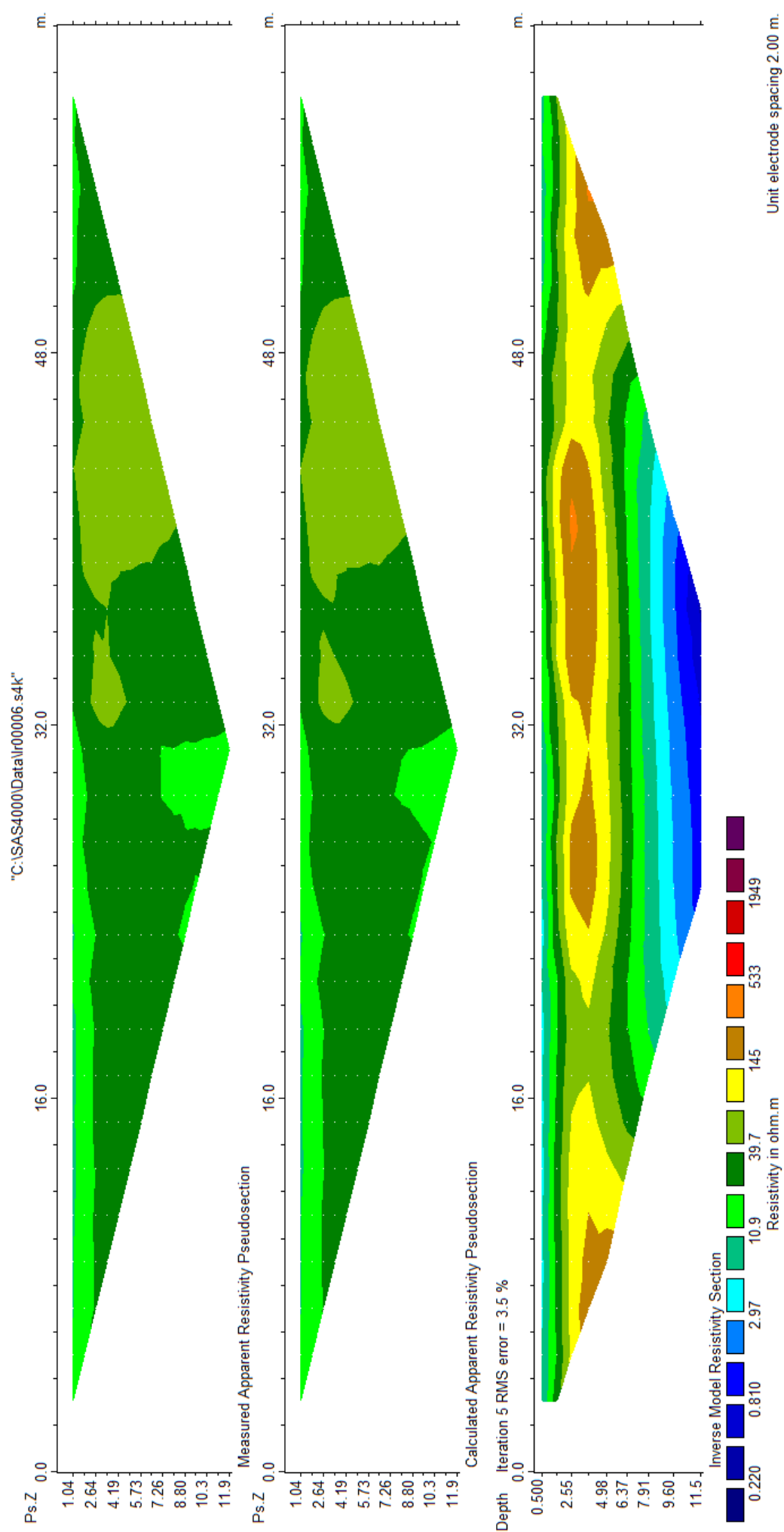


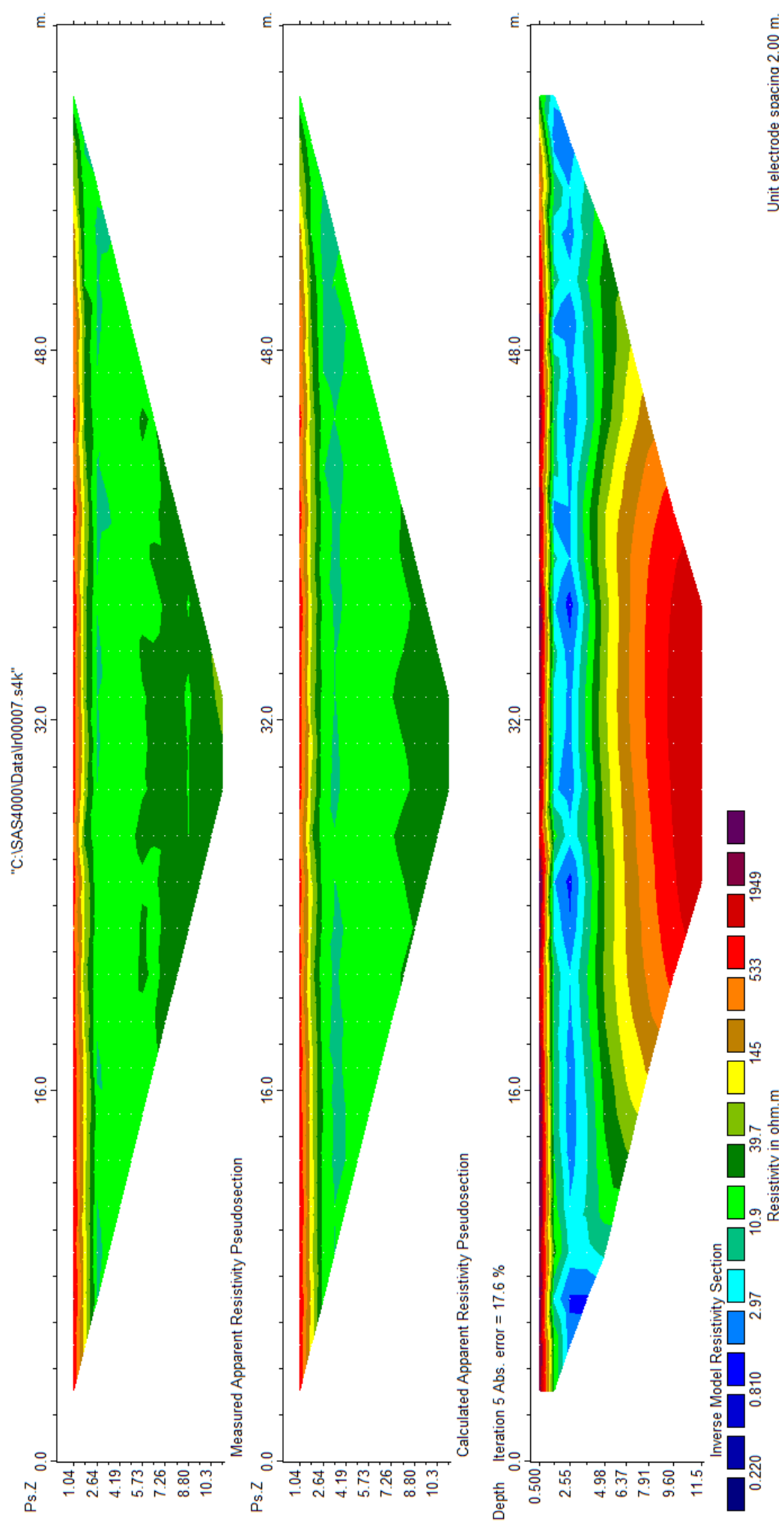












Annexe 2 : Principe des méthodes employées

**PRINCIPE DE LA METHODE
ELECTROMAGNETIQUE LEGERE A EMETTEUR PROCHE CONTROLE
(EM)**

Fondements théoriques

Les variations d'un champ magnétique provoqué (champ magnétique primaire H_p) par un courant alternatif dans la bobine d'un émetteur à une fréquence donnée induisent des faibles courants dans le sol. Ces courants créent un champ magnétique secondaire H_s , mesuré à l'aide d'un récepteur situé à une certaine distance de l'émetteur.

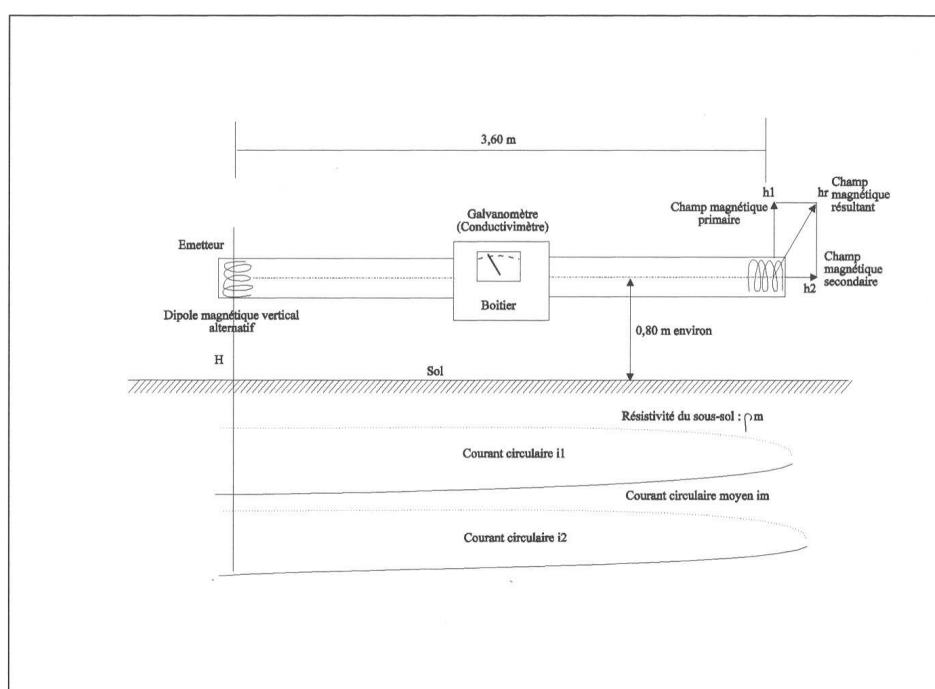
On montre que la conductivité apparente (mS/m)

$$Ca = \frac{4}{2\pi \cdot f \cdot m_0 S^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right)$$

avec m_0 : la perméabilité électromagnétique du milieu.
 S : la distance entre l'émetteur et le récepteur.
 f : fréquence de l'émetteur (pour l'EM31: 9,8 kHz).

Appareillage

Pour l'appareil EM par construction, les paramètres définis dans la formule ci-dessus sont constants ou présentent des variations négligeables. Dès lors, cet appareil permet de réaliser la lecture directe de la conductivité d'une tranche de terrain donnée, exprimée en milliSiemens par mètre et donc d'en déduire immédiatement la résistivité en ohm-mètre.



Les courants induits en sous-sol n'affectent les terrains qu'à proximité immédiate de l'appareil (quelques mètres), le champ secondaire mesuré correspondant à la réponse de ce faisceau de courant induit. Par principe on admet que la mesure réalisée en un point donné correspond à la conductivité du sous-sol en ce point.

Par construction, la précision de lecture est de $\pm 0,2$ mSiemens/mètres,

Toute variation de résistivité du sol est liée à sa nature géologique ou à son état mécanique (altération, fracturation). Ainsi, des argiles ou remblais argileux seront caractérisés par des valeurs de résistivités faibles, de l'ordre de quelques dizaines d'ohms-mètres et les grès, calcaires ou les marno-calcaires par des résistivités de plusieurs centaines d'ohms-mètres, lorsqu'ils sont massifs.

La maille de mesure devra donc être fixée en fonction du problème posé (recherche de "cibles enterrées" telles que fûts métalliques, réseaux, déchets: maille de quelques mètres / recherche géologique: maille de quelques dizaines de mètres).



Suivant le cas, on réalise, à partir d'un maillage ou d'un profil, une mesure de résistivité tous les 2,50 m, 5 m, 10 m ou 20 m, de façon à établir une carte des résistivités apparentes du terrain superficiel. La dimension réduite de l'appareillage et l'absence d'électrodes au sol permettent, par comparaison avec les méthodes électriques traditionnelles :

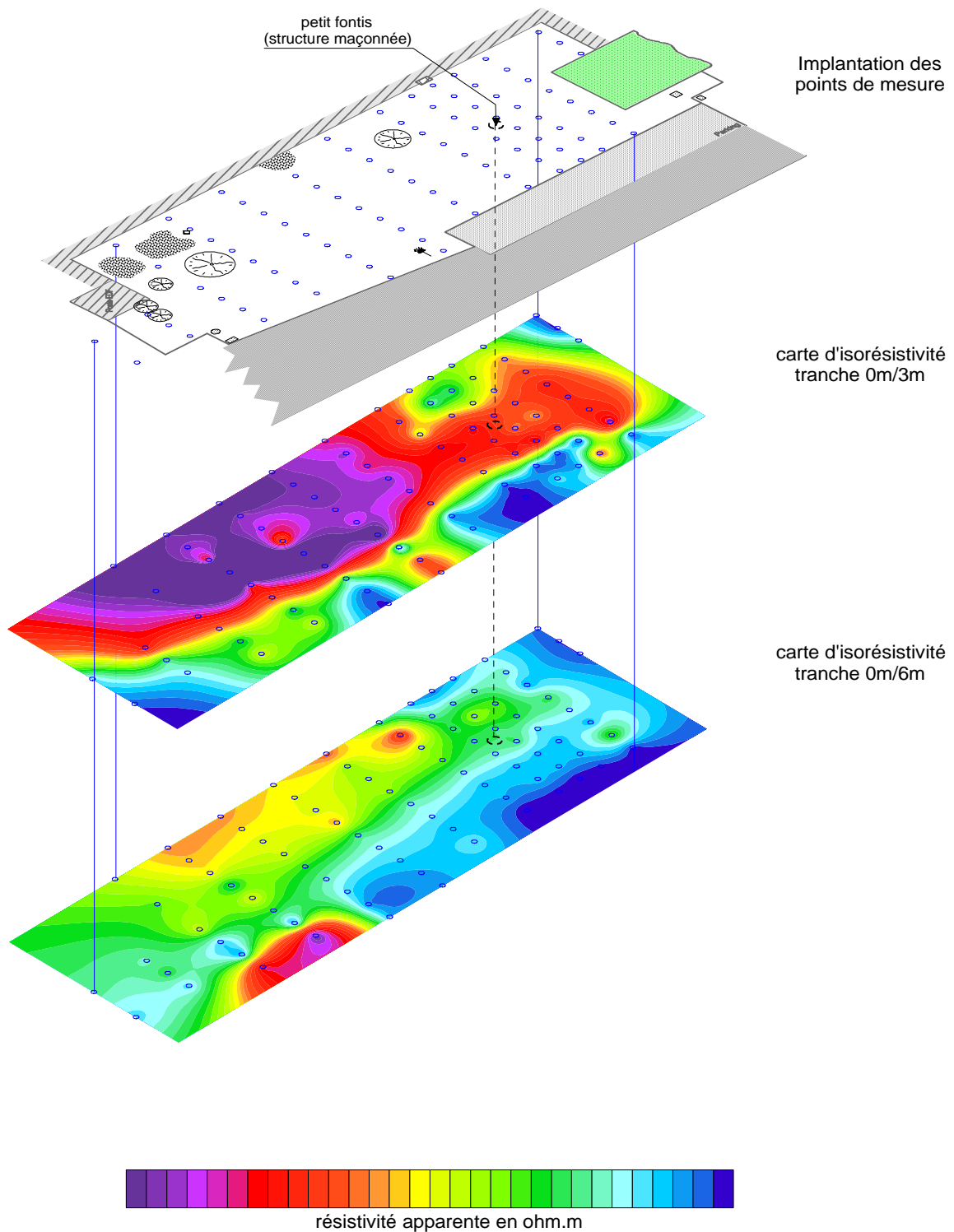
- une focalisation nettement plus importante des mesures de résistivité apparentes.
- une mise en œuvre extrêmement rapide et donc un coût réduit.

Ainsi, toute anomalie conductrice sera repérée et pourra traduire une surépaisseur de terrains argileux (ou sableux). Ces profils de résistivité sont essentiellement destinés à orienter l'implantation de reconnaissances mécaniques.

Les résultats sont stockés sous la forme de fichiers permettant un dépouillement des mesures et leur traduction sous forme graphique entièrement automatique, ce qui réduit d'autant le coût d'une prospection systématique.

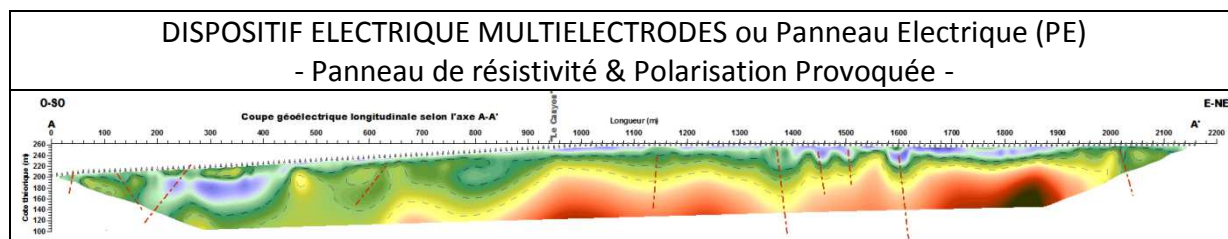
CEBTP	ANNEXE	Méthode EM	2
-------	--------	------------	---

Exemple de reconnaissance par méthode EM :



Valeurs usuelles de la résistivité des matériaux :

Eau douce	20 à 60 ohm.m
Eau de mer	0.18 à 0.24 ohm.m
Argiles, vases	0.5 à 30 ohm.m
Marnes	5 à 50 ohm.m
Craie, Calcaires marneux	80 à 300 ohm.m
Calcaires	300 à 5000 ohm.m
Grès	500 à 4000 ohm.m
Sables secs	1000 à 10000 ohm.m
Schistes	50 à 500 ohm.m
Granites	3000 à 10000 ohm.m
basaltes	800 à 10000 ohm.m



Panneau de résistivité

Notion de résistivité apparente :

Cette méthode consiste à mesurer, à la verticale d'une série d'électrodes MN, la résistivité apparente pour différentes positions d'électrodes d'injection AB.

Un courant électrique est créé en sous-sol à l'aide d'une source de courant I (batterie par exemple) et de deux électrodes A et B, dites d'injection, placées en surface.

Le courant injecté pénètre dans le sol par l'électrode A et en sort par l'électrode B. La répartition des lignes de courant se fait alors en volume.

Il est donc possible de repérer les discontinuités du sous-sol (à la fois les variations latérales de résistivité et les variations en profondeur) en fonction de la distribution des résistivités apparentes.

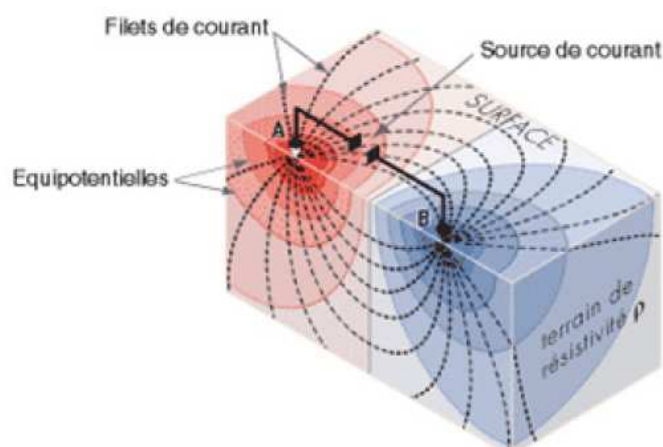


Figure 1 : Distribution du courant créé par deux électrodes dans un terrain homogène et isotrope.

La différence de potentiel entre deux électrodes M et N (dites électrodes de réception) est mesurée.

La résistivité déduite de cette mesure dépend de la géométrie du dispositif de mesure : $\rho = K \frac{\Delta V}{I}$.

Cette formule fait intervenir le facteur géométrique K caractérisant la géométrie du montage.

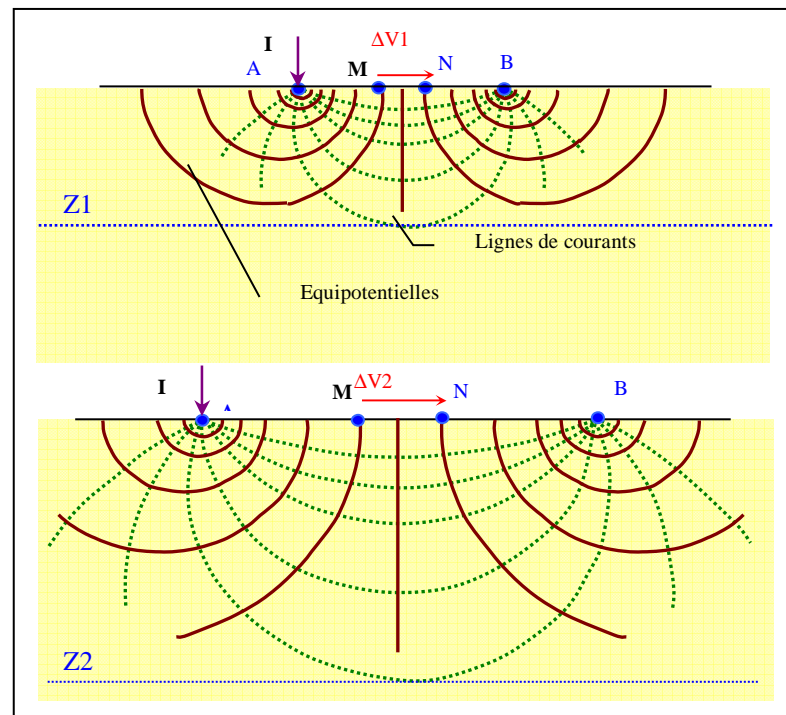


Figure 2 : Répartition des équipotentielles & des lignes de courant en fonction de l'écartement des électrodes : Influence sur la profondeur d'investigation.

La résistivité apparente mesurée n'est pas la résistivité vraie du sous sol, c'est une résistivité prenant en compte l'ensemble des terrains traversés par les équipotentiels utilisés pour la mesure.

La relation entre la résistivité apparente et la résistivité vraie est complexe. Le calcul de la résistivité vraie à partir de la résistivité apparente nécessite l'utilisation d'un programme d'inversion de données.

Appareillage :

L'appareillage se compose d'un système d'acquisition des mesures, d'un système d'injection de courant et de contrôle des électrodes et de plusieurs flûtes de 32 électrodes chacune.

La longueur d'un dispositif (unité de base) peut varier alors, pour un profil donné, entre 16 et 315 mètres.

Il est également possible de mesurer un linéaire en continu en utilisant la technique du roll-along (translation dans une direction du dispositif de mesure).



Figure 3 : Résistivimètre SAS4000 & ES464 – Marque ABEM.

Mise en œuvre :

Le panneau électrique peut être mis en œuvre aussi bien en milieu terrestre qu'aquatique.

En configuration **terrestre**, les électrodes en acier inoxydable sont plantées directement dans le terrain et assurent le couplage entre l'appareillage et le sol.

En configuration **aquatique**, la flûte est positionnée au fond de l'eau et dans le sens du courant. L'eau assure alors le contact entre les électrodes et le terrain. Une mesure en laboratoire de la résistivité de l'eau est réalisée et prise en compte dans le processus de traitement et de modélisation des panneaux électriques obtenus. Le CEBTP dispose des moyens nécessaires à la mise en œuvre de ce type de prospection (Barque motorisée).



Figure 4 : Panneau électrique terrestre -flûte de 155m – 32électrodes.

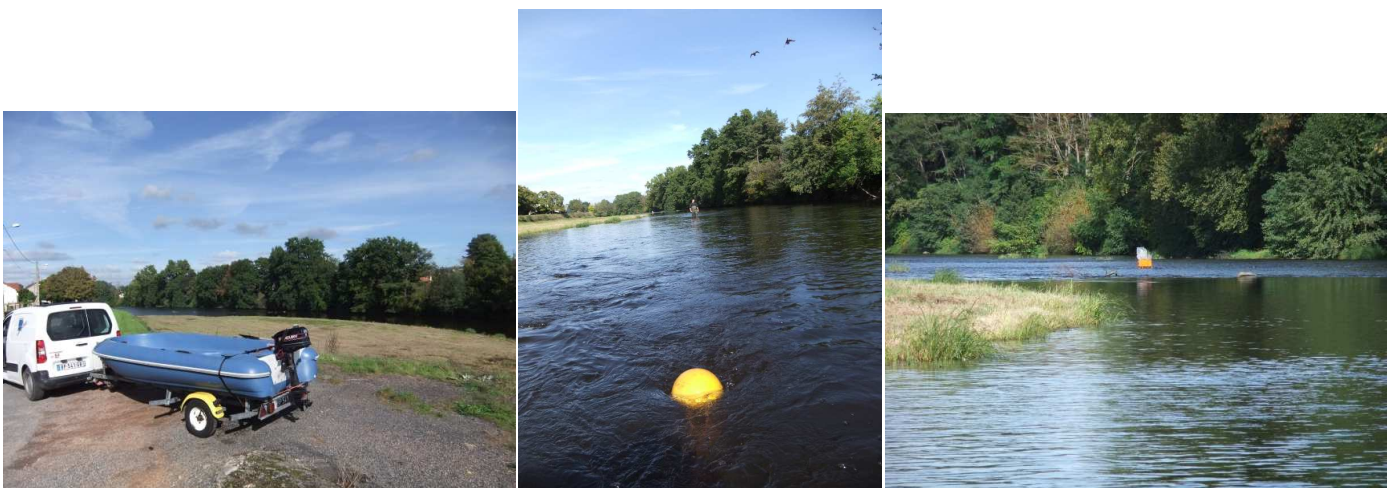


Figure 5 : Panneau électrique aquatique

Mesures :

Le dispositif multi-électrodes permet de mesurer à la fois des variations latérales de résistivité et des variations en profondeur tout en conservant un dispositif de mesure fixe. Ceci permet d'avoir des informations relativement complètes sur les propriétés électriques du sous-sol tout en évitant les « à-coups de prises ».

Il existe plusieurs types de dispositifs de mesure (Wenner, Schlumberger, Pole-pole...) selon la position des électrodes les unes par rapport aux autres. Certains de ces montages sont plus ou moins maniables : Le montage pôle-pôle par exemple est difficile à mettre en place pour de grands écarts entre les électrodes.

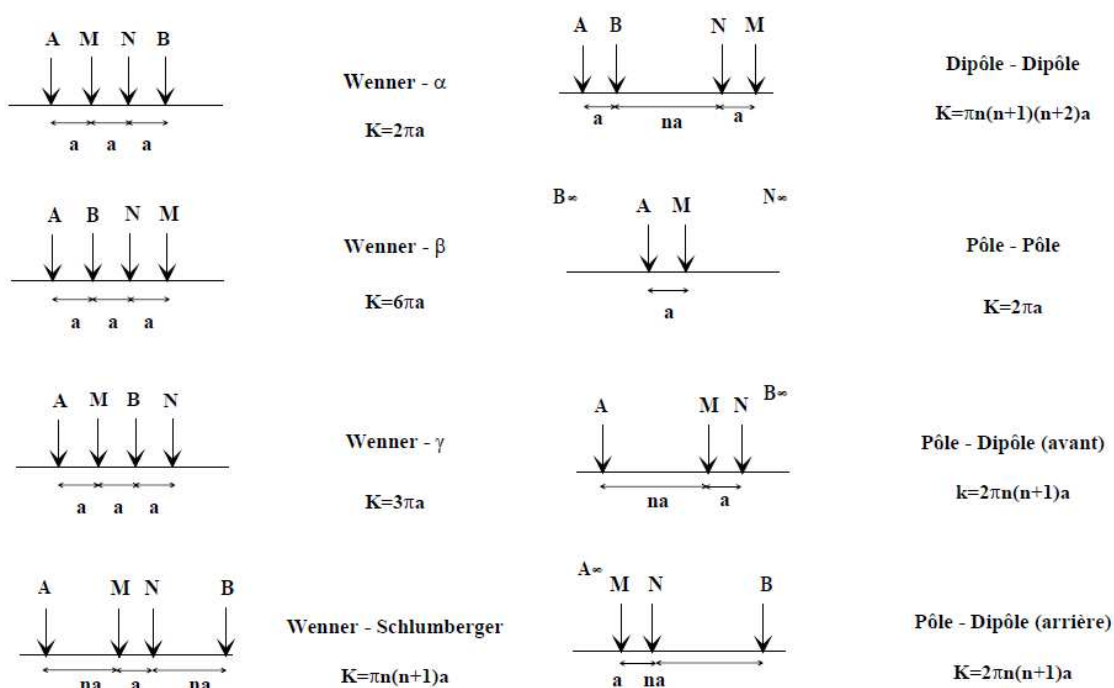


Figure 6 : Exemples de quadripôles et facteur géométrique correspondant.

Le dispositif est choisi en fonction de la sensibilité du montage aux changements verticaux et horizontaux de résistivité, de la profondeur d'investigation souhaitée et de la problématique posée.

La prospection électrique multi-électrodes (PE) est une méthode non destructive, non intrusive et sans impact environnemental. La mise en place des électrodes est possible dans la plupart des cas rencontrés (milieu naturel, aquatique, urbain...).

Les mesures s'effectuent selon le protocole défini antérieurement et enregistré dans le système de contrôle des électrodes.

Pour chaque mesure, le système de contrôle choisit 4 électrodes (A, B, M et N) parmi celles mises en place.

En déplaçant ce dispositif et en faisant varier la géométrie (longueur totale du montage), le système de contrôle parcourt l'ensemble du profil et atteint différentes profondeurs.

La profondeur d'investigation est déterminée par la longueur totale du dispositif et le protocole de mesures utilisé.

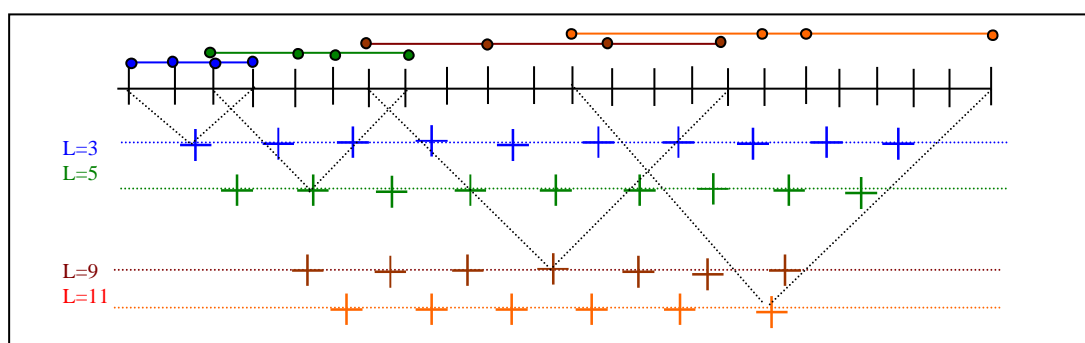


Figure 7 : Influence de la longueur du dispositif sur la profondeur d'investigation, établissement d'une pseudo-section de mesures.

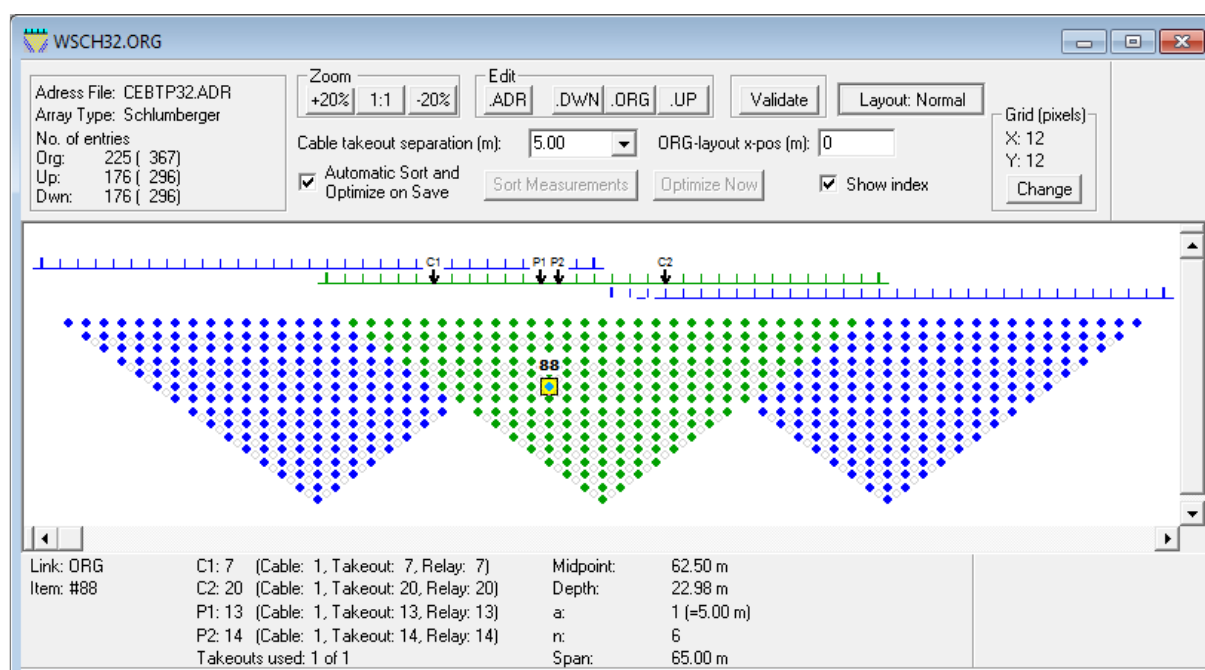


Figure 8 : Exemple de protocole de mesure Wenner-Schlumberger 32 électrodes et pseudo-section correspondante. En bleu, les mesures réalisées en technique Roll-along (logiciel S4kwin – Pôle géophysique).

Résultats obtenus :

Les données du problème sont fournies par les mesures de résistivité apparente sur un site hétérogène.

Le but de l'interprétation est alors de caractériser chacune des couches existant en sous-sol par une résistivité vraie, c'est à dire de définir un modèle multicouche ayant des caractéristiques électriques s'approchant au mieux de la réalité.

Pour ce faire, un calcul mathématique matriciel complexe est réalisé à l'aide notamment d'un logiciel d'inversion des données (Res2DInv). Une correction topographique est également appliquée dans le processus de calcul.

Une coupe géoélectrique 2D permettant de déterminer la géométrie du sous-sol et la nature électrique des différents horizons recoupés est finalement obtenue.

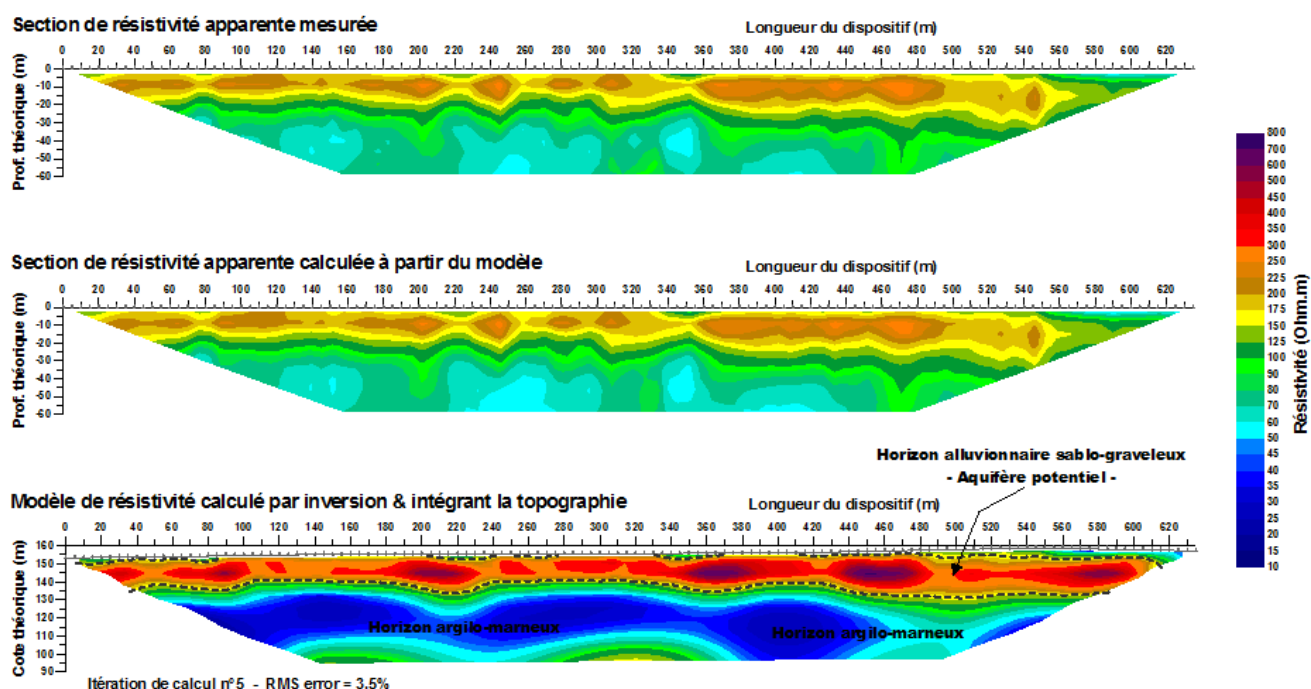


Figure 9 : Exemple de résultat obtenu par la méthode des panneaux électriques en hydrologie de surface. Détermination d'un horizon alluvionnaire sablo-graveleux sur substratum argilo-marneux - Flacourt (78). Panneau électrique 128 électrodes - 635 m – configuration Wenner-Schlumberger.

La ressemblance entre le profil des résistivités mesurées et le profil des résistivités calculées à partir du modèle (figure 8) permet de supposer le modèle valide.

Il est cependant nécessaire de garder à l'esprit pour la plupart des problèmes devant être inversés, il n'y a pas unicité de la solution.

L'interprétation des résultats demande également **une bonne connaissance du contexte géologique** (dans le cas d'une détermination de faciès ou d'une reconnaissance hydrogéologique par exemple). Cette recherche d'informations (carte géologique, logs de forages, relevés d'affleurements...) permet en général de confirmer la validité du modèle.

Exemples de prospection :

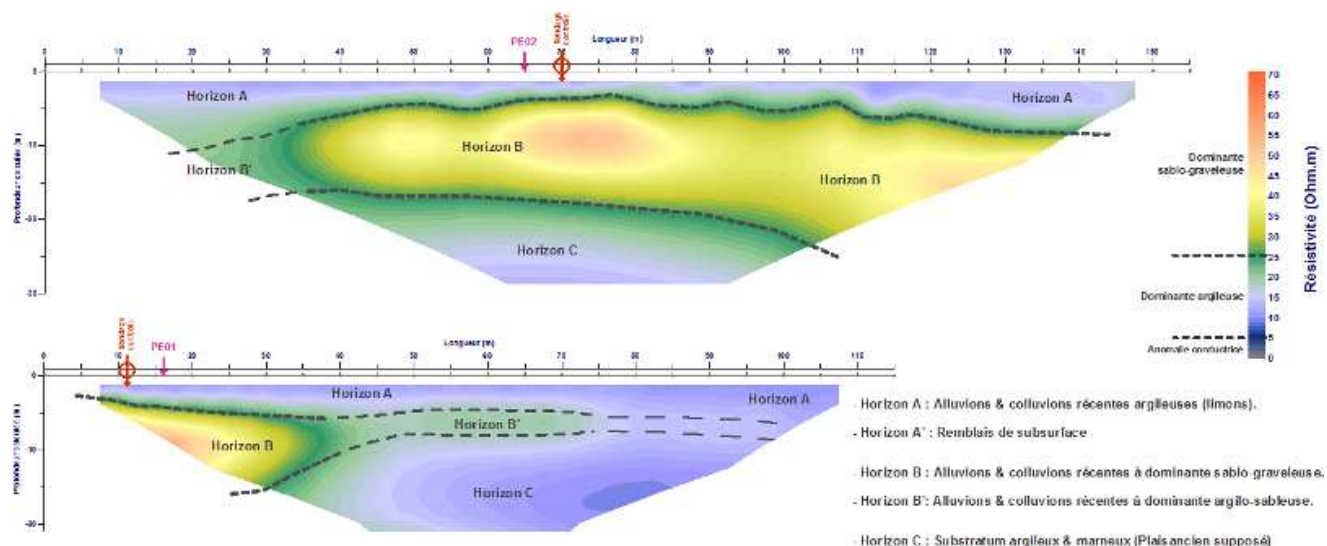


Figure 10 : Recherche hydrogéologique en contexte de vallée alluviale - Mise en évidence d'un horizon sablo-graveleux considéré comme aquifère potentiel - La Roquette/Siagne (06).

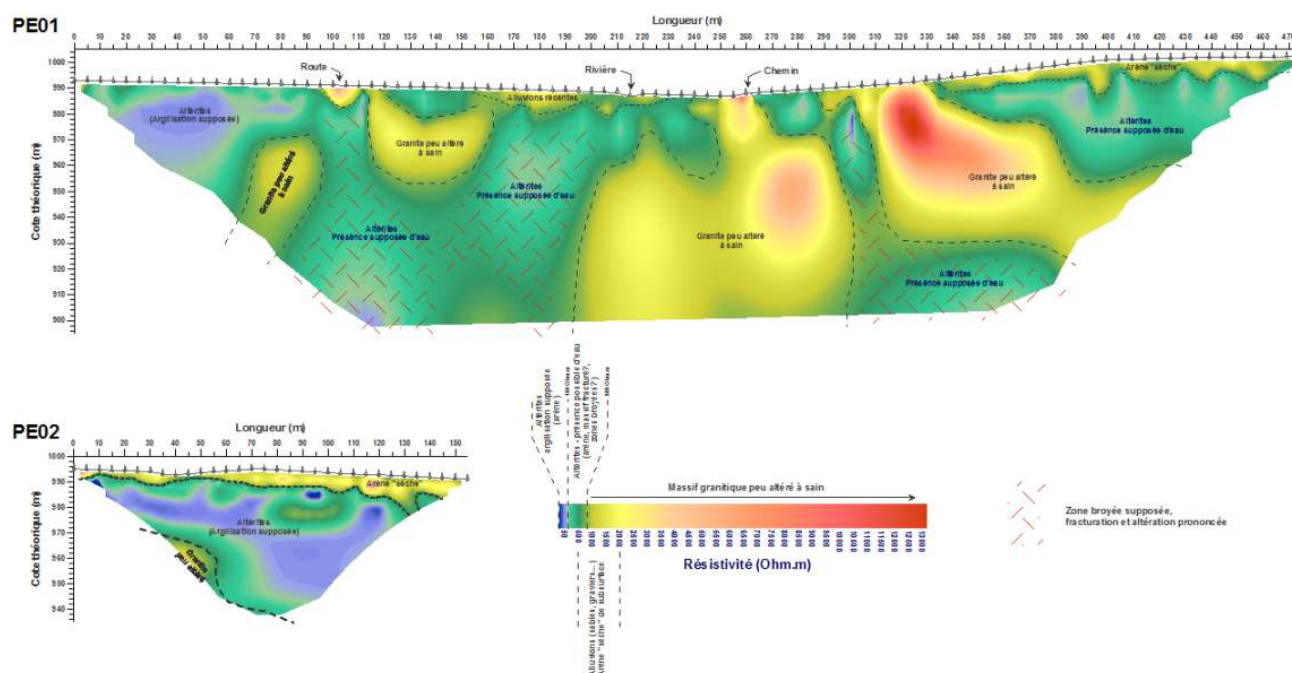
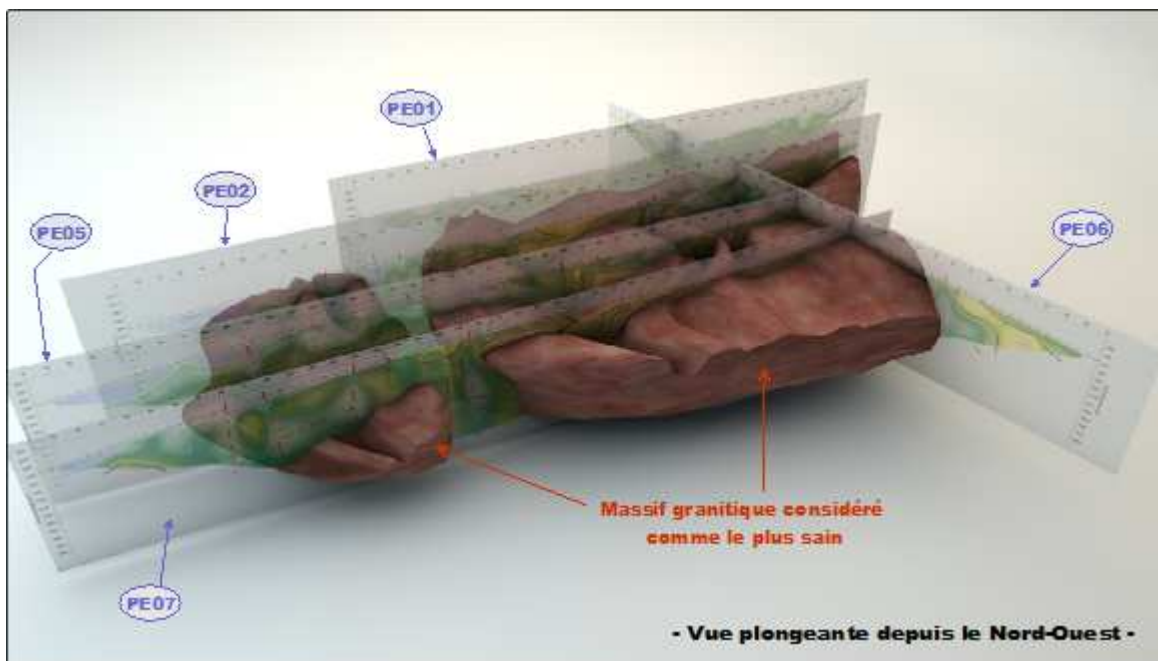
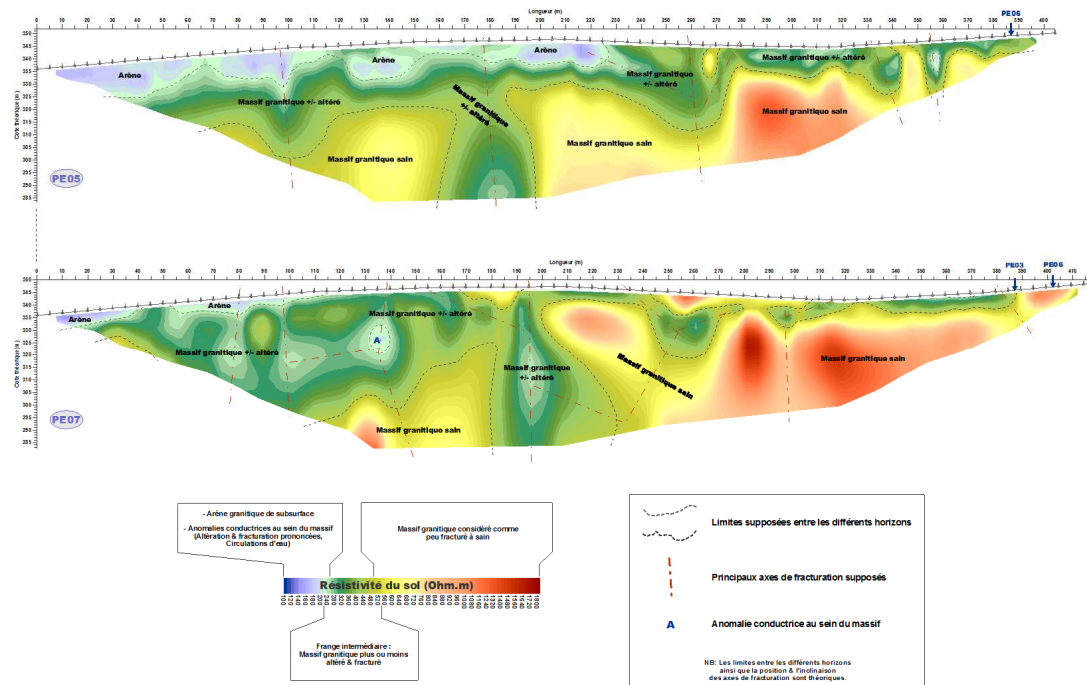


Figure 11 : Recherche hydrogéologique en contexte cristallin – Coupes géoélectriques interprétées montrant la qualité et la géométrie d'un massif granitique, mise en évidence de zones « broyées » (fracturation, altération, failles) potentiellement aquifères – Usine Arcelor-Mittal, St Chély d'Apcher (48).

Lorsque plusieurs panneaux sont réalisés selon un maillage précis et en contexte favorable, il est possible de procéder à une modélisation 3D.



Figures 12 & 13 : Modélisation en 2D & en pseudo 3D d'un massif de granite rose (qualité, géométrie, recouvrement) & de la fracturation associée. Extension de Carrière à Vendenesse-lès-Charolles (71).

Domaines d'application préférentiels :

Cette méthode, principalement qualitative, permet de mettre en évidence les déformations du champ électrique produites par des hétérogénéités quelconques.

Elle est donc principalement utilisée pour les problématiques suivantes :

- Détermination de faciès, d'horizons géologiques, d'hétérogénéités (failles...)
- Recherche de gisements (carrière, domaine minier, alluvionnaire...)
- Hydrogéologie, recherche de fluides.
- Caractérisation, diagnostic de digues
- Recherche de cavités naturelles (karst) ou anthropiques...

Valeurs usuelles de la résistivité de quelques matériaux et fluides :

Eau douce	10 à 1000 Ohm.m
Eau salée	0.1 à 1 Ohm.m
Argiles, vases	1 à 50 Ohm.m
Marnes	5 à 100 Ohm.m
Craie, Calcaires marneux	80 à 500 Ohm.m
Calcaires	300 à 5000 Ohm.m
Grès	500 à 4000 Ohm.m
Sables secs Sables humides	1000 à 10000 Ohm.m 30 à 1000 Ohm.m
Schistes	50 à 1000 Ohm.m
Granites	500 à 10000 Ohm.m
Basaltes	800 à 10000 Ohm.m

Polarisation Provoquée

Généralités :

Le passage d'un courant électrique dans un sol s'accompagne de processus électrochimiques dont le caractère et l'intensité dépendent directement des propriétés chimiques et physiques du sol. Le passage du courant peut se faire de deux façons : Par conductibilité électrique (Potentiel de membrane), pour laquelle il y a déplacement d'électrons libres dans les particules métalliques (pyrite, chalcopryrite, ...), et par conductibilité ionique (Potentiel d'électrode), pour laquelle il y a déplacement d'ions dans les solutions contenues dans les pores et les fractures des roches.

La polarisation provoquée origine des processus électrochimiques qui se produisent lorsque le courant passe d'un milieu à conductibilité ionique (eau) à un milieu à conductibilité électronique et d'un milieu à conductibilité ionique à un milieu peu conducteur ou au contact d'un milieu de conductibilité ionique différente.

Lorsqu'un courant injecté traverse le sol, il peut provoquer une polarisation de certains de ses constituants. A la coupure du courant, un retour progressif du milieu à l'état d'équilibre se fait et un faible potentiel résiduel transitoire associé à cet effet capacitif peut être mis en évidence. Le temps de retour à l'équilibre est aussi nommé temps de relaxation. Ce phénomène de charge puis de relaxation est appelé la polarisation provoquée (PP).

Mesures :

Les mesures peuvent se faire dans le domaine temporel ou fréquentiel. Le matériel dont dispose le pôle géophysique du CEBTP fonctionne dans le domaine temporel.

Lorsqu'un courant est injecté dans le sol, puis brutalement interrompu, un délai est nécessaire pour que le voltage redevienne nul : le principe de mesure est présenté sur la Figure suivante.

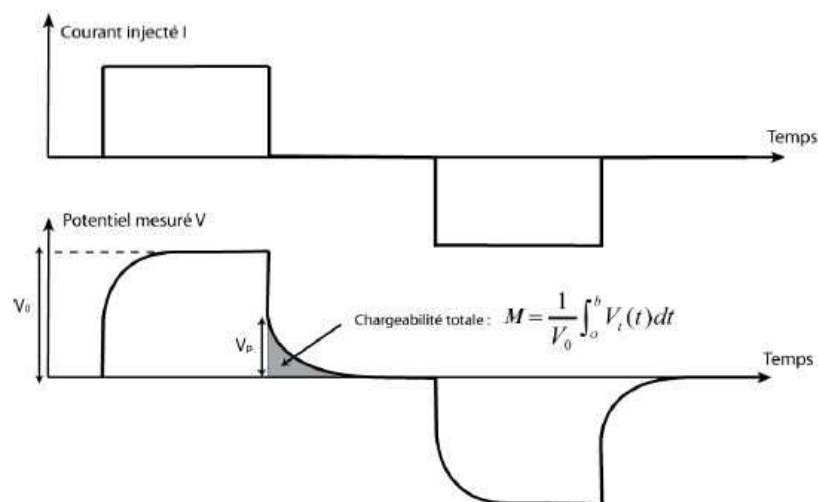


Figure 14 : Principe de mesure de la polarisation provoquée temporelle

Lors de l'application d'un courant en créneaux d'intensité I , le milieu se charge à la façon d'un condensateur jusqu'à une différence de potentiel V_0 (V). Le courant est ensuite brutalement coupé, ce qui permet au milieu de revenir à son état d'équilibre après un temps de relaxation. La tension est alors mesurée de manière discrète sur la durée de la relaxation. Une courbe de décroissance de la chargeabilité est alors obtenue.

Cette mesure correspond à l'intégrale de l'aire sous la courbe de décroissance pondérée par V_0 .

L'injection d'un courant en créniaux positifs puis négatifs permet d'éviter la polarisation résiduelle du milieu.

La vraie chargeabilité d'un milieu ne peut être mesurée ou si elle le peut, elle n'est d'aucun intérêt puisque cela impliquerait que le sous-sol est homogène. Nous recherchons des endroits où il y a des hétérogénéités. Donc ce que nous mesurons vraiment est la chargeabilité apparente qui est une fonction des vraies chargeabilités et résistivités des matériaux sondés.

Pour avoir des chiffres significatifs, on aura des mesures en ms ou mV/V.

Mise en œuvre :

De même que pour la méthode de résistivité électrique, la mesure de la PP ou chargeabilité nécessite l'emploi d'un quadripôle d'électrodes (ABMN) composé d'un dipôle d'électrodes d'injection et d'un dipôle d'électrodes de mesure de potentiel. Le même matériel (ABEM terrameter SAS4000) que pour la mesure de résistivité est utilisé.

Les mesures de PP se font en parallèle avec les mesures de résistivité, selon le même protocole de mesures (dipôle-dipôle, Wenner-Schlumberger...).

L'utilisation d'électrodes impolarisables est fortement conseillée afin d'augmenter le rapport signal/bruit.

Données PP :

Les mesures sont habituellement réalisées avec une configuration d'électrode dipôle-dipôle, Wenner ou Schlumberger. Si l'écartement entre électrodes n augmente, la résolution diminue (averaging effect).

Le traitement consiste, après filtrage des données anomaliques, à accéder aux distributions de chargeabilités « vraies » à l'aide des mêmes processus que ceux utilisés pour l'inversion des données de résistivité.

Les données PP sont présentées sous forme de pseudo-sections (Distance/profondeur) de chargeabilité.

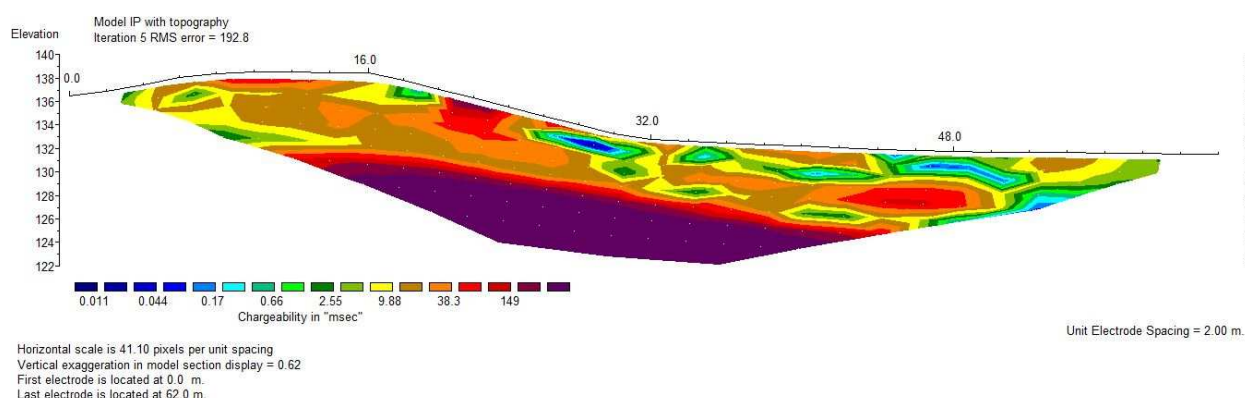


Figure 15 : Pseudo-section de chargeabilité incluant la topographie.

Interprétation – Domaines d’application :

L’interprétation est essentiellement qualitative. L’intensité des anomalies de chargeabilité et la connaissance des facteurs géologiques ou environnementaux locaux (nature des terrains prospectés, présence d’accidents tectoniques...) permettent le plus souvent de se faire une idée sur la nature des corps perturbateurs (gisements métallifères, aquifères, teneur en argile...).

Un couplage avec des mesures de résistivité est nécessaire pour l’interprétation.

Les principaux domaines d’application sont les suivants :

- Prospection minière, recherche de gisements métalliques.
- Géologie (recherche d’accidents tectoniques, évaluation des teneurs en argile...).
- Hydrogéologie (recherche d’alluvions aquifères, de fuites...).
- Environnement (Recherche de fluides, de pollutions...).