

## COMPTE RENDU D'ÉTUDE

**ORELLE (73)**  
**Piste de la Grande Roche**

### RECONNAISSANCES GÉOPHYSIQUES

TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE

SISMIQUE REFRACTION

Le 8 Août 2024

**CLIENT**  
**RTM**

Date	Type	Numéro	Ind.	Page	Auteur	Contrôle	Validation
27/08/24	NTE	110-2024-043-01	A	18	Jaguelin	Valentin	Bodard





## SOMMAIRE

1	FICHE RÉCAPITULATIVE ÉTUDE .....	3
2	CONTEXTE.....	4
3	MESURES SUR SITE.....	5
3.1	Matériel mis en œuvre.....	5
3.2	Configuration des dispositifs de mesure .....	5
3.3	Implantation des profils géophysiques .....	6
3.4	Paramètres d'acquisition .....	7
4	TRAITEMENT DES DONNÉES .....	8
4.1	Étapes de traitement .....	8
4.2	Qualité des données .....	8
5	RÉSULTATS.....	9
5.1	Résultats tomographie électrique .....	9
5.2	Résultats sismique réfraction .....	9
5.3	Synthèse des résultats .....	10
6	CONCLUSIONS.....	11



## LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (Source : Géoportail.gouv.fr) .....	4
Figure 2 : Localisation des extrémités des profils sismiques (en rouge) et électrique (en jaune). .....	6
Figure 3 : Photos de la zone d'étude .....	6
Figure 4 : Tomographie électrique   Schéma de principe du protocole Dipôle-dipôle .....	7
Figure 5 : Tomographie électrique   Schéma de principe du protocole Wenner Schlumberger.....	7
Tableau 1 : Coordonnées des extrémités des profils (Lambert 93) .....	7



## LISTE DES PLANCHES

PLANCHE 1 : Coupes sismiques et électriques .....	13
---	----



## ANNEXE

ANNEXE 1   PRINCIPE TECHNIQUE DE LA TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE.....	15
ANNEXE 2   PRINCIPE TECHNIQUE DE LA SISMIQUE REFRACTION .....	17

## 1 FICHE RÉCAPITULATIVE ÉTUDE

Nom de l'étude	Orelle (73)   Piste de la Grande Roche
Référence ABO-INNOGEO	NTE 110-2024-043-01-A
Offre	2024-110-086-01A datant du 2 juillet 2024
Projet	110-2024-043
Client	RTM
Référence marché / commande	Signature sur Offre ABO-INNOGEO en date du 25/07/2024

Dates d'intervention	Le 8 Août 2024		
Site	Piste de la Grande Roche, Orelle (73)		
Objectifs	Reconnaissance géologique par méthodes géophysiques		
Chef de projet	Christophe Bodard	Chargé d'étude	Alexandre Jaguelin
Méthode mise en œuvre	<div>» Tomographie de résistivité électrique</div> <div>» Sismique réfraction</div>		
Programme réalisé (Quantité, matériel, ...)	Acquisition de 1 profil géophysique selon les deux méthodes suivantes : <div>» Tomographie de résistivité électrique :<ul style="list-style-type: none"><li>○ Résistivimètre Lund LS ;</li><li>○ Dispositif de 64 électrodes espacées de 2 mètres ;</li></ul></div> <div>» Sismique réfraction :<ul style="list-style-type: none"><li>○ Enregistreur sismique : Geometrics Geode ;</li><li>○ Dispositifs de 24 géophones espacés de 2,5 mètres / 7 tirs sismiques.</li></ul></div>		
Commentaires	-		

Résultats	<p>Ce compte-rendu présente les résultats des reconnaissances géophysiques sans interprétation géologique. Celle-ci pourra être réalisée après réalisation de sondages de contrôle au droit de la zone d'étude. Il est à noter que les vitesses et limites de couche interprétées en sismique réfraction pourront être modifiées lors de cette réinterprétation.</p> <p>Les résultats des deux méthodes sont assez cohérents entre eux. Une limite entre des matériaux meubles et ce que nous supposons être la partie altérée du substratum rocheux est identifiée à une profondeur de 5 m pour le profil électrique et entre 4 et 6 m pour le profil sismique. Ces matériaux meublent s'épaississent vers l'ouest du profil sismique en corrélation avec une remontée du massif rocheux vers l'est de celui-ci, c'est-à-dire à peu près au centre du mur de soutènement.</p> <p>Au sein des terrains meubles qui présentent des résistivités électriques faibles, nous notons deux zones qui pourraient indiquer une humidité plus importante des terrains au niveau du mur de soutènement et donc de potentielles venues d'eau.</p>
-----------	--

## 2 CONTEXTE

À la demande du service RTM (Restauration des Terrain de Montagne), et pour le compte du TPLP de Val Cenis, ABO-INNOGEO a réalisé, le 8 août 2024, une reconnaissance géophysique par tomographie de résistivité électrique et sismique réfraction. Le site de mesure se situe sur la piste forestière de la Grande Roche sur la commune d'Orelle (73) (cf. Figure 1).

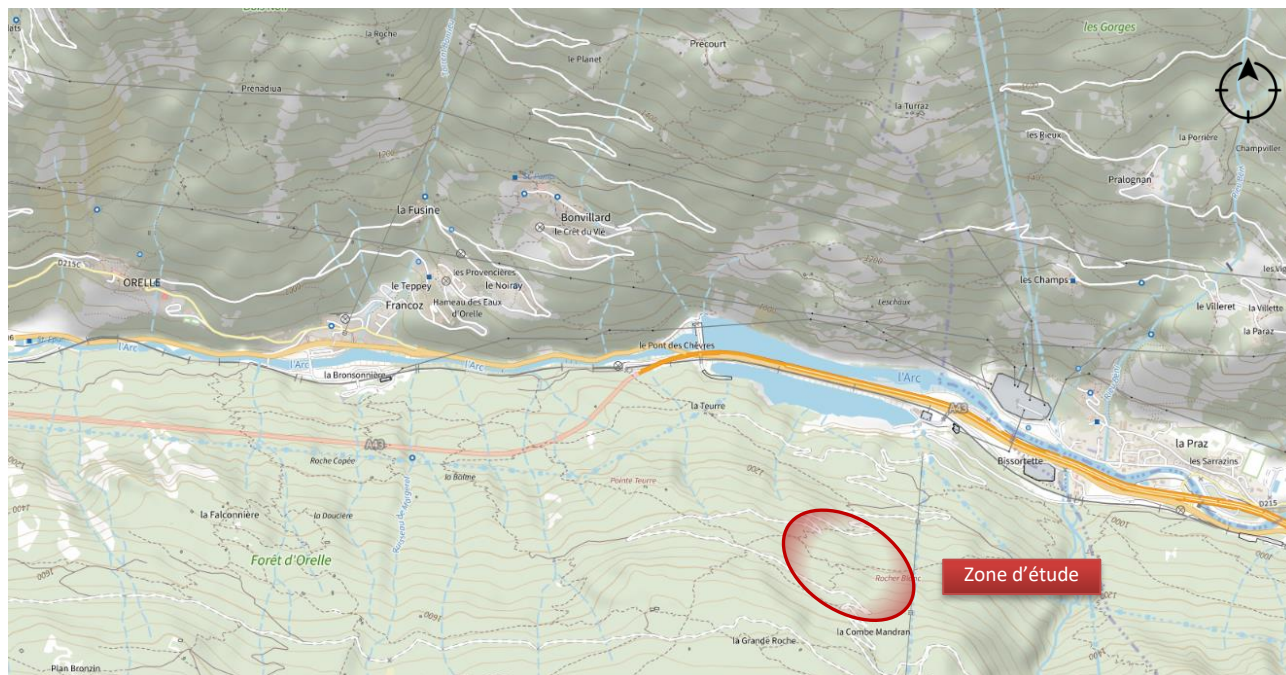


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (Source : Géoportail.gouv.fr)

Ces reconnaissances géophysiques s'inscrivent : « dans le cadre d'un projet de reprise / confortement d'un mur de soutènement de la piste de la Grande Roche. Ce mur de soutènement aval, construit en 2016, est fondé en partie sur le rocher et en partie sur des matériaux limono-graveleux. Dès son achèvement, ce mur a montré des signes de mouvements, avec une fracturation en crête, séparant les deux parties. A l'heure actuelle, la partie gauche, fondée sur des matériaux meubles, montrent des signes de basculement, et des travaux de reprise sont donc envisagés. »

Les reconnaissances doivent permettre « de dimensionner au mieux la reprise et de caractériser de manière fine la cause des désordres ». Les investigations géophysiques devront permettre :

- » De localiser l'interface sol meuble/rocher sur la moitié rive gauche du mur (N.B : le mur fait 6 m de hauteur au maximum, pour un linéaire d'environ 30 m) ;
- » De localiser d'éventuelles venues d'eau sous la fondation de l'ouvrage.

### Remarque :

*Les auscultations ou investigations mises en œuvre pour la présente étude ne se substituent pas aux autres auscultations ou investigations nécessaires à la solution du problème posé. En effet les techniques géophysiques présentent des limites liées aux principes physiques et procédés métrologiques mis en œuvre. Ceux-ci ne peuvent décrire de façon exhaustive et certaine les caractéristiques du sous-sol et des structures. Il peut subsister de ce fait une part d'incertitude et un facteur de risque découlant de l'éventualité de la présence d'anomalies non détectables à l'aide des techniques déployées ou d'une description imprécise et/ou incertaine d'une caractéristique ou d'une anomalie détectée.*

### 3 MESURES SUR SITE

#### 3.1 Matériel mis en œuvre

- » Tomographie électrique de résistivité :
  - Résistivimètre ABEM Terrameter Lund LS ;
  - Électrodes et câbles ;
- » Sismique réfraction :
  - Enregistreur sismique Geometrics Geode ;
  - 24 géophones de fréquence 10 Hz
  - Source sismique : masse à main de 4 kg ;
  - Système de déclenchement : capteur piézo électrique ;

#### 3.2 Configuration des dispositifs de mesure

- » Tomographie électrique de résistivité : 64 électrodes espacées de 2 mètres ;
- » Sismique réfraction :
  - 24 géophones espacés de 2,5 mètres ;
  - Nombre de tirs par dispositif : 7 tirs ; •
    - 2 tirs déportés ou offset à une distance de l'ordre de 15 m du capteur extrême ;
    - 2 tirs bout ;
    - 1 tir au  $\frac{1}{4}$  et 1 tir au  $\frac{3}{4}$  du dispositif ;
    - 1 tir au milieu du dispositif.



### 3.3 Implantation des profils géophysiques

Les profils ont été placés en fonction de l'espace disponible à proximité du mur de soutènement. La position des extrémités des profils a été relevée à l'aide d'un GPS de randonnée de précision métrique (cf. Figure 2). Les coordonnées des premiers et derniers capteurs de chaque profil sont présentés dans le Tableau 1.



Figure 2 : Localisation des extrémités des profils sismiques (en rouge) et électrique (en jaune).

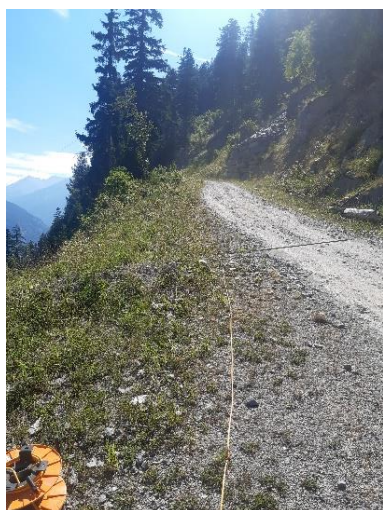


Figure 3 : Photos de la zone d'étude

Tableau 1 : Coordonnées des extrémités des profils (Lambert 93)

Base	Géophone Électrode	X L93(m)	Y L93 (m)
<b>G1</b>	1	980578.61	6462059.66
<b>G24</b>	24	980635.89	6462048.03
<b>E1</b>	1	980527.85	6462083.6
<b>E64</b>	64	980648.26	6462045.59

### 3.4 Paramètres d'acquisition

#### » Tomographie électrique :

Les acquisitions électriques ont été réalisées selon deux protocoles de mesure distincts afin de fiabiliser les traitements et interprétations :

- Dipôle-dipôle :

Dans cette configuration, le dipôle d'injection C1C2 et le dipôle de mesure P1P2 sont situés de part et d'autre du point mesuré. Ce protocole a l'avantage d'être sensible aux variations latérales de résistivité.



Figure 4 : Tomographie électrique | Schéma de principe du protocole Dipôle-dipôle  
(A et B : électrodes d'injection du courant / M et N : électrodes de réception)

- Wenner Schlumberger :

Dans cette configuration, les électrodes d'injection C1 et C2 sont placées à l'extérieur des électrodes de mesure de différence de potentiel P1 et P2 avec une distance P1P2 petite par rapport à C1C2. Ce protocole est notamment adapté à la reconnaissance de la géologie de terrains tabulaires.

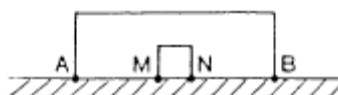


Figure 5 : Tomographie électrique | Schéma de principe du protocole Wenner Schlumberger  
(A et B : électrodes d'injection du courant / M et N : électrodes de réception)

#### » Sismique réfraction :

- Longueur d'enregistrement : 300 ms ;
- Pas d'échantillonnage : 62,5  $\mu$ s ;
- Délai : 5 ms ;
- Filtres en acquisition : Non.

## 4 TRAITEMENT DES DONNÉES

Les mesures ont été sauvegardées sur site et exploitées en bureau d'étude à l'aide du logiciel Res2DInv pour la tomographie électrique et de la suite logiciel Seislmager pour la sismique réfraction.

### 4.1 Étapes de traitement

#### » Tomographie électrique :

1. Élimination des points de mesure aberrants ;
2. Intégration de la topographie ;
3. Inversion des données électriques : logiciel Res2DInv / paramètres adaptés au site ;
4. Élimination des mesures rendant l'inversion instable ;
5. Inversion finale des données électriques selon des paramètres adaptés au site.

#### » Sismique réfraction

1. Intégration des positions des géophones et des points de tir dans les données sismiques ;
2. Application d'un filtre passe bande sur les données ;  
*Selon la qualité des signaux*
3. Pointé des temps des premières arrivées ;  
*Le pointé a été interrompu dès qu'un doute apparaissait sur le départ de l'onde réfractée afin de ne pas pointer une onde réfléchie plus énergétique présente sur les films sismiques*
4. Réalisation des hodochrones ;
5. Contrôle des temps aller / retour ;
6. Inversion des données sismiques par tomographie sismique :
  - a. Contrôle des fermetures ;
  - b. Établissement de la courbe du minus ;
  - c. Établissement du modèle d'entrée sur la base d'une première inversion ;
  - d. Inversion des données sur la base du modèle d'entrée ;
  - e. Établissement du modèle en couche ;
  - f. Ajustement par tracé de rais ;
  - g. Inversion finale.

### 4.2 Qualité des données

La qualité des données est jugée bonne, tant pour les mesures de tomographie électrique que pour la sismique réfraction.



## 5 RÉSULTATS

Les résultats des reconnaissances géophysiques sont présentés sans interprétation géologique. Celle-ci pourra être réalisée sur la base de la réalisation de sondages mécaniques au droit de la zone d'étude.

Les coupes issues du traitement des mesures géophysiques sont présentées sur la Planche 1.

### 5.1 Résultats tomographie électrique

Les mesures électriques mettent en évidence le modèle décrit ci-après, qui correspond à trois gammes de résistivité :

- » **Des zones électriquement très conductrices** (représentées par des nuances de rouge) ayant des valeurs de résistivités inférieures à 600 ohm.m. Ces terrains ne sont présents qu'en surface, à l'est du dispositif, et s'étendent sur 5 m de profondeur et sur 25 m de large.
- » **Un terrain superficiel avec des résistivités comprises entre 600 et 1500 ohm.m** (représenté en jaune orangé). Celui-ci est présent principalement au centre du dispositif, sur une épaisseur allant de 2 m à 7 m au maximum.
- » **Des terrains électriquement résistants** (représentés par des nuances de vert et de bleu) dont les résistivités électriques sont supérieures à 1500 ohm.m. On retrouve ces terrains sur la quasi-totalité du profil, avec quelques variations latérales. On observe notamment des zones beaucoup plus résistantes, notamment à l'est sous le mur de soutènement et sur la partie ouest du profil.
- »

### 5.2 Résultats sismique réfraction

Les mesures sismiques mettent en évidence un modèle composé de couches globalement parallèles à la topographie, avec les vitesses sismiques suivantes :

- » **Terrains superficiels avec des vitesses inférieures à 700 m/s.** Ce niveau présente des épaisseurs allant de 1,5 m à l'est du profil à environ 7 m au maximum à l'ouest. Il correspond aux terrains superficiels décomprimés.
- » **Le second niveau correspond à des vitesses allant de 1200 à 1600 m/s.** Comme le premier niveau, il présente des épaisseurs de quelques mètres aux extrémités est de la zone d'étude et jusqu'à plus de 5 mètres d'épaisseur au centre et à l'ouest. Il pourrait s'agir de la frange altérée du massif rocheux.
- » **Le substratum sismique**, correspondant au massif rocheux sain, avec des vitesses supérieures à 2300 m/s. Il est atteint très rapidement sur la partie est du profil (3 m de profondeur) et s'approfondit très rapidement vers l'ouest de la zone, pour atteindre 10 m de profondeur au maximum.

### 5.3 Synthèse des résultats

Les résultats des deux méthodes sont assez cohérents entre eux. Pour rappel, un matériau plus meuble se caractérise par des valeurs de vitesse et de résistivité électrique plus faibles. À l'inverse, plus un matériau est dense, plus ses valeurs de vitesse et de résistivité seront élevées. Dans le cas présent, on observe une limite entre des matériaux meubles et la partie altérée du substratum rocheux à une profondeur de 5 m pour le profil électrique et entre 4 et 6 m pour le profil sismique.

Nous pouvons également noter que les mesures sismiques mettent en évidence des variations du toit du substratum rocheux, qui est moins profond sous la partie est du mur de soutènement par rapport à la partie ouest, située sur une frange plus altérée. Ces variations sont moins visibles sur le profil électrique

Les mesures électriques ne semblent pas mettre en évidence de venues d'eau au niveau du mur même si nous notons deux zones de plus faibles résistivités électriques qui pourraient être liées à la présence d'humidité dans les terrains.

## 6 CONCLUSIONS

À la demande du RTM, ABO-INNOGEO a réalisé, le 8 août 2024, une reconnaissance géophysique par tomographie de résistivité électrique et sismique réfraction. Le site de mesure se situe sur la piste de la Grande Roche, dans la commune d'Orelle (73).

Les reconnaissances géophysiques s'inscrivent : « dans le cadre d'un projet de reprise / confortement d'un mur de soutènement de la piste de la Grande Roche. Ce mur de soutènement aval, construit en 2016, est fondé en partie sur le rocher, et en partie sur des matériaux limono-graveleux. Dès son achèvement, ce mur a montré des signes de mouvements, avec une fracturation en crête, séparant les deux parties. A l'heure actuelle, la partie gauche, fondée sur des matériaux meubles, montrent des signes de basculement, et des travaux de reprise sont donc envisagés. »

Ce compte-rendu présente les résultats des reconnaissances géophysiques sans interprétation géologique. Celle-ci pourra être réalisée après réalisation de sondages de contrôle au droit de la zone d'étude. Il est à noter que les vitesses et limites de couche interprétées en sismique réfraction pourront être modifiées lors de cette réinterprétation.

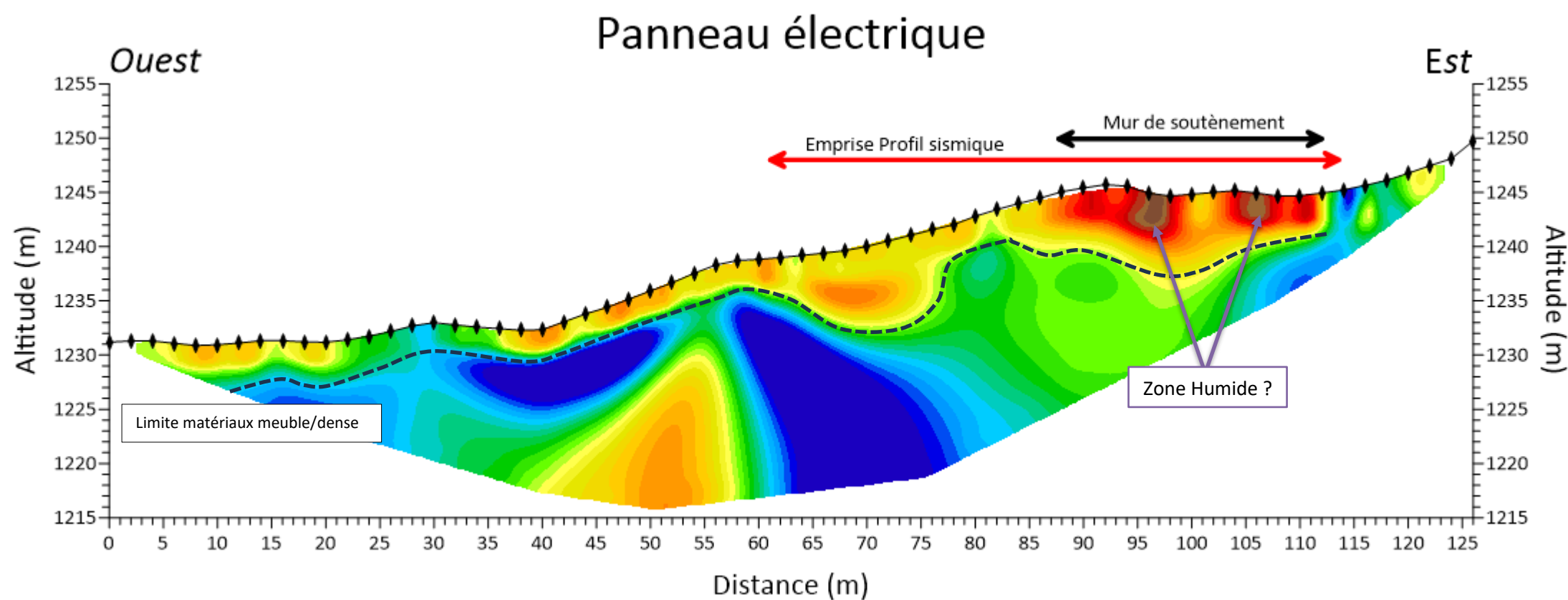
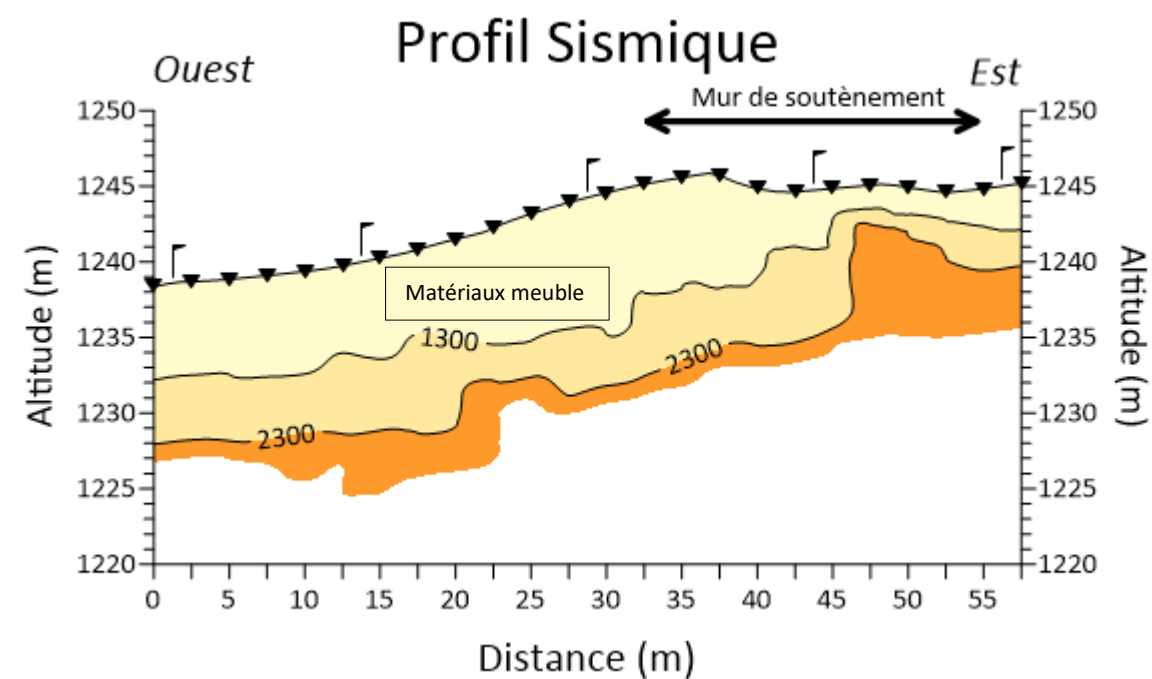
Les résultats des deux méthodes sont assez cohérents entre eux. Une limite entre des matériaux meubles et ce que nous supposons être la partie altérée du substratum rocheux est identifiée à une profondeur de 5 m pour le profil électrique et entre 4 et 6 m pour le profil sismique. Ces matériaux meublent s'épaississent vers l'ouest du profil sismique en corrélation avec une remontée du massif rocheux vers l'est de celui-ci, c'est-à-dire à peu près au centre du mur de soutènement.

Au sein des terrains meubles qui présentent des résistivités électriques faibles, nous notons deux zones qui pourraient indiquer une humidité plus importante des terrains au niveau du mur de soutènement et donc de potentielles venues d'eau.

*Avertissement : Les auscultations ou investigations mises en œuvre pour la présente étude ne se substituent pas aux autres auscultations ou investigations nécessaires à la solution du problème posé. En effet les techniques géophysiques présentent des limites liées aux principes physiques et procédés métrologiques mis en œuvre. Ceux-ci ne peuvent décrire de façon exhaustive et certaine les caractéristiques du sous-sol et des structures. Il peut subsister de ce fait une part d'incertitude et un facteur de risque découlant de l'éventualité de la présence d'anomalies non détectables à l'aide des techniques déployées ou d'une description imprécise et/ou incertaine d'une caractéristique ou d'une anomalie détectée.*

## PLANCHES





Légende :

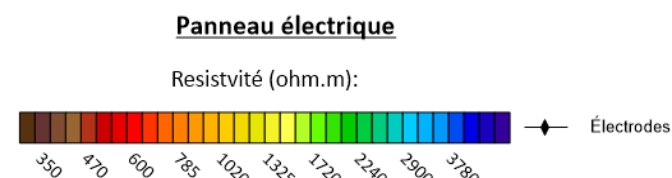
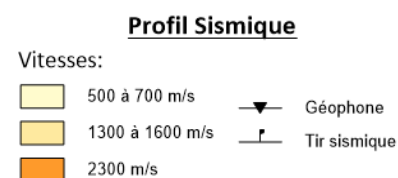


PLANCHE : COUPES SISMOLOGIQUES ET ELECTRIQUES

ORELLE (73) – PISTE DE LA GRANDE ROCHE  
SISMOLOGIE REFRACTION ET TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE  
Intervention du 08 Août 2024

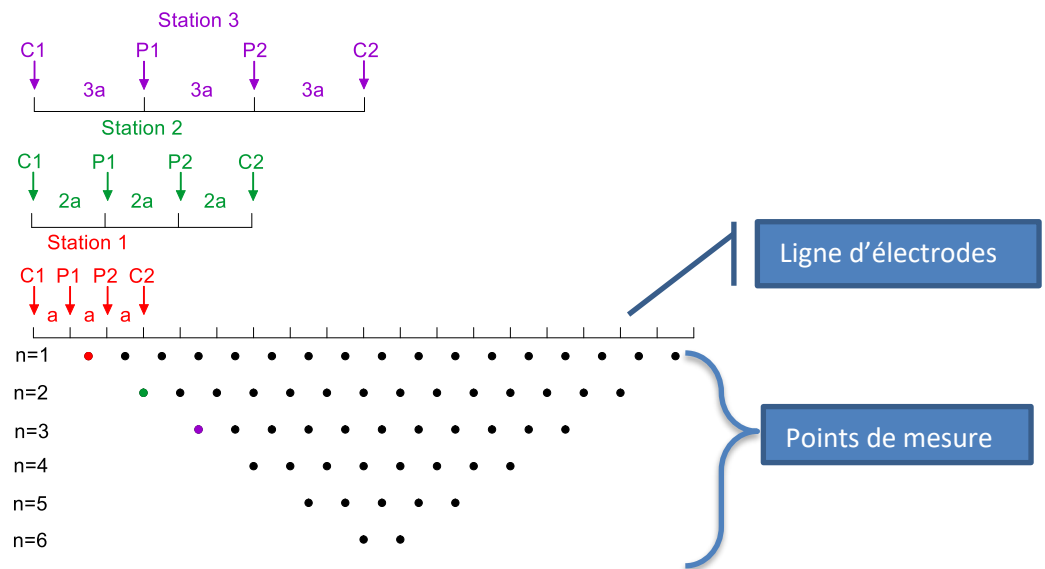
## ANNEXES

## ANNEXE 1 | PRINCIPE TECHNIQUE DE LA TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE

Synthèse méthode	
<b>Principe technique</b>	Mesure de la résistivité électrique
<b>Objectifs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Étude aquifère ;</li> <li>➤ Localisation de failles ;</li> <li>➤ Caractérisation de stockage.</li> </ul>
<b>Limitation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Absence de contraste de résistivité électrique</li> <li>➤ Présence de lignes électriques ;</li> <li>➤ Milieu urbanisé ;</li> <li>➤ Présence de structures métalliques enterrées ;</li> </ul>

### Principe théorique

La méthode de la tomographie de résistivité électrique est fondée sur la mesure des résistivités électriques apparentes du sous-sol, le long d'un dispositif rectiligne de N électrodes, pour un grand nombre de positions et d'espacements des électrodes d'injection de courant et de potentiel.



Tomographie électrique | Répartition des points de mesure par rapport à la ligne d'électrodes

### Réalisation sur site

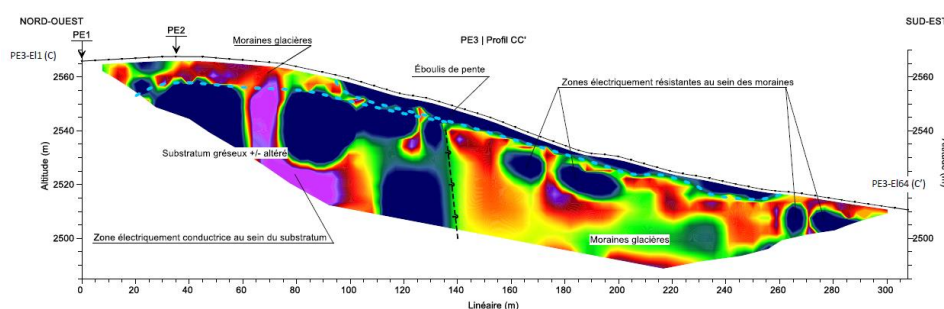
En pratique, les électrodes sont disposées en ligne selon un espacement déterminé, en fonction de la profondeur d'investigation et de la résolution désirée. La procédure de réalisation de la tomographie électrique consiste à mesurer, pour chaque espacement entre électrodes, les valeurs de résistivité apparente pour tous les groupes possibles de quadripôles de la ligne de mesure.

La profondeur de la mesure de résistivité apparente est calculée sur la base de l'espacement entre les électrodes du quadripôle. Il est à noter que plus l'espacement entre les électrodes du quadripôle est

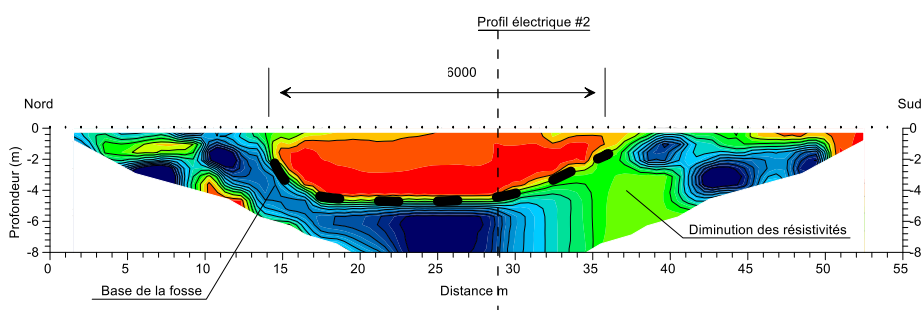
important plus la mesure est profonde. Ainsi, les profondeurs d'investigation les plus importantes sont atteintes au centre du dispositif et les mesures constituent une pseudo-coupe trapézoïdale.

### Traitement et interprétation

La coupe des résistivités électriques réelles est obtenue par inversion mathématique, par éléments finis, de l'ensemble des mesures. On obtient ainsi une coupe de répartition des résistivités apparentes en fonction de la profondeur qui peut être interprétée géologiquement sur la base des données géologiques connues pour le site, sondages mécaniques, et des objectifs de l'étude.



Tomographie électrique | Exemple de reconnaissance géologique



Tomographie électrique | Exemple de la caractérisation d'une fosse

Il existe des limitations inhérentes à la méthode elle-même mais aussi à l'algorithme d'inversion des données : la résolution de la méthode décroît avec la profondeur. Il est important de garder à l'esprit cette limitation lors de la comparaison de résultats d'imagerie de résistivité avec des données géotechniques. De plus, une limite nette entre deux terrains ou matériaux de nature différente apparaît en tomographie électrique comme une transition rapide et non comme une frontière franche.



## ANNEXE 2 | PRINCIPE TECHNIQUE DE LA SISMIQUE REFRACTION

Synthèse méthode	
Principe technique	Mesure du temps d'arrivée des ondes sismiques réfractées
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Détermination de la lithologie en termes de vitesse sismique ;</li> <li>» Caractérisation de la rippabilité des terrains</li> </ul>
Limitation	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Vitesses sismiques non croissantes avec la profondeur</li> <li>» Bruit vibratoire important</li> </ul>

### Principe théorique

La sismique réfraction est une méthode de reconnaissance géophysique du sous-sol fondée sur l'étude de la propagation des ondes sismiques élastiques. L'objectif de l'essai est de caractériser la nature et la structure des différentes couches du sous-sol dont on détermine ainsi l'état mécanique (altération, fissuration, fracturation), les épaisseurs et les vitesses sismiques des ondes de compression ou de cisaillement, elles-mêmes reliées aux propriétés mécaniques du matériau.

La sismique réfraction peut aussi bien être appliquée en milieu terrestre qu'en milieu aquatique. Son application ne peut être envisagée que si la vitesse sismique augmente avec la profondeur, si les contrastes de vitesse entre couches sont suffisamment marqués et si les couches du sous-sol sont relativement tabulaires.

### Réalisation sur site

L'essai consiste à mettre en place à la surface du sol, un profil rectiligne de capteurs sismiques, appelée dispositif sismique, reliés par un câble de mesure à un enregistreur sismique.

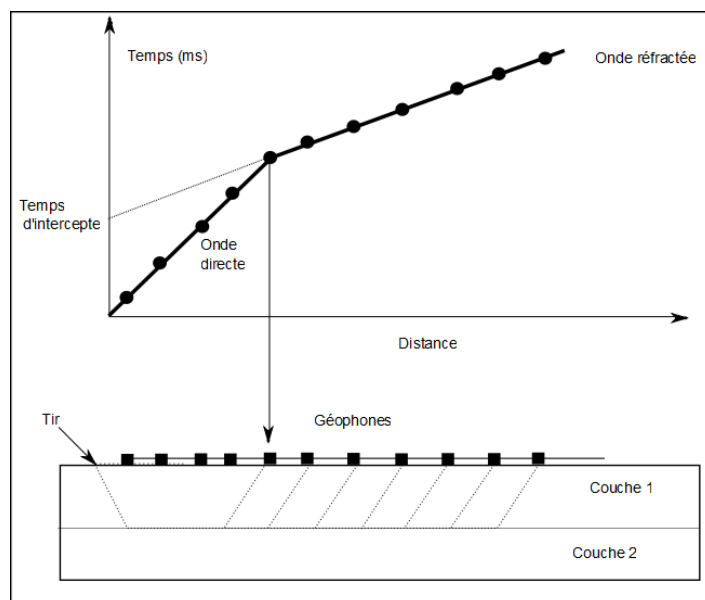
La source sismique est actionnée en différents points le long du dispositif et on enregistre le temps de propagation entre la source et chaque capteur. La source sismique et l'enregistreur sont synchronisés pour mesurer précisément l'instant de l'émission sismique.

L'enregistreur numérique à échantillonnage rapide permet également de sommer plusieurs émissions sismiques afin d'augmenter le rapport signal sur bruit. Typiquement, on utilise des dispositifs de 12 à 48 capteurs espacés de 2,5 à 20 mètres pour des profondeurs de reconnaissance variant de 15 m à 100 m.

La profondeur maximale opérationnelle de reconnaissance est fonction de la taille du dispositif mis en œuvre et de la source sismique mise en œuvre (masse à main, chute de poids accélérée, explosif, source vibrante, ...).

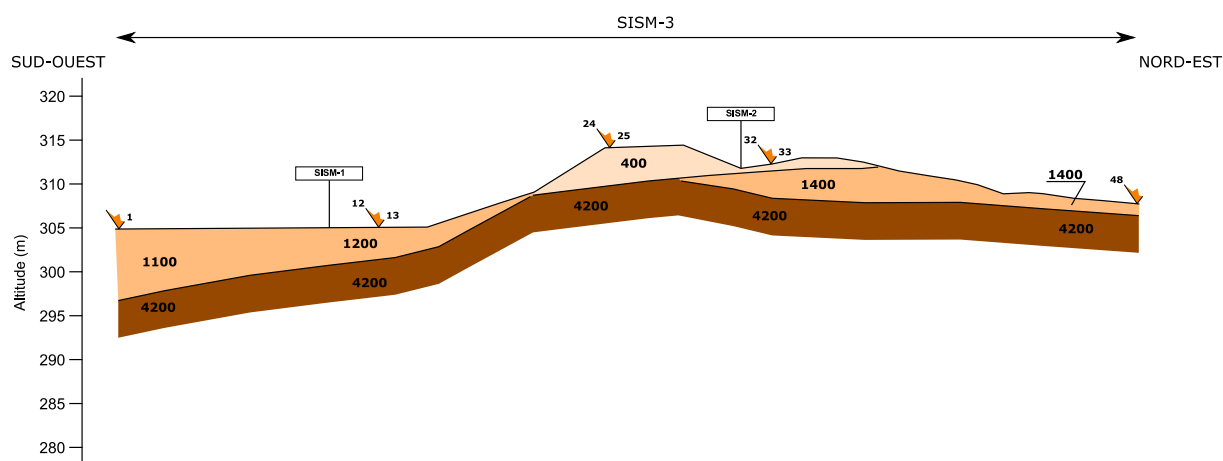
## Traitement et interprétation

Après acquisition, les temps de propagation sont reportés sur un graphique hodochrone pour permettre le traitement des mesures.



Sismique réfraction | Création du graphique hodochrone

L'interprétation, peut être menée par la méthode du plus-moins ou bien par inversion des temps d'arrivée, permet d'obtenir la coupe sismique des terrains au droit du profil sismique. La coupe sismique est interprétée géologiquement sur la base des données géologiques connues pour le site, sondages mécaniques, et des objectifs de l'étude.



Sismique réfraction | Exemple de coupe sismique