

LE POTENTIEL SPONTANÉ

DESCRIPTION THÉORIQUE DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

La méthode du potentiel spontané (ou PS) est une technique géophysique qui permet d'estimer les écoulements d'eau dans le sol et de détecter la présence de polluants et leur état de dégradation. Elle est complémentaire des analyses chimiques classiques et apporte une vision spatiale qui permet d'affiner les contours des sources et des panaches de pollution.

Elle repose sur la mesure du potentiel électrique spontané à la surface ou dans le sol. Ce potentiel électrique V_{MN} est mesuré entre une électrode de référence M et une électrode de mesure N. Le potentiel spontané se mesure en volts (ou mV) et dépend de la présence de gradients de potentiels hydrauliques

ou chimiques dans le milieu géologique. Contrairement à la tomographie électrique, c'est une méthode de mesure passive c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'injection de courant électrique dans le sol.

Le potentiel spontané est expliqué par plusieurs paramètres qui s'additionnent :

- Le gradient de potentiels d'oxydo-réduction,
- Le gradient hydraulique,
- Le gradient de concentration ionique,
- Le gradient de température,
- La distribution de conductivité électrique du sol.

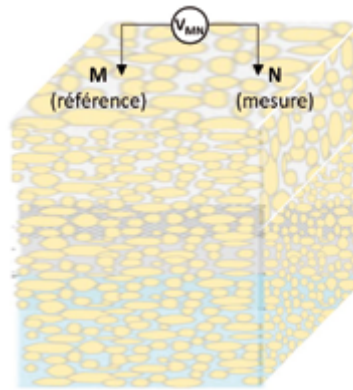


Figure 1 : Principe d'acquisition de données de potentiel spontané sur le terrain.

CONTEXTE D'UTILISATION

La méthode PS est peu adaptée à un contexte urbain et à la présence d'infrastructures enterrées qui perturbent le signal électrique. Le potentiel spontané est également sensible à des contrastes importants de végétation comme une transition clairière-forêt ou à des contrastes de conductivité comme c'est le cas pour les biseaux salés.

La sensibilité de la méthode dépend de la multiplication des sources de bruit et de la méthodologie de mesure employée. Pour limiter l'influence des différentes sources de bruit, il est intéressant de faire du suivi temporel du site, plutôt qu'un état à un instant donné.

Cette technique s'utilise en complément des autres méthodes électriques que sont la résistivité électrique et la polarisation provoquée. Elle permet de compléter les investigations géophysiques en renseignant sur l'écoulement de la nappe et les phénomènes géochimiques présents au droit du site.

L'information fournie est quasi-continue spatialement selon le pas d'échantillonnage choisi et semi-quantitative.

À quelle étape ?

La méthode PS est utilisable à toutes les étapes de gestion d'un site pollué. Elle donne en particulier des informations essentielles lors du diagnostic.

Lors d'un diagnostic avancé, la méthode du potentiel spontané permet d'améliorer la connaissance du modèle hydrogéologique du site ou local en mettant en évidence les gradients hydrauliques. Elle permet également de délimiter des panaches de pollution et d'évaluer leur état de dégradation car le polluant peut également avoir une influence sur les caractéristiques physico-chimiques du fluide, ce qui induit des différences de potentiels et donc des courants électriques spontanés.

La mesure du potentiel spontané permet de surveiller l'évolution de la géométrie d'un panache à travers la modification des propriétés du fluide interstitiel, témoin de la dégradation des polluants. La comparaison des résultats à un état initial couplé à des analyses chimiques permet **d'évaluer la performance du traitement et sa zone d'influence** au cours du temps. Ce sont ces mêmes propriétés qui sont utilisées lors de la **surveillance de site**.

LE POTENTIEL SPONTANÉ

POLLUANTS CONCERNÉS

La méthode du PS permet de repérer et de suivre les polluants qui modifient les propriétés du fluide interstitiel et engendrent des différences de potentiels. Elle est notamment

adaptée pour des sites pollués par des polluants organiques, métalliques ou ioniques.

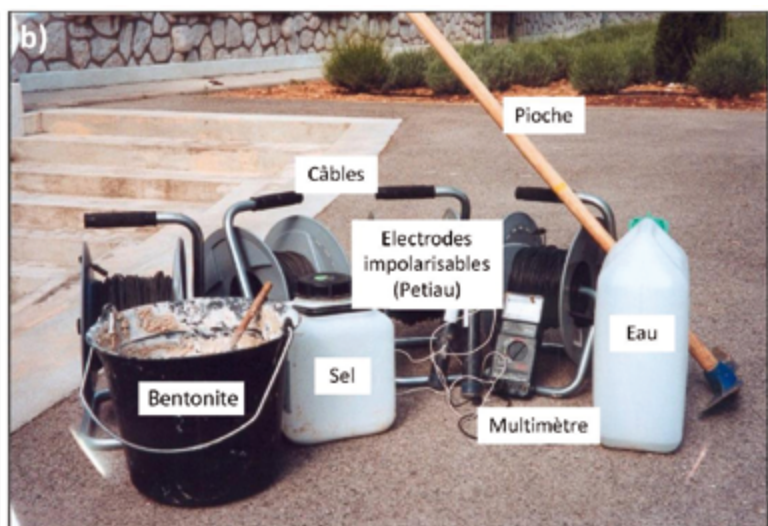
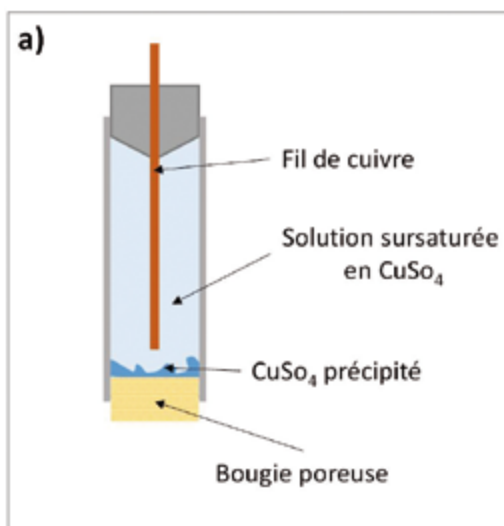
MATÉRIEL NÉCESSAIRE

Le matériel déployé est composé d'au moins deux électrodes impolarisables, de câbles de préférence blindés et d'un voltmètre à forte impédance d'entrée.

Les électrodes impolarisables sont composées d'un fil de cuivre ou de plomb entouré d'une solution sursaturée

en sulfate de cuivre ou en chlorure de plomb. Elles sont en contact avec le sol à l'aide d'une bougie poreuse.

Le voltmètre doit être choisi de manière à avoir une impédance d'entrée au minimum supérieure d'un ordre de grandeur à celle mesurée entre les électrodes.



a) Électrode impolarisable, b) Matériel pour une campagne de mesure de potentiel spontané.

MÉTHODOLOGIE

Le programme de reconnaissance est établi à partir des données historiques et de la connaissance topographique et géologique du site. Il détaille la zone étudiée, la configuration de mesure (base fixe ou gradient), l'écartement minimal entre les électrodes, le nombre d'électrodes et l'implantation des points/profils de mesure. Il peut contenir éventuellement une modélisation préalable, un mode opératoire et les résultats du test préliminaire ou des mesures préalables s'ils ont été réalisés.

Acquisition des données sur le terrain

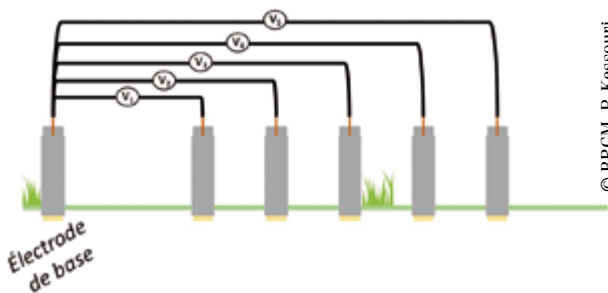
Avant d'effectuer la série de mesures sur le terrain, il est recommandé de vérifier la résistance de prise de terre entre l'électrode de référence et l'électrode de mesure. Les mesures seront généralement de bonne qualité si la résistance est inférieure à 2 000 Ohm.

L'acquisition des données sur le terrain doit être effectuée par du personnel compétent, un superviseur géophysicien et un opérateur qualifié. Il est nécessaire d'adopter de bonnes pratiques de mesure pour recueillir le maximum d'informations mais aussi pour minimiser l'impact des sources

de bruit sur la mesure. Ainsi, un levé topographique des points de mesure doit être effectué et tout évènement, physique ou temporel, susceptible de perturber la mesure doit être noté et localisé précisément. Afin de réduire les sources de bruit, il est nécessaire d'avoir un bon contact entre les électrodes et le sol en retirant toute végétation autour des électrodes sur quelques dizaines de centimètres et en insérant un mélange de bentonite et d'eau saturée en sel entre les électrodes et le sol. De plus, les électrodes sont enterrées entre 25 et 50 cm de profondeur pour éviter les bruits parasites. La taille de la ligne de mesure doit également être adaptée et les électrodes gardées à la même température. Dans les cas de mesures de suivi temporel, il faut être particulièrement vigilant sur la dérive des électrodes qui peut ne pas être linéaire et les effets des variations rapides de température.

Les mesures PS peuvent être effectuées pour obtenir une cartographie statique de la distribution de potentiel électrique dans le sous-sol, ou pour effectuer un monitoring dans le temps des variations de ce potentiel. Dans les deux cas, trois configurations de mesure différentes peuvent être employées.

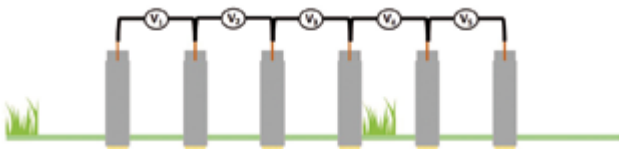
- **Technique de base fixe ou champ total** pour une surface étudiée inférieure à 1 km² : une électrode est fixe (électrode de référence) et l'autre mobile (électrode de mesure). Cette configuration permet une lecture directe du potentiel sur toute la surface d'investigation mais la longueur des profils est limitée par la longueur des câbles car plus le câble est long, plus la mesure est bruitée. Le choix de l'électrode de référence est très important. Il faut veiller à ce qu'elle soit en bon contact électrique avec le sol, que la mesure du potentiel soit stable dans le temps et en dehors de la zone d'anomalie à caractériser. Afin d'améliorer la qualité des données, il est possible d'effectuer un changement de référence lors du post-traitement. Il faut alors exclure l'électrode de référence du jeu de données et prendre un autre point comme référence a posteriori.



© BRGM, P. Kessouri

Configuration de mesure avec la technique de base fixe.

- **Technique de gradient** pour une surface étudiée supérieure à 1 km² : les deux électrodes sont mobiles, distantes d'un pas constant ou non. À chaque nouvelle mesure, la première électrode est placée à l'emplacement de la 2^e électrode de mesure précédente. Cette configuration permet de réduire les erreurs liées à la polarisation ou à la dérive des électrodes car à chaque mesure, le potentiel statique est mesuré et retranché à la mesure PS. L'inconvénient réside dans l'accumulation d'erreurs à chaque déplacement du dipôle. Ces erreurs peuvent être liées à des lectures erronées ou à un mauvais contact de l'électrode avec le sol. Selon la force du signal, ces incertitudes peuvent être largement supérieures à ce que l'on cherche à mesurer.



Configuration de mesure avec la technique de gradient.

- **Une combinaison de ces deux configurations** est possible en utilisant la technique de la base fixe sur une surface ou un profil donné, puis en déplaçant la base en suivant la technique de gradient, avant de réemployer la technique de la base fixe. La combinaison permet de limiter les sources d'erreur précédemment décrites. Lors du changement d'électrode de référence, on peut considérer qu'une mesure est stable lorsque sa variation n'excède pas 15 % de sa valeur, ce qui peut prendre plusieurs minutes. Si la mesure demeure instable, il faut penser à vérifier la résistance de prise et potentiellement changer la position de l'électrode

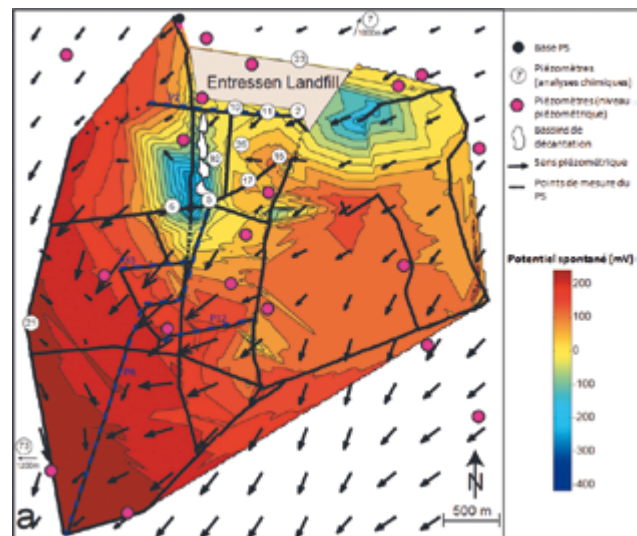
de mesure. Afin de quantifier la dérive temporelle, il est recommandé d'effectuer une mesure régulière (toutes les heures) au niveau de l'électrode de référence.

Traitement et interprétation des données

Des prétraitements sont réalisés pour repérer et supprimer les valeurs aberrantes et pour supprimer les effets des différentes sources de bruit. Si la mesure est effectuée en base fixe, un changement de référence peut également être réalisé. Pour extraire l'influence du potentiel d'oxydo-réduction sur la mesure PS, il est nécessaire de dissocier les effets liés à la dynamique d'écoulement de l'eau et donc de connaître le gradient de hauteur piézométrique de l'aquifère étudié. Il est également nécessaire d'étendre la zone de mesure PS au-delà de la surface gouvernant le(s) phénomène(s) étudié(s). Cela permettra, par exemple, de dissocier l'anomalie PS liée au phénomène électrocinétique (gradient de pression hydraulique) et l'anomalie PS générée par le potentiel d'oxydo-réduction.

La restitution des résultats se fait soit en carte, soit en profils de potentiels apparents avec une interpolation des données entre les points de mesure.

Dans le cas d'un monitoring dans le temps, les variations des potentiels électriques à partir d'un état de référence peuvent être représentées.



© V. Naudet, 2004

Composante électrocinétique (en mV) obtenue par interpolation linéaire entre les mesures PS et la hauteur piézométrique.



AVANTAGES – INCONVÉNIENTS – MATURITÉ DE LA TECHNIQUE

AVANTAGES

Investigations

- Technique non destructive et non intrusive,
- Rapidité d'acquisition,
- Mise en œuvre très simple,
- Très peu de matériel à déployer,
- Surfaces importantes à moindre coût.

Résultats d'interprétation

- Technique intégratrice (une valeur pour chaque mesure).

INCONVÉNIENTS

Investigations

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

Résultats d'interprétation

- Mesure indirecte (sans identification directe),
- Mesure relative (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 ou en cours de développement, technique peu utilisée sur le terrain

DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE

La phase d'échantillonnage sur site est rapide. Il faut compter environ 5 minutes par mesure pour obtenir les conditions idéales et une centaine de mesures peut être effectuée en une journée, si les conditions d'accès et de progression sur le site sont aisées. Le traitement et l'analyse

qualitative des données est rapide, quand on ne s'occupe que des éléments cartographiques ou en profil. L'inversion des données est assez longue et reste actuellement restreinte aux publications scientifiques.

PHASE

INVESTIGATIONS

TRAITEMENT ET INTERPRÉTATION

Délai associé



⌚: jour / ⌚⌚: semaine / ⌚⌚⌚: mois

ÉLÉMENTS DE COÛTS

Le coût du matériel est faible. Il faut compter environ 200 € pour un voltmètre haute impédance et 200 € pour deux électrodes impolarisables. Le budget matériel est plus important dans le cas d'un suivi temporel (évolution des sources lors de la dépollution par exemple). Il faut compter 100 € par électrode supplémentaire et 3 000 € pour un

datalogueur et une journée d'installation des 20 électrodes. Le coût associé aux investigations correspond au temps passé sur le terrain par deux opérateurs (1 ingénieur géophysicien et 1 technicien) dont une personne expérimentée ainsi qu'à l'interprétation par un superviseur.

PHASE

INVESTIGATIONS

TRAITEMENT ET INTERPRÉTATION

Coût associé



€ < 100 € / €€ < 1 000 € / €€€ > 1 000 €

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] Naudet, V. (2004). Les méthodes de résistivité électrique et de potentiel spontané appliquées aux sites contaminés (Doctoral dissertation), Université de droit, d'économie et des sciences-Aix-Marseille III
- [3] 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
- [4] Fiche AGAP qualité: https://www.agapqualite.org/wp-content/uploads/2019/07/CBP_AGAP_ELEC03_rev01_Polarisation-Spontanee_GT.pdf