

Investigation géophysique appliquée à l'hydrogéologie

Auteur : Richard Fortier, département de géologie et de génie géologique, Université Laval

Novembre 2017

Le principal objectif d'une investigation géophysique de proche surface est de déterminer la nature du sous-sol. Une investigation géophysique appliquée à l'hydrogéologie peut fournir de nombreuses informations utiles telles que le type de dépôts, la présence et la localisation d'un aquifère ou d'un aquitard, la géométrie de cet aquifère (extension latérale et variabilité de l'épaisseur), la profondeur de la nappe, la profondeur du roc et les structures sédimentaires des dépôts.

Réussite d'une investigation géophysique

Afin qu'une investigation géophysique d'un site d'étude soit couronnée de succès, les objectifs de cette investigation, notamment en ce qui a trait aux cibles à identifier dans le sous-sol, doivent être clairement établis dans un appel d'offres de services lancé par un demandeur en amont de la réalisation de cette investigation géophysique. Le demandeur doit aussi fournir dans son appel d'offres de services toute information disponible sur le site d'étude tels la stratigraphie régionale ou locale, les descriptions de forages et les rapports sur la réalisation d'investigations géophysiques antérieures, afin que les fournisseurs potentiels de services d'investigation géophysique puissent déterminer et proposer la ou les méthodes géophysiques les plus appropriées pour atteindre les objectifs fixés par le demandeur. L'accès à des photographies aériennes, de l'imagerie satellitaire ou des cartes du territoire (topographie, modèle numérique d'élévation, réseau de drainage, géologie du roc, dépôts quaternaires, végétation, occupation du territoire) est aussi utile aux fournisseurs pour juger de l'étendue du territoire à couvrir et pour déterminer la ou les méthodes géophysiques. Les contraintes associées à l'accessibilité du site d'étude (routes, sentiers, végétation dense, topographie accidentée, cours d'eau et plans d'eau, terrains privés) et à la présence d'infrastructures civiles (ligne électrique, vibrations causées par des activités industrielles) à l'origine de bruit anthropique doivent être connues par les fournisseurs afin qu'ils puissent concevoir leur investigation géophysique du site d'étude et adapter le déploiement des équipements géophysiques aux conditions de terrain avant la réalisation de l'investigation. Une visite préliminaire du site d'étude par le fournisseur retenu à la suite du processus d'appel d'offres de services en présence du représentant du demandeur est recommandée afin d'identifier les problèmes potentiels associés au déploiement des équipements géophysiques sur le terrain. Il est aussi recommandé que le demandeur s'assure que les droits de passage sur des terrains privés soient obtenus avant la réalisation d'une investigation géophysique. Si une ligne d'accès au site d'étude doit être coupée dans une forêt ou si le passage des opérateurs d'un levé géophysique peut endommager un champ agricole, le demandeur doit s'assurer qu'une permission de coupe forestière ou d'accès à un champ agricole soit obtenue du propriétaire de ce terrain. Le fournisseur retenu peut s'acquitter de ces tâches, mais les coûts de réalisation de l'investigation géophysique seront plus élevés. Souvent, le demandeur est le mieux placé pour obtenir les droits de passage puisqu'il est normalement connu dans la région d'étude. Le représentant du demandeur devrait être présent durant la réalisation d'une investigation géophysique pour s'assurer qu'elle se déroule sans problème. Ce représentant devrait idéalement avoir des connaissances de base en sciences de la Terre pour juger de la qualité du travail effectué sur le terrain par le fournisseur retenu. Il pourrait également être responsable de la lecture critique du rapport d'investigation géophysique produit par le fournisseur.

Complémentarité d'une investigation géophysique et des forages

Les investigations géophysiques et les forages usuels d'exploration hydrogéologique sont complémentaires. En effet, grâce aux informations de quelques forages dans un site d'étude, le fournisseur de services d'investigation géophysique peut déterminer la ou les méthodes géophysiques les plus appropriées aux conditions du site d'étude. En l'absence de forages, le fournisseur doit se fier aux autres informations disponibles. Si le demandeur d'investigation géophysique ne donne pas au fournisseur d'informations préalables sur le site d'étude afin de concevoir et de réaliser une investigation géophysique, le fournisseur retenu doit normalement proposer dans son offre de services la collecte des informations disponibles. Dans une telle éventualité, cette collecte qui se fait en amont de la réalisation d'une investigation géophysique se reflète dans les coûts à la hausse de l'investigation géophysique. Dans le cas contraire où aucune collecte d'informations n'est proposée, les chances que soient atteints les objectifs de l'investigation géophysique fixés par le demandeur sont diminuées. En effet, la conception et la réalisation de cette investigation géophysique ne sont vraisemblablement pas adaptées à la réalité du terrain. En outre, avec des descriptions de forages bien localisés dans le site d'étude, une investigation géophysique entre deux ou plusieurs forages permet de confirmer ou d'infirmer la continuité latérale des formations géologiques. Les descriptions de forages peuvent aussi être utilisées pour contraindre le traitement et l'inversion des données d'un levé géophysique, pour réaliser son interprétation et pour produire ultimement une coupe hydrostratigraphique interprétative à partir des résultats de l'investigation géophysique qui intègre les descriptions des forages. Si une ou des cibles anormales sont identifiées sur un levé géophysique dont la source est inconnue, il peut être intéressant de forer au droit de cette ou ces cibles pour déterminer leur cause selon les recommandations du fournisseur. Lorsque de nouvelles informations de forage sont disponibles après une investigation géophysique, les résultats d'un levé géophysique peuvent être réinterprétés à la lumière de ces nouvelles informations afin de raffiner la coupe hydrostratigraphique interprétative initiale.

Déroulement d'une investigation géophysique

Une investigation géophysique se déroule selon les étapes suivantes :

- 1) L'établissement des objectifs de l'investigation géophysique fixés par le demandeur selon son appel d'offres de services;
- 2) La collecte si nécessaire et l'analyse des informations disponibles sur le site d'étude;
- 3) La détermination de la ou des méthodes géophysiques les plus appropriées aux conditions du site d'étude;
- 4) La conception de l'investigation géophysique (sites de déploiement des levés géophysiques et méthodologie de déploiement des équipements géophysiques);
- 5) L'évaluation des coûts de l'investigation géophysique;
- 6) La rédaction et le dépôt d'une offre de services d'investigation géophysique par le fournisseur en réponse à l'appel d'offres de services du demandeur;
- 7) La sélection par le demandeur du fournisseur de services d'investigation géophysique;
- 8) La rencontre entre le demandeur et le fournisseur et la visite préliminaire du site d'étude pour identifier les problèmes d'accessibilité au territoire;
- 9) L'obtention des droits de passage sur les terrains privés;
- 10) La mobilisation des équipements géophysiques, de l'équipe d'investigation géophysique du fournisseur et d'un représentant du demandeur;
- 11) La réalisation de l'investigation géophysique en présence d'un représentant du demandeur;
- 12) La démobilisation des équipements géophysiques et de l'équipe d'investigation géophysique du fournisseur;

- 13) Le traitement, l'inversion et l'interprétation des données géophysiques acquises lors de l'investigation géophysique par un géophysicien expérimenté;
- 14) L'intégration des données de forages si disponibles dans l'interprétation des données géophysiques;
- 15) La production de coupes hydrostratigraphiques interprétatives;
- 16) L'identification de cibles anormales;
- 17) La rédaction d'un rapport d'investigation géophysique où les détails sur les étapes précédentes apparaissent avec des recommandations sur la localisation et la réalisation de forages pour déterminer la cause des cibles anormales;
- 18) Le dépôt du rapport d'investigation géophysique.

Dans l'éventualité d'une entente de gré à gré entre un demandeur et un fournisseur pour la réalisation d'une investigation géophysique au lieu d'un appel d'offres de services formel, les étapes précédentes sont aussi pertinentes pour s'assurer du succès de cette investigation. Dans tous les cas, le géophysicien expérimenté responsable de l'investigation géophysique devrait avoir au moins cinq années d'expérience en géophysique appliquée à l'hydrogéologie (hydrogéophysique). Il doit être en mesure d'en faire la démonstration par la réalisation antérieure d'investigations géophysiques appliquées à l'hydrogéologie auxquelles il a participé.

Coûts d'une investigation géophysique

Les coûts d'une investigation géophysique dépendent des éléments suivants :

- Les objectifs à atteindre;
- La superficie du territoire à couvrir;
- La profondeur d'investigation à atteindre;
- Le type de dépôts et leur stratigraphie;
- La ou les méthodes géophysiques retenues, les équipements géophysiques pour réaliser les levés et le déploiement de ces équipements sur le terrain;
- Le nombre de lignes de levé géophysique pour couvrir le territoire;
- La mobilisation et la démobilisation des équipements géophysiques et de l'équipe d'investigation géophysique;
- Le nombre de membres de l'équipe d'investigation géophysique;
- La durée de l'investigation géophysique sur le terrain;
- Le traitement et l'inversion des données géophysiques;
- La production et l'interprétation des modèles géophysiques obtenus de l'inversion;
- La production de cartes de localisation des levés géophysiques et de coupes hydrostratigraphiques interprétatives;
- La rédaction du rapport d'investigation géophysique.

En général, les quatre derniers éléments précédents, qui dépendent du nombre de méthodes géophysiques utilisées et du nombre de lignes de levé géophysique pour couvrir le territoire, correspondent à plus de 50 % des coûts d'une investigation géophysique. Ces éléments qui nécessitent plusieurs heures de travail sont normalement sous la responsabilité d'un géophysicien expérimenté qui commande une rémunération plus importante.

Les méthodes d'investigation géophysique

Les méthodes géophysiques peuvent être classées en plusieurs catégories (voir le tableau ci-dessous).

Les méthodes passives

La première catégorie, qui comprend les méthodes passives de mesure de phénomènes terrestres naturels telles que l'étude des champs de potentiel gravitationnel et magnétique terrestre, présente peu d'intérêt pour des applications en hydrogéologie. Elles ont leur utilité principalement en exploration minière et dans l'étude de la physique et de la structure interne de la Terre. Cependant, dans le cas d'une vallée profonde remplie de sédiments quaternaires, la cartographie des anomalies du champ gravitationnel présente un bon potentiel pour estimer les variations de l'épaisseur des dépôts quaternaires. À une échelle régionale, la mesure des anomalies du champ magnétique peut être utile pour la cartographie des formations géologiques de différentes susceptibilités magnétiques et d'aimantation rémanente variable. En présence d'objets métalliques enfouis dans des dépôts quaternaires dont la susceptibilité électrique est élevée, la cartographie locale des anomalies du champ magnétique peut révéler la présence de ces objets.

Les méthodes actives

Les méthodes géophysiques dites actives avec une perturbation artificielle telle que la circulation d'un courant électrique ou la propagation d'ondes sismiques dans le sous-sol présentent un excellent potentiel pour des applications en hydrogéologie (voir le tableau ci-dessous).

Les termes *sondage*, *traînée*, *profilage* (ou *profil*), *tomographie* et *cartographie* sont souvent employés en géophysique. Lors d'un sondage qui est semblable à un forage, les variations verticales en un endroit donné d'une propriété physique donnée dans le sous-sol sont mesurées. Un exemple de sondage est celui de résistivité électrique avec la configuration des électrodes dite de Schlumberger où le centre du dispositif des électrodes à la surface du sol demeure fixe, mais où la distance entre les électrodes de courant et de potentiel est augmentée progressivement afin d'investiguer de plus en plus profondément dans le sous-sol. Une traînée de résistivité électrique permet, en déplaçant latéralement à la surface du sol le dispositif d'électrodes sans modifier la distance de séparation entre les électrodes, de mesurer les variations latérales de résistivité électrique à une profondeur fixe dans le sous-sol le long d'une ligne de levé géophysique. Le profilage est une combinaison du sondage et de la traînée qui débouche sur une vue en coupe des variations en profondeur et latérales de résistivité électrique dans le cas présent. La tomographie est synonyme de profilage. Cependant, en utilisant une configuration particulière des électrodes de courant et de potentiel, il est possible d'effectuer de la tomographie tridimensionnelle (3D) de résistivité électrique. Au lieu d'une vue en coupe, c'est un cube des variations de résistivité électrique dans le sous-sol qui est produit. Finalement, il est possible de faire de la cartographie en réalisant des traînées de résistivité électrique le long de plusieurs lignes parallèles de levé géophysique.

Tomographie de résistivité électrique

Avec l'avènement des systèmes multi-électrodes de résistivité électrique et de logiciels commerciaux performants de modélisation directe et d'inversion en géophysique, la tomographie de résistivité électrique est un outil géophysique de plus en plus privilégié pour des applications en hydrogéologie. En effet, les différents types de dépôts quaternaires et de formations géologiques sont caractérisés par des plages de variation de résistivité électrique qui leur sont propres. La teneur en eau et la phase de l'eau dans ces dépôts affectent directement leur résistivité électrique. La connaissance de la stratigraphie locale ou l'accès à des informations de forages d'un site d'étude facilite l'interprétation des modèles de résistivité électrique obtenus de l'inversion des données de tomographies de résistivité électrique. La profondeur d'investigation d'une tomographie de résistivité électrique dépend du nombre d'électrodes, du système employé, de la configuration des électrodes et de la distance de séparation entre les électrodes. Avec un système de 96 électrodes et une distance de séparation entre les électrodes de 5 m, une profondeur d'investigation de quelques dizaines de mètres peut être atteinte. En présence d'une couche superficielle conductrice de faible résistivité électrique, par exemple une couche d'argile ou de silt, qui draine tout le courant électrique et empêche leur circulation en profondeur, la profondeur d'investigation peut être sensiblement réduite. En

plus des pseudo-sections et des modèles de résistivité électrique, le demandeur de services d'investigation géophysique devrait également demander au fournisseur la production de modèles de résistivité électrique avec la matrice de résolution. Lorsque la résolution de la tomographie de résistivité électrique diminue en profondeur, l'interprétation du modèle de résistivité électrique à cette profondeur devient incertaine. Le déploiement des électrodes à la surface du sol peut se faire facilement. Seul le piétinement des opérateurs sur le terrain perturbe le milieu. Avec un système de 96 électrodes et une distance de séparation entre les électrodes de 5 m, un taux de production de plus d'un kilomètre par jour de tomographie de résistivité électrique peut être attendu.

La méthode électromagnétique

La méthode électromagnétique consiste à faire circuler un courant électrique variable dans une boucle de fil électrique pour produire un champ magnétique primaire transitoire autour de la boucle. Lorsqu'un corps conducteur de faible résistivité électrique se trouve près de la boucle, la variation temporelle du champ magnétique primaire est à l'origine d'un flux du champ magnétique dans le corps conducteur. Ce flux génère des courants électriques dans le corps conducteur par induction électromagnétique qui sont à l'origine d'un champ magnétique secondaire transitoire autour du corps. Ce champ magnétique secondaire peut être mesuré à l'aide d'une seconde boucle de fil électrique grâce aussi à l'induction électromagnétique. Le signal dans cette seconde boucle qui provient de l'induction électromagnétique du champ magnétique primaire doit être éliminé. Seul le signal du champ magnétique secondaire est enregistré et traité pour obtenir de l'information sur la conductivité électrique du sous-sol en profondeur. Les deux boucles de fil électrique peuvent être déposées à la surface du sol pour effectuer un sondage électromagnétique. Pour une boucle de fil électrique du champ magnétique primaire de quelques dizaines de mètres de diamètre, une profondeur d'investigation de l'ordre de 250 m peut être atteinte. En déplaçant le dispositif de point en point à la surface du sol le long d'une ligne de levé géophysique, les variations en profondeur et latérales de conductivité électrique du sous-sol peuvent être obtenues. Le déploiement de ces boucles de fil électrique à la surface du sol peut être problématique si l'accès au site d'étude est limité. Le dispositif de deux boucles de fil électrique peut être aussi élingué par un hélicoptère pour faire un levé géophysique aéroporté le long de plusieurs lignes de vol. Les coûts d'un levé géophysique aéroporté sont très élevés notamment sur le plan de la mobilisation et de la démobilisation des équipements, mais, dans le cadre d'une cartographie hydrogéologique régionale à l'échelle d'une municipalité régionale de comté par exemple, les informations obtenues sur les dépôts quaternaires, la géologie et les eaux souterraines peuvent justifier cet investissement.

Le géoradar

Le géoradar est aussi une méthode électromagnétique pour obtenir de l'information sur les structures sédimentaires du sous-sol. Le géoradar est composé d'une antenne émettrice et d'une antenne réceptrice du signal radar d'une fréquence de plusieurs dizaines de MHz. Ces antennes sont des boucles de fil électrique de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres de longueur selon la fréquence d'émission du signal radar dans lesquelles un courant électrique circule. La résolution et la profondeur d'investigation souhaitées dépendent de la fréquence d'émission du signal radar. De façon générale, plus la fréquence est élevée, meilleure est la résolution, mais la profondeur d'investigation est plus faible.

Des vues en coupe du sous-sol, nommées profils de géoradar, en fonction du temps de propagation du signal radar et de la position du dispositif d'antennes le long d'une ligne de levé géophysique sont produites lors de levés de géoradar. Des réflecteurs cohérents du signal radar apparaissent sur les profils de géoradar qui correspondent à la réflexion du signal radar émis par l'antenne émettrice sur des interfaces telles que les contacts stratigraphiques entre des unités géologiques ou la nappe phréatique et capté par l'antenne réceptrice. En connaissant la genèse des dépôts quaternaires du site d'étude, on peut inférer le type de dépôt et leurs structures sédimentaires qui leur sont propres à partir de la géométrie et des relations spatiales des réflecteurs visibles sur les profils de géoradar.

Pour déterminer la profondeur des réflecteurs et des contacts stratigraphiques à leur origine, il est nécessaire de connaître la vitesse de propagation du signal radar qui peut être déterminée d'un levé de

géoradar du point milieu commun ou, encore, des réflecteurs hyperboliques identifiés sur un profil de géoradar en mode réflexion.

Dans des conditions idéales, c'est-à-dire pour un sous-sol faiblement conducteur composé de sables et de graviers secs ou humides, une profondeur d'investigation supérieure à 10 m, voire de 30 ou 40 m dans des cas exceptionnels, peut être atteinte. En présence d'une couche superficielle conductrice telle qu'une argile ou un silt, le signal radar est atténué rapidement dans ce milieu et la profondeur d'investigation est alors très faible. Il n'est pas recommandé de réaliser un profil de géoradar dans de telles conditions. Le taux de production d'un levé de géoradar peut être de plusieurs kilomètres par jour.

Les méthodes sismiques

Parmi les méthodes sismiques, selon le mode de propagation des ondes sismiques considéré, plusieurs approches peuvent être employées.

La sismique réfraction est l'approche la plus facile à utiliser. À l'aide d'une chaîne de 24 géophones alignés à la surface du sol et espacés les uns des autres de plusieurs mètres, la propagation des ondes sismiques générées par une source sismique à la surface du sol est enregistrée par les géophones à l'aide d'un sismographe. Il est possible d'inférer l'épaisseur des couches de sédiments quaternaires, le pendage des contacts stratigraphiques entre les couches, la vitesse de propagation des ondes sismiques de compression dans chaque couche et le type de sédiments qui compose chaque couche à partir de la détermination des temps de propagation des premières arrivées des ondes sismiques directes et réfractées sur les sismogrammes pour quelques points de tir sismique le long de la ligne de géophones. Une profondeur d'investigation de quelques dizaines de mètres peut être atteinte. Lorsqu'une couche d'argile ou de silt affleure, l'impact d'une masse de quelques kilogrammes sur une plaque métallique déposée à la surface du sol est suffisamment puissant pour générer des ondes sismiques qui peuvent atteindre cette profondeur d'investigation. Pour un dépôt de sable en surface, l'utilisation d'une source sismique plus puissante telle que l'explosion de dynamite enfouie à la surface du sol peut être nécessaire. Lorsqu'il y a une mince couche en profondeur ou une diminution de la vitesse de propagation des ondes sismiques de compression dans une couche sous-jacente en passant d'une couche superficielle de sable dense à une couche d'argile en profondeur par exemple, le modèle sismique obtenu du levé de sismique réfraction n'est pas en mesure d'identifier cette couche mince ou de résoudre cette stratigraphie. En augmentant le nombre de points de tir sismique le long de la ligne de géophones, il est possible d'effectuer de la tomographie de sismique réfraction et de produire des modèles de variations de la vitesse de propagation des ondes sismiques de compression dans le sous-sol en profondeur et latéralement.

À partir des équipements précédents, un profil de sismique réflexion peut également être effectué. Ce sont des arrivées tardives associées aux ondes réfléchies sur les sismogrammes qui sont d'intérêt dans cette approche. Bien qu'il soit possible d'effectuer un profil de sismique réflexion avec seulement un sismographe de 24 canaux et d'autant de géophones, il est préférable d'utiliser de 48 à 96 géophones, voire même plus, et un sismographe du même nombre de canaux afin d'augmenter le taux de production d'un tel levé géophysique. La distance de séparation de quelques mètres entre les géophones est beaucoup plus faible en sismique réflexion qu'en sismique réfraction et les points de tir sismique sont aussi beaucoup plus rapprochés les uns des autres le long de la ligne de géophones. Un peu à l'image des profils de géoradar, un profil de sismique réflexion est produit à la suite d'un levé de sismique réflexion. Des réflecteurs cohérents apparaissent sur les profils de sismique réflexion qui correspondent à la réflexion des ondes sismiques sur des interfaces telles que les contacts stratigraphiques entre des unités géologiques. Tout comme pour le profil de géoradar, pour déterminer la profondeur des réflecteurs et des contacts stratigraphiques à leur origine, il est nécessaire de connaître la vitesse de propagation des ondes sismiques. À cet effet, le modèle de vitesse de propagation des ondes sismiques de compression obtenu de la tomographie de sismique réfraction mentionné précédemment peut être utilisé.

Étant donné qu'il y a deux types d'ondes de volume qui se propagent à des vitesses différentes dans le sous-sol, soit les ondes sismiques de compression et les ondes de cisaillement, dont les modes de propagation sont différents l'un de l'autre, il est possible de les distinguer sur les sismogrammes. Cette distinction est facilitée si des géophones triaxiaux sont utilisés au lieu des géophones verticaux usuels pour

détecter les modes de propagation des deux types d'ondes sismiques de volume. En outre, certaines sources sismiques qui génèrent plus d'ondes sismiques de cisaillement que le seul impact d'une masse sur une plaque métallique déposée à la surface du sol peuvent être employées. Par conséquent, deux profils peuvent être produits lors d'un levé de sismique réflexion : le profil des ondes sismiques de compression et celui des ondes sismiques de cisaillement. Pour le deuxième profil, un autre modèle de vitesse de propagation, soit celui des ondes sismiques de cisaillement, est nécessaire pour transformer le temps de propagation de ces ondes en une profondeur atteinte. Ce modèle peut aussi être obtenu d'un levé de sismique réflexion en analysant un autre mode de propagation des ondes sismiques, soit celui des ondes de surface. Le traitement et l'analyse de l'ensemble des modes de propagation des ondes sismiques d'un levé de sismique réflexion nécessitent une expertise poussée dans le traitement du signal sismique et un effort majeur.

Les diagraphies géophysiques

Les diagraphies géophysiques constituent la troisième catégorie proposée dans le tableau ci-dessous. En modifiant la configuration des équipements géophysiques et leur déploiement, les méthodes géophysiques précédentes peuvent être utilisées dans des trous de forage pour mesurer différentes propriétés physiques des formations géologiques en fonction de la profondeur atteinte dans le forage. La majeure partie des diagraphies géophysiques sont effectuées dans des trous de forage dans le socle rocheux. En effet, sous de telles conditions, les parois du forage se maintiennent et le forage demeure accessible pour qu'on puisse y glisser des sondes diagraphiques. Lorsqu'un tubage de protection en acier est utilisé en surface pour garantir l'accès au forage, la plupart des diagraphies géophysiques ne fonctionnent pas dans ce tubage qui perturbe le signal émis par les sondes. Dans certains cas où un tubage en plastique est utilisé dans des dépôts quaternaires pour éviter l'effondrement du sol dans le forage, certaines diagraphies géophysiques telles que la diagraphie électromagnétique pour mesurer la conductivité électrique des formations géologiques traversées peuvent fonctionner. Sans description de forage disponible dans le cas d'un forage destructif sans échantillonnage, les diagraphies géophysiques peuvent remplacer ces descriptions. Même avec des descriptions disponibles de forages, les diagraphies géophysiques demeurent utiles. Elles sont complémentaires aux forages et fournissent des informations pertinentes sur différentes propriétés physiques des formations géologiques traversées par le forage. Les diagraphies géophysiques sont très utiles pour caractériser les aquifères fracturés dans la roche dure.

L'essai de pénétration au piézocône

Finalement, à titre de quatrième catégorie, l'essai de pénétration au piézocône dans des dépôts de sédiments fins est un outil d'investigation qui est fréquemment employé en géotechnique. Il est possible d'intégrer différentes sondes géophysiques dans le pénétromètre dont un module de résistivité électrique, des géophones ou des accéléromètres triaxiaux, une sonde électromagnétique pour mesurer la teneur en eau et une sonde à fluorescence pour déterminer la présence d'hydrocarbures. Lors d'un essai de pénétration au piézocône, en plus des diagraphies usuelles de résistance à la pointe, de frottement et de pressions interstitielles, des diagraphies de résistivité électrique, de vitesse de propagation des ondes sismiques de compression et de cisaillement, de la teneur en eau et de la présence d'hydrocarbures peuvent être obtenues. Couplé aux résultats des autres méthodes géophysiques mentionnées précédemment, l'essai de pénétration au piézocône sismo-électrique est complémentaire et permet de contraindre l'inversion des données géophysiques.

Liste des méthodes géophysiques couramment employées, utiles en hydrogéologie

Méthodes	Contraste physique	Paramètres mesurés ou calculés	Applications	
I) Méthodes passives de la mesure de phénomènes terrestres naturels			Exploration minérale (peu utile en hydrogéologie)	
II) Méthodes actives avec une perturbation artificielle				
Radiométrique	Sonde à neutrons	Hydrogène	Neutrons lents	Teneur en eau dans les formations géologiques
Électrique	Résistivité : <ul style="list-style-type: none"> • sondage • profilage 	Conductivité électrique	Résistivité apparente	Investigation des dépôts quaternaires et recherche en eau, exploration minérale
Électrique	Polarisation provoquée : <ul style="list-style-type: none"> • transitoire (temporel) • fréquentiel 	Polarisations d'électrodes et de membrane	Chargeabilité	Investigation des dépôts quaternaires et recherche en eau, exploration minérale des sulfures disséminés et massifs
Électromagnétique	Sondage fréquentiel : <ul style="list-style-type: none"> • boucle de courant au sol • boucle de courant aéroporté 	Conductivité électrique et perméabilité magnétique	Nombreux paramètres : <ul style="list-style-type: none"> - amplitude et phase du champ - composantes en phase et en quadrature 	Investigation des dépôts quaternaires et recherche en eau, exploration minérale des minerais conducteurs et des filons
Électromagnétique	Géoradar	Constante diélectrique	Amplitude et temps de propagation du signal radar	Investigation des dépôts quaternaires, imagerie des structures sédimentaires
Sismique	Sismique réfraction, sismique réflexion et analyse spectrale des ondes de surface	Densité et pression	Mode de propagation, vitesse de propagation, amplitude, phase et contenu en fréquence des ondes sismiques	Structures et couches géologiques, dômes de sel
III) Diagraphies géophysiques (toutes les méthodes précédentes)				
IV) Essais de pénétration au piézocône sismo-électrique				