

LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

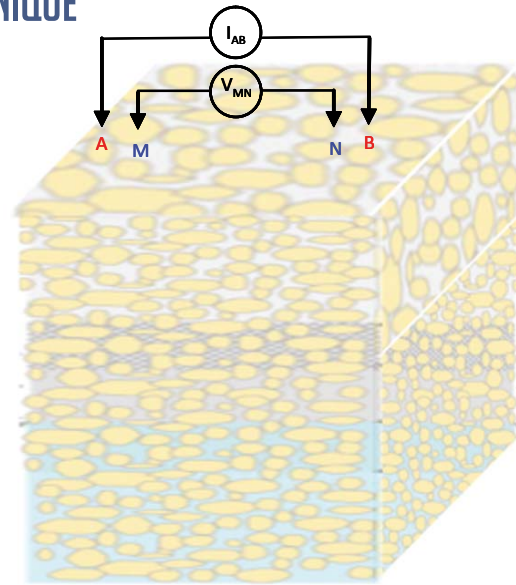
LES MÉTHODES ÉLECTRIQUES À COURANT CONTINU APPLIQUÉES À LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

DESCRIPTION THÉORIQUE DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

La résistivité électrique est un paramètre géophysique qui permet d'apporter des connaissances sur la géologie mais également des informations en 2D ou 3D sur la pollution présente : localisation de source de pollution, délimitation et évolution d'un panache de polluants.

La résistivité électrique peut être mesurée par les méthodes électriques à courant continu. Elle est la propriété d'un matériau à résister au déplacement des charges électriques libres (électrons, ions) sous l'effet d'un champ électrique. Elle se mesure en ohm.m et est fonction de la lithologie (porosité, connectivité des pores) mais également des propriétés des fluides présents.

La méthode électrique à courant continu consiste à injecter dans le sol un courant d'intensité connue entre deux électrodes (A et B) et à mesurer la différence de potentiels électriques entre deux autres électrodes (M et N). Ce dispositif est un quadripôle. La différence de potentiel mesurée reflète les variations spatiales ou temporelles de résistivité électrique du sol. Ces variations de la résistivité sont ensuite traitées et interprétées.



© BRGM

Principe d'acquisition de données de résistivité électrique sur le terrain par méthode électrique à courant continu.

CONTEXTE D'UTILISATION

Les méthodes électriques sont à la fois adaptées pour la connaissance du sous-sol, pour la recherche des pollutions et pour le suivi des opérations de dépollution. De manière générale, elles sont peu adaptées à un contexte urbain et à la présence d'infrastructures enterrées qui perturbent le signal électrique.

La sensibilité de ces méthodes dépend à la fois des concentrations de polluant dans les sols ou les eaux et du volume investigué.

La profondeur maximale d'auscultation dépend de l'espacement entre les électrodes, de la longueur totale du dispositif, de la géologie et du contraste de résistivité entre la cible (polluant ou couche géologique) et son milieu environnant. Plus le dispositif de mesure est étendu en surface, plus la profondeur auscultée est grande mais plus la résolution diminue. La profondeur maximale investiguée peut aller de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres.

L'information fournie est continue spatialement et semi-quantitative et doit être complétée par des investigations physiques (fouilles, forages) qui donnent des informations ponctuelles et permettent l'échantillonnage des milieux pour des analyses chimiques quantitatives.

Une étude au cas par cas pour chaque site est nécessaire afin de comprendre le fonctionnement de la dégradation du polluant et pouvoir interpréter les résultats géophysiques.

À quelle étape ?

Les méthodes électriques à courant continu appliquées à la résistivité électrique sont répandues car utilisables à toutes les étapes de gestion d'un site pollué.

Caractérisation du site et de la pollution

Les méthodes de mesure de la résistivité électrique permettent d'améliorer les connaissances du modèle géologique (profondeur des interfaces, hétérogénéité, écoulements préférentiels, fracturation, présence de vides naturels ou artificiels) et hydrogéologique (perméabilité, écoulements). Ce sont les variations de porosité et de nature des grains minéraux qui permettent de distinguer des couches de lithologie contrastée. Les variations de saturation en eau et de composition de l'eau dans le sol permettent de distinguer l'interface entre zone saturée et zone non saturée si elle est assez nette. La zone non saturée apparaît moins conductrice électriquement que la zone saturée (diminution de la saturation en eau).

Les méthodes de mesure de la résistivité électrique sont également adaptées à la recherche d'objets enfouis.

Enfin, les polluants peuvent avoir une influence directe sur la conductivité du fluide interstitiel (concentration ionique) ou sur la porosité connectée des pores. Ainsi, un polluant

LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

pur non miscible et non dégradé se comporte comme un isolant électrique : sa présence dans l'espace poral influe directement sur la conductivité des sols. De part leurs propriétés électriques modifiant la conductivité des sols, ils permettent de localiser des fuites, des sources de pollution ou de définir l'extension de panaches.

Dépollution et suivi environnemental

Les méthodes électriques à courant continu permettent de surveiller l'évolution de la géométrie d'un panache à travers

POLLUANTS CONCERNÉS

Les méthodes électriques à courant continu appliquées à la résistivité électrique permettent de repérer et suivre les polluants qui modifient les propriétés du fluide interstitiel. Elles sont notamment adaptées pour des sites pollués par des BTEX, HAP, organochlorés, phénols et métaux.

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

Le matériel minimum est composé d'une batterie (source d'énergie électrique), d'un résistivimètre (générateur de courant continu et récepteur qui mesure les différences de potentiels électriques), et de quatre électrodes.

Dans la pratique, on recourt à un grand nombre d'électrodes reliées entre elles par un ensemble de flûtes (câbles multiconducteurs) ; l'opérateur choisit les couples d'électrodes d'injection et les couples d'électrodes de mesure.

Matériel pour une campagne de mesure de résistivité électrique : a) Résistivimètre connecté à une flûte de mesure. b) Connexion entre la flûte et l'électrode de mesure. c) Flûte de mesure repliée.

la modification des propriétés du fluide interstitiel (évolution de la conductivité avec la production de métabolites ioniques, composition du fluide) et de la porosité (précipitations de métabolites, présence de bactéries), témoins de la dégradation des polluants. La comparaison des résultats à un état initial couplée à des analyses chimiques permet d'évaluer la performance du traitement et sa zone d'influence au cours du temps.

Quelques soient les polluants, ces méthodes s'appliquent pour apporter des connaissances géologiques ou hydrogéologiques sur le sous-sol du site.



MÉTHODOLOGIE

Le programme de mesures et des zones à investiguer se justifie à partir des données historiques sur le site et sur la pollution et des bases géologiques et hydrogéologiques connues. La réalisation de tests préliminaires est recommandée pour établir les contrastes de résistivité de la cible (polluant ou couche géologique) recherchée. Le programme de mesure est enfin cadré par l'ensemble des objets parasites (infrastructure aérienne ou enterrée, béton armé, rail et tuyau parallèle au profil, cuve métallique, grillage métallique, barbelé mis à la terre, clôture électrique), du contexte urbain ou industriel et de l'accessibilité des lieux. Il détaille la(les) zone(s) étudiée(s), les paramètres d'acquisition (géométrie, échelle et profondeur) et l'implantation des points/profils de mesure. Il peut contenir une modélisation préalable, un mode opératoire et les résultats du test préliminaire ou des mesures préalables s'ils ont été réalisés.

L'acquisition des données sur le terrain doit être effectuée par du personnel compétent (un superviseur géophysicien et un opérateur qualifié). La mesure requiert un

levé topographique dans un système national de coordonnées des profils et des points de mesure. Tout évènement, physique ou temporel, susceptible de perturber la mesure doit être noté et localisé précisément. Il est également important de réaliser certains contrôles lors de l'acquisition comme le bon contact entre les électrodes et le terrain et une mesure de la dérive de la chaîne de mesure dans le temps.

Différentes méthodes d'acquisition existent selon les objectifs :

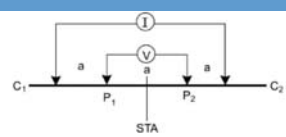
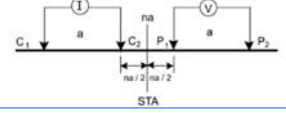
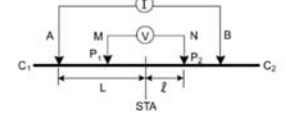
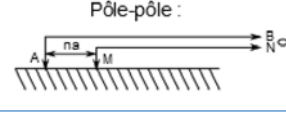
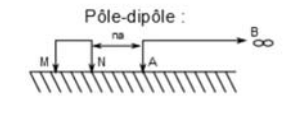
- Avec la méthode de la tomographie de résistivité électrique (TRE), appelée également panneau électrique, les électrodes sont implantées suivant une ligne droite et peuvent servir alternativement d'électrode d'injection ou de mesure (en configurations dipôle-dipôle, Schlumberger, Wenner α ou Wenner-Schlumberger). C'est la méthode la plus utilisée en surface. Plusieurs tomographies peuvent être réalisées pour couvrir l'ensemble de la zone investiguée.
- Avec la méthode rectangle ou gradient, les électrodes d'injection sont situées à l'extérieur de la zone étudiée, le reste du réseau d'électrodes étant uniquement des électrodes

de mesure. Cette configuration est particulièrement adaptée pour un suivi temporel.

- On utilise la méthode de mise-à-la-masse lorsqu'une électrode d'injection est placée dans la zone conductrice préalablement repérée et la seconde à l'infini (configuration Pôle-Pôle ou Pôle-dipôle). Cette configuration convient particulièrement pour le suivi et la caractérisation du fluide interstitiel.

- Enfin, on utilise la méthode de l'électrode enterrée lorsqu'une électrode d'injection est placée dans un forage repéré et la seconde à l'infini (configuration Pôle-Pôle ou Pôle-dipôle). Cette configuration permet une utilisation plus dirigée du courant électrique si une zone particulière est localisée ou si une zone particulièrement résistante est présente en surface.

Les différentes configurations de mesure classiques sont répertoriées dans le tableau suivant.

Technique d'acquisition	Caractéristiques	Figure
Wenner	Utile pour un environnement électromagnétique bruité, Adapté pour la détection d'objets horizontaux mais peu pour les objets verticaux, Profondeur d'investigation modérée (0.5 x espacement électrodes M et N)	
Dipôle-dipôle	Sensible au bruit électromagnétique environnemental, Bonne résolution horizontale, très sensible aux structures verticales, Profondeur d'investigation inférieure à Wenner	
Wenner-Schlumberger	Adapté aux structures verticales et horizontales, Résolution en sub-surface moyenne, Profondeur d'investigation supérieure à Wenner (80 m pour un dispositif de 500 m de long)	
Pôle-pôle	Très sensible au bruit électromagnétique environnemental, Résolution spatiale la plus basse, Profondeur d'investigation importante	
Pôle-dipôle	Sensibilité moyenne au bruit électromagnétique environnemental, Adapté aux objets verticaux, Profondeur d'investigation supérieure à Wenner, Assez difficile à mettre en œuvre (grande distance entre les électrodes)	

La mise en œuvre et l'interprétation seront différentes selon qu'il s'agit de la caractérisation de la pollution ou bien de la surveillance du phénomène étudié par évolution de la résistivité électrique.

Pour la recherche de source ou de panache, une première étude est réalisée à grande échelle selon un quadrillage pour définir les caractéristiques de l'encaissant non pollué et l'identification de secteurs anormaux. Il est préconisé de cerner les anomalies conductrices ou résistantes observées, ce qui peut conduire à augmenter la surface investiguée. Il existe plusieurs configurations de mesure qui seront choisies en **concertation avec le géophysicien, le spécialiste en environnement et le donneur d'ordre**. Une seconde étude détaillée à petite échelle est ensuite réalisée si besoin. Ces études permettent de donner une description en profondeur en 2D ou en 3D de la résistivité électrique.

Pour la surveillance ou le suivi d'opérations de dépollution, l'installation des équipements géophysiques peut être pérenne avec le lancement des mesures à distance et une télétransmission des données ou bien partielle avec un retour sur site pour réaliser les mesures. Il est conseillé de laisser en place les électrodes de mesure tout au long de la surveillance car le repositionnement est générateur d'erreurs de mesure. Dans le cas où cela n'est pas possible, les précautions nécessaires seront prises pour pouvoir repositionner les électrodes au cm près.

L'analyse des données acquises doit être réalisée au bureau par un géophysicien confirmé. Elle consiste en un prétraitement, un traitement et une interprétation des données. Le prétraitement vise à éliminer les valeurs aberrantes et le traitement consiste à estimer la résistivité électrique vraie du sous-sol par inversion. L'interprétation des données traitées est réalisée en analysant les contrastes de résistivité mesurés ou estimés entre la zone polluée et une partie non polluée connue du site (ou proche du site d'étude) ; dans le cadre d'une surveillance, elle sera menée par rapport à un état de référence. Cette interprétation comprend la confirmation et l'étalonnage des données traitées par des investigations complémentaires permettant une observation directe et quantitative (analyse de sols ou des eaux). En fonction des contrastes, elle peut comprendre une correction de l'influence de la température, de la hauteur de niveau d'eau ainsi que de l'état hydrique du sol, ces paramètres influant sur les résultats de mesure.

Enfin, la **restitution des résultats** varie selon la méthode d'acquisition (modèle 2D ou 3D).



AVANTAGES – INCONVÉNIENTS – MATURITÉ DE LA TECHNIQUE

AVANTAGES

Investigations

- Technique non destructive et non intrusive,
- Rapidité d'acquisition,
- Mise en œuvre simple,
- Pilotage à distance pour le suivi de dépollution,
- Surfaces importantes à moindre coût.

Résultats d'interprétation

- Technique intégratrice (une valeur en chaque point de l'espace).

INCONVÉNIENTS

Investigations

- Perturbation par la présence d'objets conducteurs enterrés ou proches (béton armé, rails et tuyaux parallèles au profils, cuve métallique, grillage métallique, barbelés mis à la terre, clôture électrique),
- Nécessité d'un contact électrique de qualité avec le sol (difficile en milieu urbain ou industriel en présence d'enrobé ou de plateformes).

Résultats d'interprétation

- Mesure indirecte (sans identification directe),
- Mesure semi-quantitative des polluants (nécessite des investigations complémentaires),
- Interprétation complexe (plusieurs phénomènes peuvent donner le même résultat de mesure),
- Besoin de personnel compétent et expérimenté.

MATURITÉ DE LA TECHNIQUE



R&D aboutie, indicateurs développés, technique utilisée sur le terrain

La résistivité électrique est de loin le paramètre géophysique le plus couramment mesuré dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués.

DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE

Les délais et coûts associés aux mesures et interprétation sont importants mais à mettre en perspective avec les surfaces investiguées. Les données suivantes donnent un ordre de grandeur mais doivent être adaptées selon la complexité du site.

Pour la tomographie de résistivité électrique, la durée d'acquisition dépend du nombre d'électrodes implantées et du nombre de quadripôles de mesure. Le rendement

moyen pour des sites d'accès facile (sur terrain plat sans végétation ni infrastructures de surface) est de 2 acquisitions tomographiques de 500 mètres par jour (profil de 96 électrodes avec un écartement inter-électrode de 5 m). L'interprétation (prétraitement et traitement) pour un superviseur nécessite 1 jour d'interprétation par jour de terrain, sans compter la rédaction de rapport.

PHASE

INVESTIGATIONS

TRAITEMENT ET INTERPRÉTATION

Délai associé



⌚ : jour / ⌚⌚ : semaine / ⌚⌚⌚ : mois

ÉLÉMENTS DE COÛTS

Les coûts associés correspondent au temps passé sur le terrain pour 2 opérateurs (1 ingénieur géophysicien et 1 technicien) dont une personne expérimentée ainsi qu'à

l'interprétation par un superviseur. La location de matériel est également un poste de dépense à ne pas oublier (environ 1 000 € pour une semaine).

PHASE

INVESTIGATIONS

TRAITEMENT ET INTERPRÉTATION

Coût associé



€ < 100 € / €€ < 1000 € / €€€ > 1000 €

POUR EN SAVOIR PLUS - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Rapport ADEME - Apports et limitations des méthodes géophysiques dans le cadre de la démonstration de l'atténuation naturelle - Projet ATTENA – PHASE 2 - Juin 2013

[2] Rapport ADEME AGAP – Guide des méthodes géophysiques pour la détection d'objets enfouis sur les sites pollués – Janvier 2017

[3] Géophysique appliquée : Code de bonne pratique – BRGM/CGG/CPGF/LCPC - Mars 1992

[4] Fiche de description de l'US EPA

[5] Norme AFNOR 1999 FD X 31-611-2 - Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions - Partie 2 : Guide général pour l'utilisation de méthodes géophysiques en criblage de terrain – Août 1999