

**Renouvellement canalisation
AEP Ø 250 sous l'Allier
Communes de Le Broc & Nonette-Orsonnette (63)**

- Reconnaissance Géophysique -

**Méthode de la Tomographie de résistivité
électrique multi-électrodes**

KAS4.P.079

Décembre 2025



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

*



Zone du « bras mort », le 02/12/2025 lors des mesures in situ.

Date émission	Version	Rédaction	Contrôle
19/12/2025	1	T. HOUTTEVILLE	F. CHALUS
	2		

Le présent rapport constitue un ensemble indissociable de 51 pages (annexes comprises).

SOMMAIRE

1.	Introduction	4
1.1	Généralités.....	4
1.2	Nature de la mission.....	4
1.3	Contexte géographique & géologique.....	5
1.4	Documents fournis	6
2.	Reconnaissance géophysique.....	7
2.1	Matériel de mesure mis en œuvre.....	7
2.2	Travaux réalisés	8
3.	Résultats de la reconnaissance.....	11
3.1	Documents remis en annexes.....	11
3.2	Synthèse de la reconnaissance	12
4.	Conclusion	15

Annexes	16
----------------------	-----------

Annexe 1 : Synthèse de la reconnaissance géophysique	17
---	-----------

- Implantation & nomenclature de la tomographie électrique (1 planche A3)
- Tableau des coordonnées GPS (1 page A4)
- Tableau des mesures brutes des sondages électriques (1 page A4)
- Sondages électrique verticaux interprétés SEV01 & SEV02 (1 planche A3)
- Coupes géoélectriques PE01 & PE02 incluant la topographie (1 planche A3)
- Sections de mesures PE01 & PE02 modélisées à l'aide du logiciel Res2DInv (1 page A4)

Annexe 2 : Principe des méthodes employées	24
---	-----------

1. Introduction

1.1 Généralités

A la demande du service géotechnique de la société GINGER CEBTP – Agence de Clermont-Ferrand, 17 rue du Pré Comtal, ZA des Gravanches, 63100 CLERMONT-FERRAND, représenté par Mme Lucie PRAT,

Le Pôle National Géophysique de la société GINGER CEBTP, ZA des Gravanches, 17 rue du Pré Comtal, 63100 CLERMONT-FERRAND, a réalisé une reconnaissance géophysique par tomographie de résistivité électrique multi-électrodes (ou panneau électrique – PE) et par la méthode du sondage électrique vertical (SEV) au droit du projet de renouvellement de la canalisation AEP Ø 250 sous l'Allier, sur le territoire communal de LE BROC & NONETTE-ORSONNETTE (63).

Les mesures ont été effectuées par le personnel de GINGER CEBTP (Thomas HOUTTEVILLE assisté de Antoine VIVIER), pendant 4 jours in situ, sur une période allant du 24 novembre au 02 décembre 2025.

Le traitement, l'interprétation et le rapport ont été réalisés par Thomas HOUTTEVILLE, Ingénieur Géologue-Géophysicien au Pôle Géophysique de GINGER CEBTP.

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

1.2 Nature de la mission

La tomographie 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 (en Ohm.m) et/ou la chargeabilité électrique (en ms). Le paramètre mesuré dans le cas présent est la résistivité (Ohm.m) du terrain.

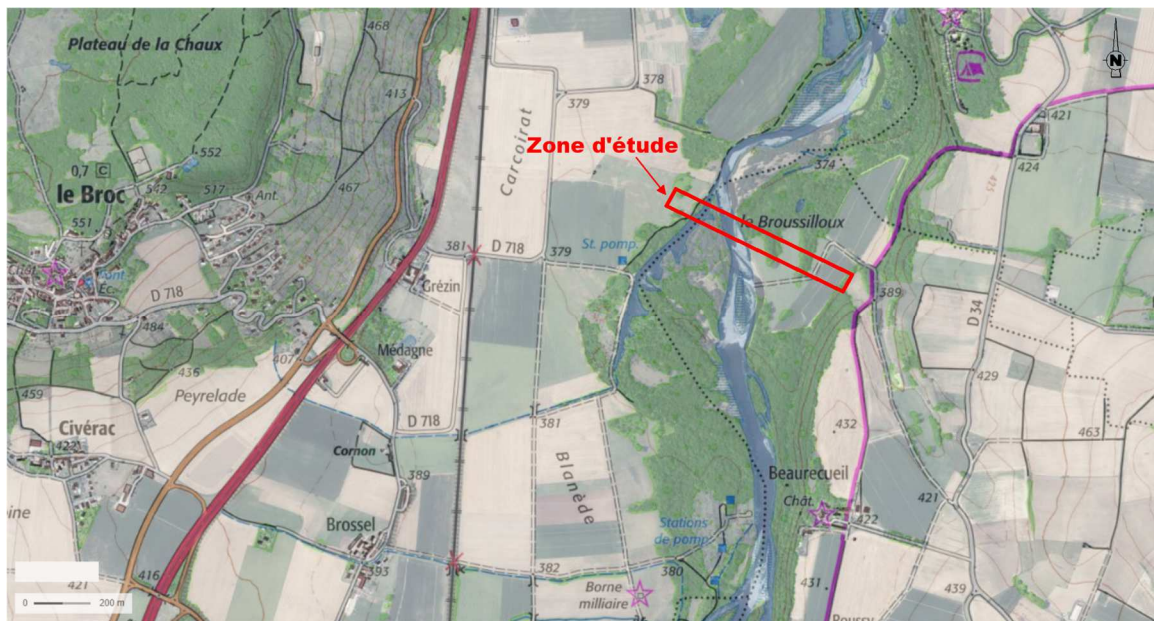
Dans le cadre du projet de renouvellement de la canalisation AEP Ø 250 sous l'allier (passage en forage dirigé), l'objet de cette prospection géophysique est d'obtenir une meilleure connaissance des structures géologiques et des terrains investigués au droit et à proximité de l'axe de la future canalisation.

La méthode mise en œuvre vise donc à préciser en coupe la géométrie de la zone d'étude et la nature supposée des différentes formations en présence.

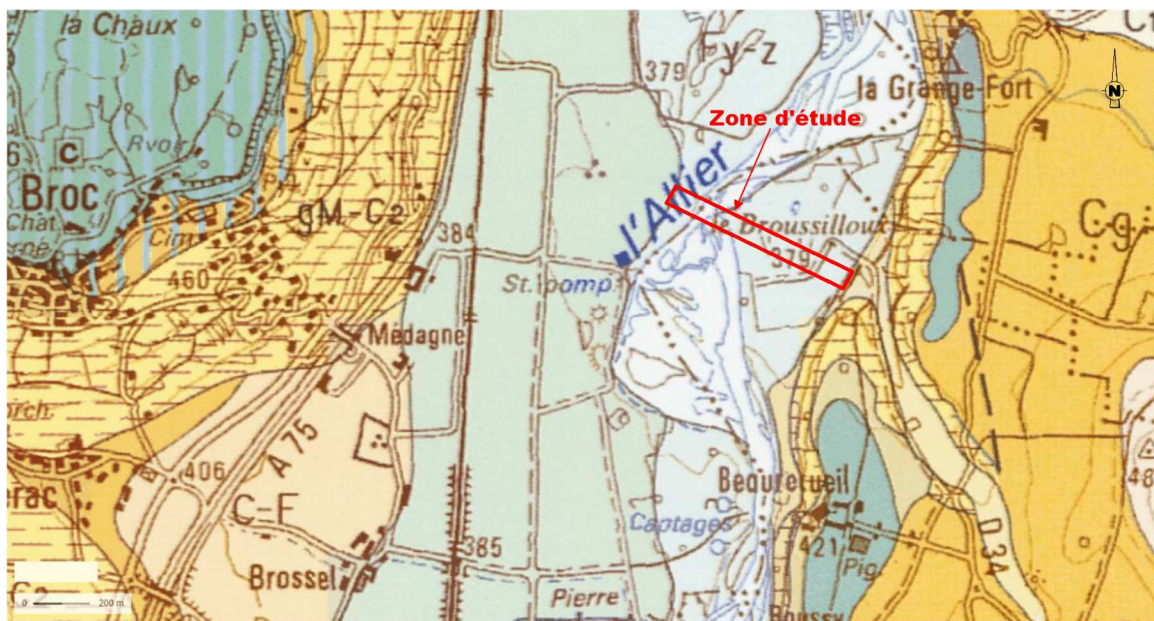
D'éventuelles hétérogénéités (variations de faciès, anomalies, discontinuités...) pourront être mises en évidence. Des flux d'eau souterraine peuvent aussi influencer les résultats de la prospection géophysique.

1.3 Contexte géographique & géologique

La zone d'étude est située à environ 2.2 km à l'est de « Le Broc », dans le lit majeur de l'Allier. Elle se caractérise par des champs cultivés en rive gauche et rive droite. Le lit mineur est constitué d'un bras mort et d'un bras dynamique séparés par des îles alluvionnaires.



Localisation de la zone d'étude sur fond de carte topographique IGN drapée sur photo aérienne (geoportail.fr).



Localisation de la zone d'étude sur carte géologique du BRGM – Feuille 742, St-Germain-Lembron (infoterre.brgm.fr).

Sur la base des informations mentionnées dans la notice de la carte géologique – Feuille 742 ST-GERMAIN-LEMBRON, les formations géologiques naturelles susceptibles d'être rencontrées au droit du site étudié sont succinctement décrites ci-dessous, de la plus récente à la plus ancienne :

- Formations superficielles (C_{fv}) : Dépôts de pente & colluvions de fond de vallée, à dominante argilo-sableuse. Potentiellement présentes au pied du coteau à l'est de la zone d'étude.
- Alluvions actuelles à subactuelles indifférenciées ($FY / Fy-z$) : Elles constituent le fond de l'Allier et l'ensemble du lit majeur. Elles sont à dominante de sables et de galets non altérés (essentiellement issus du socle et de basalte). Leur granulométrie peut être très hétérogène.
- Substratum oligocène indifférencié (gs et $gM-C_2$) : Ensemble détritique sablo-argileux et alternance de calcaires marneux et marnes bariolées, localement présence de schistes papyracés.

1.4 Documents fournis

- SME/Geoal : Cahier des charges Etudes géophysiques du 06/08/2025 - dossier C25044 - Renouvellement canalisation AEP Ø 250 sous l'Allier, au format PDF.
- Document Forexi : 25.1276 GEOVAL - Franchissement de l'Allier - Rapport de mission G1PGC_rev1, au format PDF.
- Plan Autocad AVP_C25044-pour GINGER.dwg.

2. Reconnaissance géophysique

2.1 Matériel de mesure mis en œuvre

- ⇒ 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)
- ⇒ 2 câbles de 155m, 64 électrodes inox & 64 connexions.
(Référence GPH 07272)
- ⇒ GPS Garmin non différentiel.



Matériel de mesure in situ.

2.2 Travaux réalisés



Les mesures géophysiques ont été réalisées selon le référentiel AGAP, fiche n°2018 – ELE 01 du code de bonne pratique édité par l'Association pour la qualité en Géophysique Appliquée (AGAP).

Il a été réalisé 2 panneaux électriques terrestres et aquatiques, avec la configuration suivante :

Nom	Longueur	Nbre d'électrodes	Distance Inter-électrodes	Protocole de mesure	Prof. théorique	Nombre de mesures
PE01	640m	125	5m	Wenner-Schlumberger	± 35m	1035
PE02	635m	122	5m	Wenner-Schlumberger	± 35m	948

Il est important de noter que les mesures des panneaux électriques n'ont pas pu être réalisées dans le bras dynamique de l'Allier du fait d'un fort courant et de la présence d'arbres morts ne permettant pas la mise en place des câbles électriques. Il en résulte que 4 électrodes n'ont pas pu être mises en place sur le PE01, ainsi que 6 électrodes sur le PE02.

L'implantation finale des panneaux électriques a également été conditionnée par la présence de zones boisées avec broussailles et ronces.

Il a également été réalisé 2 sondages électriques verticaux parallèles aux berges en rive droite et rive gauche. Ils sont notés SEV01 & SEV02 et ont été mesurés selon la configuration Schlumberger et avec un écartement AB max = 200m.

Les coordonnées X, Y (selon le système géodésique RGF93) de 39 points GPS, répartis sur les différents profils, ont été relevées à l'aide d'un système GPS non différentiel dont la précision les jours des mesures était de ± 1m.

Elles sont présentées dans un tableau en annexe.



Les données obtenues lors de la prospection électrique ont été filtrées (élimination des mesures considérées comme non significatives), traitées par l'intermédiaire d'un module de lissage (« smoothing ») codé en langage informatique PYTHON, puis dépouillées à l'aide du logiciel 2D de modélisation par inversion RES2DINV, version 3.4, produit par la société GEOTOMO Software.

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 a été réalisé à l'aide d'un logiciel d'inversion.

La topographie et la bathymétrie, extraites du plan Autocad fourni et complétées par les données du MNT (géoportail.fr), ont été prises en compte dans le processus d'inversion et de modélisation.

Les données ont été inversées suivant la norme L2, couramment utilisée dans le cadre d'une distribution où les variations de la résistivité électrique sont progressives, typiquement lorsque l'on cherche à imager les variations géologiques d'une zone. L'utilisation de la norme L2 implique que les données obéissent à une statistique Gaussienne.

$$L_2norm = \|e\|_2 = \left[\sum_i |e_i|^2 \right]^{1/2}$$

avec $e_i = d_i^{obs} - d_i^{mod}$

L'équation ci-dessus définit la norme L2 comme étant la racine carrée de la somme des carrés des écarts entre les données mesurées et le modèle calculé.

Afin de quantifier l'écart entre les données de résistivité apparente calculées à partir du modèle et les données de résistivité apparente mesurées sur le terrain, la valeur RMS (Root Mean Square) est calculée :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{calc} - d_i^{mes}}{d_i^{mes}} \right)^2}{N}} \times 100$$

La RMS peut être définie comme un facteur de la qualité de l'inversion. Plus celle-ci sera faible, plus le modèle calculé sera proche du modèle mesuré et donc représentatif de la réalité.

La RMS obtenue pour le PE01 après 5 itérations de calcul est de 15.8%.

La RMS obtenue pour le PE02 après 5 itérations de calcul est de 15.6%.

Les modèles calculés sont considérés comme bons et à priori représentatifs de la réalité.

Le résultat des panneaux électrique est présenté sous la forme de sections de résistivité finalement calculées. Ces coupes géoélectriques 2D permettent de déterminer la géométrie du sous-sol (épaisseur, variations latérales et verticales...) et la nature électrique des différents horizons recoupés.

L'ensemble des données a ensuite été mis en forme à l'aide du logiciel SURFER 22, produit par la société GOLDEN Software.

3. Résultats de la reconnaissance

3.1 Documents remis en annexes

➤ **Annexe 1 : Synthèse de la reconnaissance géophysique**

- Implantation & nomenclature de la tomographie électrique (1 planche A3)
- Tableau des coordonnées GPS (1 page A4)
- Tableau des mesures brutes des sondages électriques (1 page A4)
- Sondages électrique verticaux interprétés SEV01 & SEV02 (1 planche A3)
- Coupes géoélectriques PE01 & PE02 incluant la topographie (1 planche A3)
- Sections de mesures PE01 & PE02 modélisées à l'aide du logiciel Res2DInv (1 page A4)

➤ **Annexe 2 : (27 pages)**

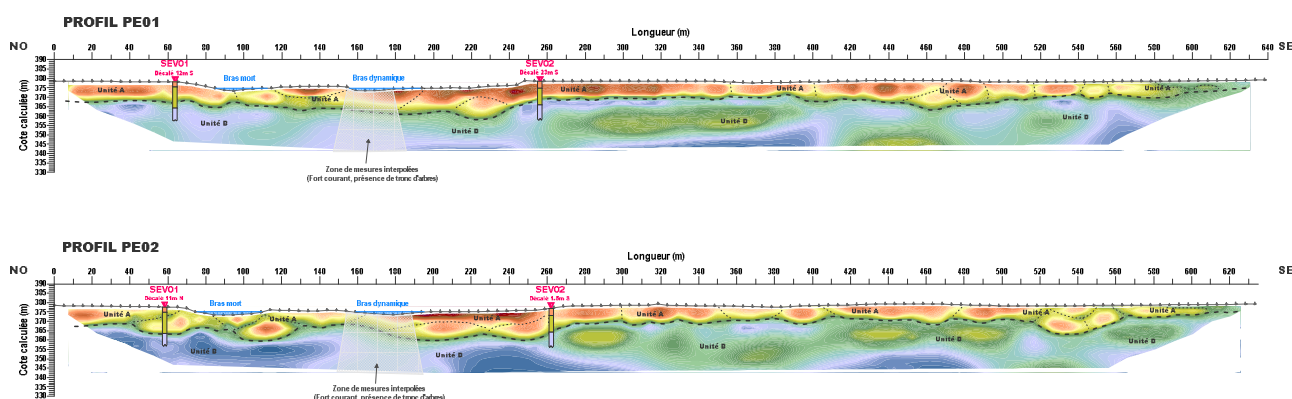
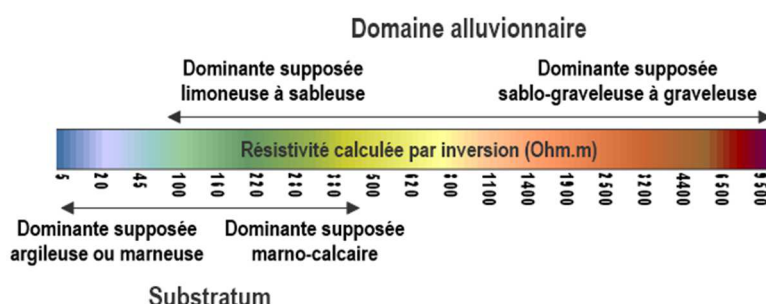
Principe des méthodes employées.

3.2 Synthèse de la reconnaissance

Les résistivités obtenues par « inversion » sur les sections de résistivité (ou coupes géoélectriques) s'intègrent dans une gamme considérée comme très étendue. Elles sont intégralement comprises entre 5 Ohm.m et 10 000 Ohm.m.

Les coupes géoélectriques montrent une géométrie bicouche caractérisée par un recouvrement alluvionnaire globalement électriquement résistant sur un substratum marno-calcaire globalement électriquement plus conducteur.

Il est à noter que la distinction entre les différents matériaux constitutifs du recouvrement et du substratum peut parfois être difficile à réaliser car leurs gammes de résistivité peuvent se chevaucher, selon l'échelle de résistivité suivante :



Coupes géoélectriques modélisées incluant la topographie, obtenues par inversion et mises en forme à l'aide du logiciel Surfer.

Les tomogrammes présentent des contrastes de résistivité significatifs permettant de définir les unités géoélectriques décrites ci-après :

Unité géoélectrique	Plage de Résistivité	Interprétation géophysique correspondante
Unité A	Résistivité hétérogène, assez faible à très forte, globalement comprise entre 75 et 10 000 Ohm.m (en moyenne autour des 1000 Ohm.m).	Unité de surface et subsurface attribuée au recouvrement quaternaire et pouvant correspondre : - à des alluvions de l'Allier pouvant varier d'une dominante sableuse à une dominante graveleuse à galets. - localement à des colluvions sablo-limoneuses de pied de versant (notamment au pied du coteau en rive droite). Il est à noter que les fortes variations de résistivité au sein de cette unité peuvent résulter de variations latérales & verticales de faciès ainsi que de la teneur en eau des alluvions (hors nappe, sous nappe...).
Unité B	Résistivité très faible à moyenne, globalement comprise entre 5 et 400 Ohm.m.	Unité profonde attribuée au substratum et pouvant correspondre de manière indifférenciée à : - Des formations sédimentaires d'âge oligocène : Marnes, marnes argileuses, marno-calcaires, calcaires argileux, schistes papyracés. - Localement à des formations détritiques sablo-argileuses bariolées et plus ou moins indurées, d'âge oligocène Il est à noter que les variations de résistivité au sein de cette unité peuvent résulter de variations latérales & verticales de faciès. La teneur en eau peut également influencer la résistivité.

Au droit des 2 profils réalisés, l'épaisseur modélisée du recouvrement alluvionnaire est très variable, comprise entre environ 3m (en bordure de coteau en rive droite) et environ 17m (vers 227m au droit du PE01). Plusieurs zones de surépaisseur d'alluvions sont visibles sur les coupes géoélectriques. En moyenne, l'épaisseur des alluvions est de l'ordre d'une dizaine de mètres.

Remarques :

- 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 limites reportées sur les profils correspondent à des interfaces marquées liées à des gradients significatifs. Elles déterminent donc les transitions supposées entre les différentes unités géoélectriques définies ci-dessus.
- Les coupes géoélectriques présentées sont des modèles calculés par inversion mathématique des mesures. Les épaisseurs fournies, les limites supposées entre les différents ensembles et la nature supposée des formations en présence sont donc théoriques et peuvent être différentes des unités décrites lors des investigations géotechniques.

Les 2 sondages électriques (SEV01 & SEV02) réalisés présentent une bonne corrélation avec les coupes géoélectriques.

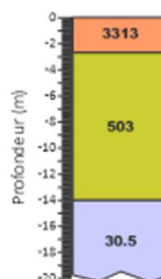
Au droit du SEV01 en rive gauche, l'épaisseur modélisée des alluvions est de 14m.

Au droit du SEV02 en rive droite, l'épaisseur modélisée des alluvions est de 12.6m.

Sondage électrique SEV01 - Rive gauche

N	ρ	h	d
1	3313	2.7	2.7
2	503	11.3	14
3	30.5		

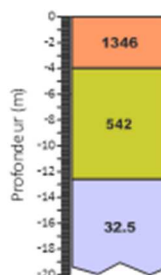
Déviati on Mesures brutes / Modèle calculé = 8.64%



Sondage électrique SEV02 - Rive droite

N	ρ	h	d
1	1346	4	4
2	542	8.6	12.6
3	32.5		

Déviati on Mesures brutes / Modèle calculé = 3.95%



4. Conclusion

La prospection géophysique réalisée fournit une vision spatiale au droit du projet de franchissement de l'Allier en forage dirigé pour la pose d'une nouvelle canalisation AEP Ø 250.

Elle permet de préciser la géométrie du sous-sol, d'estimer la nature et la qualité supposée des différentes unités en présence ainsi que leur puissance.

Cette prospection géophysique étant dite « conjecturale » (car non destructive et réalisée depuis la surface), les caractéristiques indiquées précédemment (nature lithologique, limites entre différents ensembles, épaisseurs calculées, hétérogénéités et variations relevées...) 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 18/12/2025

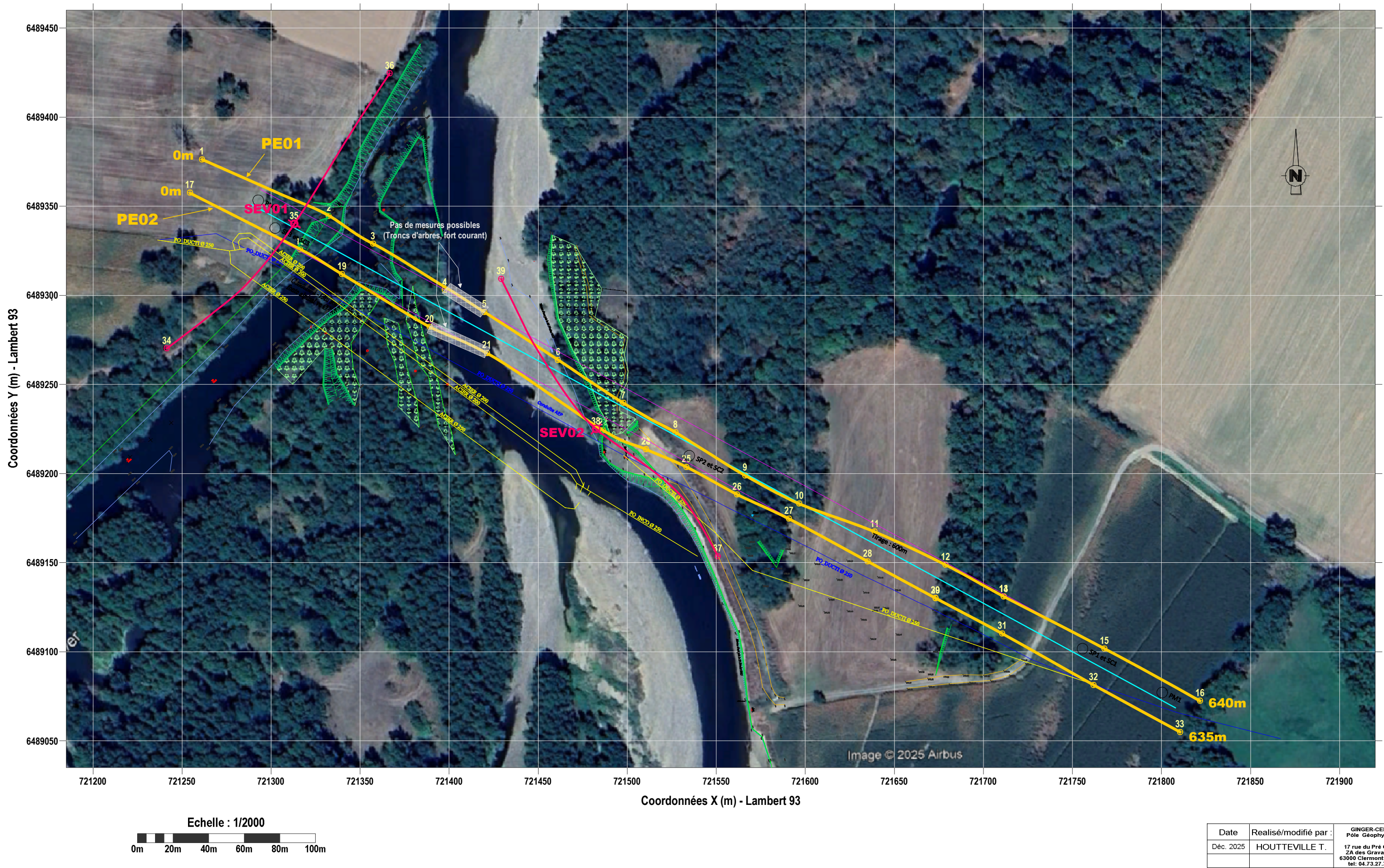
Rédaction	Contrôle
 <i>T. HOUTTEVILLE</i> Ingénieur Géophysicien	 <i>F. CHALUS</i> Ingénieur Géophysicien

ANNEXES

Annexe 1 : Synthèse de la reconnaissance géophysique

- Implantation & nomenclature de la tomographie électrique (1 planche A3)
- Tableau des coordonnées GPS (1 page A4)
- Tableau des mesures brutes des sondages électriques (1 page A4)
- Sondages électrique verticaux interprétés SEV01 & SEV02 (1 planche A3)
- Coupes géoélectriques PE01 & PE02 incluant la topographie (1 planche A3)
- Sections de mesures PE01 & PE02 modélisées à l'aide du logiciel Res2DInv (1 page A4)

Implantation & nomenclature
de la tomographie électrique



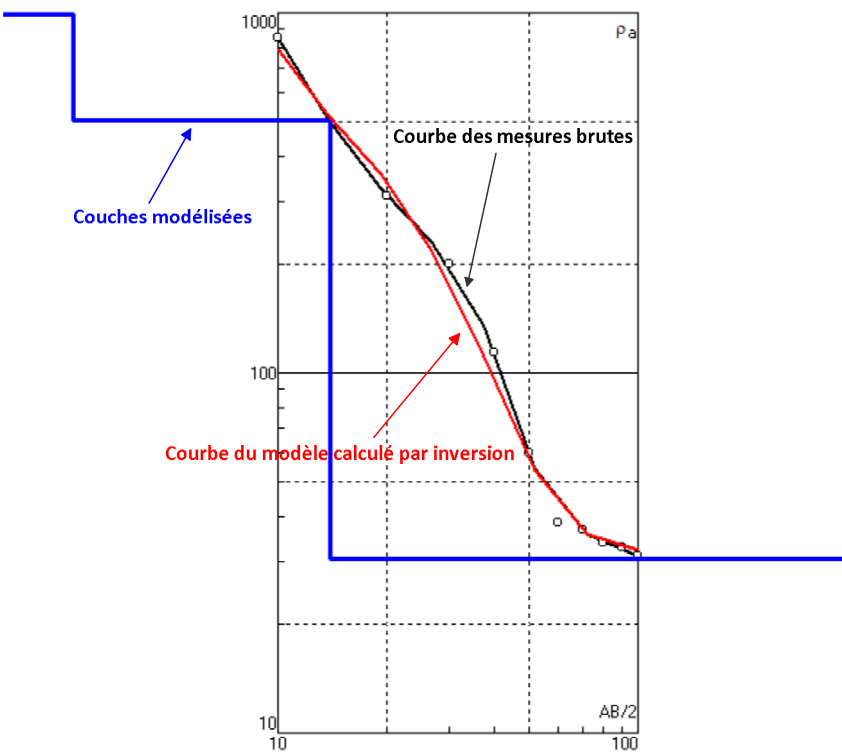
Coordonnées GPS - Système géodésique Lambert 93		
N° Point GPS	X (m)	Y (m)
1	721261.2426	6489376.198
2	721332.497	6489344.632
3	721357.2644	6489328.969
4	721397.593	6489303.066
5	721419.803	6489290.647
6	721461.2004	6489263.705
7	721497.801	6489239.589
8	721527.1077	6489223.029
9	721566.271	6489198.847
10	721596.5633	6489183.077
11	721639.0121	6489167.306
12	721678.701	6489148.775
13	721711.4247	6489130.967
14	721711.4904	6489130.967
15	721768.0668	6489101.791
16	721821.6863	6489072.418
17	721254.4715	6489357.533
18	721316.3967	6489325.77
19	721339.9245	6489311.841
20	721389.0976	6489282.242
21	721421.2837	6489267.561
22	721486.323	6489224.282
23	721510.6456	6489213.532
24	721510.6456	6489213.532
25	721533.2636	6489203.643
26	721561.7518	6489188.264
27	721590.8637	6489174.564
28	721635.0131	6489150.7
29	721673.1148	6489129.957
30	721673.1148	6489130.124
31	721710.5509	6489110.102
32	721761.8523	6489081.317
33	721810.4361	6489054.917
34	721241.4582	6489270.196
35	721313.0518	6489340.186
36	721366.6031	6489424.531
37	721550.8753	6489153.485
38	721482.496	6489225.013
39	721429.2231	6489309.13

	Date : 27/11/2025	
SEV N° : 01	LIEU : Nonette-Orsonnette - Rive gauche	
AB/2	MN	ρ (résistivité app.) Ohm.m
10	5	856
20	5	311
30	5	201
40	5	114
50	5	60
60	5	38.6
70	5	36.8
80	5	33.9
90	5	32.7
100	5	31

	Date : 27/11/2025	
SEV N° : 02	LIEU : Nonette-Orsonnette - Rive Droite	
AB/2	MN	ρ (résistivité app.) Ohm.m
10	5	815.5
20	5	352
30	5	164
40	5	90
50	5	51
60	5	43
70	5	38
80	5	36
90	5	34
100	5	32

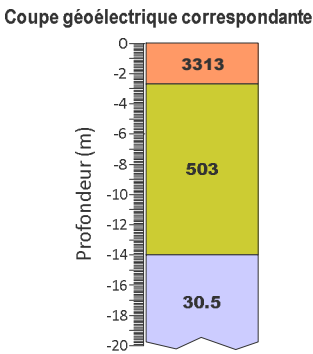
Sondages électriques verticaux
interprétés SEV01 & SEV02

Sondage électrique SEV01 - Rive gauche

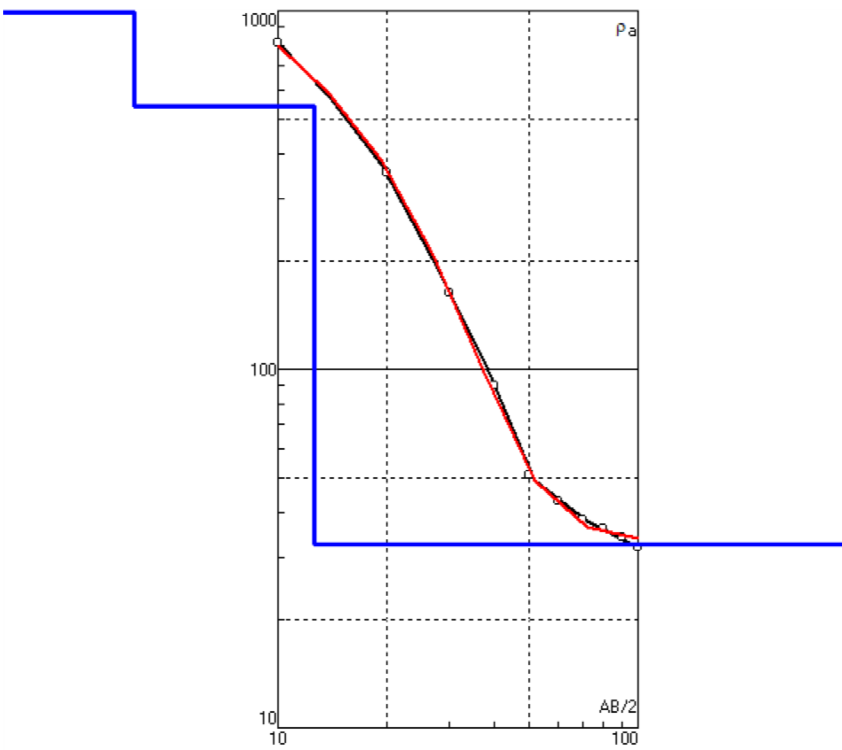


Horizon	Résistivité "vraie" calculée de l'horizon (Ohm.m)	Épaisseur calculée de l'horizon (m)	Épaisseurs cumulées (m)
N	ρ	h	d
1	3313	2.7	2.7
2	503	11.3	14
3	30.5		

Déviation Mesures brutes / Modèle calculé = 8.64%

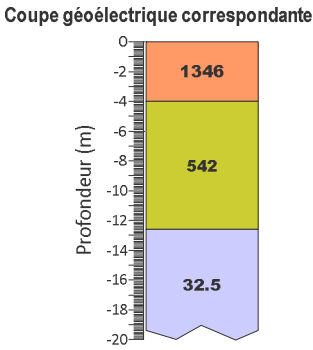


Sondage électrique SEV02 - Rive droite



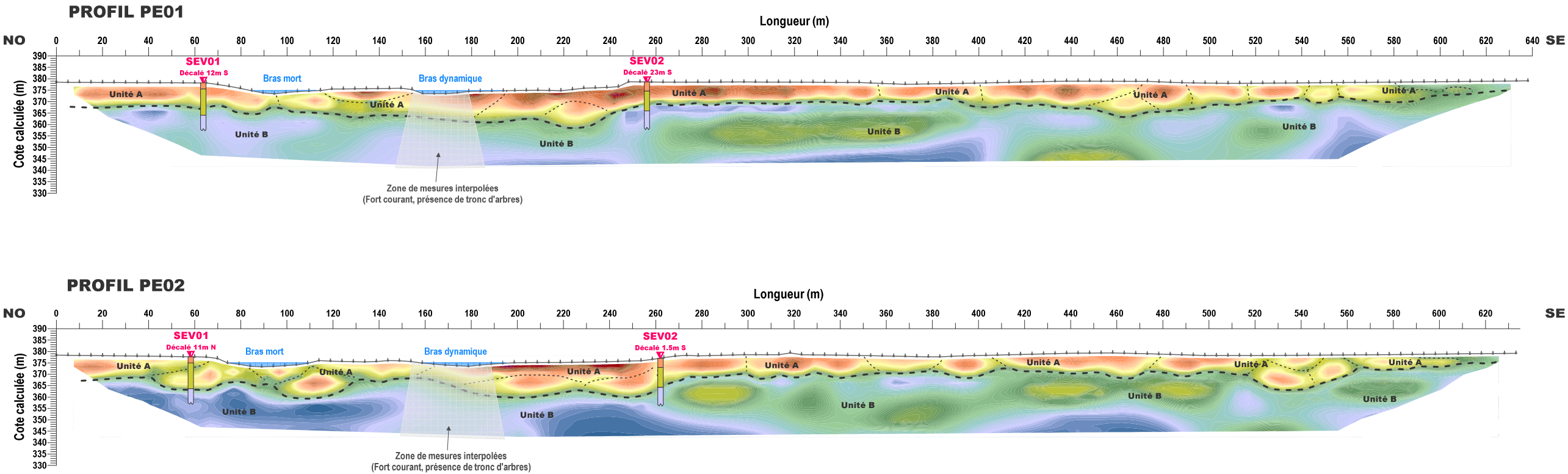
N	ρ	h	d
1	1346	4	4
2	542	8.6	12.6
3	32.5		

Déviation Mesures brutes / Modèle calculé = 3.95%

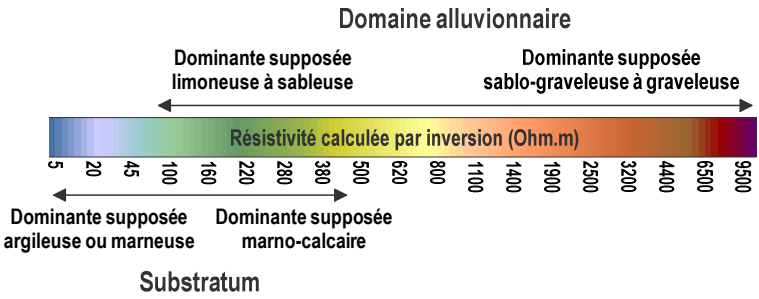


- < 50 Ohm.m : Dominante argileuse à marneuse supposée
- 50 à 200 Ohm.m : Dominante indifférenciée sablo-argileuse, marno-calcaire ou limoneuse supposée
- 200 à 400 Ohm.m : Dominante indifférenciée sableuse ou marno-calcaire supposée
- 400 à 1000 Ohm.m : Dominante sablo-graveleuse (avec présence de galets) supposée
- > 1000 Ohm.m : Dominante gravelo-sableuse (avec présence de galets) supposée

Coupes géoélectriques PE01 & PE02
incluant la topographie

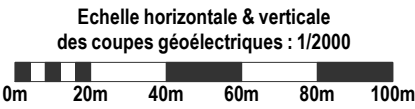


Unité géoélectrique	Plage de Résistivité	Interprétation géophysique correspondante
Unité A	Résistivité hétérogène, assez faible à très forte, globalement comprise entre 75 et 10 000 Ohm.m (en moyenne autour des 1000 Ohm.m).	Unité de surface et subsurface attribuée au recouvrement quaternaire et pouvant correspondre : - à des alluvions de l'Allier pouvant varier d'une dominante sableuse à une dominante graveleuse à galets. - localement à des colluvions sablo-limoneuses de pied de versant (notamment au pied du coteau en rive droite). Il est à noter que les fortes variations de résistivité au sein de cette unité peuvent résulter de variations latérales & verticales de faciès ainsi que de la teneur en eau des alluvions (hors nappe, sous nappe...).
Unité B	Résistivité très faible à moyenne, globalement comprise entre 5 et 400 Ohm.m.	Unité profonde attribuée au substratum et pouvant correspondre de manière indifférenciée à : - Des formations sédimentaires d'âge oligocène : Marnes, marnes argileuses, marno-calcaires, calcaires argileux, schistes papyracés. - Localement à des formations détritiques sablo-argileuses bariolées et plus ou moins indurées, d'âge oligocène Il est à noter que les variations de résistivité au sein de cette unité peuvent résulter de variations latérales & verticales de faciès. La teneur en eau peut également influencer la résistivité.

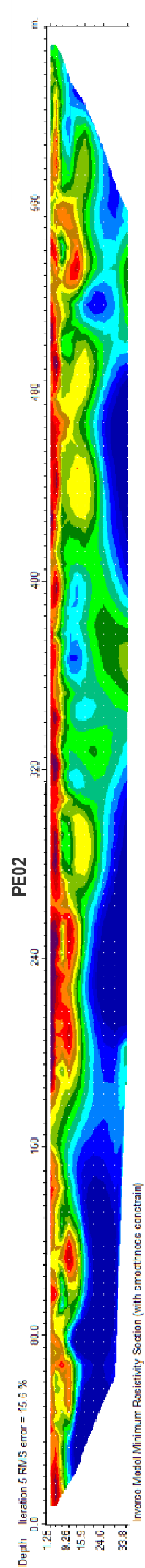
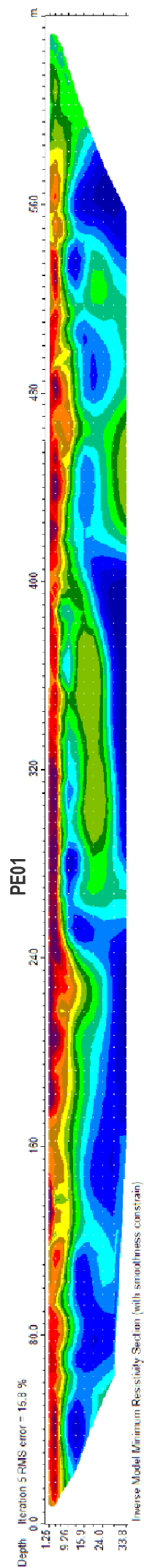


----- Limite supposée Recouvrement alluvionnaire / Substratum

..... Limites secondaires supposées au sein du recouvrement alluvionnaire

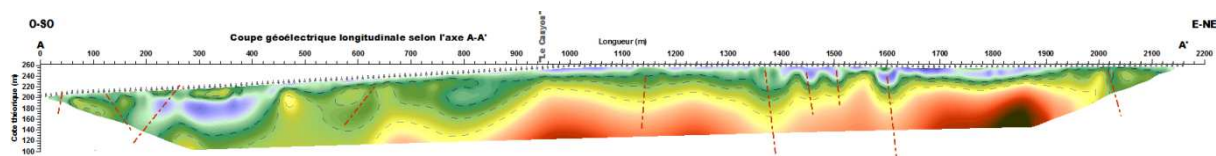


Date	Realisé/modifié par :	GINGER-CEBTP Pôle Géophysique
Déc. 2025	HOUTTEVILLE T.	17 rue du Pré Comtal ZA des Gravanches 63000 Clermont Ferrand tel: 04.73.27.72.00



Annexe 2 : Principe des méthodes employées

TOMOGRAPHIE DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE - Résistivité & Polarisation Provoquée -



Panneau de résistivité

1- Notion de résistivité apparente & principe de la méthode

La méthode de tomographie de résistivité électrique (TRE, ou panneau électrique) consiste à mesurer, à la verticale d'une série d'électrodes MN, la résistivité électrique du sous-sol à différentes profondeurs au moyen d'un dispositif multi-électrodes plantées dans le sol, à partir d'un courant électrique créé 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.

Un quadripôle est donc utilisé, comprenant 2 électrodes d'injection de courant (intensité I connue) et 2 électrodes de mesure du potentiel électrique V , induit dans le sol par l'injection de I .

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

Il est alors 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.

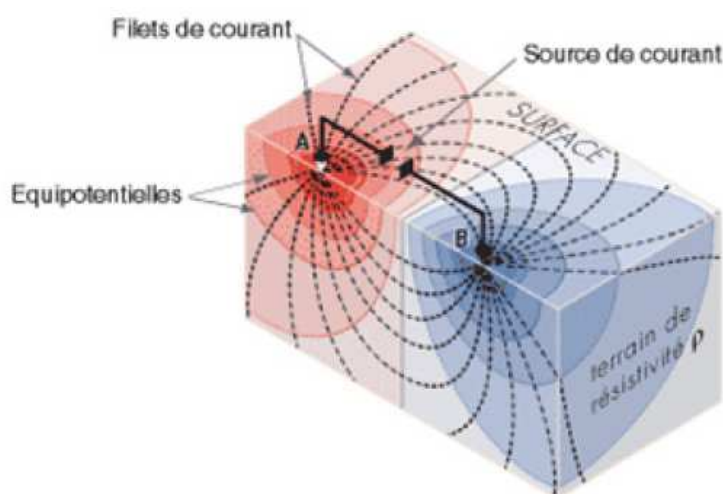


Figure 1 : Distribution du courant créé par deux électrodes dans un terrain homogène et isotrope.

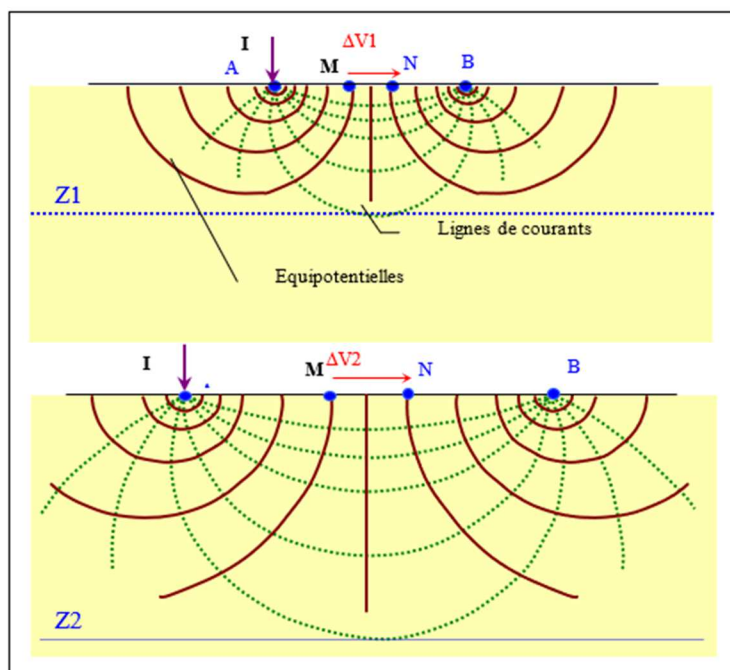


Figure 2 : Répartition des équipotentiellles & des lignes de courant en fonction de l'écartement des électrodes : Influence sur la profondeur d'investigation.

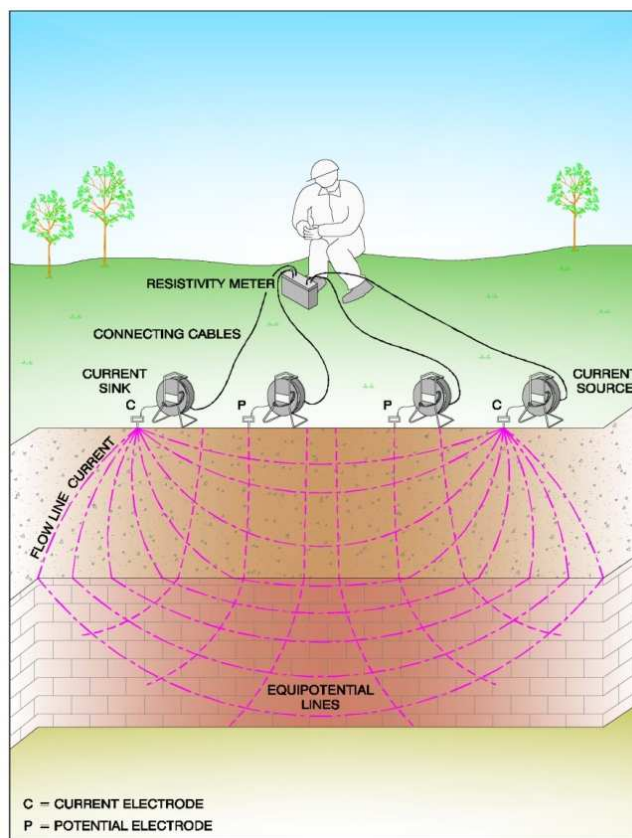


Figure 3 : Schéma de principe de la mesure de résistivité.

La résistivité électrique apparente ρ_a est telle que :

$$\rho_a = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

Avec :

ρ_a : Résistivité apparente,

K : Coefficient géométrique du quadripôle,

ΔV : Différence de potentiel mesurée,

I : Intensité du courant injectée.

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

En faisant varier la géométrie du quadripôle, une série de valeurs de résistivité apparente ρ_a est obtenue. 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 équipotentielles utilisées pour la mesure. Elle résulte de la contribution de la résistivité de chaque unité lithologique présente sur une tranche de sol donnée.

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 algorithme d'inversion de données qui permet de déterminer les pseudo-résistivités électriques du sous-sol en fonction de la profondeur.

Une image des variations de résistivité électrique du sous-sol est alors obtenue sur une profondeur qui dépend du dispositif mis en place. Elle représente la répartition de la résistivité électrique dans le plan vertical situé sous le dispositif de mesure.

Le panneau électrique correspond ainsi à une succession de sondages électriques le long d'un profil d'électrodes. Les positions des quadripôles sont préenregistrées dans une séquence, jusqu'à la profondeur d'investigation théorique souhaitée.

Les mesures sont réalisées suivant un ou plusieurs protocoles donnés (dipôle-dipôle, Wenner-Schlumberger, pôle-dipôle, etc...).

Le protocole de mesure est choisi suivant l'objectif : le dipôle-dipôle est par exemple plus sensible aux hétérogénéités verticales, le Wenner-Schlumberger restitue mieux la structure géologique. Un protocole mixte offre les deux possibilités.

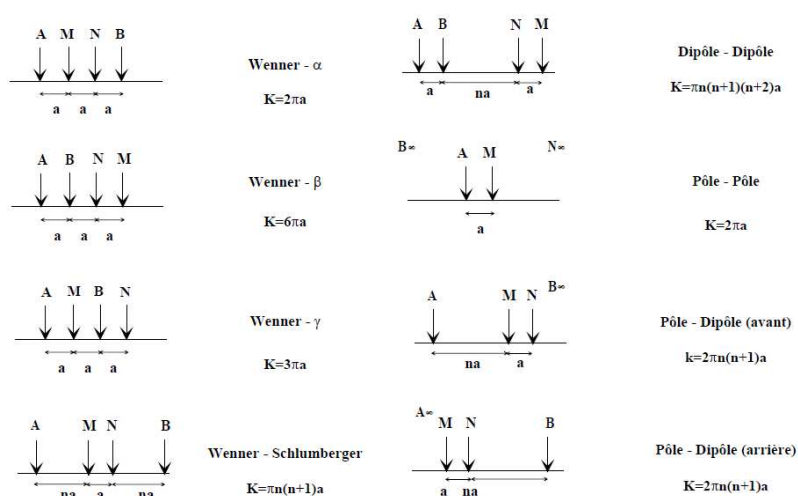


Figure 4 : Exemples de quadripôles et facteur géométrique correspondant.

2- Appareillage & acquisition

L'appareillage mis en œuvre in situ se compose d'un système d'acquisition des mesures, d'un système d'injection de courant et de contrôle des électrodes et d'un ou plusieurs câbles (flûtes) de 16 à 32 électrodes chacune. La distance inter-électrodes peut généralement varier de 1m à 20m.

La longueur d'un dispositif (unité de base) peut alors varier, pour un profil donné, de 16m à 1260m.

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).

Le système est constitué d'un résistivimètre de type SAS4000 ou LS, produit par la société ABEM, associé à des câbles et électrodes inox (dispositif multi-électrodes de 32 à 128 électrodes).

La résolution (espacement entre les électrodes) et la profondeur d'investigation (longueur du dispositif au sol) vont dépendre des objectifs recherchés.

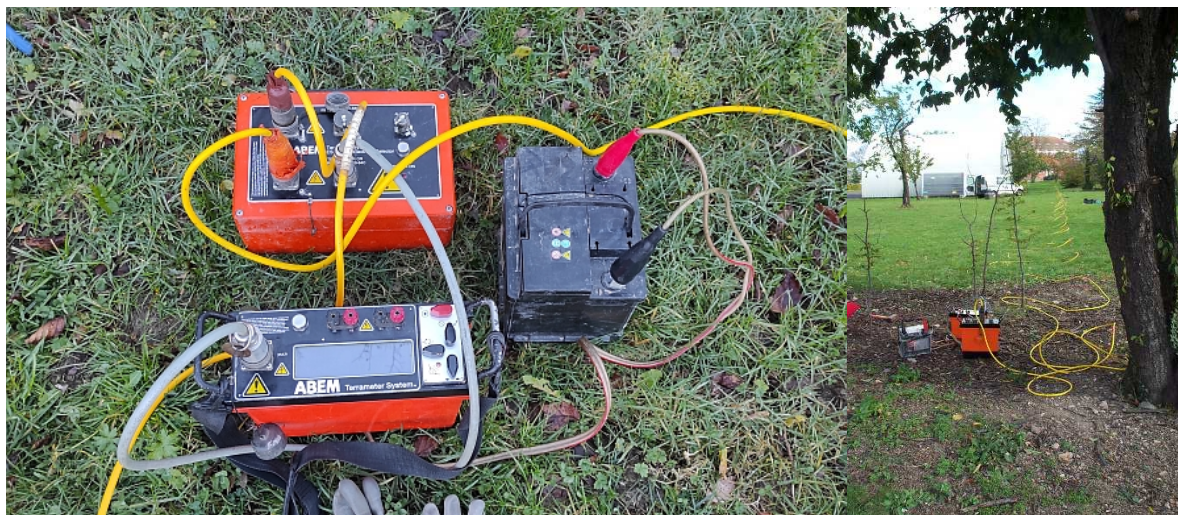


Figure 5 : Résistivimètre SAS4000 & multiplexeur ES10-64, flûte de 32 électrodes (à droite).



Figure 6 : Système d'acquisition ABEM LS.

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 de préférence 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 7 : Panneau électrique terrestre - flûte de 155m – 32 électrodes distantes de 5m.

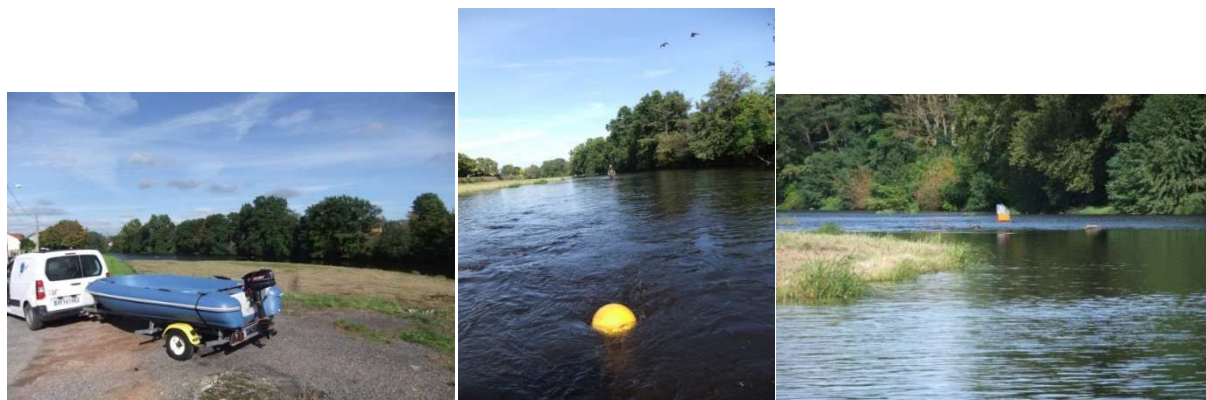


Figure 8 : Panneau électrique aquatique.

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 ».

L'opérateur choisit le dispositif de mesure (Wenner, Schlumberger, Pole-pole...) 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.

Certains de ces montages sont plus ou moins maniables : Le montage pôle-pôle par exemple (avec 2 électrodes dites « à l'infini ») est difficile à mettre en place pour de grands écarts entre les électrodes.

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.

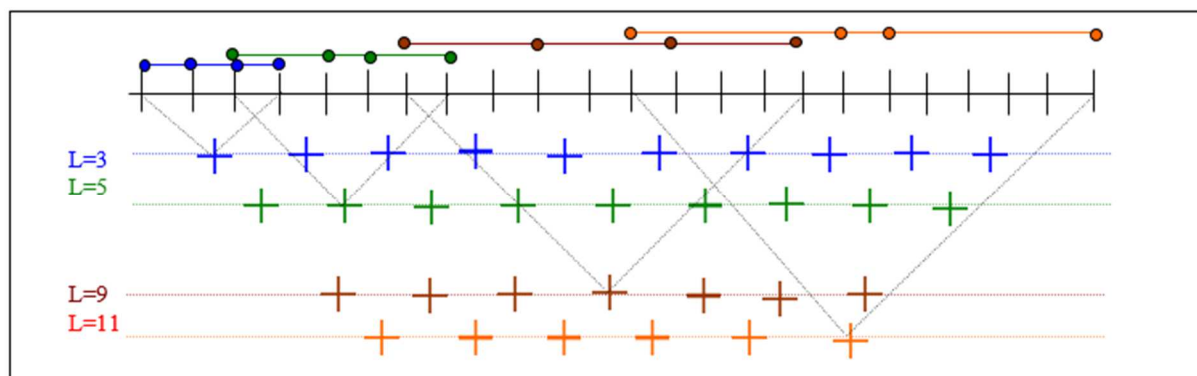


Figure 9 : Influence de la longueur du dispositif sur la profondeur d'investigation –
Etablissement d'une pseudo-section de mesures.

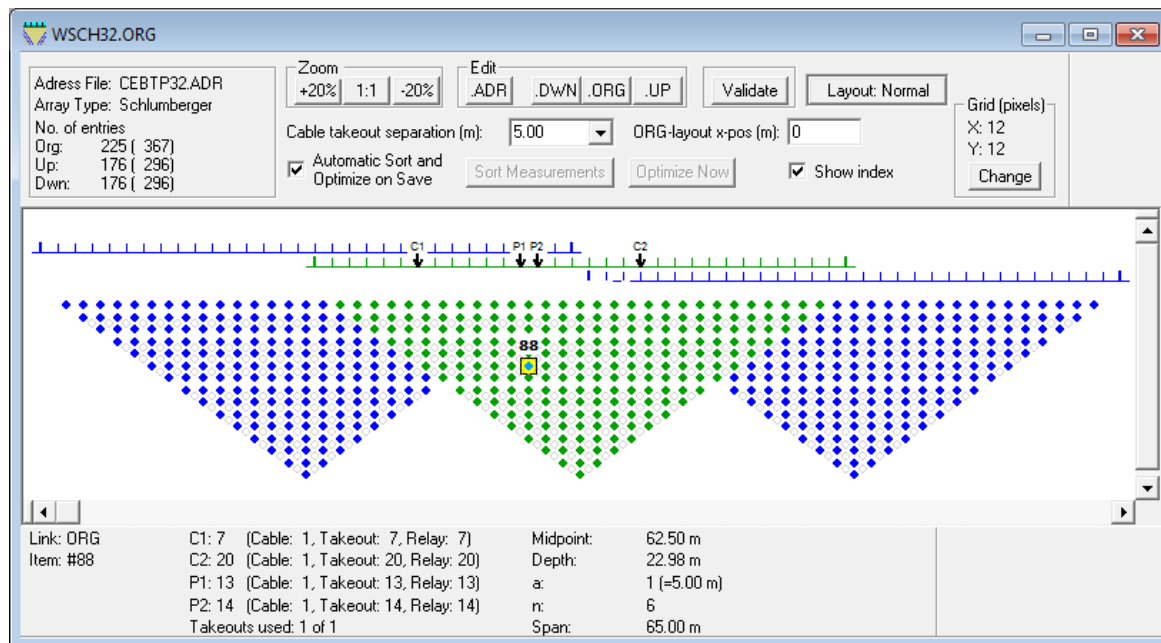


Figure 10 : Exemple de protocole de mesure Wenner-Schlumberger 32 électrodes et pseudo-section correspondante. En bleu, les mesures réalisées selon la technique Roll-along (Logiciel S4kwin – Pôle géophysique).

3- Traitement & 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. Au pôle géophysique de GINGER CEBTP, les mesures de résistivité électrique sont filtrées puis inversées par l'intermédiaire du logiciel **Res2dInv** mis au point par M.H. LOKE.

Une correction topographique est également appliquée dans le processus de calcul.

Les données peuvent être inversées suivant la norme L2 dite « standard », couramment utilisée dans le cadre d'une distribution où les variations de la résistivité électrique sont progressives, typiquement lorsque l'on cherche à imager les variations géologiques d'une zone. L'utilisation de la norme L2 implique que les données obéissent à une statistique Gaussienne.

$$L_2norm = \|e\|_2 = \left[\sum_i |e_i|^2 \right]^{1/2}$$

avec $e_i = d_i^{obs} - d_i^{mod}$

L'équation ci-dessus définit la norme L2 comme étant la racine carrée de la somme des carrés des écarts entre les données mesurées et le modèle calculé.

Afin de quantifier l'écart entre les données de résistivité apparente calculées à partir du modèle et les données de résistivité apparente mesurées sur le terrain, la valeur RMS (Root Mean Square) est calculée :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{calc} - d_i^{mes}}{d_i^{mes}} \right)^2}{N}} \times 100$$

La RMS peut être définie comme un facteur de la qualité de l'inversion. Plus celle-ci sera faible, plus le modèle calculé sera proche du modèle mesuré et donc représentatif de la réalité.

Lorsque les variations électriques attendues ne suivent pas une distribution gaussienne, typiquement lorsque les variations géologiques sont plus abruptes (faille, décrochement, présence de cavités, structures anthropiques), il est souvent plus approprié d'inverser les données suivant la norme L1 dite « robuste ». Cet algorithme donne généralement des résultats présentant des variations électriques plus franches. Dans ce cas, l'écart entre les données de résistivité apparente calculées à partir du modèle et les données de résistivité apparente mesurées sur le terrain est évalué à partir de l'erreur abs (absolute).

Le résultat des panneaux électrique est généralement présenté sous la forme d'une section de résistivités finalement calculée. Cette coupe géoélectrique 2D permet de déterminer la géométrie du sous-sol (épaisseur, variations latérales et verticales...) et la nature électrique des différents horizons recoupés.

Dans l'exemple ci-dessous, on voit nettement se distinguer le niveau résistif correspondant aux matériaux sablo-graveleux, objet de la recherche, surmontant un horizon électriquement conducteur (couleur bleu) correspondant au substratum argilo-marneux.

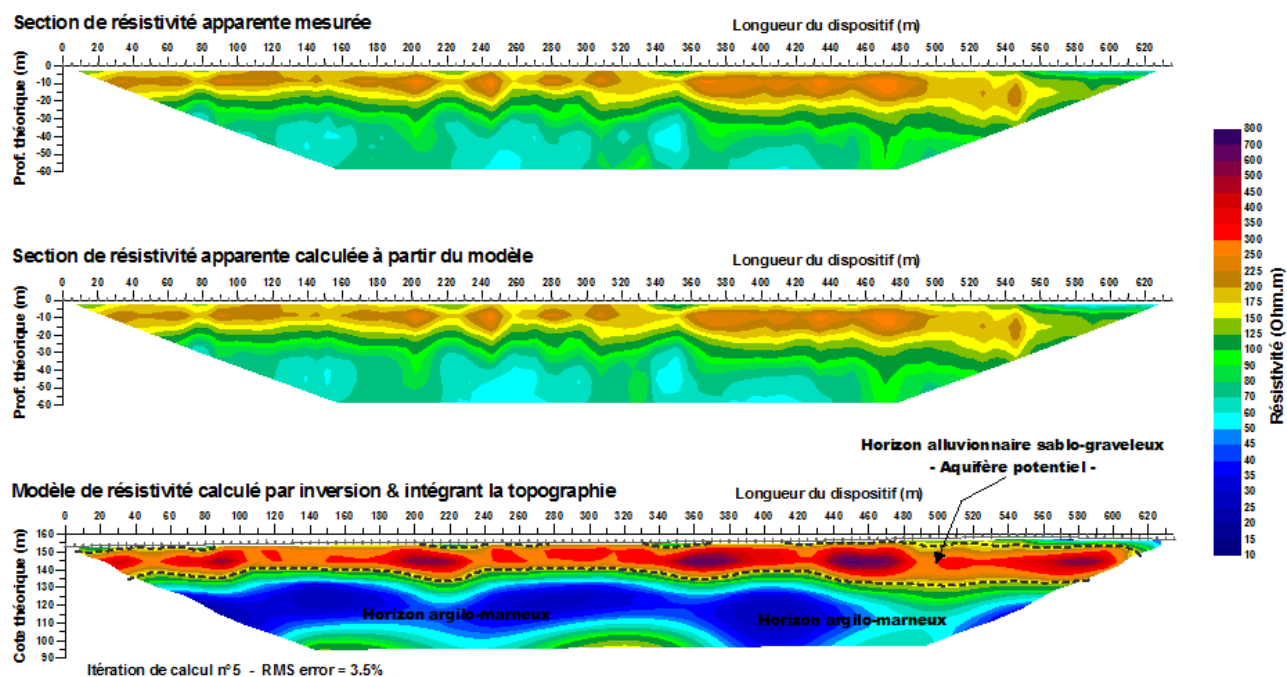


Figure 11 : Exemple de résultat obtenu par la méthode des panneaux électriques en hydrogéologie. Détermination d'un horizon alluvionnaire sablo-graveleux sur substratum argilo-marneux - Flacourt (78). Panneau électrique 128 électrodes - 635 m – configuration Wenner-Schlumberger.

La ressemblance entre le profil des résistivités mesurées et le profil des résistivités calculées à partir du modèle (figure 11) permet de supposer le modèle valide.

Il est cependant nécessaire de garder à l'esprit que 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 :

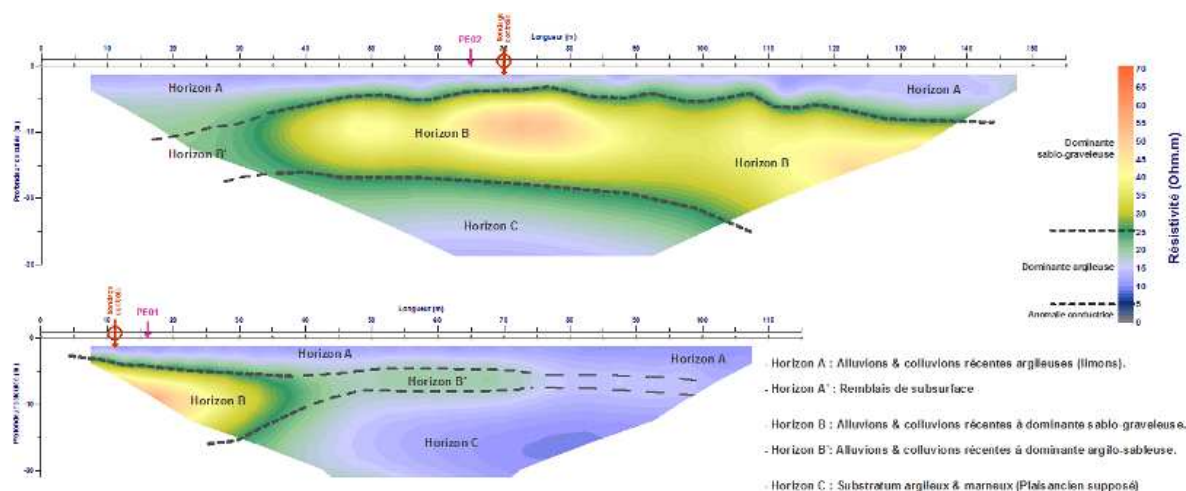


Figure 12 : Reconnaissance hydrogéologique en contexte de vallée alluviale - Mise en évidence d'un horizon sablo-graveleux considéré comme aquifère potentiel - La Roquette/Siagne (06).

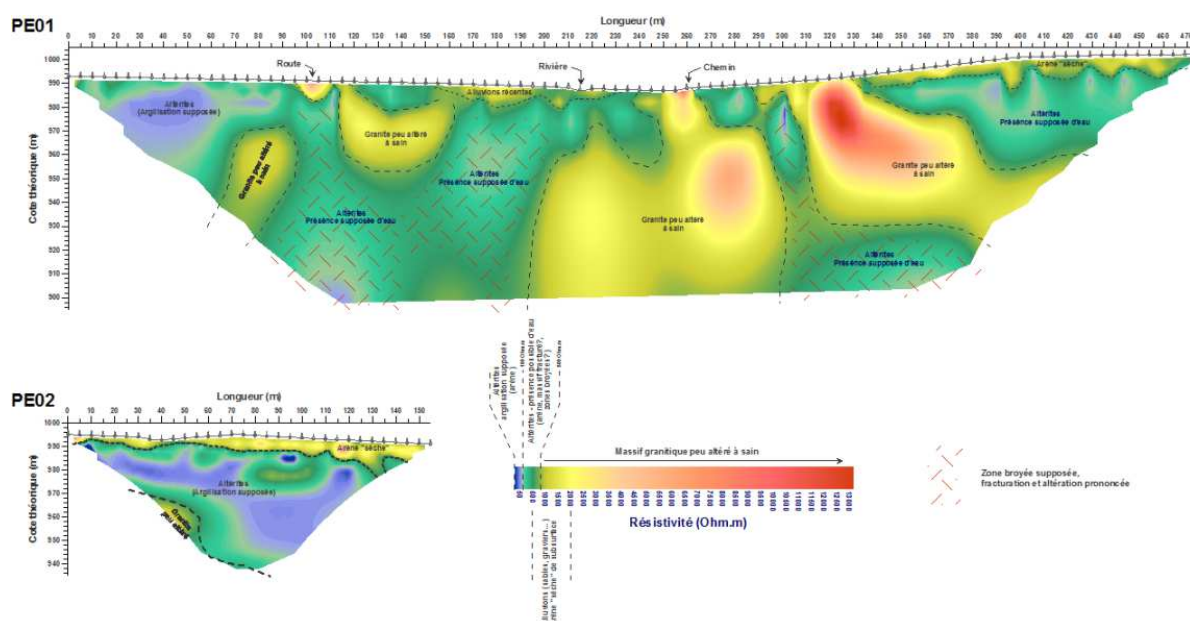
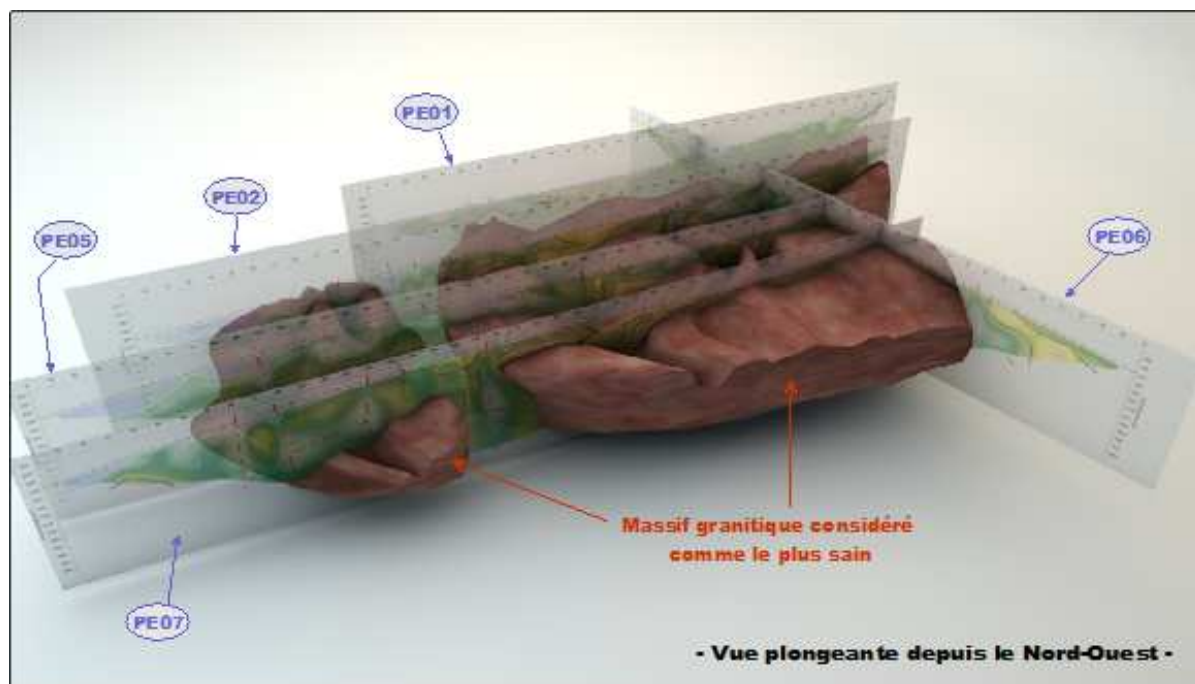
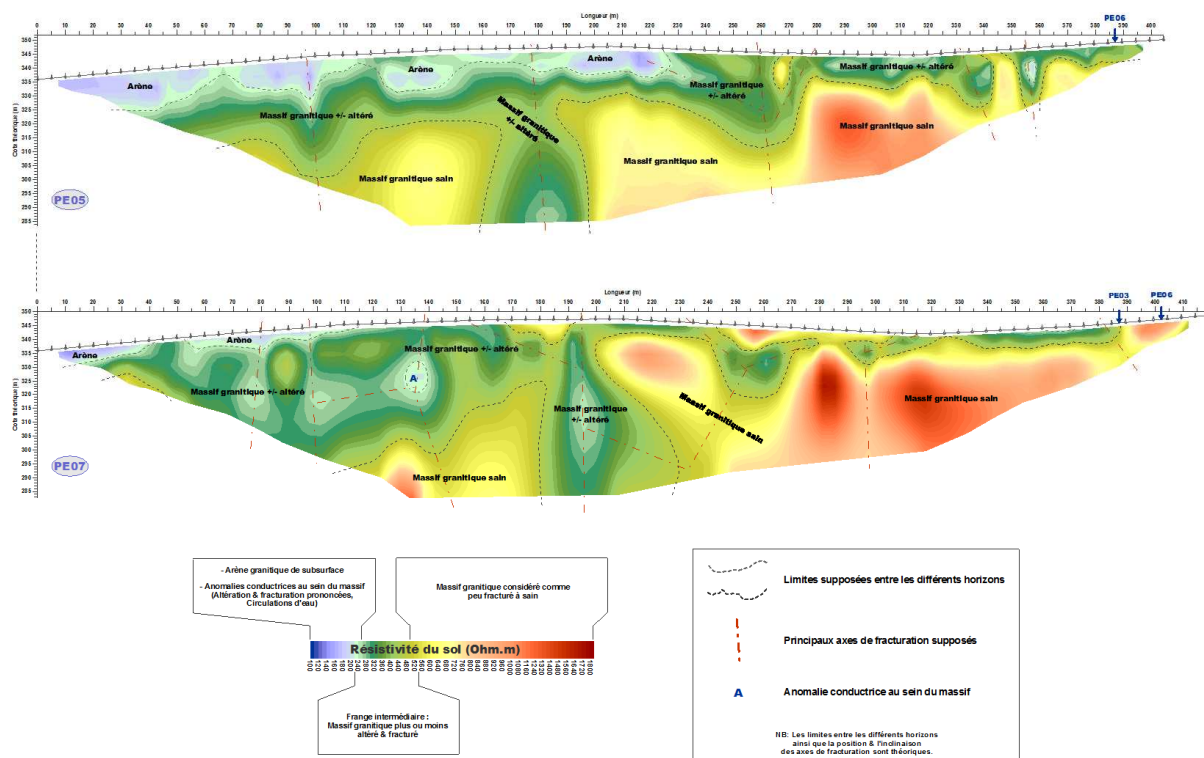


Figure 13 : Reconnaissance hydrogéologique en contexte cristallin – Coupes géoélectriques interprétées montrant la qualité et la géométrie d'un massif granitique, mise en évidence de zones « broyées » (fracturation, altération, failles) potentiellement aquifères – Usine Arcelor-Mittal, St-Chély-d'Apcher (48).

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



Figures 14 & 15 : Modélisation en 2D & en pseudo 3D d'un massif de granite rose (qualité, géométrie, recouvrement) et de la fracturation associée. Extension de Carrière à Vendenesse-lès-Charolles (71).

4- Domaines d'application préférentiels & limites de la méthode

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	1000 à 10000 Ohm.m
Sables humides	30 à 1000 Ohm.m
Schistes	50 à 1000 Ohm.m
Granites	500 à 10000 Ohm.m
Basaltes	800 à 10000 Ohm.m

Limites de la méthode :

- La résolution (taille du plus petit élément observable) d'un panneau électrique va directement dépendre de la distance entre les électrodes de mesure. Plus celle-ci sera petite est plus des éléments de petites tailles seront observables (typiquement de l'ordre de la maille de mesure).
- La profondeur d'investigation maximale dépend de la taille du dispositif de mesure au sol (plus celle-ci sera importante, plus les mesures seront profondes) mais aussi du protocole de mesure utilisé et de la géologie du site étudié. D'un milieu à un autre, la profondeur d'investigation peut varier fortement en fonction de la résistivité du terrain traversé. En effet, dans un terrain très conducteur en surface, le courant va circuler préférentiellement dans les couches supérieures qui opposent peu de résistance. Les terrains sous-jacents ne seront alors pas traversés et la profondeur d'investigation sera nettement réduite. Au contraire, avec un terrain résistant en surface et des terrains sous-jacents conducteurs, le courant circulera préférentiellement dans les couches profondes. La profondeur d'investigation sera alors plus importante.
- Les résultats des mesures électriques sont issus d'un calcul fondé sur un algorithme d'inversion dont l'objet est de déterminer un modèle de terrain optimisé par rapport aux données. En conséquence, les valeurs de résistivité et les profondeurs indiquées doivent être considérées comme indicatives et, en toute rigueur, les anomalies mises en évidence devront être vérifiées par des sondages mécaniques pour en déterminer la nature exacte et la profondeur.
- La présence de conduites enterrées et de lignes électriques à proximité des investigations peut perturber les mesures, voire les rendre inopérantes.

Polarisation Provoquée (PP)

1- Généralités & principe de la méthode

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, chalcoppyrite, ...), 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, 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).

Les mesures peuvent se faire dans le domaine temporel ou fréquentiel. Le matériel dont dispose le pôle géophysique de GINGER 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 ainsi présenté sur la Figure suivante :

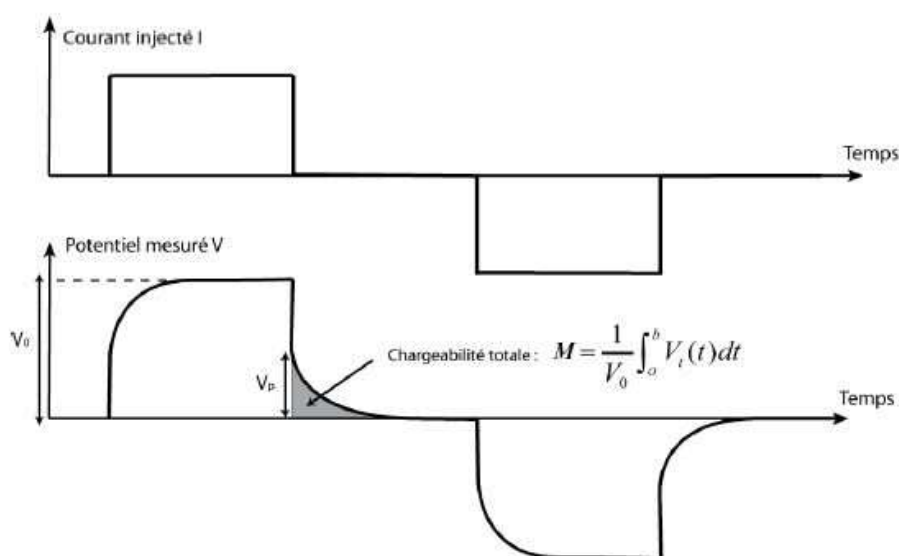


Figure 16 : Principe de mesure de la polarisation provoquée temporelle.

Lors de l'application d'un courant en créniaux, 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 ainsi 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 donc des zones présentant des hétérogénéités. Par conséquent, 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.

2- 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 ou LS) 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 conseillée mais non nécessaire, afin d'augmenter le rapport signal/bruit.

3- Traitements & résultats obtenus

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).

Les données brutes, mesurées sur le terrain, de la résistivité apparente (Ohm.m) et de la chargeabilité (millisecondes) obtenue par polarisation provoquée permettent de calculer et de modéliser les 5 tomogrammes suivants :

- Tomogramme de résistivité dite « vraie » ou coupe géoélectrique (voir le chapitre Panneau de résistivité).
- Tomogramme de chargeabilité normalisée (Mn).
- Tomogramme de capacité d'échange cationique (CEC).
- Tomogramme de teneur en eau.
- Tomogramme de perméabilité (K)

3.1- Chargeabilités

Chargeabilité :

Le terramètre utilise la courbe de décroissance du courant pour calculer la chargeabilité.

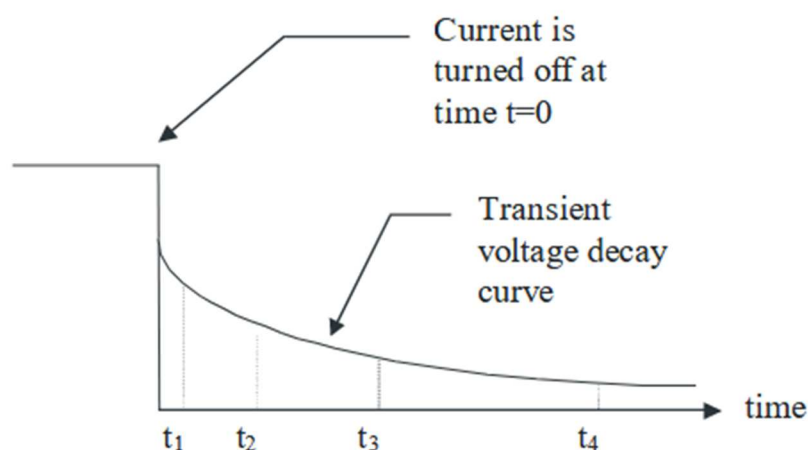


Figure 17 : Courbe de décroissance de la chargeabilité.

Une chargeabilité est calculée entre deux instants (t_i, t_{i+1}).

Si 10 fenêtres de mesures ont été choisies par l'utilisateur, alors le terramètre calcule 10 chargeabilités.

W1 est la première chargeabilité. Elle est égale à $M_{t1,t2} = \int_{t1}^{t2} V(t)dt$ en msec $t1$ = temps mort, $t2$ = temps mort + « incrementation time ».

Plus on prend une fenêtre proche de $t=0$, plus elle est en théorie juste, mais en pratique, les bruits inductifs nous poussent à utiliser un temps mort pour palier à ce phénomène :

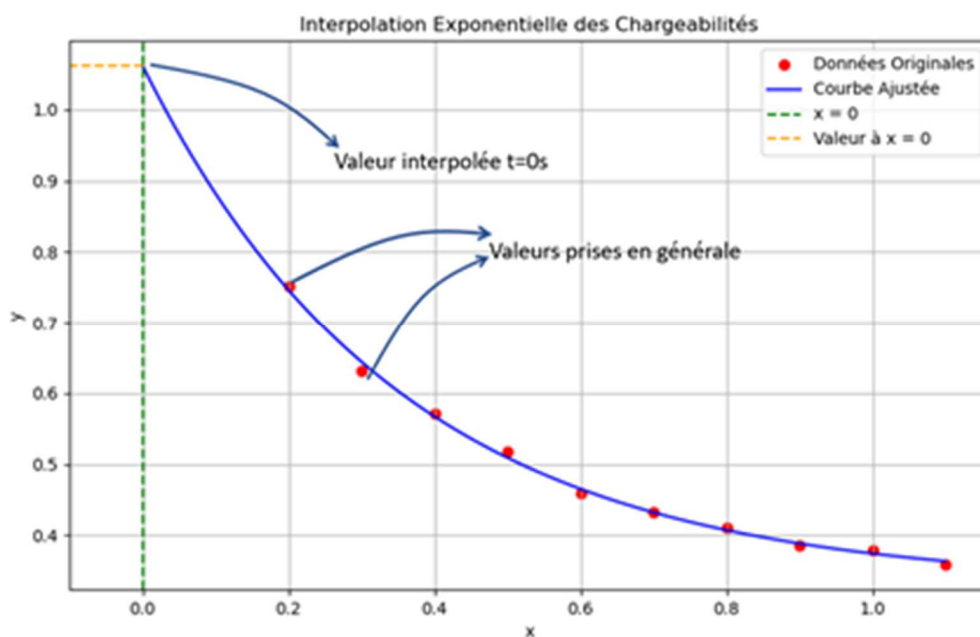


Figure 18 : Principe d'interpolation des chargeabilités.

Attention, les msec ne sont pas une unité valable pour les calculs pétrophysiques : La chargeabilité est sans unité. Il faut donc diviser $M_{t1,t2}$ par $(t2-t1)$ et multiplier par 10^{-3} (car en msec).

Chargeabilité normalisée :

La chargeabilité se définit de la manière suivante : $M = \frac{\sigma_{\infty} - \sigma_0}{\sigma_{\infty}}$

Avec M la chargeabilité, σ_{∞} la conductivité mesurée par le terramètre (régime permanent), et σ_0 la conductivité mesurée en début d'injection (régime transitoire).

$Mn = M * \sigma_{\infty}$ = la chargeabilité normalisée, en S/m.

L'utilisation de la chargeabilité normalisée permet de s'affranchir de l'influence de la conductivité sur les données de chargeabilité.

Les valeurs de chargeabilité normalisée obtenues permettent de calculer les paramètres de teneur en eau et de CEC.

3.2- Calcul de la capacité d'échange cationique (CEC)

La CEC est une quantité de matière chargée négativement à la surface des grains dans un sol. Plus la CEC est élevée, plus le sol peut être considéré comme riche en argile, en matières organiques, en minéraux métalliques...

Ci-dessous, les gammes de valeurs usuelles :

Type de sol	CEC (meq/100g)
Sables	3-5
Limons	10-15
Limons argileux	15-25
Argile	10 (kaolinite)-100 (smectite sodique)
Sol organique	50-150
Granites	<2

Calcul de la CEC :

$$CEC = \frac{Mn}{963.2 * \rho_g * \lambda * \theta^{(m-1)}}$$

Avec :

- Mn est la chargeabilité normalisée.
- 963.2 est une constante permettant d'exprimer le résultat en meq/100g.
- ρ_g La densité des grains.
Pour la plupart des sols minéraux, la densité se situe entre 2,5 et 2,7 g/cm³. Cette fourchette est assez étroite car les minéraux courants du sol diffèrent peu en termes de densité. Une valeur moyenne de 2,65 g / cm³ est souvent retenue. En revanche, les sols organiques ont des densités de particules plus faibles car la densité de la matière organique est beaucoup plus faible que celle des particules minérales.
- λ , La mobilité des ions pour la polarisation.
 $\lambda = 3e^{-10} \text{ m}^2\text{S}^{-1}\text{V}^{-1}$ en général. $2e^{-10} \text{ m}^2\text{S}^{-1}\text{V}^{-1}$ pour des calcaires purs.
- θ La teneur en eau volumique calculée (voir ci-après).
- m, le facteur de cimentation de la loi d'Archie

3.3- Calcul de la teneur en eau

$$\theta = \left[\frac{1}{\sigma_w} \left(\sigma_{\infty} - \frac{M_n}{R} \right) \right]^{1/m}$$

Avec :

- θ est la teneur en eau volumique = $\frac{\text{Volume d'eau}}{\text{Volume total}}$, sans unité ou en %.
Si le terrain est saturé en eau, alors on a θ tend vers ϕ , la porosité effective.
 $\theta \in [0, 0.95 * \phi]$. 7

Type de sédiments	Diamètre (mm)	Porosité totale (%)	Porosité efficace (%)
gravier moyen	2,5	45	40
sable gros	0,250	38	34
sable moyen	0,125	40	30
sable fin	0,09	40	28
sable très fin	0,045	40	24
sable silteux	0,005	32	5
silt	0,003	36	3
silt argileux	0,001	38	-
argile	0,0002	47	-

- σ_w est la conductivité de l'eau porale (S/m).
- R est le rapport des mobilités des ions dans la couche de Stern, généralement pris à 0.08 (Dans un contexte calcaire, on se rapproche plus de 0.02).
- m est le facteur de cimentation de la loi d'Archie.

a: Tortuosity factor	m: Cementation exponent	Comments
1.0	2.0	Carbonates*
0.81	2.0	Consolidated sandstones*
0.62	2.15	Unconsolidated sands (Humble Formula)*
1.45	1.54	Average sands (Carothers, 1968)
1.65	1.33	Shaly sands (Carothers, 1968)
1.45	1.70	Calcareous sands (Carothers, 1968)
0.85	2.14	Carbonates (Carothers, 1968)
2.45	1.08	Pliocene sands, southern California (Carothers and Porter, 1970)
1.97	1.29	Miocene sands, Texas-Louisiana Gulf Coast (Carothers and Porter, 1970)
1.0	$\phi^{(2.05-\phi)}$	Clean granular formations (Sethi, 1979)

*Most commonly used.

3.4- Calcul de la perméabilité

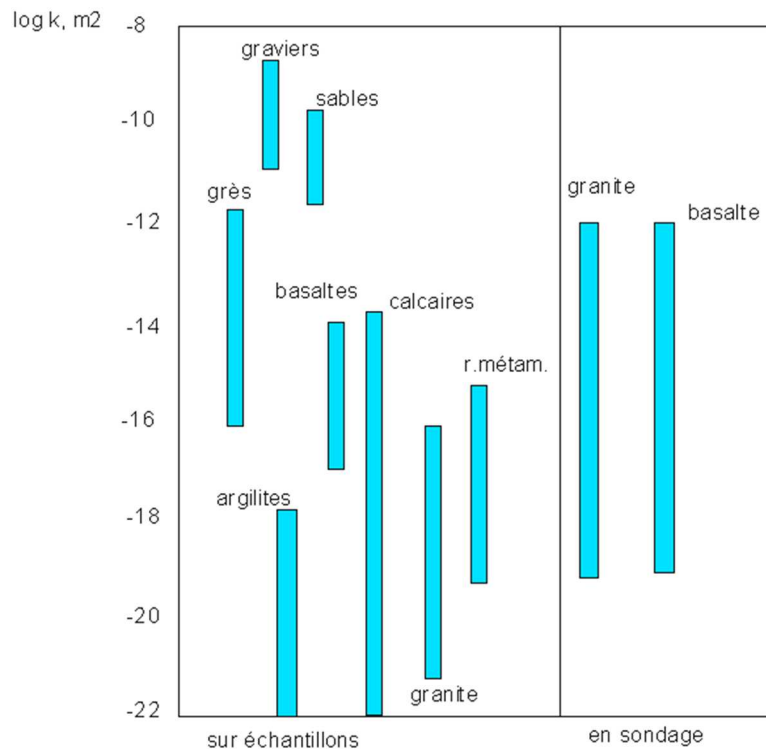
$$k = \frac{k_0 * \theta^6}{(CEC * \rho_g)}$$

Avec :

- $k_0 = 10^{4.3} (m^2)$
- θ La teneur en eau volumique calculée précédemment.
- CEC la Capacité d'Echange Cationique calculée précédemment.
- ρ_g La densité des grains

L'unité de cette perméabilité est le m^2 ($1m^2=1.03*10^{11}$ Darcy).

Ci-dessous, les gammes de valeurs usuelles :



- Remarque -

ATTENTION : Pour l'instant, les calculs et résultats sont encore expérimentaux et en cours de développement. Il est donc nécessaire d'analyser les tomogrammes de CEC, de Teneur en eau et de perméabilité de manière qualitative plus que quantitative.

3.5- Résultats obtenus

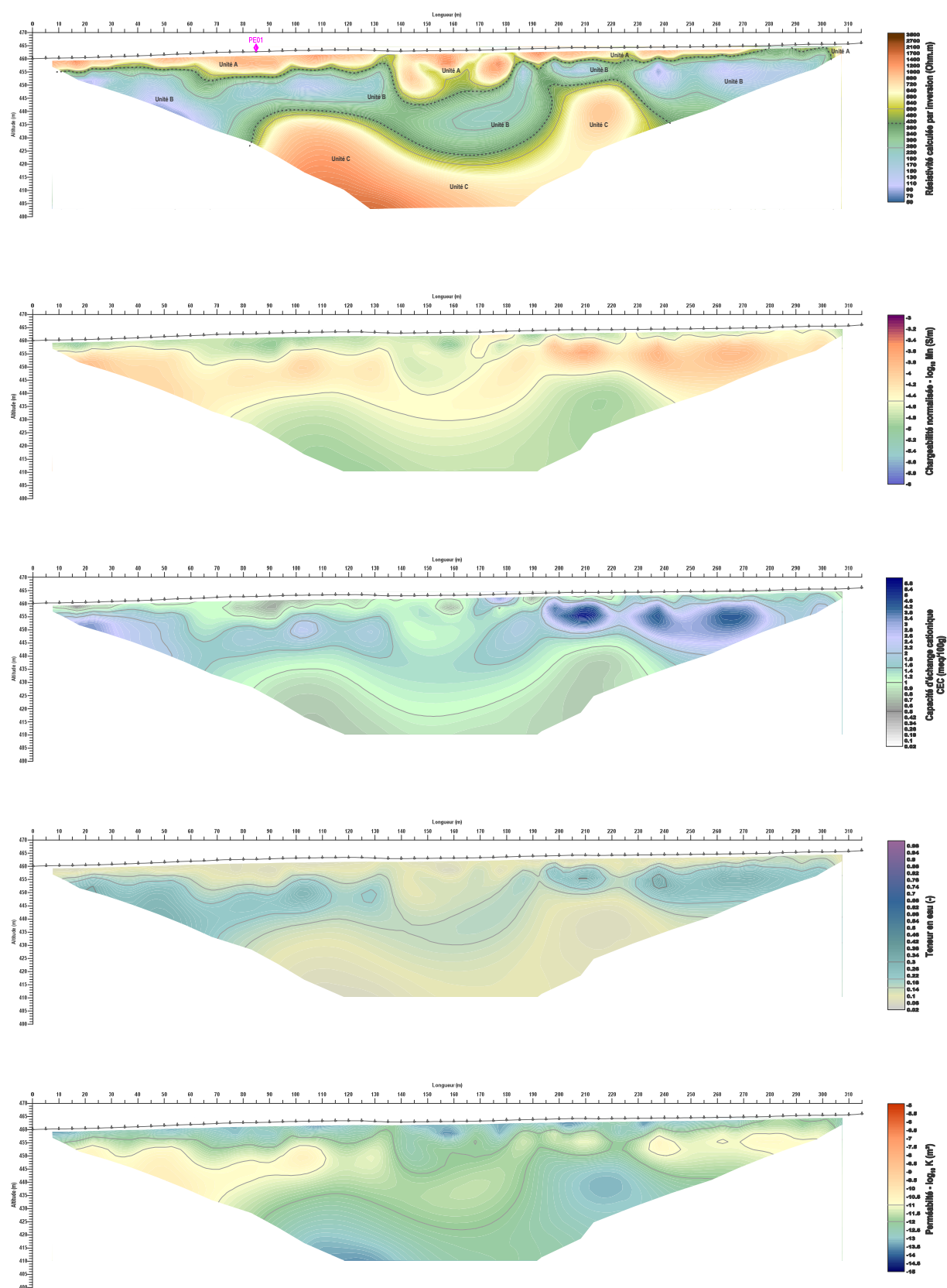


Figure 19 : Différents tomogrammes incluant la topographie, obtenus par mesure de la résistivité et par Polarisation Provoquée, lors d'une étude hydrogéologique en contexte granitique (granite arénisé à sain, hors nappe et sous nappe) – Commune de Junhac (15).

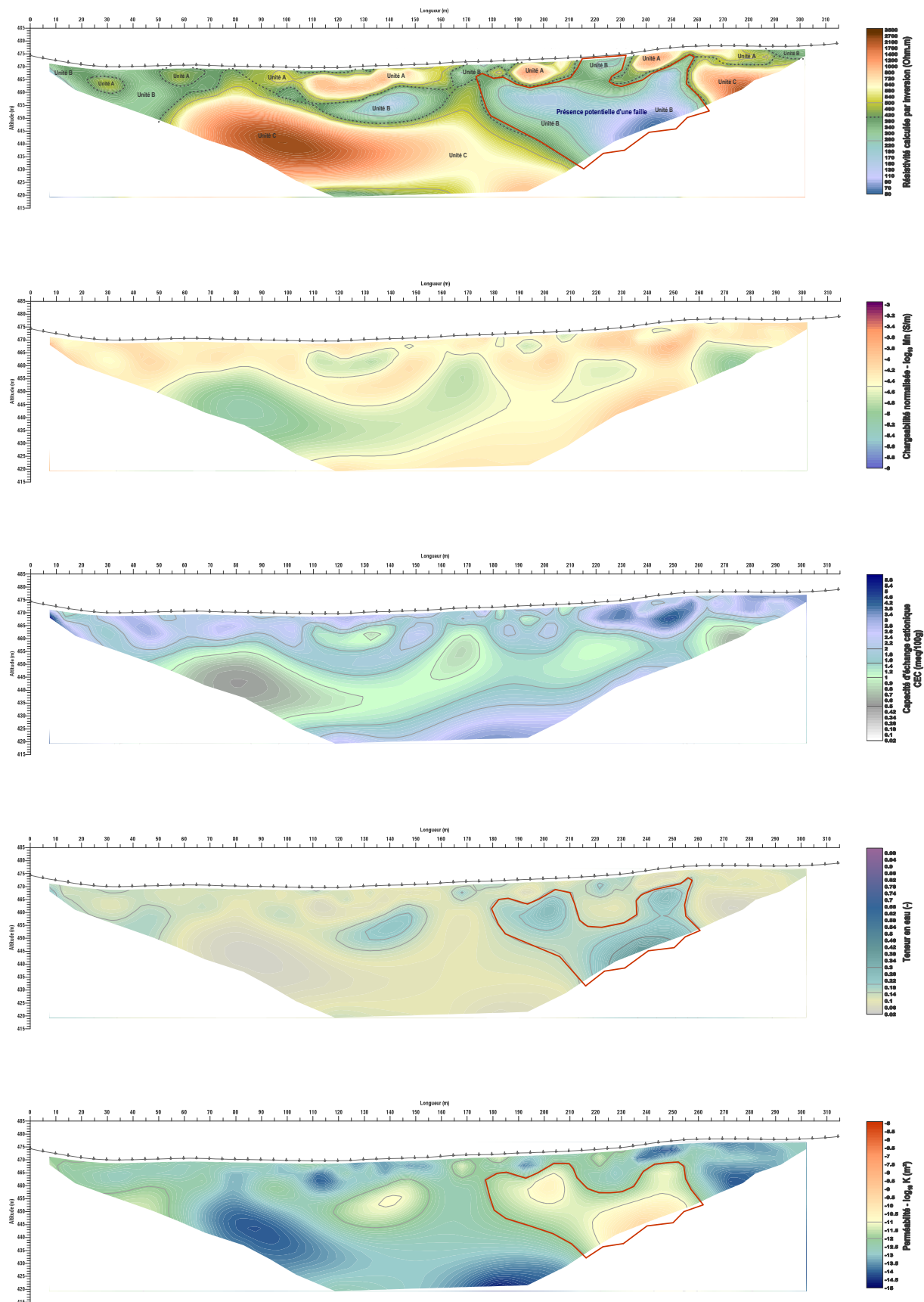


Figure 20 : Mise en évidence d'une zone de faille avec circulations d'eau, par mesure de la résistivité et par Polarisation Provoquée, lors d'une étude hydrogéologique en contexte granitique – Commune de Junhac (15).

3.6- 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...).

Les limites de la méthode sont globalement les mêmes que pour les panneaux de résistivité classiques.

PRINCIPE DE LA METHODE ELECTRIQUE
(Sondage et traîné)

Notion de résistivité apparente

Un courant est créé en sous-sol à l'aide d'une source de courant (batterie par exemple) et de deux électrodes dites d'injection. Ce courant pénètre dans le sol par une électrode dite "A" et en sort par une électrode dite "B". La répartition des lignes de courant dans le sol se fait alors en volume.

Dans un matériau homogène et dans un plan passant par A et B, on peut représenter la trace des surfaces équipotentiellles et les filets de courant de la façon suivante (les deux réseaux de courbe étant orthogonaux):

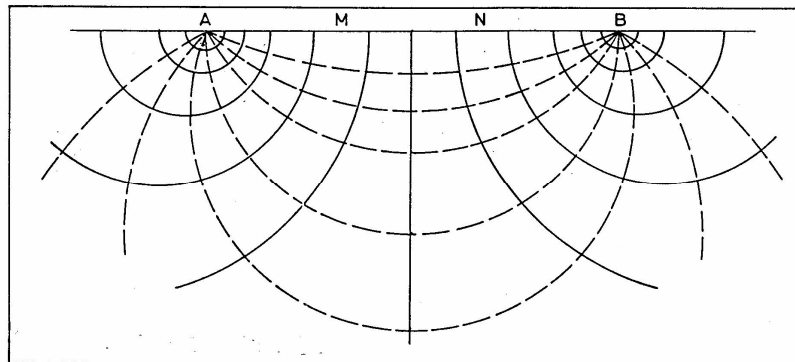


figure n°1:
tracé schématique des équipotentiellles et des filets de courant dans un sol homogène

On mesure alors la chute de potentiel de ce courant, entre deux électrodes dite de mesure, à l'aide d'un voltmètre. Cette mesure n'intéresse qu'un volume relativement restreint, elle concerne la chute de potentiel entre les électrodes M et N.

La résistivité déduite de cette mesure dépend de la géométrie du dispositif de mesure (constitué des quatre électrodes A,B,M et N). On accédera alors à la résistivité apparente par l'introduction d'un facteur dit "géométrique" tenant compte de l'écart entre électrodes constituant le système d'injection / mesure.

La résistivité apparente obtenue est égale à la résistivité vraie du sol si celui-ci est homogène. En fait cette résistivité est dite "apparente" car elle correspond, pour un système multicouche, à la capacité des différentes couches concernées par le faisceau de courant à concentrer les lignes de courant.

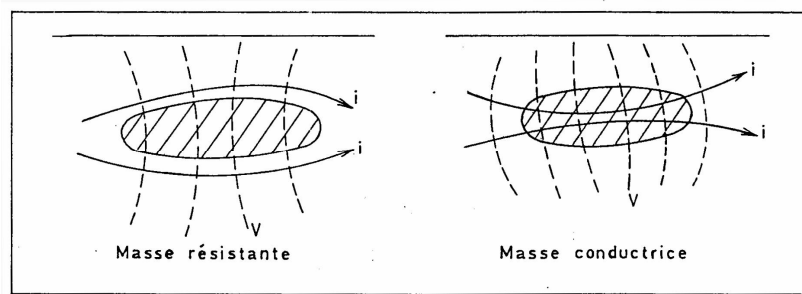


figure n°2:
Distorsion des filets de courant et des équipotentielles dans un sol hétérogène

Le Sondage électrique vertical (dispositif quadripôle) :

Un sondage électrique est constitué par une série de mesures de résistivité apparente avec, entre chaque mesure, un accroissement de la séparation des électrodes d'injection (ou de courant), le centre du dispositif et sa direction demeurant constant. Plus la distance entre les électrodes de courant est grande, plus grande est la profondeur de pénétration des filets de courant participant utilement à la mesure.

Un terrain constitué d'une succession, en profondeur, de couches présentant des caractéristiques électriques différentes se traduira donc par des variations de la résistivité apparente mesurée en surface lors de la réalisation du "sondage".

La mise en œuvre:

Plusieurs types de dispositifs existent, (dispositifs Wenner, Schlumberger), présentant des protocoles de mesures différents quant au pas de mesure le long du profil et au rapport entre écartement des électrodes d'injection et de mesure (on choisira de préférence le dispositif Schlumberger).

De façon générale, on augmente progressivement la distance AB en laissant le centre O du dispositif fixe. Pour obtenir des renseignements sur les séries de plus en plus profondes, en pratique, on est amené à augmenter la valeur de l'intensité et de la tension du courant émis, et de temps en temps la distance MN de façon à obtenir des valeurs de différence de potentiel supérieures à la précision de lecture de l'appareil. A chaque valeur de résistivité mesurée est associée une valeur du facteur géométrique caractérisant la disposition des électrodes au sol. Il est parfois intéressant de réaliser au même point plusieurs mesures selon des directions différentes, cette opération permettant de mettre en évidence une anisotropie des terrains ou des limites de couches, proches.

Présentation des résultats:

La représentation adoptée est maintenant universelle, elle est due à l'école Schlumberger. Elle consiste à tracer la courbe de résistivité apparente en fonction de $AB/2$:

$$\text{Log}(\rho_{\text{app}}) = f[\log(AB/2)]$$

Ce choix permet en premier lieu d'avoir une bonne précision pour les faibles valeurs de résistivité et une bonne interprétation pour les faibles profondeurs. De plus cette représentation permet l'interprétation à l'aide de courbes théoriques

L'interprétation des résultats:

Les données du problème sont fournies par les mesures de résistivités apparentes 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.

L'interprétation classique se fera par comparaison entre la courbe expérimentale relevée sur le terrain et diverses courbes théoriques dont la distribution des terrains est connue et constitue un modèle.

Actuellement les méthodes d'interprétation indirectes assistées par ordinateur permettent d'ajuster la courbe de résistivité apparente, calculée à partir d'un modèle, à la courbe expérimentale. L'ajustement des deux courbes se fait par modification successives du modèle initialement introduit jusqu'à ce que l'écart entre la courbe calculée et la courbe expérimentale soit jugé négligeable.

Lors d'une campagne il est donc particulièrement intéressant d'étalonner un sondage électrique sur un sondage destructif de façon à "caler" au mieux le modèle électrique qui servira de base à l'interprétation, ou à défaut de recueillir la maximum d'informations sur la géologie locale.

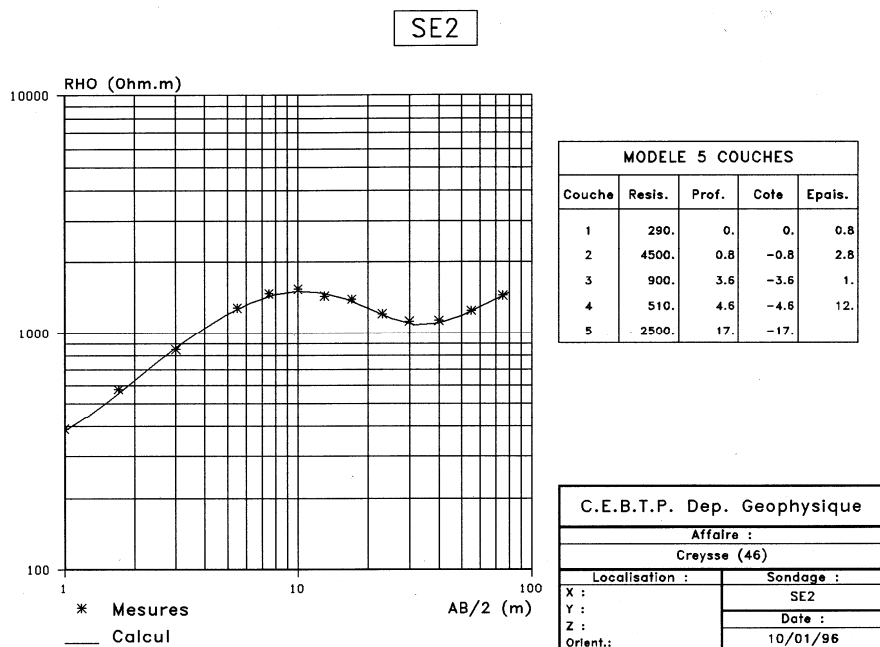


Figure n°3:
Exemple de sondage électrique, courbe expérimentale et modèle associé

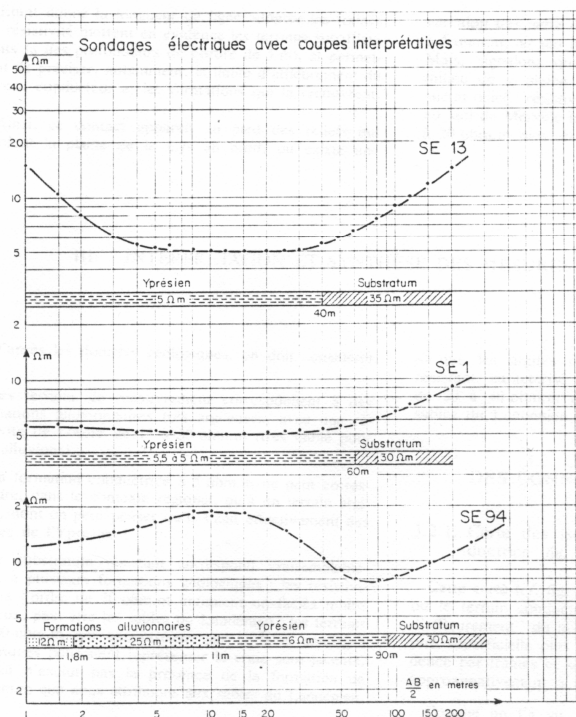


Figure n°4:
Exemple de 3 sondages électriques issus d'une même campagne

Le traîné électrique (dispositif quadripôle):

Le traîné électrique consiste à mesurer la résistivité apparente à l'aide d'un dispositif approprié, et à étudier les variations latérales de cette résistivités apparente. Pour cela on choisira une longueur de ligne AB et une disposition des électrodes MN correspondante, et cet ensemble est déplacé sur le sol sans modification de sa géométrie. Les résultats ainsi obtenus correspondent à la résistivité apparente du terrain à une profondeur supposée constante.

Le choix de la longueur AB est donc primordial et doit s'effectuer en fonction de la profondeur d'investigation souhaitée et/ou de la taille des anomalies recherchées. Ainsi, si la longueur de AB est bien choisie la répartition en plan des résistivités apparentes mesurées reflète bien les variations de niveau d'un substratum résistant, la présence de poches ou de filons conducteurs, ou les discontinuités géologiques à fort contraste de résistivité. Cependant la méthode du traîné électrique ne donnera en général que des résultats qualitatifs.