

Investigations géophysiques sur les verses de Ramèle, Nartau et les abords du Grésillou, ancienne mine de Salsigne

Rapport final

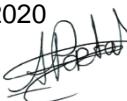
BRGM/RP-69819-FR
Juillet 2020

Investigations géophysiques sur les verses de Ramèle, Nartau et les abords du Grésillou, ancienne mine de Salsigne

Rapport final

BRGM/RP-69819-FR
Juillet 2020

B. François
Avec la collaboration de
J.M. Baltassat

Vérificateur :	Approbateur :
Nom : Angélie Portal	Nom : Sébastien Jaffrot
Fonction : Ingénieure géophysicienne	Fonction : Directeur Adjoint DRP
Date : 22/04/2020	Date : 01/05/2020
Signature : 	Signature : 

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : GEOPHYSIQUE, ARSENIC, RESISTIVITE ELECTRIQUE, POLARISATION PROVOQUEE, SISMIQUE REFRACTION, POLLUTION, SALSIGNY, VILLANIERE

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

FRANCOIS B. (2020) – Investigations géophysiques sur les verses de Ramèle, Nartau et les abords du Grésillou, ancienne mine de Salsigne. Rapport final. BRGM/RP-69819-FR, 67 p., 15 fig., 2 tabl., 3 ann.

Synthèse

Des concentrations anormales d'arsenic ont été observées dans les eaux du Grésillou, qui longe d'anciennes verses minières avant de se jeter dans l'Orbiel, rivière elle-même affluent de l'Aude. Les sites concernés sont les verses de Ramèle et Nartau, toutes deux mises en place lors de l'exploitation de la mine de Salsigne. La verse de Nartau est formée du minerai pauvre issu de l'exploitation de l'or provenant de l'arsénopyrite, qui était rejeté dans la pente topographique. La verse de Ramèle est essentiellement composée des stériles provenant de la mine à ciel ouvert (MCO), située un peu plus à l'ouest. Ces derniers ont directement recouvert l'ancienne usine de pyrométallurgie de Villanière, et des doutes subsistent sur l'évacuation complète des scories et produits relatifs aux rejets des installations préalablement à la mise en place de la verse. C'est désormais le Département de Prévention et de Sécurité minière (DPSM) du BRGM qui est en charge de la surveillance et de l'entretien de ces sites.

Dans ce cadre, le BRGM a réalisé une étude géophysique visant à étudier les éventuels liens entre les matériaux déposés sur les verses de Ramèle et de Nartau, et la pollution observée dans les eaux du Grésillou. Dans le détail, cette étude vise à :

- Mesurer l'épaisseur des matériaux déposés sur les 2 verses ;
- Estimer les volumes à 20 % près ;
- Déterminer l'hétérogénéité de composition des déblais des verses, en différenciant les secteurs ou niveaux composés de matériaux inertes (notamment MCO), et les secteurs contenant de fortes proportions d'arsenic ;
- Détecter, s'ils existent, les apports latéraux d'une pollution (drainage minier) vers le Grésillou, et caractériser le contexte géologique (notamment karstique) en-dessous des alluvions du Grésillou.

Au total, 10 profils de tomographie électrique, pour un linéaire total de 3365 m, ont été réalisés sur les abords du Grésillou (4 profils) et la verse de Ramèle (6 profils, dont 1 a aussi été couvert par des mesures sismiques). Les investigations initialement prévues sur la verse de Nartau n'ont pas pu être menées, en raison de la nature et de la géométrie de la verse.

Les résultats des mesures réalisées aux abords du Grésillou montrent que les formations géologiques ont des signatures très contrastées en termes de résistivité, certaines couches présentant des résistivités relativement faibles, de l'ordre de 50 ohm.m. Deux anomalies conductrices sont identifiées et localisées aux abords du Grésillou (profil GR4). Dans ce contexte, hétérogène et contrasté, il reste délicat de conclure de manière univoque sur l'origine de ces anomalies; une origine géologique et/ou provenant d'éventuelles infiltrations d'eau chargée en arsenic sont possibles. Des sondages de reconnaissance sont recommandés pour contrôler ces deux anomalies.

Les investigations menées sur la verse de Ramèle apportent des informations importantes sur la structure interne de la verse. Celles-ci ont pu être comparées à la topographie initiale (avant mise en place de la verse sur l'ancienne usine de Villanière), obtenue par la société Envisol, bureau d'étude actuellement en charge d'une étude technico-économique concernant les potentialités de gestion environnementale de ces sites, en digitalisant des plans de masse anciens. Les résultats permettent de définir que l'épaisseur minimum des déblais qui composent la verse (associés au résistant R2), varie de quelques mètres à 25 m localement ; ils recouvrent la quasi-intégralité de la verse. A ce stade, il subsiste un doute quant à la contribution du conducteur C2 sous-jacent au

volume des déblais ; des sondages de reconnaissance sont préconisés pour lever cette ambiguïté. De plus, plusieurs anomalies de chargeabilité permettent de préciser les zones où ces remblais sont potentiellement riches en sulfures métalliques, parmi lesquels peuvent se trouver des pyrites et arsénopyrites.

Sur la base de ces résultats, 19 implantations de forages sont proposées. Ces forages permettront une meilleure compréhension du site et une interprétation plus aboutie des présents résultats. Ce n'est qu'à la lumière de ces informations complémentaires qu'une estimation des volumes de remblais pourra être faite avec un degré de confiance suffisant.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Contexte et objectifs de l'étude.....	11
2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	11
2.2. CONTEXTE HISTORIQUE	12
2.2.1. Nartau.....	12
2.2.2. L'ancienne usine métallurgique de Villanière	12
2.2.3. La verre Ramèle.....	15
2.3. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE GÉOPHYSIQUE	15
3. Programme initial et moyens mis en oeuvre	17
3.1. PROGRAMME TECHNIQUE	17
3.2. VOLUME DES TRAVAUX.....	18
3.3. RÉALISATION DES TRAVAUX	20
3.3.1. Personnel et calendrier	20
3.3.2. Equipement.....	20
4. Acquisition et traitement des données.....	23
4.1. MÉTHODE ÉLECTRIQUE	23
4.1.1. Mise en œuvre de la méthode de la tomographie de résistivité	23
4.1.2. Mesures réalisées.....	23
4.1.3. Traitement des mesures électriques	25
4.2. MÉTHODE SISMIQUE.....	27
4.2.1. Mise en œuvre de la méthode de la sismique réfraction	27
4.2.2. Mesures réalisées.....	27
4.2.3. Traitement et inversion des mesures sismiques.....	27
4.3. POSITIONNEMENT DES MESURES	27
5. Résultats	29
5.1. RAMÈLE	29
5.1.1. Description des résultats des mesures de résistivité et de chargeabilité	29
5.1.2. Calage des mesures électriques avec le profil sismique (profil RA6)	37

5.2. . GRESILLOU	37
6. Interprétation et recommandations	41
6.1. RAMÈLE.....	41
6.2. GRÉSILLOU.....	44
7. Conclusions	47
8. Bibliographie	49

Liste des figures

Figure 1 : Contexte géologique de la zone d'étude d'après la carte géologique de la France (1/50000), feuille Carcassonne (n°1037).	11
Figure 2 : Plan de recollement des anciennes installations de Villanière sur la topographie actuelle de la verse Ramèle.	13
Figure 3 : Vue actuelle de la verse à stériles terrassée et végétalisée de Ramèle depuis le sud de Nartau (photo BRGM).	15
Figure 4 : Illustration du signal utilisé pour mesurer la chargeabilité électrique.....	17
Figure 5 : Positionnement des profils géophysiques, sur fond composé de la carte géologique harmonisée superposée à l'orthophotographie (©IGN 2008).	19
Figure 6 : Dispositifs de mesures sur le site de Ramèle (a-Syscal Pro lors des mesures électriques sur RA1; b- Stratavisor lors des mesures sismiques sur RA6).....	24
Figure 7 : Schéma représentant l'agencement des différents dispositifs utilisés lors de l'acquisition sismique en roll-along.	27
Figure 8 : Visualisation des coupes de résistivité inversées en 3D, superposées de la surface topographique, issue du logiciel Paraview. Vue depuis l'ouest.	29
Figure 9 : Résultats des mesures de résistivité pour les profils RA1 à RA4.	31
Figure 10 : Résultats des mesures de résistivité pour les profils RA5, RA6, et GR1 à GR4, et résultats des mesures sismiques réalisées sur RA6.	32
Figure 11 : Résultats des mesures de chargeabilité pour les profils RA1 à RA4.....	34
Figure 12 : Résultats des mesures de chargeabilité pour les profils RA5, RA6, et GR1 à GR4.	38
Figure 13 : Résultats interprétés des mesures réalisées sur les profils RA1 à RA4.....	43
Figure 14 : Résultats interprétés des mesures réalisées sur les profils RA5, RA6 et GR1 à GR4.	44
Figure 15 : Implantations des sondages préconisés, sur fond composé de la carte géologique harmonisée superposée à l'orthophotographie (©IGN 2008).	46

Liste des tableaux

Tableau 1 : Statistiques sur les mesures électriques réalisées et conservées après filtrage.	25
Tableau 2 : Descriptions et positions des sondages de contrôles préconisés.	45

Liste des annexes

Annexe 1 Principe de la méthode du panneau électrique.....	51
Annexe 2 Paramètres d'inversion pour Res2Dinv.....	59
Annexe 3 Fiche descriptive de la méthode sismique réfraction	65

1. Introduction

Des concentrations anormales d'arsenic ont été observées dans les eaux du Grésillou, affluent de l'Orbiel, rivière elle-même affluent de l'Aude. Le Grésillou s'écoule vers le sud et longe d'anciennes verses minières qui pourraient être à l'origine de la pollution.

Les verses à stériles de Nartau et de Ramèle sont constituées de résidus de traitement minier et de déblais de la mine de Salsigne. Une partie des déblais est constituée de matériaux riches en arsenic, notamment d'arsénopyrite, qui est le minéral contenant l'arsenic et l'or, exploités sur la mine de Salsigne, ainsi que sur des filons plus localisés, par exemple au-dessus de la verse de Nartau.

La verse de Nartau est située sur un flanc de vallée de forte pente ($> 75\%$), sur la rive gauche du Grésillou (figure 1). Les déblais présents sont issus de l'exploitation à la fin du XIX^{ème} siècle d'un filon riche en arsenic, en amont de la verse. Les volumes sont estimés à 20 000 tonnes (ICF Environnement, 2007). Ces matériaux sont très riches en arsenic (10 à 20%). Ils sont donc toxiques et certains matériaux, très fins, peuvent être transportés par le vent.

La verse de Ramèle est située sur le flanc de la vallée en rive droite du Grésillou, en bordure de la mine de Salsigne. Les matériaux ont été déversés à diverses périodes de l'exploitation de la mine de Salsigne (plus de 100 ans d'exploitation). Leurs compositions et leurs volumes sont très incertains. Ces déblais peuvent être constitués de matériaux riches en arsenic (arsénopyrite) ou de matériaux issus de la mine à ciel ouvert – MCO.

Par ailleurs, le mode de transport de l'arsenic des verses vers le Grésillou n'est pas encore bien compris. Aucune alimentation de surface n'est visible et le ruissellement des eaux de surface apporterait une quantité trop faible en arsenic par rapport aux observations. Des hypothèses sur des alimentations souterraines (drainages miniers) sont avancées sans pouvoir les situer. Enfin, en période où il est alimenté, avec des débits faibles, les eaux du Grésillou se perdent dans les alluvions sans aucune preuve de l'origine du phénomène.

2. Contexte et objectifs de l'étude

2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

D'après la carte géologique (Berger, et al., 1993), la lithologie de la zone de Salsigne se compose (Figure 1) :

- d'un socle métamorphique cambro-ordovicien constitué de schistes X (ou schistes violets) associés au massif de la Montagne Noire (Spi-j sur la carte géologique) ;
- de la nappe du Nord-Minervois (D1a), qui surmonte les schistes X, et se compose de :
 - o Calcshistes,
 - o Quatzites, grès et conglomérats,
 - o Alternances calcaires, schistes dolomitiques et grès,
 - o Alternances grès-schistes ;
- de la nappe du Minervois, qui chevauche celle du Nord-Minervois, et est composée de schistes, calcschistes (k1V) et grès (k1). Elle est partiellement recouverte de dépôt tertiaires détritiques.

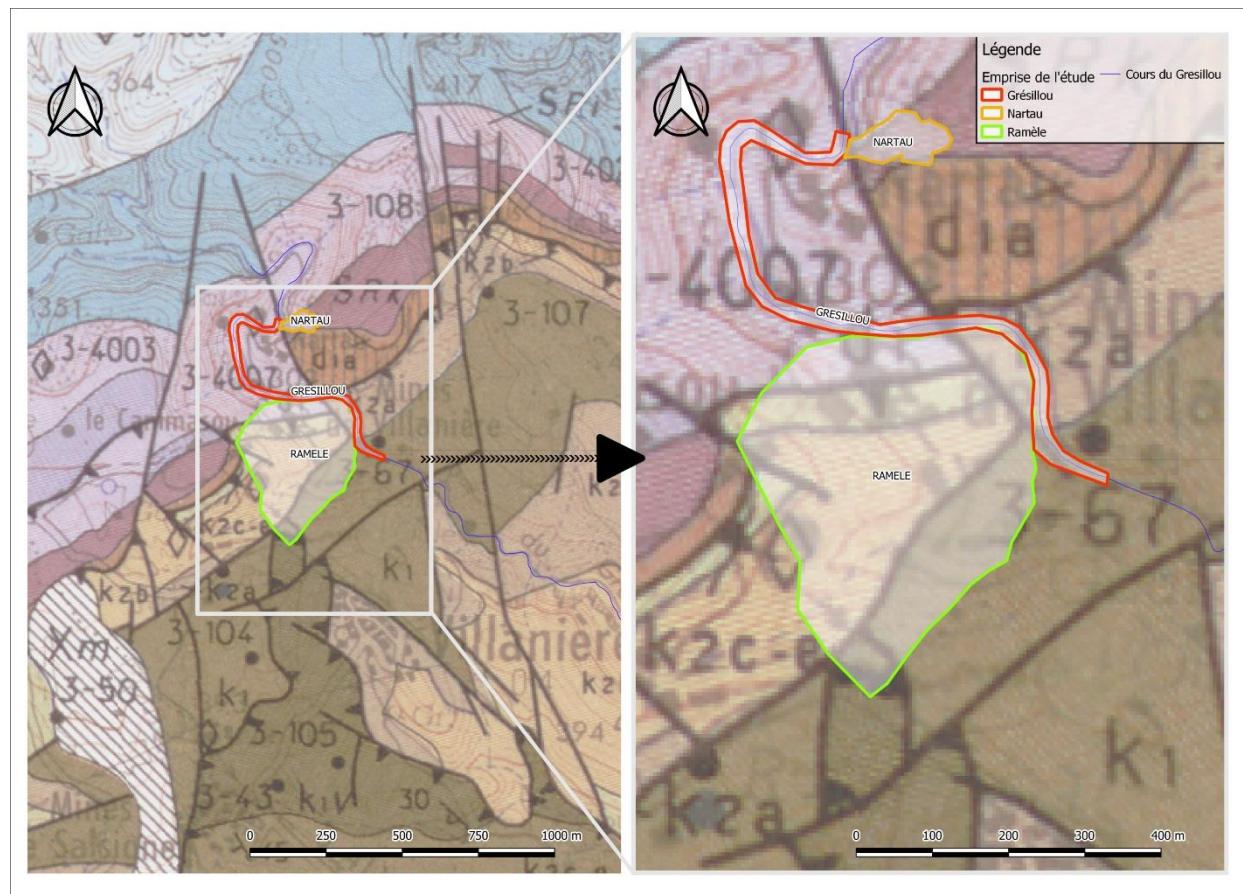


Figure 1 : Contexte géologique de la zone d'étude d'après la carte géologique de la France (1/50000), feuille Carcassonne (n°1037).

La zone d'étude (figure 1), entaillée de filons minéralisés, se situe ainsi dans un contexte tectonique relativement complexe, notamment en raison du chevauchement varisque et de la présence de nombreuses failles. La notice de la carte géologique fait également mention de plusieurs phases de plis de dimensions métriques à hectométriques (Berger et al., 1993).

2.2. CONTEXTE HISTORIQUE

2.2.1. Nartau

Les premiers travaux de fouille datent de 1873 et concernaient la recherche de pyrite de fer pour la fabrication d'acide sulfurique. Ce n'est qu'en 1896, après la découverte de l'or dans le mispickel (ou arsénopyrite FeAsS), que les travaux d'exploitation en surface et en souterrain se développent. Jusqu'en 1909, le minerai sulfuré est trié à la main, et le mispickel massif envoyé en Angleterre pour y être fondu. L'essentiel du minerai pauvre est alors rejeté en verse dans la pente topographique.

En 1910, les installations de Nartau sont abandonnées au profit de la nouvelle mine de Salsigne (filon Ramèle) et laissées plus ou moins en l'état.

Au total, l'exploitation de Nartau n'aura duré que 14 ans et aura été développée sur 6 niveaux de galerie (entre les cotes NGF 309 et 401) pour produire environ 15 600 t de minerai sulfo-arséniés tout venant. On estime à environ 20 000 t la quantité de matériaux abandonnés sur la pente topographique pour former la verse de Nartau (ICF Environnement, 2007).

2.2.2. L'ancienne usine métallurgique de Villanière

Cette usine a été construite pour, à la fois s'affranchir des coûts et contraintes liées au transport de minerais vers l'Angleterre, et développer l'industrie sur les sites de production des mines.

Le procédé utilisé était basé sur la pyrométallurgie qui consistait à griller, puis à fondre, le minerai sulfuré le plus homogénéisé possible, pour en extraire une matte métallique riche en fer et en métaux précieux. Ce procédé permettait également de produire, en voie aqueuse et par condensation, de l'acide arsénieux.

Si les premières installations de préparation mécanique du minerai (laverie) datent de 1907, la fonderie a commencé sa production en 1913, puis a fonctionné au ralenti pendant plus d'une vingtaine d'années, avec une production d'or inférieure ou égale à 100 kg /an. Elle a cessé son activité en 1946 et ses installations ont été démolies en 1977.

A noter qu'en 1983, l'Etat a fait procéder à l'enlèvement de produits arsenicaux dont 23 t d'anhydride arsénieux (ou trioxyde d'arsenic As₂O₃) transférés sur la Combe du Saut, située à 5 km au sud-est.

Ces installations (laverie, fours, chambre de condensation, cheminée, en rouge sur la Figure 2), ainsi que les scories et produits relatifs aux rejets des anciennes installations, et qui n'auraient pas été évacués préalablement, furent ensuite recouverts par les stériles qui composent l'actuelle verse de Ramelle (ICF Environnement, 2007).

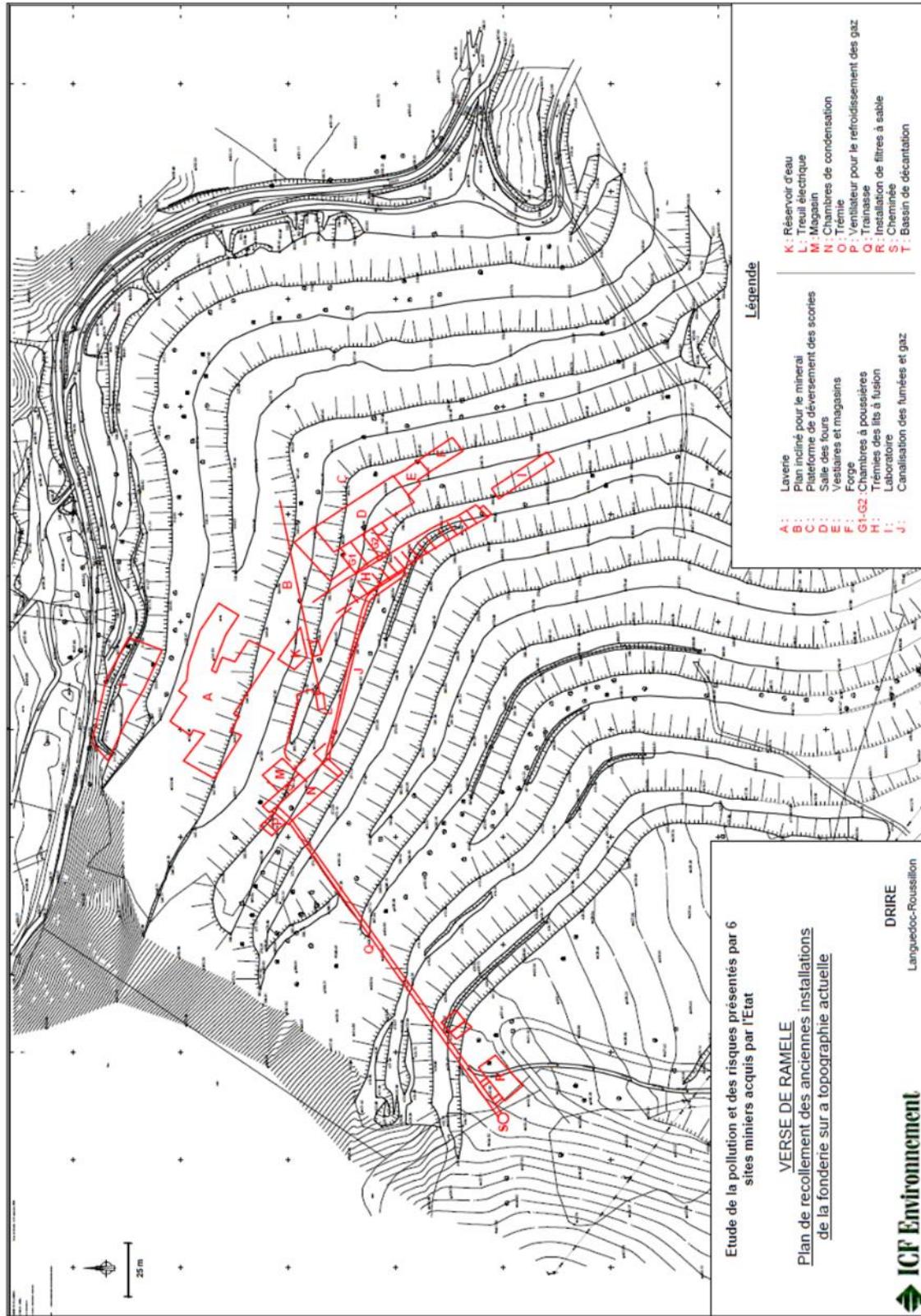


Figure 2 : Plan de recollement des anciennes installations de Villanière sur la topographie actuelle de la verše Ramèle.



Figure 3 : Vue actuelle de la verse à stériles terrassée et végétalisée de Ramèle depuis le sud de Nartau (photo BRGM).

2.2.3. La verse Ramèle

La verse à stériles Ramèle est constituée de stériles francs de découverte (blocs rocheux peu ou pas minéralisés) provenant de l'exploitation à ciel ouvert (MCO) de Salsigne. Le volume de matériaux mis en verse, entre 1985 et la fin des années 90, est estimé à plusieurs dizaines de millions de m³, recouvrant une superficie de 13,5 ha sur près de 130 m de dénivelé (ICF Environnement, 2007). Dans le cadre de la cessation de ses activités au début des années 2000, les banquettes ont été végétalisées (figure 3).

Les matériaux ainsi stockés ont recouvert l'entrée d'ouvrages souterrains de la mine de Salsigne qui débouchaient au jour dans ce secteur, dont un travers-banc (à la cote 319) suspecté, d'après les modèles hydrogéologiques mis en place juste avant la fermeture, de faire office d'exutoire de surverse pour de futurs écoulements souterrains en provenance du réservoir minier.

Il est à noter que cette verse a recouvert l'ancienne usine de pyrométallurgie de Villanière, ainsi qu'une partie des scories et produits relatifs aux rejets des anciennes installations, qui n'auraient pas été évacués préalablement. La carte de la figure 2 montre le plan de recollement des anciennes installations métallurgiques sur la topographie actuelle de la verse à stériles.

2.3. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE GÉOPHYSIQUE

Les objectifs de cette étude géophysique sont :

- De mesurer l'épaisseur des matériaux (déblais) déposés sur les 2 verses ;
- D'estimer leurs volumes à 20 % près ;
- De déterminer l'hétérogénéité de composition des déblais des verses, en différenciant les secteurs ou niveaux composés de matériaux inertes (notamment MCO) des secteurs contenant de fortes proportions d'arsenic ;

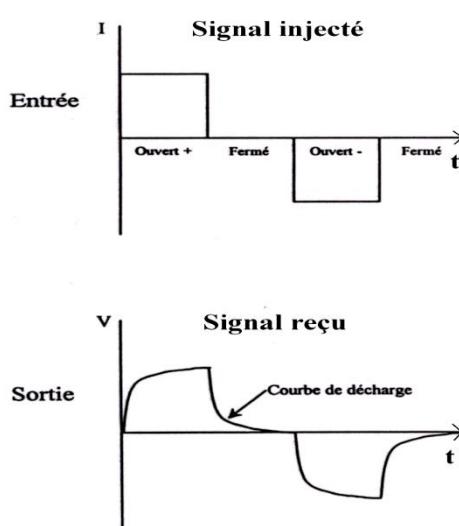
De détecter des apports latéraux d'une pollution (drainage minier) vers le Grésillou, et de caractériser le contexte géologique (notamment karstique) en-dessous des alluvions du Grésillou.

3. Programme initial et moyens mis en oeuvre

3.1. PROGRAMME TECHNIQUE

Pour répondre à ces objectifs, le BRGM a proposé de réaliser des tomographies 2D de résistivité et chargeabilité électrique, ainsi qu'un profil de sismique réfraction.

La résistivité électrique d'un milieu est sa capacité à s'opposer au courant électrique. Elle est sensible, entre autres, au type de matériau qui le compose, à sa texture (e.g. porosité), à sa teneur en eau, à la conductivité électrique de celle-ci, à la teneur en argile...



La chargeabilité électrique caractérise la propriété d'un matériau à emmagasiner de l'énergie électrique, puis à la restituer (effet de polarisation provoquée). La chargeabilité électrique est proportionnelle à la teneur en minéraux polarisables tels que les sulfures métalliques (pyrite et arsénopyrite dans le présent contexte). Elle est mesurée avec les mêmes dispositifs et matériels que ceux utilisés lors des tomographies de résistivité électrique. Seule la forme du signal est modifiée (figure 4), un temps de coupure est intercalé (mesure de chargeabilité) entre deux injections (mesure de résistivité).

Résistivité et chargeabilité électrique peuvent donc être mesurées simultanément, lors d'une acquisition de polarisation provoquée. Une telle mesure prendra cependant au moins deux fois plus de temps qu'une mesure de résistivité simple.

Figure 4 : Illustration du signal utilisé pour mesurer la chargeabilité électrique.

Ces méthodes géophysiques répondent en grande partie aux objectifs :

- Les remblais issus de la mine n'ont a priori pas la même résistivité que les terrains naturels encaissants, car leur porosité est nettement supérieure, et la teneur en eau des remblais est différente de celle des terrains encaissants. Ces deux paramètres (porosité et teneur en eau) affectent la résistivité électrique ;
- Les matériaux riches en arsénopyrite et pyrite doivent avoir une chargeabilité plus forte que les matériaux issus de la MCO ;
- Les eaux contaminées sont a priori plus conductrices que les eaux naturelles, et que les roches encaissantes. Aussi le point d'origine et l'extension de la pollution pourraient être détectés à condition que les profils croisent la pollution.

Les méthodes sismiques (et notamment la sismique réfraction dans ce cas) s'appuient sur l'étude de la propagation d'ondes mécaniques dans le sous-sol pour obtenir une coupe 2D de la distribution de leurs vitesses. On obtient donc une information directement reliée aux caractéristiques mécaniques du sous-sol. Cette méthode a été mise en œuvre sur un profil commun à un profil électrique. En effet, des profils électriques réalisés préalablement sur la verve

de l'Atelier, également située dans la région de Salsigne (Coppo & Colombain, 2018), ont montré que la résistivité seule ne suffisait pas toujours à caractériser l'interface entre remblais et encaissant. La méthode sismique doit permettre un calage de cette interface sur les coupes de résistivité.

3.2. VOLUME DES TRAVAUX

Trois profils de résistivité et chargeabilité étaient initialement prévus sur la verse de Nartau afin d'en caractériser la géométrie et la composition des déblais. Mais la mise en œuvre de ces profils s'est heurtée à deux difficultés majeures :

- La pente très raide, associée au caractère pulvérulent des matériaux la constituant ont rendu l'accès et le travail sur cette zone très délicats. Une intervention dans ces conditions nécessitait de réaliser les travaux sur cordes, avec l'appui d'une équipe de cordistes professionnels.
- La composition des remblais constituant la verse étant mal connue, et les teneurs en arsenic susceptibles d'y être potentiellement élevées, il était donc nécessaire d'envisager des équipements de protection individuels (EPI) adaptés (masque respiratoire, combinaison, etc...), complexifiant d'autant plus le travail des opérateurs sur ce site.

En raison des dangers potentiels évoqués ci-dessus, les acquisitions sur la verse de Nartau n'ont pas pu être réalisées lors de cette intervention.

Sur la verse de Ramèle, 4 profils ont été implantés, dans le sens de la pente, complétés par 2 profils transverses, afin de caractériser au mieux la géométrie des remblais qui composent la verse. Sur l'ensemble des profils la résistivité et la chargeabilité ont été mesurées. Le profil RA6 a également été couvert par la méthode sismique, afin de caler la profondeur de l'interface remblais/terrain naturel. L'espacement entre électrodes est de 5 m pour garantir une profondeur d'investigation suffisante (environ 70 m). Les géophones sont espacés de 2 m pour la méthode sismique, ce qui permet d'avoir une résolution suffisante. La relativement faible puissance de la source utilisée (double masse) n'aurait pas permis de couvrir un dispositif à 5 m, quoiqu'il en soit.

Au niveau du Grésillou, l'objectif était de détecter d'éventuels drains favorisant la circulation d'eaux chargées en arsenic. Seul le paramètre résistivité est pertinent dans ce cas. Afin de longer au mieux le cours d'eau, en évitant au maximum que les profils ne fassent des coudes qui altèreraient les mesures, 2 profils de 160 m et 820 m respectivement étaient initialement prévus. Leur nombre et leurs implantations ont ensuite été adaptés aux des conditions de terrain (figure 5). Les tracés de ces profils ayant été ajustés sur place suite à la réalisation des profils de Ramèle, leur layonnage fut réalisés par l'équipe géophysique, pendant l'acquisition des mesures du profil précédent. Le temps disponible pour l'acquisition étant de fait plus long, l'opérateur a décidé de mesurer la chargeabilité en plus de la résistivité pour les profils GR1, GR3 et GR4. Bien que seul le paramètre résistivité soit pertinent au regard des infiltrations d'eau polluée, la chargeabilité peut apporter un complément d'information sur la géologie.

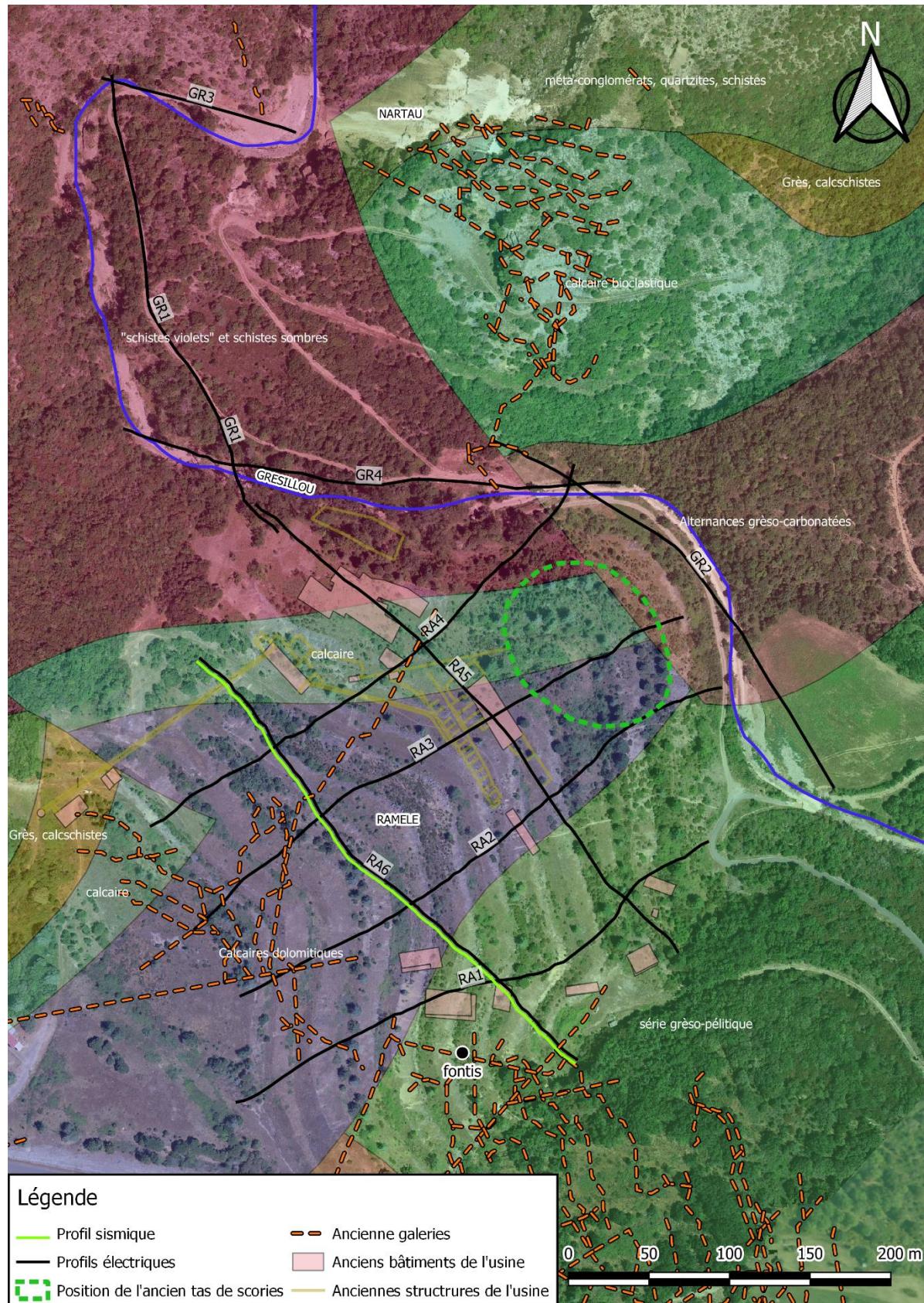


Figure 5 : Positionnement des profils géophysiques, sur fond composé de la carte géologique harmonisée superposée à l'orthophotographie (©IGN 2008).

3.3. RÉALISATION DES TRAVAUX

3.3.1. Personnel et calendrier

Ces travaux ont été réalisés par 2 ingénieurs géophysiciens du BRGM (DRP/IGT). Compte tenu des délais d'intervention très courts, les opérateurs se sont succédés sur le site entre le 12 et le 24 septembre 2019.

Les profils RA1, RA2, RA3 et RA6 (sismique et électrique sur ce dernier), situés sur la verre de Ramèle, ont été réalisés par Benjamin FRANCOIS, ingénieur géophysicien, assisté d'Anthony BONJOUR (ATTIS Environnement), du 12 au 18 septembre 2019.

Les profils RA4 et RA5 (verre de Ramèle), GR1, GR2, GR3 et GR4 en bordure du Grésillou, ont été couverts par Jean-Michel BALTASSAT, ingénieur géophysicien, assisté d'Anthony BONJOUR (ATTIS Environnement), du 19 au 24 septembre 2019.

Les travaux sur le terrain ont été précédés d'une phase de layonnage (sous-traitance), supervisée par Anthony BONJOUR (ATTIS Environnement) et mise en œuvre par M. Ballester, paysagiste.

La compilation des données et l'interprétation des résultats ont été réalisées par Benjamin FRANCOIS. Des résultats préliminaires ont été fournis à BRGM/DPSM début novembre 2019.

3.3.2. Equipement

L'acquisition des panneaux électriques a été réalisée à l'aide d'un résistivimètre Syscal-Pro (Iris Instruments, France, figure 6-a) connecté à 6 flûtes (câble à sorties multiples) de 16 électrodes, soit 96 électrodes métalliques régulièrement espacées de 5 mètres sur 475 m. L'énergie provenait d'une batterie externe. L'espacement inter-électrode de 5 m a été choisi afin d'assurer à la fois une résolution acceptable des terrains de surface, et une profondeur d'investigation maximale d'environ 70 m. Ce dispositif permet de réaliser simultanément les mesures de résistivité et de polarisation provoquée.

Le profil sismique a quant à lui été réalisé grâce un enregistreur principal Stratavizor NZ 48 voies (figure 6-b), complété d'un second enregistreur Geometrics Geode (24 voies, relié à l'enregistreur principal Stratavizor). Ces enregistreurs étaient connectés à 72 géophones par l'intermédiaire de 3 flûtes de 24 traces chacune (espacement de 2 m entre traces). L'onde sismique a été générée par une source non-accélérée (double masse de 10 kg) dotée d'un accéléromètre permettant le déclenchement de l'enregistrement. L'ensemble était alimenté par 2 batteries externes de 70 Ah chacune.

L'ensemble du matériel utilisé (électrique et sismique) comprend :

- 1 Syscal Pro, switch 96 ;
- 6 flûtes électriques de 16 traces avec un espacement de 5 m ;
- 96 électrodes ;
- 96 cordons ;
- 1 Stratavizor NZ (Geometrics) ;
- 1 Geode (Geometrics) ;
- 3 flûtes sismiques de 24 traces avec un espacement de 2 m ;

- 1 câble de connexion Geode-Stratavizor de 120 m ;
- 72 géophones ;
- 1 double masse, équipée d'un accéléromètre de déclenchement ;
- 1 câble de déclenchement de 120 m ;
- 1 plaque de tir ;
- 3 massettes ;
- 4 claies de portages ;
- 1 transporteur à chenilles ;
- 2 batteries 70 Ah ;
- 10 connecteurs de flûtes ;
- 1 GPS différentiel Trimble Geo7X ;
- 1 micro-ordinateur portable ;
- 1 fourgon.

4. Acquisition et traitement des données

4.1. MÉTHODE ÉLECTRIQUE

Les mesures électriques ont été acquises sur la base les recommandations du Code de Bonne Pratique édité par l'AGAP Qualité (AGAP, 1992). La localisation des mesures réalisées est présentée sur la carte de la figure 5.

4.1.1. Mise en œuvre de la méthode de la tomographie de résistivité

Le principe de la méthode du panneau électrique est présenté en annexe 1.

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant et de potentiel en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant des avantages et des inconvénients, notamment en ce qui concerne l'amplitude du signal, la profondeur d'investigation et la résolution. Parmi celles-ci, deux configurations ont été mises en œuvre dans le cadre de cette étude :

- **Le dispositif dipôle-dipôle**, qui donne une très bonne résolution des terrains de sub-surface et est bien adapté à l'auscultation des discontinuités verticales. Il est robuste face aux effets latéraux (structures parallèles au profil). En revanche, le rapport signal/bruit décroît rapidement, ce qui limite sa profondeur d'investigation (par rapport à d'autres dispositifs plus pénétrants) ;
- **Le dispositif Wenner-Schlumberger réciproque**, qui offre une profondeur d'investigation maximale optimale (de l'ordre de 80 m pour un dispositif de 475 m de long), grâce à un meilleur rapport signal/bruit. Beaucoup plus intégrant, il est, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. Il offre ainsi une mauvaise résolution des horizons de sub-surface, et une résolution relativement globale des structures auscultées. Le Wenner-Schlumberger réciproque offre l'avantage, par rapport au Wenner-Schlumberger classique, d'être mieux adapté à l'utilisation de résistivimètres multivoies comme le Syscal Pro, ce qui permet de réaliser des programmes de mesures plus complets tout en optimisant les temps d'acquisition.

Ces deux dispositifs ont été mis en œuvre sur chaque profil pour les mesures de résistivité. Les mesures de PP ont été réalisées lors des acquisitions en dipôle-dipôle uniquement.

4.1.2. Mesures réalisées

Pour éviter de perturber les mesures avec des profils trop tortueux, et assurer tout de même une profondeur d'investigation suffisante, le plus long des 2 profils prévus initialement sur le Grésillou a été scindé en 3 profils GR1, GR2 et GR4.

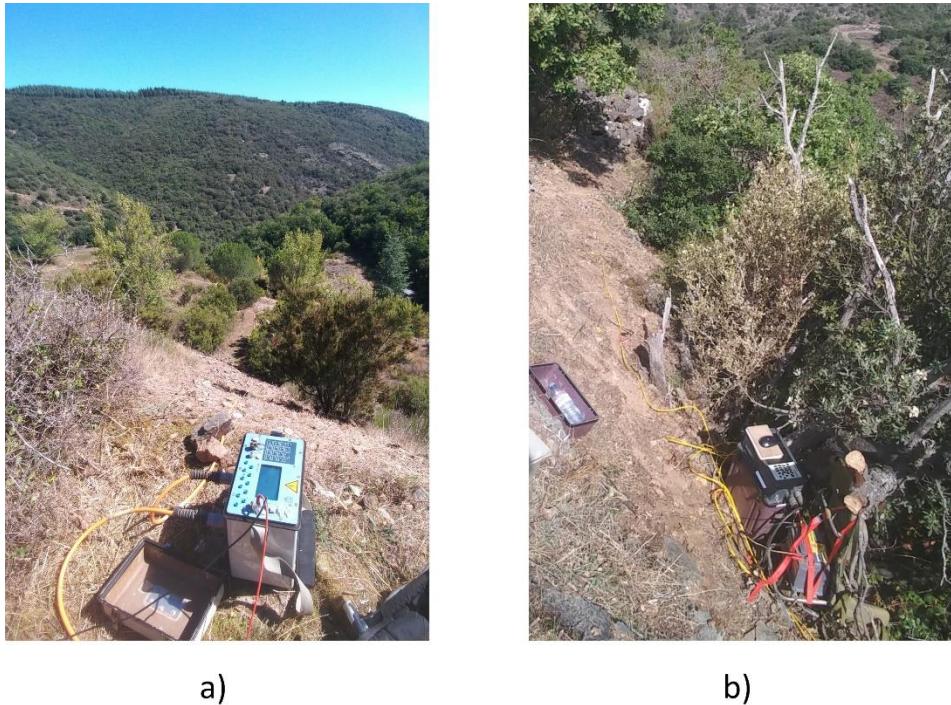


Figure 6 : Dispositifs de mesures sur le site de Ramèle (a-Syscal Pro lors des mesures électriques sur RA1; b- Stratavisor lors des mesures sismiques sur RA6).

Les conditions de mesure, notamment sur la verse de Ramèle, ont été rendues délicates par la présence de gravats et d'enrochements, susceptibles de rendre difficile l'injection de courant électrique à cause de résistances de prises élevées (pouvant atteindre plusieurs dizaines de kOhm localement). Pour améliorer les contacts, et ainsi augmenter le rapport signal/bruit, de l'eau saturée en sel a été ajoutée au pied de chaque électrode. En complément, lorsqu'une électrode devait être implantée dans des blocs de roches (souvent en pied de talus), les électrodes standard de 20 cm ont été remplacées par de longues électrodes (80 cm à 1 m), permettant d'optimiser le contact électrique dans ces zones peu propices à ce type de mesure. Au final, 93% des résistances de prises au moment des mesures étaient inférieures à 10 kOhm.

Ces précautions de mise en œuvre, bien que chronophages, ont permis d'obtenir des mesures de très bonnes qualités compte tenu des conditions de site, comme le montrent les taux de conservation des mesures après filtrage (tableau 1).

Au total, 10 profils (résistivité-chARGEabilité et résistivité seule) ont été réalisés, pour un linéaire total de 3365 m.

Profil	Longueur (m)	Dispositif	Nombre mesures brutes	Résistivité		Polarisation provoquée	
				nb. mesures conservées	% conservé	nb. mesures conservées.	% conservé
RA1	360	dip-dip	1550	1517	97.9	1455	93.9
	360	W.-Schlum. Rec.	1158	1158	100.0	-	-
RA2	390	dip-dip	1754	1715	97.8	1690	96.4
	390	W.-Schlum. Rec.	1333	1333	100.0	-	-
RA3	395	dip-dip	1788	1767	98.8	1734	97.0
	395	W.-Schlum. Rec.	1363	1361	99.9	-	-
RA4	390	dip-dip	1754	1607	91.6	1593	90.8
	390	W.-Schlum. Rec.	1333	1232	92.4	-	-
RA5	395	dip-dip	1788	1700	95.1	1690	94.5
	395	W.-Schlum. Rec.	1363	1351	99.1	-	-
RA6	365	dip-dip	1584	1540	97.2	1509	95.3
	365	W.-Schlum. Rec.	1187	1183	99.7	-	-
GR1	315	dip-dip	1248	1149	92.1	925	74.1
	315	W.-Schlum. Rec.	911	880	96.6	-	-
GR2	315	W.-Schlum. Rec.	911	698	76.6	-	-
GR3	125	dip-dip	248	248	100.0	244	98.4
	125	W.-Schlum. Rec.	147	147	100.0	-	-
GR4	315	dip-dip	1248	1171	93.8	1056	84.6
	315	W.-Schlum. Rec.	911	895	98.2	-	-

Tableau 1 : Statistiques sur les mesures électriques réalisées et conservées après filtrage.

4.1.3. Traitement des mesures électriques

a) Filtrage des mesures avec le logiciel PROSYS

Les données brutes de mesures électriques ont été filtrées avec les paramètres suivants :

- Pour les données de résistivité :
 - $|V| > 0.5 \text{ mV}$ (V : potentiel mesuré),
 - $Q < 5 \%$, (Q = facteur qualité, erreur de répétitivité pendant la phase de stack).
- Pour les données de polarisation provoquée :
 - $|V| > 1 \text{ mV}$,
 - $Q < 5 \%$.

Ce type de filtrage est cohérent avec les caractéristiques instrumentales fournies par le constructeur, et sont conformes aux recommandations de l'AGAP (AGAP, 1992).

b) Traitement des mesures avec le logiciel X2IPI

Le logiciel X2IPI (Robain & Bobachev, 2017) permet une seconde phase de traitement des données brutes, avant qu'elles ne soient inversées avec le logiciel Res2DInv (4.1.3.c). Il nous a permis :

- D'intégrer la topographie aux données ;

- De visualiser les pseudo-sections de résistivité apparente, et de supprimer visuellement les mesures aberrantes qui n'auraient pas été filtrées par les critères appliqués dans Prosys ;
- De concaténer les données issues de différents dispositifs de mesure (dipôle-dipôle et Schlumberger réciproque dans notre cas) ;
- D'appliquer un filtre « moyenne » ou « médiane » aux données, afin de filtrer les effets des inhomogénéités de surface.

L'application d'un filtre médian a néanmoins introduit des difficultés de convergence et mené à des erreurs RMS résiduelles plus importantes. L'utilisation de ces filtres a donc été écartée pour cette étude.

En outre, les mesures dipôle-dipôle étant de bonne qualité, jusqu'en profondeur, l'ajout des données du Wenner-Schlumberger réciproque n'apporte ici pas de gain de profondeur d'investigation. Les résultats présentés dans ce rapport sont donc ceux issus des acquisitions dipôle-dipôle uniquement, à l'exception du profil GR2 sur lequel seules les mesures Wenner-Schlumberger réciproques ont pu être réalisées.

c) *Inversion des données avec le logiciel RES2DINV*

Après filtrage et préparation des données avec les logiciels PROSYS et X2IPI, toutes les pseudo-coupes de résistivité apparente ont été inversées avec le logiciel Res2DInv (Loke, 2008).

Les sections de résistivité « vraie », résultats de l'inversion, ont ensuite été utilisées pour l'interprétation en termes de formations géologiques et de structurales. Elles fournissent des informations quantitatives (résistivité, géométrie et profondeur, pendage) permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe présentant la distribution des résistivités le long du profil en fonction de la profondeur (les profils de topographie sont inclus lors des inversions).

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

Pour chaque dispositif, des paramètres d'inversion ont été testés de manière à obtenir une bonne convergence de la solution et une erreur minimale d'ajustement du modèle aux mesures. Les résultats de ces tests ont permis de sélectionner un ensemble de paramètres qui sont décrits en annexe 2.

Avec ces paramètres, l'algorithme cherche à minimiser l'erreur quadratique (norme L2) qui donne généralement des résultats assez lisses, et convient lorsque les données ne sont pas trop bruitées. Un facteur d'anisotropie a également été ajouté (Vertical to horizontal flatness filter ratio de 0.5) ; celui-ci fait tendre les résultats de l'inversion vers des structures plutôt horizontalisées, ce qui semble cohérent dans ce contexte (roches sédimentaires et dépôt de remblai).

4.2. MÉTHODE SISMIQUE

4.2.1. Mise en œuvre de la méthode de la sismique réfraction

Le principe de la méthode sismique réfraction est décrit en annexe 3. Il consiste à propager une onde mécanique dans le sous-sol et à en enregistrer la propagation à l'aide de capteurs positionnés le long d'un profil en surface.

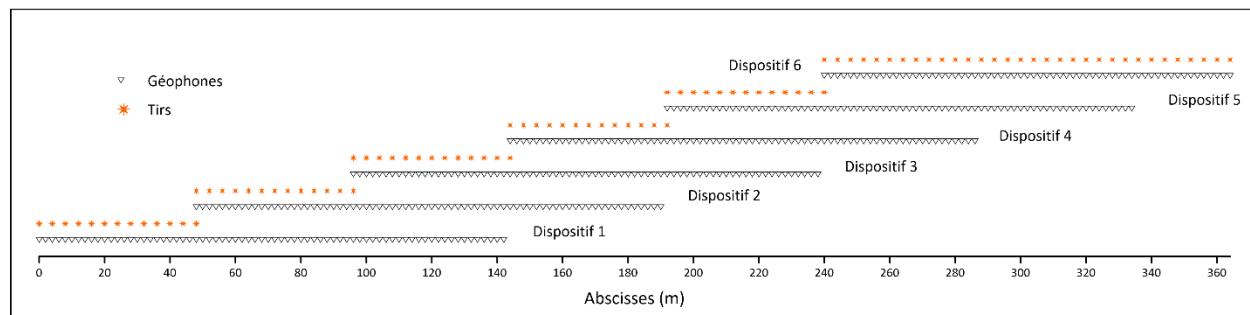


Figure 7 : Schéma représentant l'agencement des différents dispositifs utilisés lors de l'acquisition sismique en roll-along.

4.2.2. Mesures réalisées

Le profil sismique réalisé sur RA6 mesure au total 366 m de long, soit 184 géophones espacés de 2 m. Pour cela la technique du roll-along a été employée, et 6 dispositifs de 72 géophones ont été utilisés successivement (figure 7). Lorsque tous les tirs (25) du dispositif 1 ont été enregistrés, les 24 premiers géophones et la première flûte ont été démontés d'une extrémité et réinstallés à l'autre extrémité, pour obtenir le dispositif 2, sur lequel les tirs prévus ont été effectués, et ainsi de suite. Sur le dernier dispositif, les tirs ont été réalisés tout le long du dispositif, jusqu'à l'extrémité du profil.

Il a fallu 2 jours à l'équipe pour l'acquisition de ces mesures.

4.2.3. Traitement et inversion des mesures sismiques

L'ensemble du traitement des données sismiques a été réalisé avec le logiciel Rayfract.

Les temps de trajets des premières arrivées ont d'abord été pointés, pour chacun des 98 tirs, avant d'être traités avec un algorithme d'inversion. Le résultat est représenté par une coupe de la distribution des vitesses des ondes P en profondeur, le long du profil de mesure (voir résultats de la sismique du RA6, figure 14). L'erreur quadratique (RMS) résiduelle à la fin de l'inversion (20 itérations) est de 2.3 %.

4.3. POSITIONNEMENT DES MESURES

Les tomographies de résistivité et sismique ont été positionnées avec un GPS Trimble Geo7X associé à une antenne externe de type Zéphyr. Ce récepteur permet de capter les satellites GPS ainsi que les satellites GLONASS (en moyenne entre 14 et 20 satellites). Les valeurs obtenues ont été corrigées en post-traitement, à l'aide des éphémérides de l'IGN. Ce post-traitement a permis d'aboutir à une précision centimétrique en X, Y (dans les conditions optimales d'utilisation).

La précision sur les levés altimétriques (Z) est fonction de la couverture végétale et du relief. Les valeurs de Z, affectées d'une précision anormalement élevée, et/ou qui paraissaient aberrantes (par rapport au MNT et par rapport aux observations de terrain), ont été rejetées, et n'ont donc pas été prises en compte dans la construction du profil topographique. La précision finale sur Z est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres en absolu.

Le système de référence géographique est le Lambert 93.

5. Résultats

5.1. RAMÈLE

Les coupes de résistivité des profils réalisés sur la verre de Ramèle (RA1 à RA6) sont présentées en figure 9 et figure 10. Pour simplifier leur lecture vis-à-vis de l'interprétation, les anomalies de chargeabilité supérieure à 11mV/V y sont superposées. La valeur de ce seuil est basée sur l'analyse du « bruit de fond » de polarisation provoquée observé sur l'ensemble de la zone. Cette valeur est en outre cohérente avec les valeurs habituellement observées pour la détection de sulfures, en domaine minier notamment. Les résultats complets de chargeabilité figurent quant à eux sur les figure 11 et figure 12. Sur ces figures sont détaillés les ensembles résistants et conducteurs tels que décrits ci-après. Ce sont ces figures qui sont utilisées pour établir une interprétation des résultats.

Pour faciliter la compréhension globale des résultats et voir comment ceux-ci s'agencent d'un profil à l'autre, les résultats de ces profils 2D ont été projetés et visualisés ensemble en 3D dans le logiciel Paraview (figure 8). La conversion des résultats issus du logiciel Res2DInv vers des fichiers lisibles dans Paraview est effectuée à l'aide d'un script développé au BRGM.

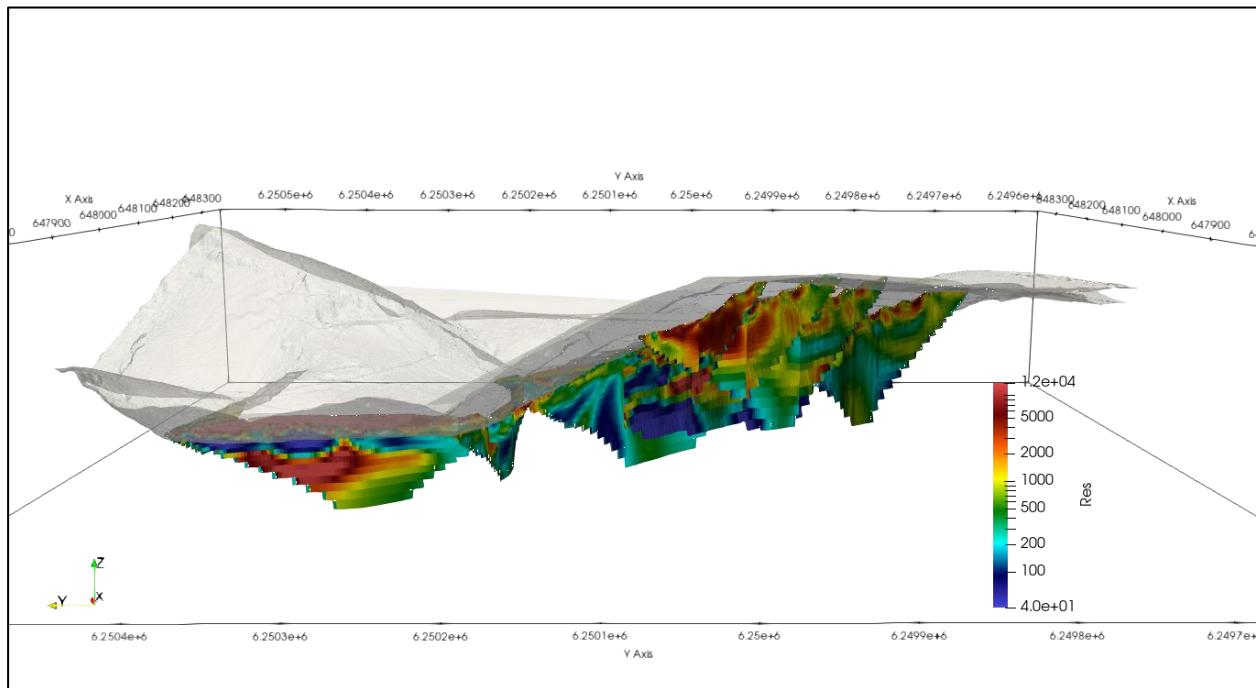


Figure 8 : Visualisation des coupes de résistivité inversées en 3D, superposées de la surface topographique, issue du logiciel Paraview. Vue depuis l'ouest.

5.1.1. Description des résultats des mesures de résistivité et de chargeabilité

Les profils RA1 à RA4 sont implantés sur la verre de Ramèle, dans le sens de la pente (direction SW-NE, voir carte de la figure 5). Les profils RA5 et RA6 les recoupent, en traversant la verre d'un bord à l'autre (orientés NW-SE).

a) Profil RA1

D'après la carte géologique, le profil RA1 est implanté sur les calcaires dolomitiques pour son extrémité ouest, puis sur les séries gréso-pélitiques au-delà de l'abscisse 140 m. Les résultats de résistivité mettent en évidence la succession d'horizons géo-électriques suivante, de bas en haut :

- Un substratum conducteur C1-C1' dont le toit se situe à une profondeur de 50 m en haut de la verre, pour atteindre 10 m environ en pied de verre. Cet horizon est séparé en 2 compartiments par une discontinuité verticale D1, située à l'aplomb de l'abscisse 165 du profil, et marquée par une augmentation de la résistivité (environ 500 Ω.m au niveau de D1). Au sud-ouest, le compartiment C1' a une résistivité de l'ordre de 200 Ω.m ; en pied de verre (à l'est) le compartiment C1 a une résistivité plus faible, environ 100 Ω.m.
- Il est surmonté d'un horizon résistant au sein duquel on distinguera 3 compartiments :
 - o R1'', en haut de verre, d'une épaisseur de 20-25m, dont le toit se situe à une profondeur de 35 à 22 m, décroissant progressivement à mesure qu'on s'approche du pied de verre. Sa résistivité est de l'ordre de 700 Ω.m, et on l'observe de l'extrême ouest du profil jusqu'à la discontinuité D1.
 - o R1', dans le prolongement de R1'' à l'est de D1, a des propriétés géoélectriques et géométriques semblables à R1''. Son toit se situe à une profondeur décroissante vers l'est, de 10 à 3 m environ. Il s'étend des abscisses 180 à 250 m.
 - o En pied de verre, le résistant R1 a des propriétés assez différentes de R1' et R1''. Sa résistivité est plus faible (200-250 Ω.m) et son épaisseur n'excède pas 5 m. Cette résistivité plus faible en apparence que R1' et R1'' pourrait être un effet de la faible épaisseur de cet horizon au regard de la résolution de la méthode, et de la position de R1, intercalé entre deux horizons conducteurs (C1 et C2).
- R1 est directement surmonté par un compartiment plus conducteur, C2 (100 Ω.m environ), d'une épaisseur de 5 à 10 m, qui s'étend, comme R1, de l'abscisse 250 m jusqu'au pied de la verre.
- A l'image de la combinaison R1/C2, l'horizon R1'' est surmonté du conducteur C2'. Sa résistivité est de l'ordre de 200-250 Ω.m, et son épaisseur de 10 à 18 m.
- En surface, l'horizon résistant R2 surmonte l'ensemble, avec une épaisseur variant de quelques mètres à une quinzaine de mètres. Il s'agit d'un horizon plutôt hétérogène (probablement en lien avec l'hétérogénéité des matériaux qui le composent) dont la résistivité est globalement comprise entre 1000 et 4000 Ω.m (exception faite de quelques anomalies conductrices très localisées (e.g. à l'abscisse 195 m).
- La chargeabilité met en évidence plusieurs anomalies ($M>11mV/V$), toutes associées à l'horizon superficiel R2. Il est à noter que la position de l'anomalie située entre les abscisses 140 et 185 m correspond également à la position d'un ancien bâtiment de l'usine (figure 5).
- La position de la discontinuité D1, bien qu'elle ne montre pas une adéquation parfaite, pourrait correspondre au contact entre les calcaires dolomitiques à l'ouest et les séries gréso-pélitique à l'est. Cela pourrait expliquer la différence de résistivité entre C1 et C1' de part et d'autre de D1.

b) Profil RA2

D'après la carte géologique, le profil RA2 est essentiellement implanté sur les calcaires dolomitiques. Seuls les vingt derniers mètres à l'est se situent sur les alternances gréso-

carbonatées signalées le long du Grésillou. Les résultats de résistivité mettent en évidence la succession d'horizons géo-électriques suivante, de bas en haut :

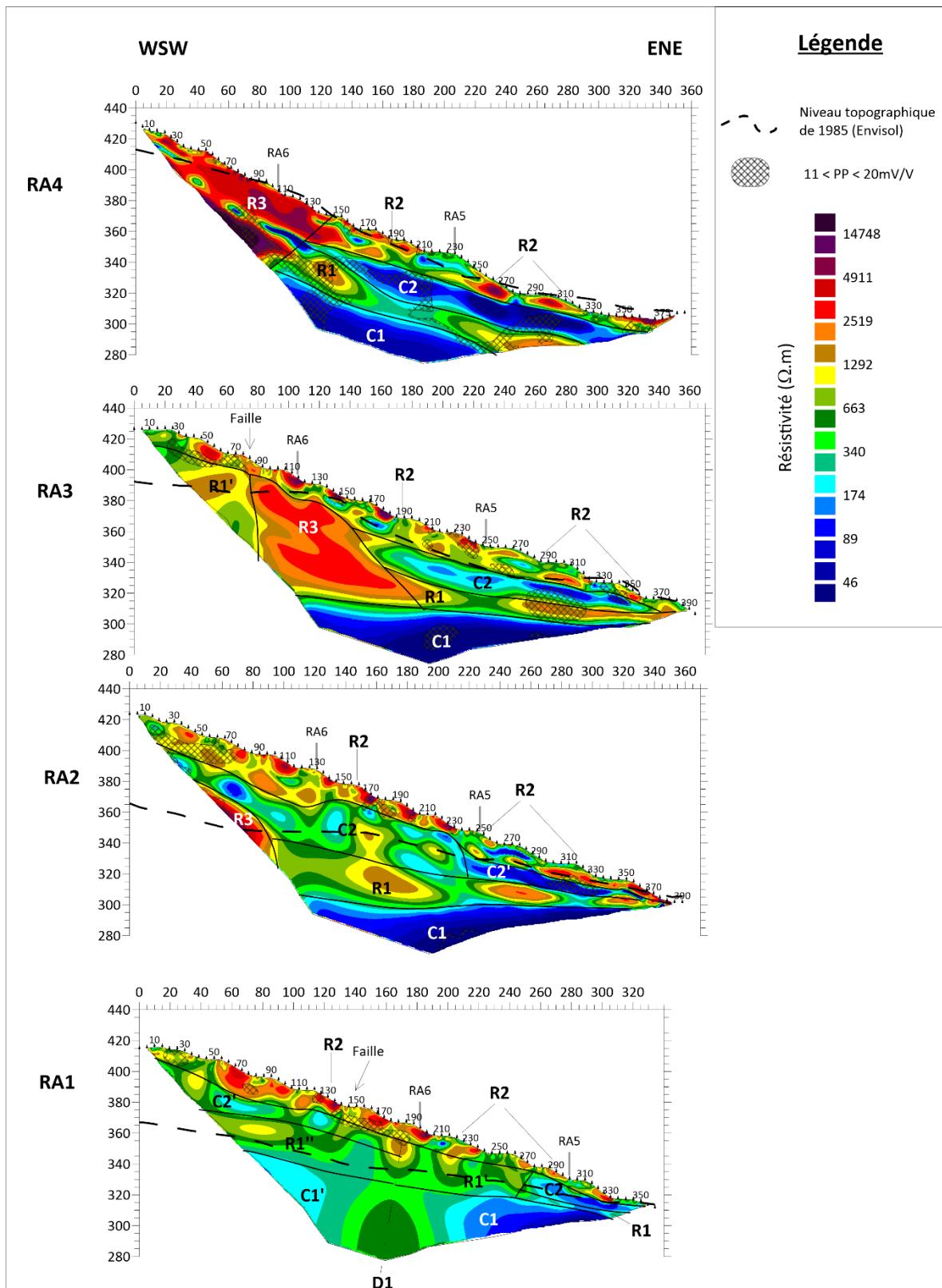


Figure 9 : Résultats des mesures de résistivité pour les profils RA1 à RA4.

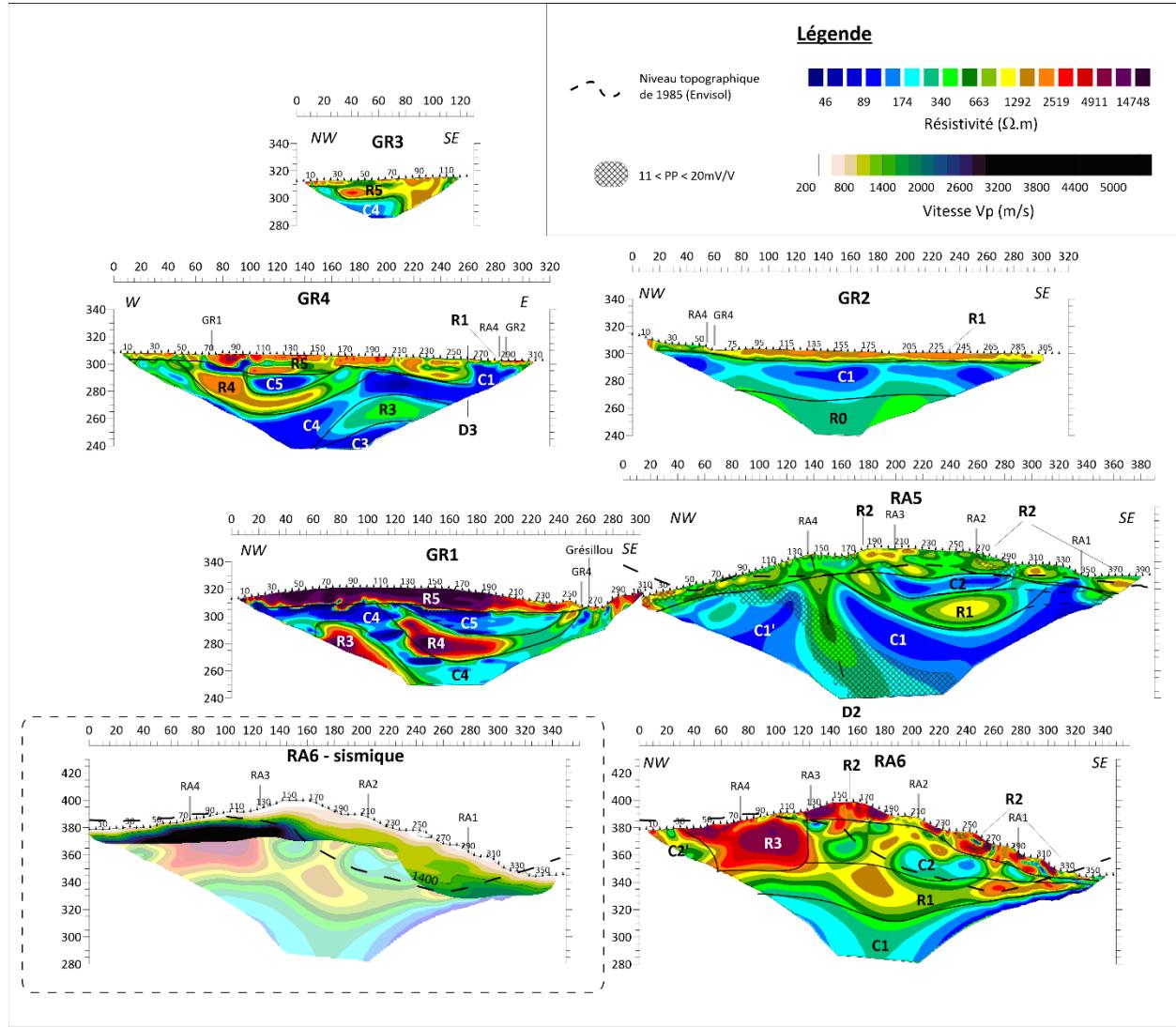


Figure 10 : Résultats des mesures de résistivité pour les profils RA5, RA6, et GR1 à GR4, et résultats des mesures sismiques réalisées sur RA6.

- Un substratum conducteur C1 dont le toit est sub-horizontal et se situe à une altitude de 300 m environ, soit une profondeur supérieure à 80 m au niveau de l'abscisse 110 m, qui diminue pour n'atteindre que quelques mètres en pied de verse. Sa résistivité moyenne est inférieure à 100 Ω.m.
- Il est surmonté d'un horizon résistant R1 dont l'épaisseur est de l'ordre de 35 m à hauteur de l'abscisse 110 m, et diminue à mesure que l'on s'approche du pied de verse, pour n'atteindre que 5 m environ à l'abscisse 370 m. Sa résistivité est comprise entre 700 et 1500 Ω.m environ.
- R1 est directement surmonté par un compartiment plus conducteur C2-C2', sur l'ensemble de la coupe. C2 dans la partie amont, présente des résistivités assez hétérogènes entre 50 et presque 400 Ω.m. Dans la partie aval (au-delà de l'abscisse 240 m), l'horizon C2' présente des résistivités plus homogènes et faibles (50-100 Ω.m), sur une épaisseur inférieure à 15 m, qui tend à diminuer vers l'aval de la verse. Il n'est plus détecté au-delà de l'abscisse 365 m.

- En surface, l'horizon résistant R2 surmonte l'ensemble, avec une épaisseur variant de quelques mètres à une vingtaine de mètres dans la partie amont. Il s'agit d'un horizon plutôt hétérogène (probablement en lien avec l'hétérogénéité des matériaux qui le composent) dont la résistivité est globalement comprise entre 1000 et 4000 Ω.m. Les zones de plus forte résistivité sont généralement associées aux pieds de talus. A noter qu'une anomalie conductrice, d'une épaisseur de 5 m environ, est observée au sein de cet horizon, entre les abscisses 255 et 285 m ; son toit se situe à une profondeur de 2 à 5 m.
- Dans la partie amont, un résistant R3 ($\rho > 4000 \Omega.m$) est mis en évidence mais mal caractérisé car trop proche de l'extrémité ouest du profil.

La chargeabilité met en évidence plusieurs anomalies, essentiellement associées à l'horizon superficiel R2, mais également au conducteur sous-jacent C2' (abscisses 300-330 m).

c) Profil RA3

D'après la carte géologique, le profil RA3 est essentiellement implanté sur les calcaires dolomitiques (abscisses 0 à 340 m). Son extrémité est recoupe ensuite les formations calcaires puis les alternances gréso-carbonatées. Les résultats de résistivité mettent en évidence la succession d'horizons géo-électriques suivants, de bas en haut :

- Un substratum conducteur C1 dont le toit est sub-horizontal et se situe à une altitude de 300 à 310 m environ, soit une profondeur de l'ordre de 80 m au niveau de l'abscisse 110 m, qui diminue pour n'atteindre que 20 mètres à l'abscisse 365 m. Sa résistivité moyenne est inférieure à 100 Ω.m.
- Il est surmonté, sur la partie est du profil, d'un horizon résistant R1 dont l'épaisseur est comprise entre 10 et 20 m. Sa résistivité est comprise entre 700 et 1500 Ω.m environ.
- R1 est directement surmonté par un compartiment plus conducteur C2 que l'on observe entre les abscisses 180 et 360 m. Son épaisseur est de l'ordre de 10 à 15 m et sa résistivité est inférieure à 200 Ω.m.
- Un compartiment résistant R3 dont l'épaisseur dépasse les 60 m, surmonte C1 et se trouve au contact des horizons R1 et C2 à l'ouest entre les abscisses 80 et 170 m. Sa résistivité est élevée (2000-3000 Ω.m) et relativement homogène. Sa limite latérale en amont (au niveau de l'abscisse 80 m), correspond à la présence d'une faille, signalée sur la carte géologique (Berger, et al., 1993).
- En surface, l'horizon résistant R2 surmonte l'ensemble, avec une épaisseur variant de quelques mètres à une vingtaine de mètres. Il s'agit d'un horizon plutôt hétérogène dont la résistivité est globalement comprise entre 1000 et 4000 Ω.m. Les zones de plus forte résistivité sont généralement associées aux pieds de talus.
- Dans la partie amont (jusqu'à l'abscisse 85 m), un résistant R1' ($700 < \rho < 2000 \Omega.m$) se trouve au contact de R3. Sa géométrie n'est pas bien caractérisée du fait de la profondeur d'investigation insuffisante.

La chargeabilité met en évidence plusieurs anomalies ($M > 11 \text{mV/V}$). La majorité de celle-ci se trouvent au sein de R2. Une anomalie d'assez grande dimension cependant (40 m d'extension latérale et 20 m d'épaisseur), se trouve à une profondeur plus importante (supérieur à 15 m), associée à R1 et C2, à l'aplomb de l'abscisse 280-320 m.

La chargeabilité en profondeur est globalement plus élevée que sur les profils RA1 et RA2, mais cela est vraisemblablement lié à la géologie (voir description de RA4)

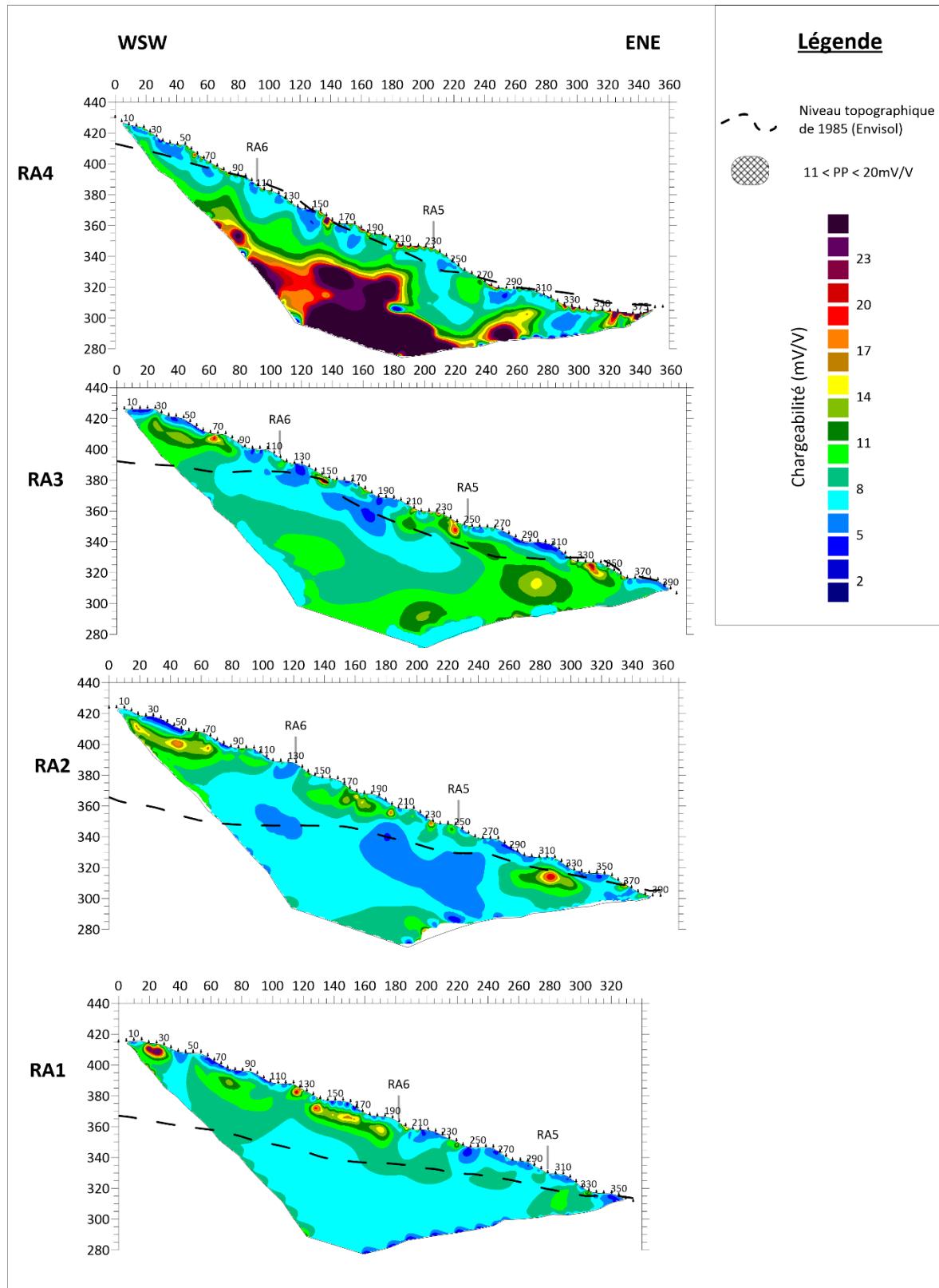


Figure 11 : Résultats des mesures de chargeabilité pour les profils RA1 à RA4.

d) Profil RA4

D'après la carte géologique, le profil RA4 recoupe plusieurs contacts géologiques. Le début du profil se trouve sur les calcaires décrits en haut de la verre. Il recoupe ensuite les calcaires dolomitiques (abscisses 25 à 165 m), les calcaires (abscisses 160 à 280 m), puis repose sur les schistes violets et les schistes sombres entre les abscisses 280 et 350 m. Son extrémité est située sur les alternances gréso-carbonatées. Les résultats de résistivité mettent en évidence la succession d'horizons géo-électriques suivante, de bas en haut :

- Un substratum conducteur C1 dont le toit suit la surface topographique, à une profondeur de l'ordre de 50 m. Sa résistivité moyenne est inférieure à 100 Ω.m
- Il est surmonté, sur la partie est du profil (au-delà de l'abscisse 120 m), d'un horizon résistant R1 d'une épaisseur de 15 à 20 m et dont la résistivité est comprise entre 400 et 1500 Ω.m environ.
- R1 est directement surmonté par un horizon conducteur C2 dont l'épaisseur est de l'ordre de 10-15 m et la résistivité inférieure à 200 Ω.m.
- En surface, l'horizon résistant hétérogène R2 surmonte C2, avec une épaisseur ne dépassant pas une vingtaine de mètres. Sa résistivité est globalement comprise entre 1000 et 4000 Ω.m. Quelques zones conductrices très localisées y apparaissent.
- A l'extrémité ouest du profil (abscisse 0 à 150 m) on observe un ensemble résistant R3, dont le mur n'est pas atteint par les investigations. Sa résistivité est élevée ($\rho > 3000 \Omega.m$). Au sein même de ce résistant, plusieurs anomalies très conductrices ($\rho < 50 \Omega.m$), de faible dimension, apparaissent. Celles-ci semblent être dans la continuité de C2.

La chargeabilité montre quelques anomalies superficielles, de faible dimension, le long du profil. La plus importante se situe à l'extrémité est du profil, en bas de pente (au-delà de l'abscisse 355 m).

La chargeabilité en profondeur est bien supérieure à ce qui a pu être observé sur les profils RA1 à RA3 ($20 < M < 115 \text{ mV/V}$). Ces valeurs sont vraisemblablement à mettre en lien avec la présence des schistes X signalés un peu plus au nord sur la carte géologique, qui présentent un pendage vers le sud-est, et sont décrits comme potentiellement « imprégnés de sulfures disséminés » (ENVISOL, 2020). Les mesures en profondeurs, qui passent par l'utilisation de dipôles plus grands, sont plus sensibles aux effets latéraux, et peuvent être influencées par la présence de ces schistes même s'ils ne se trouvent pas directement à l'aplomb du profil.

e) Profil RA5

D'après la carte géologique, ce profil qui traverse la verre du nord-ouest au sud-est, prend son origine sur les schistes X jusqu'à l'abscisse 100 m. Il recoupe ensuite les formations calcaires, les calcaires dolomitiques et se termine au sud-est sur les séries gréso-pélitiques (à partir de l'abscisse 285 m). Les résultats de résistivité mettent en évidence la succession d'horizons géo-électriques suivante, de bas en haut :

- Un substratum conducteur C1-C1', scindé en deux, au niveau de l'abscisse 150 m, par une discontinuité sub-verticale D2 marquée par une résistivité plus élevée. La résistivité de ce substratum est inférieure à 100 Ω.m et l'altitude de son toit est comprise entre 290 et 325 m.
- Entre les abscisses 170 et 320 m, C1 est surmonté d'un résistant R1 dont l'épaisseur moyenne est de l'ordre de 20 m et la résistivité comprise entre 500 et 1500 Ω.m.

- Juste au-dessus de R1, le conducteur C2, présent entre les abscisses 200 et 290 m, est caractérisé par des résistivités inférieures à 150 $\Omega\cdot\text{m}$ sur une épaisseur de 10 à 15 m.
- De par sa géométrie, l'ensemble R1-C2 pourrait être associé au remplissage d'une dépression dans le substratum C1. Cependant, on peut également poser l'hypothèse d'une continuité (et d'un amincissement) de R1 et C2 vers le sud-est (en pointillés fins sur la figure), comme cela est suggéré par les résultats observés sur le profil RA1. La non-détection de ces horizons pourrait être due à une épaisseur de R1 trop faible localement, aux vues de la résolution des mesures à cette profondeur, ou à un effet 3D lié à la géométrie complexe du site. Les résultats du sondage S15 devraient permettre de trancher sur ces 2 propositions d'interprétation ; c'est pour l'instant la seconde proposition qui est représentée sur les figures.
- En surface, l'horizon R2 présente des résistivités assez hétérogènes et une épaisseur ne dépassant pas une vingtaine de mètres. Sa résistivité est globalement comprise entre 1000 et 2500 $\Omega\cdot\text{m}$.

La chargeabilité montre quelques anomalies superficielles, de faible dimension, au sein de R2 ($M=14\text{mV/V}$ environ). Elle confirme également la présence d'une formation de chargeabilité élevée (supérieure à 65 mV/V , vraisemblablement les schistes X) sur la partie nord-ouest du profil, avec un contact sub-vertical situé à hauteur de l'abscisse 140 m, c'est-à-dire à l'aplomb du profil RA4. Ce contact peut être associé à la présence de la discontinuité D2.

f) Profil RA6

D'après la carte géologique, ce profil qui traverse la verre du nord-ouest au sud-est, prend son origine sur les formations calcaires. Il traverse ensuite les calcaires dolomitiques (abscisses 40 à 245 m) et se termine au sud-est sur les séries gréso-pélitiques. Les résultats de résistivité mettent en évidence la succession d'horizons géo-électriques suivante, de bas en haut :

- Un substratum conducteur C1 qui est ici assez mal caractérisé car en limite de profondeur d'investigation (l'altitude de ce profil est en effet supérieure à celle de RA5). Sa résistivité est inférieure à 300 $\Omega\cdot\text{m}$ et l'altitude de son toit est comprise entre 310 et 330 m environ.
- C1 est surmonté d'un résistant R1 dont l'épaisseur est comprise entre 5 et 30 m et tend à être plus faible vers l'extrémité sud-est du profil. Sa résistivité est globalement comprise entre 700 et 1500 $\Omega\cdot\text{m}$.
- Juste au-dessus de R1, le conducteur C2 est présent entre les abscisses 125 m et l'extrémité sud-est du profil. Il présente des résistivités assez hétérogènes mais généralement inférieures à 400 $\Omega\cdot\text{m}$, sur une épaisseur allant de 30 m entre les abscisses 125 et 220 m, à seulement quelques mètres en bout de profil.
- En surface, l'horizon R2 présente des résistivités assez hétérogènes, et une épaisseur n'excédant pas 15 m. Sa résistivité est globalement comprise entre 1500 et 4000 $\Omega\cdot\text{m}$. On y observe plusieurs anomalies conductrices ($\rho < 50 \Omega\cdot\text{m}$), de faible épaisseur (3 m environ), dont la forme allongée suit la topographie du terrain en surface.
- Un résistant R3 est également présent en position sub-affleurante, entre les abscisses 30 et 125 m. Son épaisseur est de 35 m environ.

La chargeabilité met en évidence quelques anomalies superficielles de chargeabilité, de faibles dimensions, au sein de R2 ($M=14\text{mV/V}$ environ). Elles sont essentiellement présentes entre les abscisses 240 et 270 m.

5.1.2. Calage des mesures électriques avec le profil sismique (profil RA6)

Des mesures sismiques ont été réalisées sur le profil RA6, dans le but d'obtenir une information de calage sur la profondeur de l'interface entre les déblais et le terrain sous-jacent, au sein duquel on peut raisonnablement anticiper des vitesses sismiques plus élevées que dans les déblais. Pour maximiser les chances d'avoir une interface à une profondeur suffisamment faible pour qu'elle puisse être détectée, cette méthode a été appliquée sur l'un des 2 profils transverses. Le profil RA6 a été sélectionné car plus facilement accessible. Les conditions d'accès au site ne permettaient pas d'utiliser une source autre qu'une double masse, limitant ainsi la profondeur d'investigation (20-30 m). Des résultats en profondeur pourraient être obtenus, à condition de mettre en œuvre une source plus puissante, ce qui nécessiterait de pouvoir faire circuler un véhicule sur le site (compliqué *a priori*), ou de pouvoir utiliser de l'explosif (irréalisable dans les délais autorisés pour cette intervention).

Les résultats de ce profil sismique montrent un fort contraste proche de la surface et une zone de vitesses sismiques élevées ($V_p > 3000$ m/s) sur la partie nord-ouest du profil (abscisses 0 à 160 m environ). Ces vitesses élevées correspondent au résistant R3 mis en évidence sur la coupe de résistivité du même profil.

Au-delà de l'abscisse 160 m, l'imagerie sismique ne met pas en évidence de contraste de vitesse conséquent, qui pourrait représenter l'interface entre les déblais et le terrain naturel. Cependant, si l'on se fie au niveau topographique initial (information qui n'était malheureusement pas disponible avant les acquisitions), il est probable que cette interface se situe au-delà de la profondeur d'investigation de la sismique sur la majeure partie du profil. L'augmentation de la vitesse à l'extrême sud-est du profil (à partir de l'abscisse 280 m) pourrait correspondre au terrain naturel. Cela devra être confirmé par le sondage S17.

5.2. GRESILLOU

Quatre profils (GR1 à GR4) ont été réalisés le long du Grésillou, du pied de la verre de Nartau (GR3) jusqu'à l'aval de la verre Ramèle (GR2). L'objectif était ici de vérifier la présence d'infiltration d'eau chargée en arsenic qui pourraient se traduire par des anomalies conductrices. Les mesures de chargeabilité n'apportent rien dans ce contexte. Elles ont néanmoins été maintenues pour les profils RA1, RA3 et RA4, et apportent un complément d'information pour l'interprétation géologique uniquement, permettant de différencier les schistes des autres formations non métamorphosées, ce qui ne peut être fait avec le paramètre résistivité uniquement.

Les coupes de résistivité et de chargeabilité des profils GR1 à GR4 sont présentées en figure 10 et figure 12 respectivement. Comme évoqué précédemment (cf. 3.2 - Volume des travaux), la chargeabilité pour les profils GR1, GR3 et GR4 a été mesurée car le temps le permettait, mais ce paramètre n'apporte pas d'information sur la problématique pollution. C'est pourquoi les résultats de chargeabilité de ces 3 profils ne sont pas commentés ici.

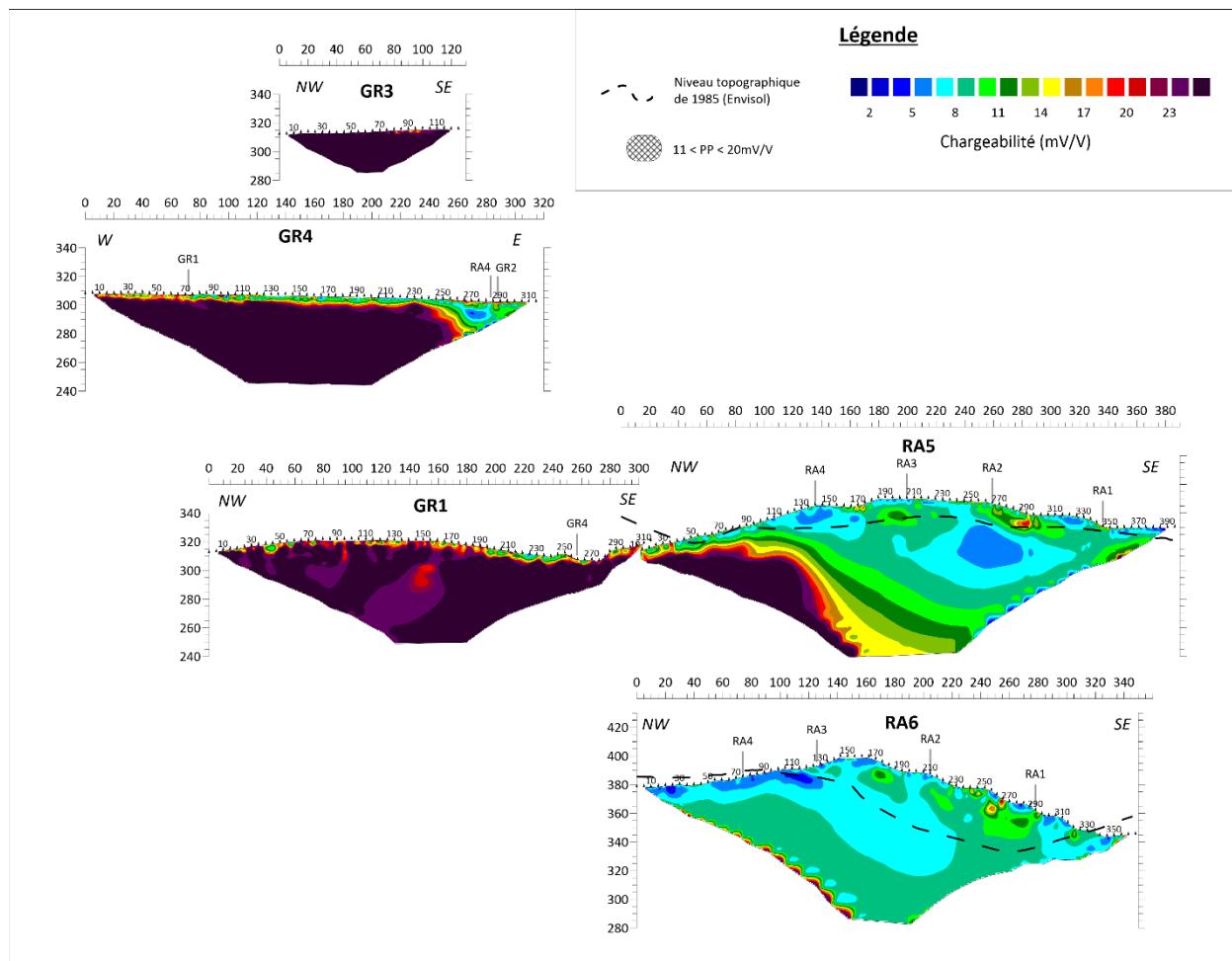


Figure 12 : Résultats des mesures de chargeabilité pour les profils RA5, RA6, et GR1 à GR4.

a) Profil GR1

Le profil GR1 est positionné dans le prolongement de RA5, plus au nord, le long d'un chemin qui longe le Grésillou sur sa rive gauche. Il traverse la rivière au niveau de l'abscisse 265 m. D'après la carte géologique, il repose entièrement sur les schistes violets et schistes sombres (schistes X). Les résultats de résistivité mettent en évidence la succession d'horizons géo-électriques suivante, dont l'apparence laisse suggérer un plissement conséquent :

- Un résistant R3 dont la géométrie n'est pas entièrement caractérisée par les investigations, mais qui semble redressé. Sa résistivité est de l'ordre de 5000 Ω.m.
- Un horizon conducteur C4, dont on peut évaluer l'épaisseur à 15 m environ. Il semble former un synclinal sur la partie SE et un anticinal sur la partie NW. Sa résistivité est comprise entre 50 et 200 Ω.m.
- Un horizon résistant R4, qui surmonte C4 entre les abscisses 110 et 260 m, et dont la résistivité est de l'ordre de 5000 Ω.m.
- Un conducteur C5, au-dessus de R4 et dont l'épaisseur maximale est de 15 m. Sa résistivité est de l'ordre de 50 à 200 Ω.m.
- Un horizon superficiel résistant R5, d'une épaisseur moyenne de 10 m et dont la résistivité est de l'ordre de 3000 à 5000 Ω.m.

b) Profil GR2

Le profil GR2, de direction NNE-SSW est implanté directement au pied de la verre Ramèle, il recoupe Grésillou aux abscisses 72 et 193 m. D'après la carte géologique, il est implanté essentiellement sur les alternances gréso-carbonatées et les séries gréso-pélitiques à son extrémité SSW.

Les résultats de résistivité mettent en évidence une succession d'horizons géo-électriques tabulaires que l'on peut décrire de la manière suivante :

- Un substratum résistant R0 dont la profondeur d'investigation ne permet pas de caractériser complètement la géométrie. Le toit de cette formation, sub-horizontal, se situe à une altitude moyenne de 270 m, et sa résistivité est supérieure à 300 Ω.m.
- Un horizon conducteur C1, d'une épaisseur moyenne de 25 m, présentant des résistivités comprises entre 50 et 200 Ω.m.
- Un horizon superficiel résistant R1, peu épais (moins de 8 m), et dont la résistivité est globalement de l'ordre de 2000 Ω.m, excepté au nord du Grésillou (abscisses 0 à 70 m) où la résistivité en surface est un peu plus faible (500 Ω.m environ).

Ces résultats permettent un calage intéressant pour l'interprétation des profils réalisés sur la verre Ramèle (paragraphe 6.1), car ils montrent clairement que les horizons C1 et R1 rencontrés à l'aplomb de la verre (profils RA1 à RA6) correspondent au terrain naturel.

c) Profil GR3

Le profil GR3, de direction ENE-WSW ne mesure que 125 m de long. Il est implanté directement au pied de la verre Nartau, et la morphologie du terrain ne permettait pas de le prolonger davantage. Par conséquent, sa profondeur d'investigation est limitée à 28 m au maximum. D'après la carte géologique il est entièrement implanté sur les schistes violets et schistes sombres.

Les résultats de résistivité mettent en évidence la succession d'horizons géo-électriques suivante :

- Un horizon conducteur C4 en profondeur, d'une résistivité comprise entre 50 et 200 Ω.m, et dont le toit se situe à une altitude de 300 m environ. Bien que cela soit assez mal caractérisé par les investigations, il y a vraisemblablement une remontée de ce conducteur entre les abscisses 10 et 30 m, jusqu'à une profondeur de quelques mètres seulement.
- Un horizon superficiel résistant R5, situé juste au-dessus de C4, dont l'épaisseur varie de 5 m en début de profil, à 15 m entre les abscisses 30 et 70 m. Au-delà de l'abscisse 70 m, le mur n'est pas atteint, et l'épaisseur de R5 est vraisemblablement supérieure à 25 m.

d) Profil GR4

Le profil GR4 a une orientation est-ouest, et est situé presque uniquement en rive gauche du Grésillou, qu'il ne recoupe qu'une fois au niveau de l'abscisse 10 m. D'après la carte géologique, il est implanté sur les schistes X (abscisses 0 à 260 m), et son extrémité est reposé sur les alternances gréso-carbonatées. A l'image de ce qui est observé sur le profil GR1, les résultats de résistivité mettent en évidence la succession d'horizons géo-électriques suivants, dont l'apparence suggère également un plissement conséquent :

- Une succession d'horizons conducteur-résistant-conducteur, notée C3-R3-C4-R4-C5, qui forme, à l'est, une structure anticlinale, dont l'axe apparent serait à l'aplomb de l'abscisse 200 m, puis, plus à l'ouest, un synclinal centré sur l'abscisse 105 m. Cette alternance est observée à l'ouest de la discontinuité D2, située à l'abscisse 260 m.
- C3, dont la géométrie n'est pas bien caractérisée par les investigations (faible résolution des données en profondeur). Sa résistivité est de l'ordre de 100 Ω.m.
- R3 présente une épaisseur moyenne de 15 m, et une résistivité de l'ordre de 300- 400 Ω.m. Il est observé entre les abscisses 140 et 250 m.
- C4 a une épaisseur moyenne de 15-20 m, et une résistivité de 100 à 200 Ω.m.
- R4, dont l'épaisseur est de 15-20 m également, présente des résistivités comprises entre 500 à 1500 Ω.m.
- Au-dessus de R4, entre les abscisses 100 et 145 m, le conducteur C5, dont la résistivité est de 100 Ω.m, présente une épaisseur de 10 à 15 m.
- Un horizon superficiel résistant R5 relativement hétérogène, d'une épaisseur moyenne de 10 m et dont la résistivité est comprise entre 1000 à 5000 Ω.m, surmonte l'ensemble de la coupe entre les abscisses 0 et 260 m.
- A l'est de la discontinuité D3 (contact géologique mentionné plus haut), on retrouve le conducteur C1 déjà observé sur la coupe GR2, surmonté du résistant superficiel R1 dont l'épaisseur, ici, ne dépasse pas 5 m.

6. Interprétation et recommandations

La géologie de la zone et notamment la présence de nombreuses failles et contacts géologiques, ainsi que d'une déformation importante (plissements observés sur GR1 et GR4), induit une géométrie 3D assez complexe des structures. En outre, les signatures géophysiques des différents faciès présents ne permettent pas toujours de les différencier clairement.

Dans ce contexte, il est délicat de proposer, uniquement sur la base des résultats géophysiques, une interprétation univoque, bien que visualisation en 3D des résultats des différents profils, grâce au logiciel Paraview, aide en ce sens.

Pour compléter la compréhension du site, et affiner certains aspects des interprétations géophysiques, des sondages de reconnaissance sont préconisés. La géophysique permet de proposer des implantations optimisées de ces sondages, afin d'apporter une information la plus complète et pertinente possible. Le tableau 2 regroupe 19 implantations de forages et précise les objectifs de chacun d'entre eux. La localisation des sondages recommandés est présentée sur la figure 15. La position et la profondeur de ces sondages sont également représentées sur les coupes géoélectriques correspondantes (figure 13 et figure 14).

La localisation des forages de reconnaissance préconisés ne saurait être réalisée sur la simple base de la carte fournie à la figure 15. L'implantation devra être réalisée à partir des coordonnées (Lambert 93) fournies dans le tableau 2 et grâce à l'utilisation d'un GPS différentiel avec correction des données en temps réel.

6.1. RAMÈLE

Pour guider l'interprétation des résultats sur Ramèle, la topographie de 1985 (avant recouvrement de l'ancienne usine), digitalisée par ENVISOL (ENVISOL, 2020) a été reportée sur les coupes RA1 à RA6 (figure 13 et figure 14). Il n'est pas observé de lien direct et systématique entre les horizons géoélectriques et la surface topographique digitalisée. Il est possible que les contrastes de résistivité soient essentiellement contrôlés par des phénomènes indépendants de l'origine des matériaux (antérieure ou postérieure à la mise en place de la verse). Des phénomènes d'infiltrations préférentielles (notamment liées à la présence de galeries) ou encore la nature variable des stériles utilisés lors des phases successives de la mise en place de la verse de 1986 à 1989 (ENVISOL, 2020), pourraient expliquer le manque de cohérence entre interfaces géoélectriques et ancienne surface topographique. De plus, il convient de garder à l'esprit que la topographie digitalisée n'a qu'une précision relative, qui peut induire des biais dans l'interprétation. Ceci est inhérent à un tel exercice et cette information, précieuse dans l'étude de la verse, doit être utilisée en gardant à l'esprit que sa précision ne peut pas être du même ordre que celle du MNT réalisé en 2019.

Les figure 13 et figure 14 présentent les résultats issus des investigations géophysiques, sur lesquels sont superposés les éléments d'interprétation en terme de probabilité de présence de remblai. La proposition des sondages de reconnaissance préconisés y est également indiquée.

Dans l'état actuel des connaissances, on peut raisonnablement conclure que l'horizon superficiel R2, observé sur l'ensemble des profils RA1 à RA6 est composé des déblais de la MCO. Son caractère très hétérogène et son épaisseur ne dépassant pas 25 m sont entièrement cohérents avec cette hypothèse. Une estimation du volume de R2 représenterait ainsi le volume minimum des déblais constituant la verse de Ramèle.

Aux vues de la topographie initiale telle qu'elle a été digitalisée, il subsiste cependant un doute sur la présence de déblais au sein de l'horizon C2, qui est parfois corrélé avec des anomalies de chargeabilité. Les résultats de la campagne de forages (notamment S1, S2, S4, S6, S7, S10, S13, S14 et S17) permettraient de conclure sur un éventuel lien entre C2 et les déblais, et d'affiner l'évaluation des épaisseurs de déblais sur chaque profil.

En outre, on observe que des anomalies de forte résistivité en surface sont souvent localisées au niveau des pieds de talus. Cela semble être lié aux matériaux utilisés pour la construction des terrasses, et à leur agencement. Il pourrait cependant s'agir d'artefacts de mesure causés par les variations abruptes de la topographie au niveau des talus, qui peuvent induire un biais dans la détermination de la résistivité apparente (Günther, Rücker, & Spitzer, 2006). Le processus d'inversion a alors tendance à contrebalancer la présence de résistants ponctuels par un conducteur au contact de celui-ci. Il est ainsi possible que certaines anomalies conductrices présentes directement sous les résistants superficiels (au niveau de RA3-145 m et RA3-180 m notamment) soient uniquement liées à des artefacts d'inversion.

Ce ne semble cependant pas être le cas d'autres anomalies ponctuelles conductrices, notamment au niveau de RA1-210m, RA2-170m, RA3-275m ou encore RA4-210m dont les signatures sont différentes. Il pourrait ici s'agir d'infiltrations préférentielles en pied de talus, causées par les matériaux très grossiers présents à ces endroits, et les « rigoles » qui s'y sont formées afin de retenir les blocs qui descendent le long de la pente. Contrôler ces anomalies par forage semble délicat car il faudrait pour cela planter une foreuse en pleine pente. Ils ne font donc pas partie des recommandations du tableau 2. Si cela semble réalisable techniquement, ces contrôles devraient tout de même être encouragés.

Les résultats du profil GR2, situé en pied de verset sur le terrain naturel, offrent un excellent calage et permettent d'affirmer que les horizons C1 et R1 sont associés au terrain naturel, et donc que les déblais ne peuvent se trouver qu'au sein des horizons R2 et potentiellement C2.

Le résistant R3, observé sur les profils RA2, RA3, RA4 et RA6, qui présente, en outre, des vitesses sismiques élevées, peut être associé à un éperon rocheux, et la présence de déblais au sein de cet ensemble est a priori exclue. Les sondages S9, S12 et S16 devraient confirmer cette conclusion, et nous renseigner sur la nature des anomalies conductrices présentes au sein de R3, que l'on observe sur le profil RA4.

Au sein des horizons R2 et C2 suspectés de représenter les déblais, plusieurs anomalies de polarisation provoquée suggèrent la présence de minéraux polarisables tels que les sulfures métalliques (pyrite et arsénopyrite dans le présent contexte), et vont permettre d'orienter les investigations complémentaires en ce sens. Il est à noter que les anciennes structures de l'usine (métalliques notamment) pourraient induire également des réponses en polarisation provoquée. La position de l'anomalie PP présente à l'aplomb des abscisses 140 à 185 m sur le profil RA1 par exemple, coïncide avec l'emplacement d'un ancien bâtiment de l'usine. Sa profondeur cependant, ne correspond pas au niveau topographique supposé avant l'ajout des déblais. Bien qu'il soit possible qu'une partie des anomalies de chargeabilité identifiées soient associées à d'anciennes structures métalliques laissées en place avant le recouvrement du site, la nature de la majorité d'entre elles doit être confirmée par les sondages (S1, S2, S4, S5, S7, S8, S10, S11, S13 et S14; tableau 2).

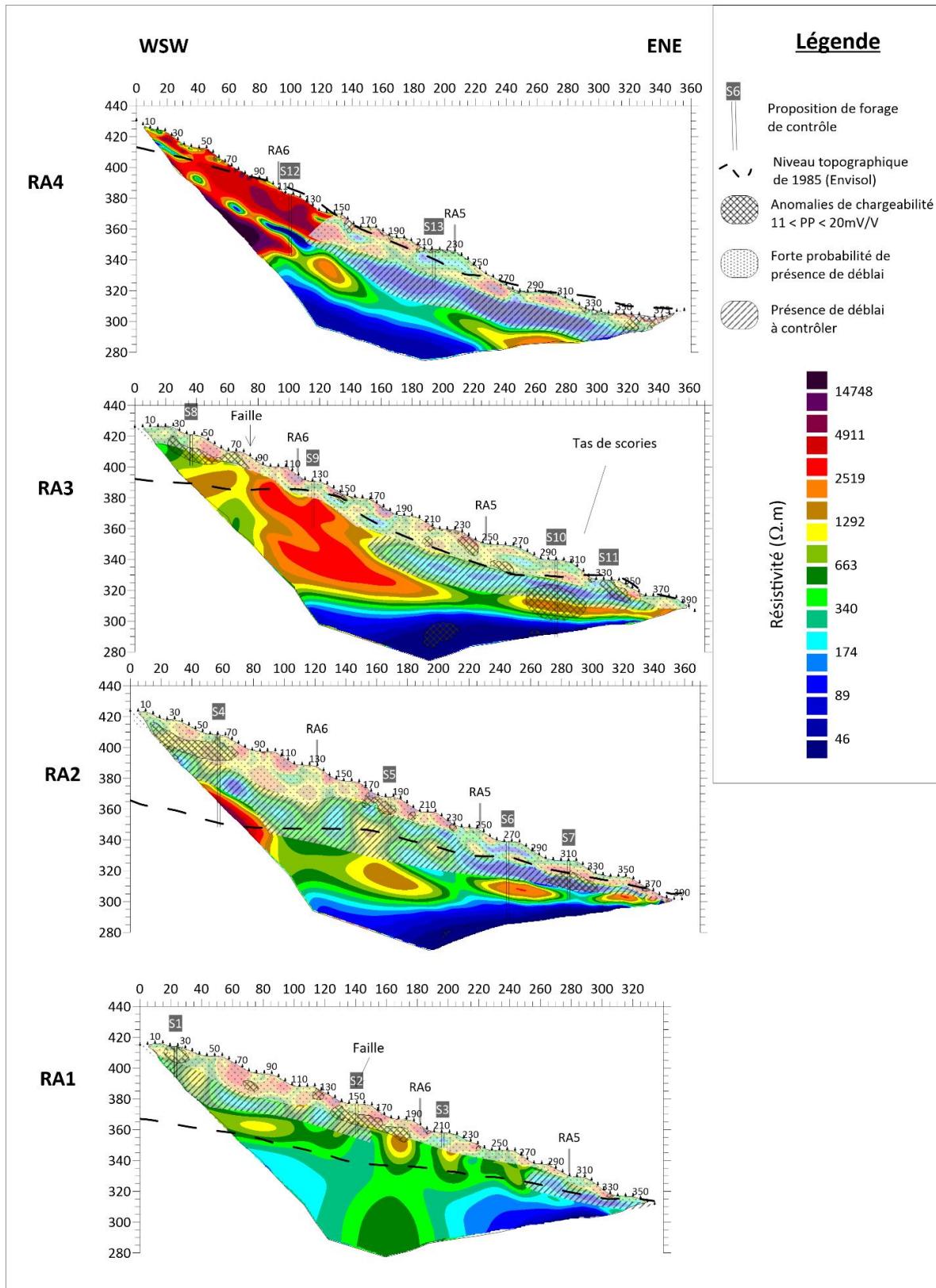


Figure 13 : Résultats interprétés des mesures réalisées sur les profils RA1 à RA4.

6.2. GRÉSILLOU

Les résultats en termes de résistivité sur les profils GR1 à GR4 (figure 14) mettent en évidence des structures très déformées, et des contrastes de résistivité conséquents (de l'ordre de 2 décades, et des résistivités minimales inférieures à 50 ohm.m). Deux anomalies conductrices, observées sur le profil GR4 (abscisses 65 à 100m pour la première, 100 à 145m pour la seconde) ont des dimensions et profondeurs compatibles avec une origine liée à des infiltrations d'eau chargée en arsenic. La géologie complexe et la présence d'horizons naturellement très conducteurs ne permet pas d'affirmer catégoriquement un tel lien, mais ces deux anomalies devraient être contrôlées en priorité dans le cadre de la recherche des apports d'arsenic aux eaux du Grésillou. Les sondages de reconnaissance S18 et S19 (tableau 2 et figure 14) sont proposés en ce sens.

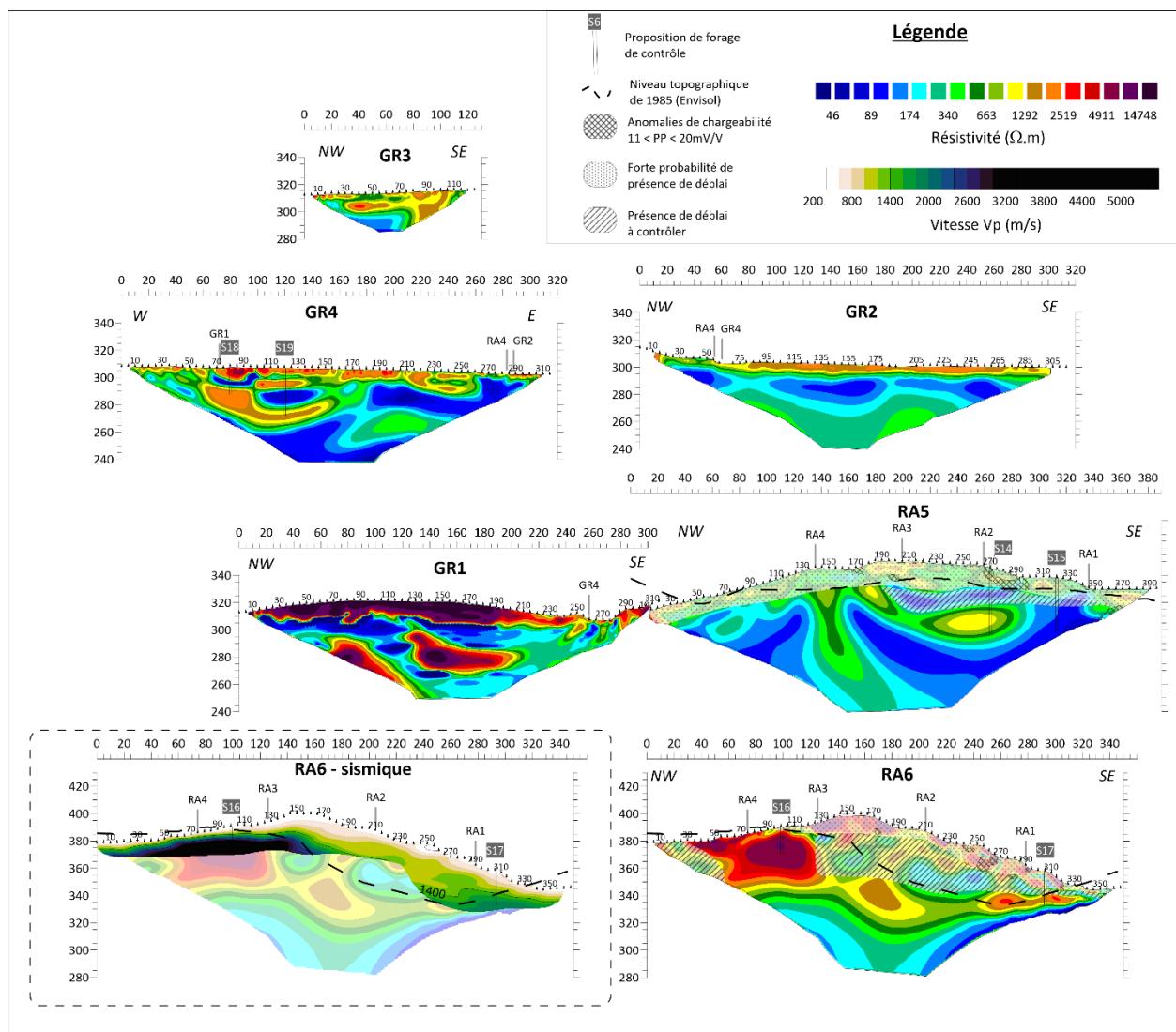


Figure 14 : Résultats interprétés des mesures réalisées sur les profils RA5, RA6 et GR1 à GR4.

Investigations géophysiques sur les versées de Ramèle, Nartau et les abords du Grésillou, ancienne mine de Salsigne

Sondage	Profil géophysique concerné	Abscisses au sol le long du profil (m)	X L93 (m)	Y L93 (m)	Profondeur (m)	Objectifs
S1	RA1	23	647841.5	6249810.6	20	- anomalie PP dans R2 - nature de C2', contact R2/C2'
S2	RA1	150	647943.9	6249865.9	20	- anomalie PP - nature de C2'
S3	RA1	211	647998.4	6249878.6	10	- anomalie conductrice superficielle
S4	RA2	60	647873.8	6249893.9	50	- anomalie PP dans R2 - nature de C2 et R3
S5	RA2	182	647968.1	6249951.5	15-30	- anomalie PP dans R2 (15m suffisant) - contrôle niveau initial du sol (30m nécessaire)
S6	RA2	267	648029.2	6250000.5	50	- anomalie conductrice superficielle - nature de C2-R1-C1
S7	RA2	310	648057.3	6250028.7	25	- anomalie PP dans C2
S8	RA3	38	647821.0	6249934.4	20	- anomalie PP dans R2 (idem S1 et S5)
S9	RA3	125	647880.3	6249984.2	30	- nature de R3
S10	RA3	295	648018.4	6250062.6	50	- anomalie PP dans R1/C2 - nature de C1-R1-C2-R2
S11	RA3	333	648049.2	6250077.3	15	- anomalie PP dans R2 - anomalie conductrice superficielle
S12	RA4	112	647849.9	6250025.4	40	- nature de R3 + horizon conducteur dans R3
S13	RA4	215	647927.7	6250076.3	25	- anomalie PP dans R2 - anomalie conductrice superficielle - nature de C2
S14	RA5	270	648017.6	6249986.5	50	- nature de R2-C2-R1 - anomalie PP dans R2
S15	RA5	320	648045.3	6249946.1	40	- continuité de R1
S16	RA6	100	647860.9	6250002.4	20	- nature de R3
S17	RA6	305	647994.2	6249866.5	25	- anomalie conductrice superficielle - nature de R2-C2-R
S18	GR4	80	647827.7	6250196.3	20	- anomalie conductrice
S19	GR4	120	647866.7	6250189.8	35	- anomalie conductrice

Tableau 2 : Descriptions et positions des sondages de contrôles préconisés.

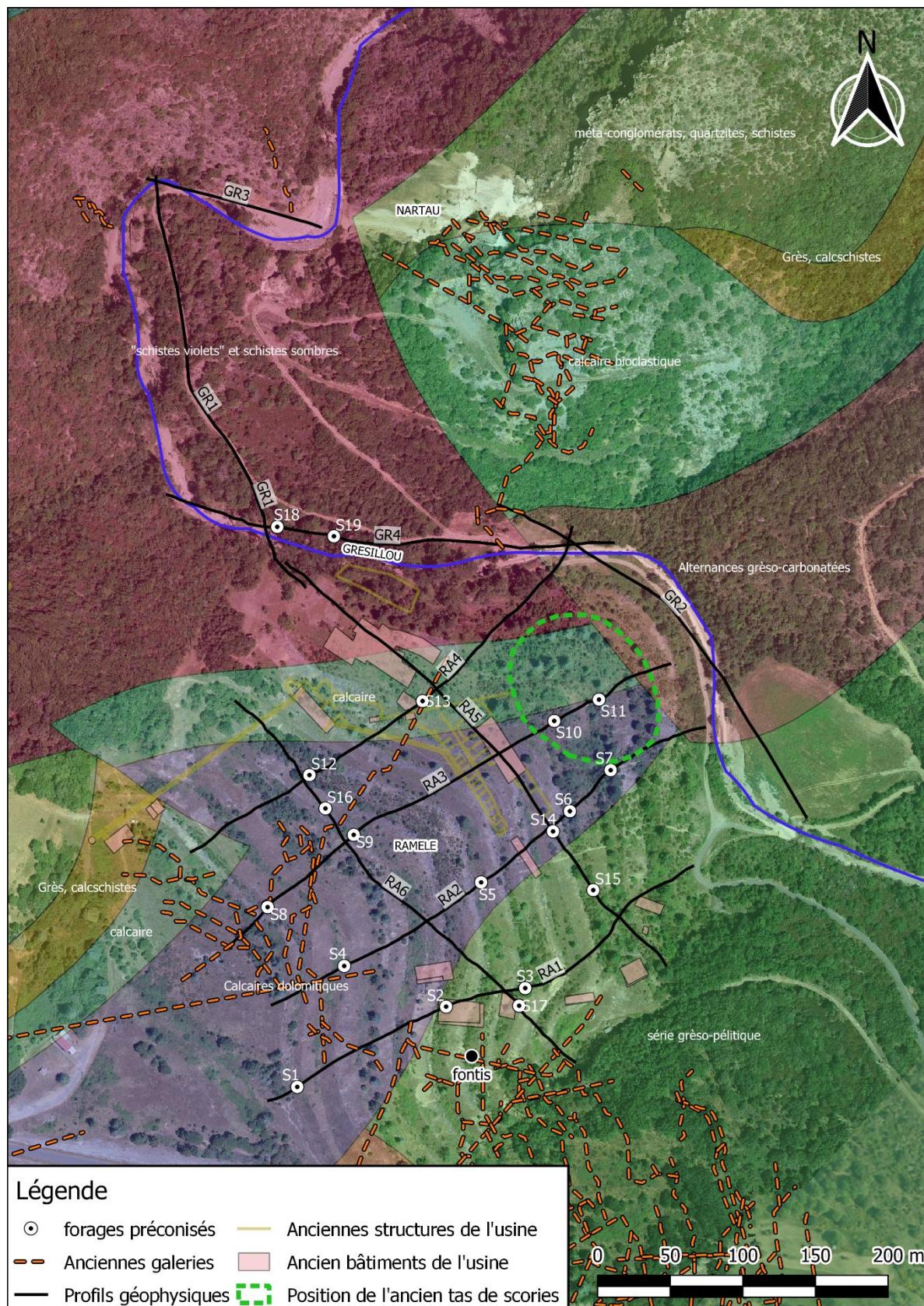


Figure 15 : Implantations des sondages préconisés, sur fond composé de la carte géologique harmonisée superposée à l'orthophotographie (©IGN 2008).

7. Conclusions

Des concentrations anormales d'arsenic sont observées dans les eaux du Grésillou, affluent de l'Orbiel, qui se jette lui-même dans l'Aude. Cette rivière longe d'anciennes verses minières, dont les verses de Ramèle et Nartau, toutes deux mises en place lors de l'exploitation de la mine de Salsigne. Le Département Prévention et Sécurité Minière du BRGM, en charge de la surveillance et de l'entretien de ces sites, a fait appel à l'unité DRP/IGT du BRGM afin de mener une étude sur ces verses ; l'objectif était d'étudier les éventuels liens entre les matériaux déposés sur les verses de Ramèle et de Nartau, et la pollution observée dans les eaux du Grésillou.

Les investigations géophysiques envisagées sur la verse de Nartau n'ont pas pu être mises en œuvre, en raison de la nature et de la géométrie de la verse rendant complexe l'intervention.

Les 4 profils de résistivités réalisés le long de la rivière du Grésillou ne mettent pas clairement en évidence les effets de potentielles infiltrations d'eaux chargées en arsenic. Deux anomalies conductrices ont toutefois été identifiées et doivent être contrôlées par forage, afin d'en contraindre clairement l'origine.

La verse de Ramèle a quant à elle été investiguée par 6 profils électriques (mesures de résistivité et de chargeabilité), dont l'un également couvert par la méthode sismique réfraction. Les résultats permettent de bien mieux appréhender la structure interne de la verse. Celle-ci est relativement complexe, et il semble que les signatures géophysiques seules ne suffisent pas à complètement discriminer les différentes entités qui composent le sous-sol. Bien qu'il reste, à ce stade, encore délicat de discriminer précisément l'interface entre déblais et terrain naturel sur les résultats géophysiques, les résultats sur la verse de Ramèle montrent que l'épaisseur des déblais correspond à minima à celle du résistant superficiel R2, présent sur presque toute la verse, et d'une épaisseur allant de quelques mètres jusqu'à 25 m. La nature du conducteur C2, et la présence de déblais au sein de ce dernier, reste à contrôler avant de pouvoir réaliser des estimations plus précises du volume concerné par les déblais. Cette hypothèse doit être contrôlée par la réalisation de sondage de reconnaissance.

De plus, sur la verse de Ramèle, plusieurs anomalies de chargeabilité ont été mises en évidence à des profondeurs compatibles avec la présence des déblais. Il est probable qu'il s'agisse de remblai à forte teneur en sulfures métalliques, potentiellement des pyrites et arsénopyrites compte tenu de l'environnement.

Les résultats actuels ne permettent pas d'évaluer avec suffisamment de précision le volume de déblais, mais les précisions qui seront apportés par les travaux complémentaires préconisés, devraient suffisamment compléter notre connaissance du site pour fournir une évaluation utilisable pour la gestion du site.

Une liste de 19 forages de reconnaissance a été établie. Les implantations proposées sont basées sur les résultats de la géophysique et les conditions d'accès et d'installation d'une sondeuse (plutôt sur des plateformes de la verse que dans les pentes). Certains d'entre eux poursuivent des objectifs communs et il ne sera probablement pas nécessaire d'en réaliser la totalité. La sélection des sondages les plus pertinents pourra être faite en concertation entre les équipes DPSM et géophysique du BRGM et au regard des éléments en cours d'acquisition dans le cadre de l'étude menée sur ces sites par le bureau d'étude ENVISOL. Ils devront ensuite être soumis à validation de la DREAL.

A la lumière de ces informations, et en fonction de leur contribution aux présents résultats, des investigations complémentaires pourraient être proposées, sur des zones d'intérêts ciblées. Si les forages ne suffisent pas à conclure sur un lien univoque entre les interfaces mis en évidence par les mesures de résistivité, et la base des déblais, il pourrait aussi être envisagé de réaliser des mesures sismiques complémentaires, avec une source plus puissante.

8. Bibliographie

AGAP. (1992). *Géophysique appliquée: code de bonne pratique.*

Berger, G., Boyer, F., Debat, P., Demange, M., Freytet, P., Marchal J., Vautrelle C. (1993). *Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Carcassonne (1037).* Orléans: BRGM.

Bobachev, A. (s.d.). Logiciel X2IPI. Moscow University.

Coppo, N., & Colombain, A. (2018). *Investigations géophysiques (ERT) sur la verse de l'Atelier, mine de Salsigne, (Salsigne, Aude, France).* Final, BRGM/RP-68492-FR.

ENVISOL. (2020). *Secteur minier de Salsigne - Site de Nartau et Verse de Ramele - Etude Technico-Economique - TACHE1. Sites et Sols Pollués.*

Günther, T., Rücker, C., & Spitzer, K. (2006). Three-dimensional modelling and inversion of DC resistivity data incorporating topography – II. Inversion. *Geophysical Journal International*(166), 506 - 517.

ICF Environnement. (2007). *Etude de la pollution et des risques présentés par 6 sites miniers acquis par l'Etat et proposition de travaux à réaliser.* ICF Environnement, Agence Sud-Est, Aix-en-Provence.

Loke, M. (2008). *Geotomo software Sdn. Bhd.* Consulté le 11 16, 2019, sur <http://www.geotomosoft.com/>

Robain, H., & Bobachev, A. (2017). *X2IPI - Tool box for 2D Electrical Resistivity Tomography and IP measurements - User Manual.*

Annexe 1

Principe de la méthode du panneau électrique

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

Le principe de base de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité I entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel ΔV induite entre une autre paire d'électrodes M et N (figure 1).

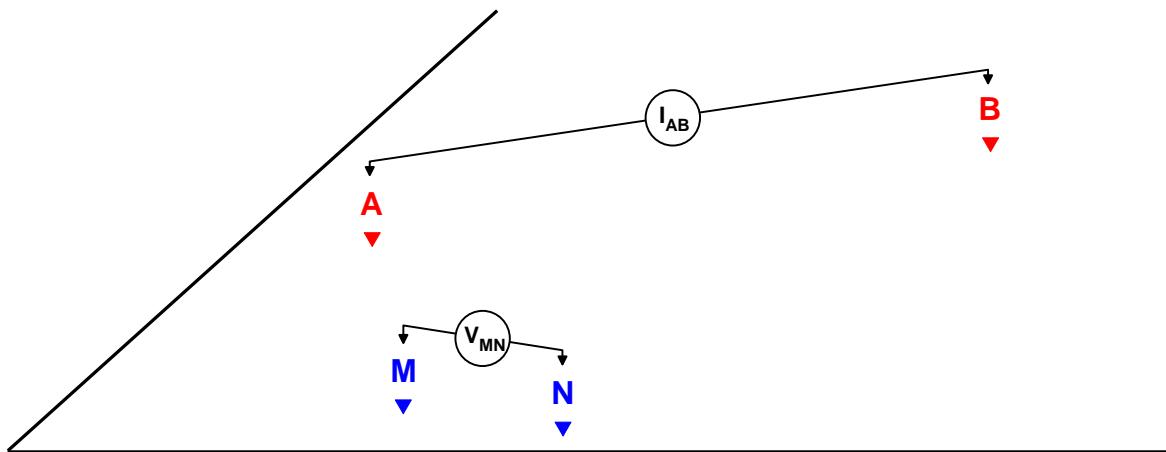


Figure 1 : Principe de la mesure en courant électrique continu

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

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

où K est un facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure (figure 2) :

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

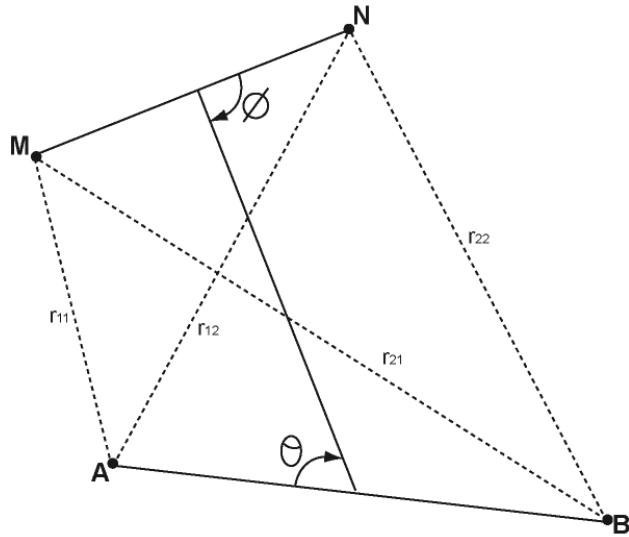


Figure 2 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel ($0 < \theta, \phi < \pi$)

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

Dispositifs d'électrodes / configurations d'acquisition

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

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

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

Le dispositif dipôle-dipôle donne une très bonne résolution des terrains de subsurface et pour les discontinuités verticales. Dans cette configuration, le rapport signal/bruit décroît rapidement et la profondeur d'investigation se réduit également (figure 3).

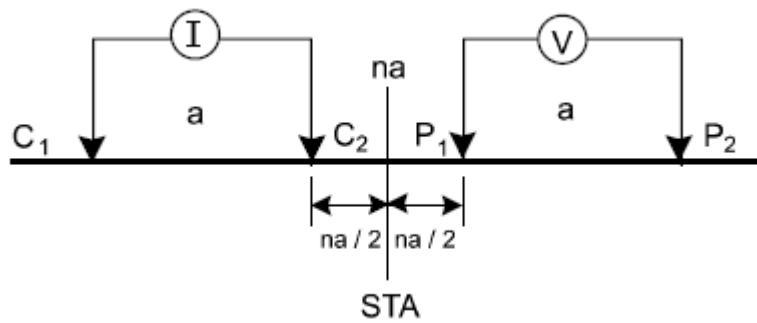


Figure 3 : Configuration dipôle-dipôle

Le dispositif Schlumberger est plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte grâce à un meilleur rapport signal/bruit (figure 4).

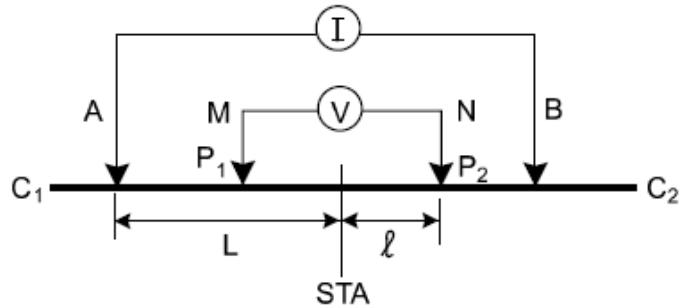


Figure 4 : Configuration de Schlumberger

Le dispositif Wenner est un dispositif présentant la particularité d'avoir trois espacements identiques entre les quatre électrodes. Avec ce dispositif, les résistivités apparentes sont moins affectées par les variations latérales superficielles (figure 5).

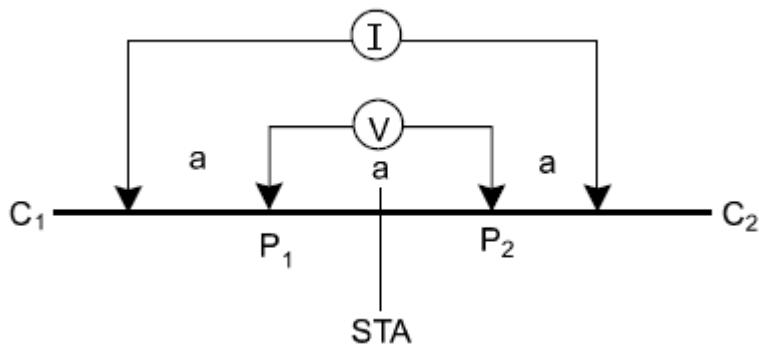


Figure 5 : Configuration de Wenner

Construction d'une pseudo-section de résistivité apparente

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré (logiciels Iris Instruments et X2ipi), celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol. Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité (puisque apparentes) et celles de profondeur ne sont pas correctes (figure 6).

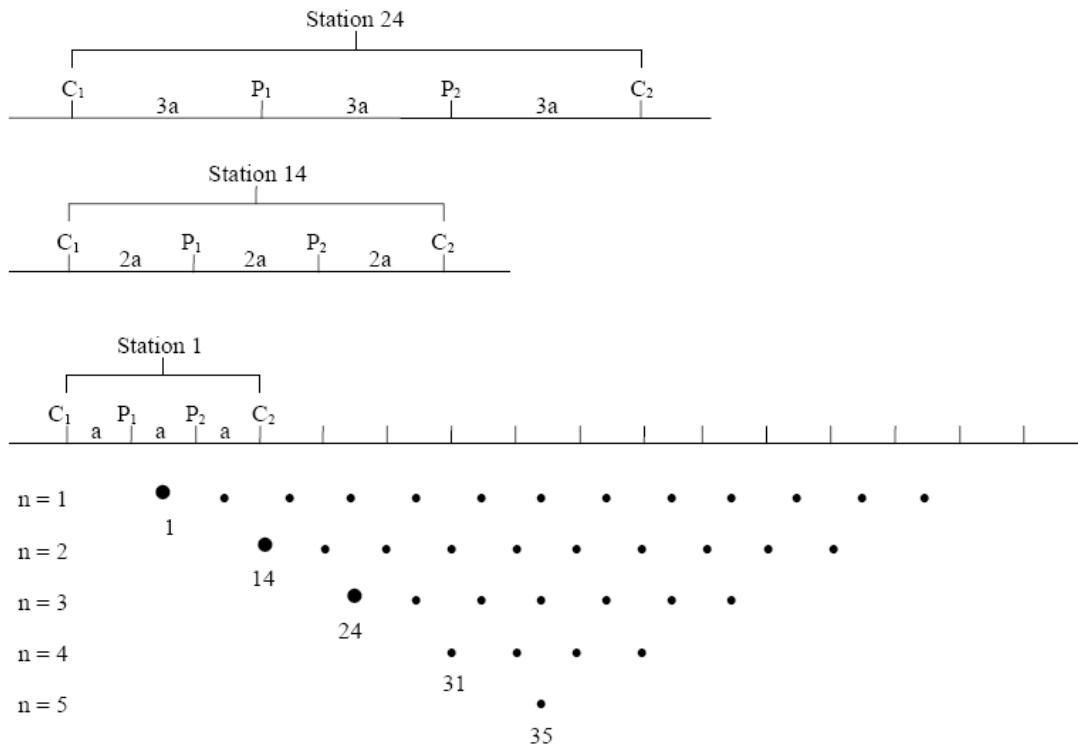


Figure 6 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner

Traitements et inversion des données

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section (figure 7). Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Loke & Barker). Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Afin de prendre en compte les morphologies rencontrées, la topographie de chaque profil est incluse lors de l'inversion (figure 8).

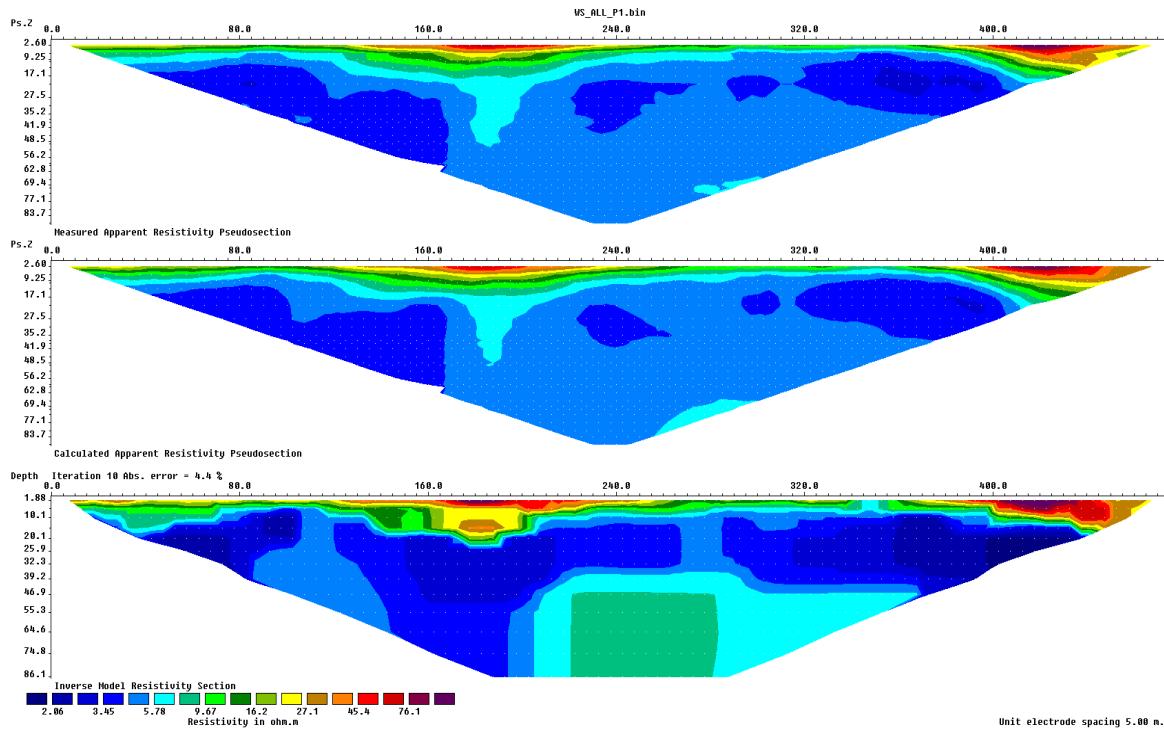


Figure 7 : Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).

La section de résistivité « vraie » (illustration du bas de la figure 7), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie des horizons, profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe semblable à celle de résistivité apparente présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

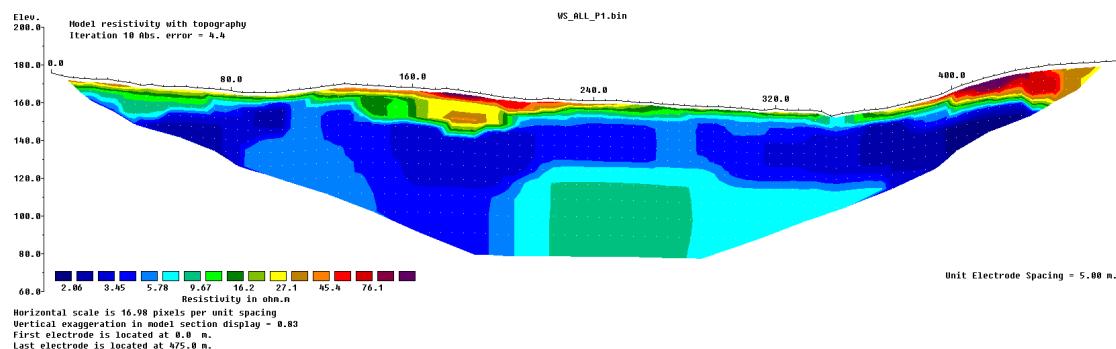


Figure 8 : Résultat de l'inversion de la figure 7 avec la topographie.

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

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

Applications

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

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

Annexe 2

Paramètres d'inversion pour Res2DInv

Inversion settings
Initial damping factor (0.01 to 1.00)
0.1500
Minimum damping factor (0.001 to 0.75)
0.0200
Local optimization option (0=No, 1=Yes)
1
Convergence limit for relative change in RMS error in percent (0.1 to 20)
0.5000
Minimum change in RMS error for line search in percent (0.5 to 100)
0.5000
Number of iterations (1 to 30)
8
Vertical to horizontal flatness filter ratio (0.25 to 4.0)
0.5000
Model for increase in thickness of layers(0=default 10%, 1=default 25%, 2=user defined)
2
Number of nodes between adjacent electrodes (1, 2 or 4)
4
Flatness filter type, Include smoothing of model resistivity (0=model changes only,1=directly on model)
1
Reduce number of topographical data points? (0=No,1=Yes. Recommend leave at 0)
0
Carry out topography modeling? (0=No,1=Yes)
1
Type of topography trend removal (0=Average,1=Least-squares,2=End to end)
2
Type of Jacobian matrix calculation (0=Quasi-Newton, 1=Gauss-Newton, 2=Mixed)
1
Increase of damping factor with depth (1.0 to 2.0)
1.0500
Type of topographical modeling (0=None, 1=No longer supported so do not use, 2=uniform distorted FEM,
3=underwater, 4=damped FEM, 5=FEM with inverse Swartz-Christoffel)
4
Robust data constrain? (0=No, 1=Yes)
0
Cutoff factor for data constrain (0.0001 to 0.1))
0.0500
Robust model constrain? (0=No, 1=Yes)
0
Cutoff factor for model constrain (0.0001 to 1.0)
0.0050
Allow number of model parameters to exceed data points? (0=No, 1=Yes)
1
Use extended model? (0=No, 1=Yes)
0
Reduce effect of side blocks? (0=No, 1=Slight, 2=Severe, 3=Very Severe)
2
Type of mesh (0=Normal,1=Fine,2=Finest)
2
Optimise damping factor? (0=No, 1=Yes)
1
Time-lapse inversion constrain (0=None,1&2=Smooth,3=Robust)
3
Type of time-lapse inversion method (0=Simultaneous,1=Sequential)
0
Thickness of first layer (0.25 to 1.0)
0.5546
Factor to increase thickness layer with depth (1.0 to 1.25)
1.1000
USE FINITE ELEMENT METHOD (YES=1,NO=0)
1
WIDTH OF BLOCKS (1=NORMAL WIDTH, 2=DOUBLE, 3=TRIPLE, 4=QUADRUPLE, 5=QUINTIPLE)
1

MAKE SURE BLOCKS HAVE THE SAME WIDTH (YES=1,NO=0)
1
RMS CONVERGENCE LIMIT (IN PERCENT)
0.100
USE LOGARITHM OF APPARENT RESISTIVITY (0=USE LOG OF APPARENT RESISTIVITY, 1=USE RESISTANCE VALUES, 2=USE APPARENT RESISTIVITY)
0
TYPE OF IP INVERSION METHOD (0=CONCURRENT,1=SEQUENTIAL)
0
PROCEED AUTOMATICALLY FOR SEQUENTIAL METHOD (1=YES,0=NO)
0
IP DAMPING FACTOR (0.01 to 1.0)
0.150
USE AUTOMATIC IP DAMPING FACTOR (YES=1,NO=0)
0
CUTOFF FACTOR FOR BOREHOLE DATA (0.0005 to 0.02)
0.00010
TYPE OF CROSS-BOREHOLE MODEL (0=normal,1=halfsize)
0
LIMIT RESISTIVITY VALUES(0=No,1=Yes)
1
Upper limit factor (10-50)
10.000
Lower limit factor (0.02 to 0.1)
0.100
Type of reference resistivity (0=average,1=first iteration)
0
Model refinement (1.0=Normal,0.5=Half-width cells)
1.00
Combined Combined Marquardt and Occam inversion (0=Not used,1=used)
1
Type of optimisation method (0=Gauss-Newton,2=Incomplete GN)
2
Convergence limit for Incomplete Gauss-Newton method (0.005 to 0.05)
0.005
Use data compression with Incomplete Gauss-Newton (0=No,1=Yes)
0
Use reference model in inversion (0=No,1=Yes)
1
Damping factor for reference model (0.0 to 1.0)
0.01000
Use fast method to calculate Jacobian matrix. (0=No,1=Yes)
1
Use higher damping for first layer? (0=No,1=Yes)
0
Extra damping factor for first layer (1.0 to 100.0)
5.00000
Type of finite-element method (0=Triangular,1=Trapezoidal elements)
1
Factor to increase model depth range (1.0 to 5.0)
1.050
Reduce model variations near borehole (0=No, 1=Yes)
0
Factor to control the degree variations near the boreholes are reduced (2 to 100)
5.0
Factor to control variation of borehole damping factor with distance (0.5 to 5.0)
1.0
Floating electrodes survey inversion method (0=use fixed water layer, 1=Incorporate water layer into the model)
1
Resistivity variation within water layer (0=allow resistivity to vary freely,1=minimise variation)
1
Use sparse inversion method for very long survey lines (0=No, 1=Yes)
0
Optimize Jacobian matrix calculation (0=No, 1=Yes)

0
Automatically switch electrodes for negative geometric factor (0=No, 1=Yes)
1
Force resistance value to be consistant with the geometric factor (0=No, 1=Yes)
0
Shift the electrodes to round up positions of electrodes (0=No, 1=Yes)
0
Use difference of measurements in time-lapse inversion (0=No, 1=Yes)
0
Use active constraint balancing (0=No, 1=Yes)
0
Type of active constraints (0=Normal, 1=Reverse)
0
Lower damping factor limit for active constraints
0.4000
Upper damping factor limit for active constraints
2.5000
Water resistivity variation damping factor
8.0000
Use automatic calculation for change of damping factor with depth (0=No, 1=Yes)
0
Type of I.P. model transformation (0=None, 1=square root, 3=range)
3
Model Chargeability Lower Limit (mV/V) for range
-10.00
Model Chargeability Upper Limit (mV/V) for range
100.00
Use I.P. model refinement (0=No, 1=Yes)
1
Weight for I.P. data (0.1 to 10)
10.0000
I.P. model damping factor (0.05 to 1.0)
0.1500
Use program estimate for I.P. model damping factor (0=No, 1=Yes)
0
Type of I.P. smoothness constraint (1=Same as resistivity, 0=Different)
1
Joint or separate I.P. inversion method (1=Separate, 0=Joint)
0
Apparent I.P. cutoff value (300 to 899 mV/V)
899.00
Use diagonal filter (0=No, 1=Yes)
0
Diagonal filter weight (0.2 to 5.0)
1.00
Limit range of data weights from error estimates? (0=No, 1=Yes)
0
Lower limit of data weights (0.2 to 0.5)
0.30
Upper limit of data weights (2.0 to 5.0)
3.00
Use same data weights from error estimates for different time series? (0=No, 1=Yes)
0
Calculate model resolution? (0=No, 1=Yes)
0
Use L curve method? (0=No, 1=Yes)
0
Use same norms in L curve method? (0=No, 1=Yes)
0
Allow damping factor in increase in L curve method? (0=No, 1=Yes)
1
Type of borehole damping method (0=Horizontal distance from nearest borehole, 1=Distance from nearest active electrode)
0

Use fast Jacobian calculation for dense data sets? (0=No,1=Yes)
0
Use higher damping factors at sides of model? (0=No,1=Yes)
1
Adjust damping factors for distances between the blocks in the model? (0=No,1=Yes)
1
Number of electrodes in segment for sparse inversion method for very long survey lines.
250
Time-lapse damping factor.
0.25
Reduce time-lapse damping with each iteration? (0=No,1=Yes)
1
Filter input data using geometric factor? (0=No,1=Yes)
0
Automatically remove negative apparent resistivity values? (0=No,1=Yes)
0
Automatically remove Gamma type arrays? (0=No,1=Yes)
0
Topography distortion damping factor (0.1 to 2.0)
0.750
Use zero reference I.P. model value? (0=No, 1=Yes)
0
Use apparent IP data in resistivity inversion. (0=No, 1=Yes)
0

Annexe 3

Fiche descriptive de la méthode sismique réfraction

Sismique réfraction

Principe de la méthode

La sismique réfraction consiste à étudier la propagation d'ondes sismiques émises dans le sous-sol et réfractées au toit de couches plus dures via leurs temps d'arrivée (hodochrones)

Mise en œuvre

Les mesures sismiques sont enregistrées le long d'un profil rectiligne. La ligne de mesure comporte des géophones, régulièrement espacés et reliés aux enregistreurs par des câbles (flûtes). Au minimum, un tir sismique doit être réalisé à chaque extrémité du profil et en son milieu. La source sismique peut être le marteau, la chute de poids ou encore l'explosif.

Applications

- Etudes structurales
 - Caractérisation géologique
 - Etude de faciès

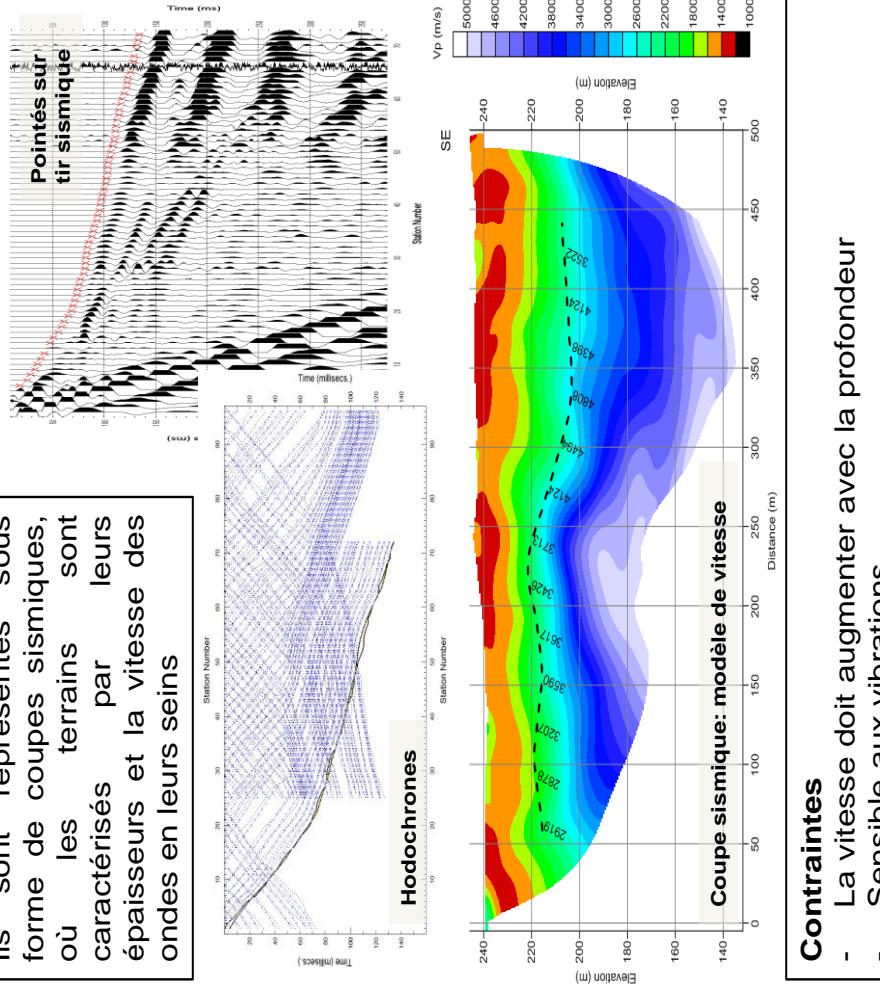
Données nationales

- Données pratiques**

 - Paramètres étudiés: vitesse des ondes sismiques
 - Profondeur d'investigation: ~1/5 de la longueur du dispositif

Contraintes

- La vitesse doit augmenter avec la profondeur
 - Sensible aux vibrations





Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 - Orléans Cedex 2 - France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Département Prévention et Sécurité Minière
Unité Territoriale Après-Mine Sud
Puits Yvon Morandat - Quartier La Plaine
13120 Gardanne - France
Tél. : 04 42 65 46 20