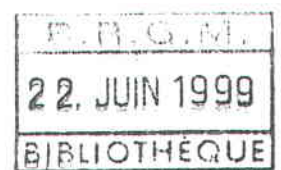




Détection des cavités souterraines par méthodes géophysiques en région Haute-Normandie

Guide de synthèse



Mots clés : Géophysique, Cavités souterraines, Craie, Haute-Normandie, France.

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

A. Beauce, J.P. Deroin (1999) - Détection des cavités souterraines par méthodes géophysiques en région Haute-Normandie : guide de synthèse. Rap. BRGM R 40626, 18 p.

INTRODUCTION

Ce guide de synthèse a été réalisé dans le cadre d'un projet cofinancé par le Ministère de l'Environnement, le Conseil Régional de Haute-Normandie et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Il a pour objectif de préciser ce qu'on peut attendre des investigations géophysiques sur des secteurs de vides souterrains supposés ou avérés en région Haute-Normandie.

Il s'adresse aux services déconcentrés de l'Etat ainsi qu'à l'ensemble des décideurs locaux. Il permettra à chacun d'acquérir les principes physiques de base sur lesquels reposent ces méthodes, de comprendre comment elles sont mises en œuvre sur le terrain et quelles en sont les limites et performances. Des ordres de grandeur des coûts sont également indiqués. Toutes les méthodes décrites dans ce guide ne concernent que les méthodes de géophysique dites "non intrusives", c'est-à-dire qui ont pour tâche d'imager le sous-sol à partir de mesures réalisées en surface.

La mise en œuvre de ces méthodes ne doit intervenir **qu'après d'autres étapes**, à savoir : recherches d'archives, repérages sur le terrain d'éventuels indices de surface, collectes d'informations locales, photos interprétation.

En préambule, il faut toujours se souvenir que les résultats obtenus à partir d'une méthode géophysique se fondent sur la présence ou l'absence d'une *anomalie d'un paramètre physique* mesuré dans un environnement géologique particulier. Par la suite, l'interprétation que l'on fait de cette anomalie en terme de présence ou d'absence d'une *cavité* demeure toujours une phase difficile. Si une anomalie géophysique est interprétée comme un indice de présence d'une cavité, il faudra toujours réaliser des sondages de reconnaissance afin de vérifier cette interprétation. En effet, le ou les origines géologiques d'une anomalie

physique ne sont pas nécessairement uniques : par exemple, une poche de sable d'un certain volume peut produire une anomalie microgravimétrique identique à celle d'une cavité.

Ainsi, il faut toujours avoir à l'esprit que l'utilisation de ces méthodes ne dispense en aucune façon de faire réaliser des sondages de reconnaissance. Toute anomalie mise en évidence doit être contrôlée par forage. Ainsi l'interprétation sera d'autant meilleure que le plus grand nombre d'information sera pris en compte.

Il est également important d'avoir toujours à l'esprit que l'absence d'anomalie d'un paramètre physique ne veut pas nécessairement dire qu'il n'y a pas de cavité sous la zone d'étude, mais plutôt qu'il n'y a pas de cavité *détectée*, voire *détectable*, par la méthode utilisée. En effet, toute méthode géophysique possède des limites intrinsèques et des limites d'origines externes à la méthode elle-même. Les premières sont bien connues et quantifiables précisément car elles sont liées à l'appareil lui-même et à la précision des mesures. Par contre, les secondes sont plus subjectives et difficilement appréciables : en effet, la mesure d'un paramètre physique prend en compte les influences de nombreux "objets" dont on ne soupçonne pas toujours la présence et qui peuvent parasiter, voire masquer, l'influence d'une cavité sur ce paramètre. D'autres cas de figures peuvent également se présenter : on citera en particulier celui d'un mauvais dimensionnement de la campagne de mesures par rapport à la taille du vide recherché, excluant dès le début toute chance de le détecter.

Enfin, on notera que la combinaison de techniques géophysiques se fondant sur des paramètres physiques différents peut aider à lever certaines ambiguïtés d'interprétation.

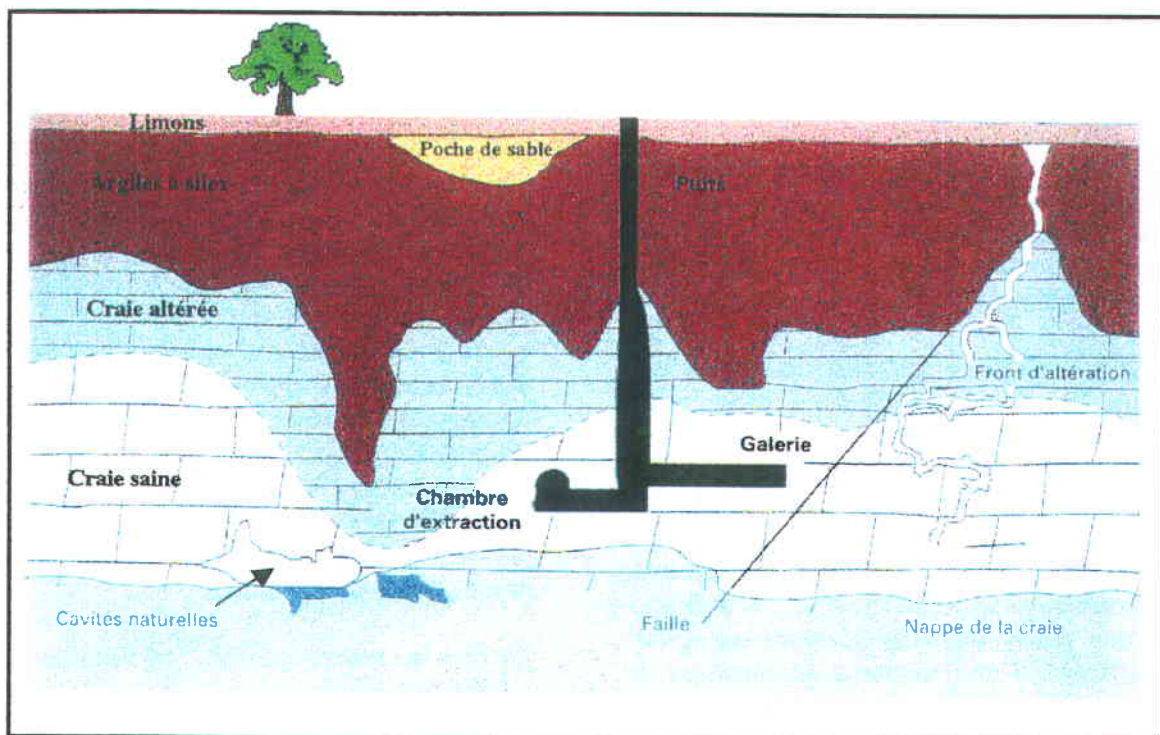
1. LES MARNIÈRES DE HAUTE-NORMANDIE

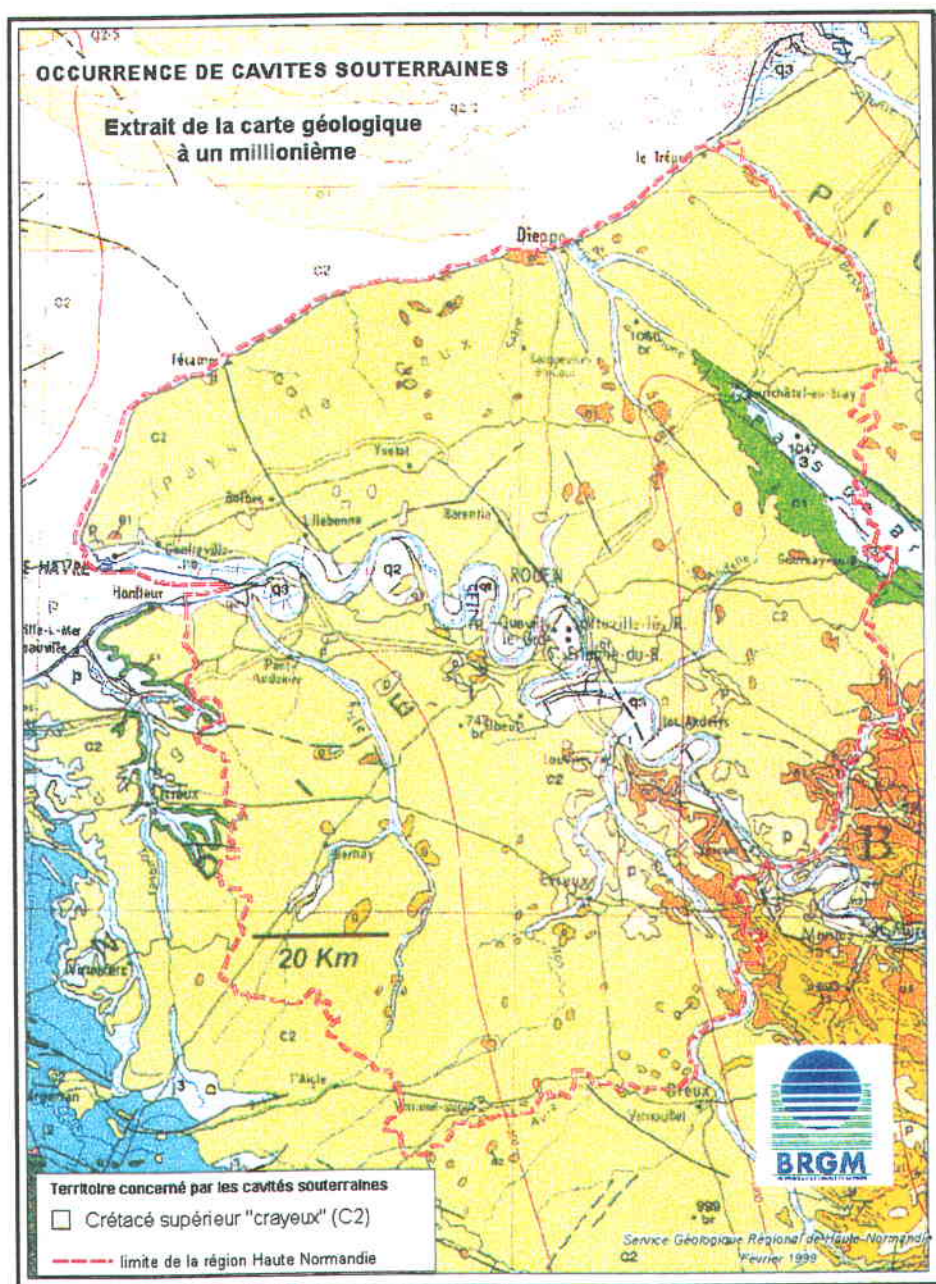
Le sous-sol de la région Haute Normandie, est caractérisé par la présence de nombreuses cavités d'origine naturelle (karsts, bétoires) ou humaine (marnières, argilières). Les marnières représentent l'essentiel des cavités de cette région et elles en constituent une particularité : leur nombre est estimé à plusieurs dizaines de milliers.

Schématiquement, les marnières se situent dans la craie à des profondeurs variables pouvant aller jusqu'à une soixantaine de mètres. Les hauteurs de vides créés sont généralement de 2 à 3 m. Leurs extensions latérales sont extrêmement variables : en moyenne (mais il y a une grande hétérogénéité), une cavité typique peut se

caractériser par des dimensions de l'ordre de 20 m par 20 m.

La craie est recouverte par des terrains argileux (argile à silex) et l'interface craie-argile est loin d'être plate : des langues d'argiles en forme de doigts (entonnoirs d'altération) peuvent pénétrer plus ou moins profondément dans la craie (jusqu'à une vingtaine de mètres). Lorsque ces zones argileuses sont interceptées par des marnières, indépendamment des instabilités mécaniques qu'elles peuvent générer, leur remplissage meuble peut s'y vidanger lors d'épisodes climatiques anormalement pluvieux et se traduire, à terme, par des dégâts en surface. Une couverture superficielle de limons masque ces argiles. Son épaisseur, très variable, peut atteindre une dizaine de mètres.





Carte schématique d'occurrence de cavités souterraines

Géologiquement, des marnières (entre autres cavités d'origine anthropique) peuvent exister :

- au sein de plateaux crayeux recouverts d'argiles et de limons (donc sans affleurement de craie...),
- à distance du bord de ces plateaux (sinon il y aurait eu exploitation de "marnes" à ciel ouvert, à flanc de coteau),
- lorsque le toit de la craie est à une profondeur inférieure à 80 m environ,
- pour autant que la frange supérieure de la craie (seule exploitable) soit hors nappe,
- enfin, en présence de sols acides et argileux, nécessitant un tel amendement.

Ces conditions excluent les terroirs où la craie est absente (Pays de Bray par exemple) et les zones recelant une nappe d'eau souterraine proche de la surface (grandes vallées). En résumé, 85 % environ du territoire de la Haute Normandie, est concerné.

2. LA MICROGRAVIMETRIE

2.1 PRINCIPE ET GENERALITES

La gravimétrie fut initialement utilisée pour l'étude structurale des bassins sédimentaires en vue d'applications pétrolières. Elle étudie les variations de l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre. Les variations observées sont ensuite traduites en termes géologiques (structures ou variations latérales de densité dans le sous-sol).

La microgravimétrie repose sur la mesure des valeurs relatives de la gravité à la surface du sol. Ces valeurs sont influencées par la **répartition des densités** dans le proche sous-sol. Les variations du champ de gravité sont couramment exprimées en microgal (μGal ; $1 \mu\text{Gal} = 0,001 \text{ mGal}$; $1 \text{ mGal} = 1 \text{ cm/s}^2$). Cette technique, d'invention française, est couramment utilisée pour la détection des cavités depuis les années 1970.

Puisque les cavités créent un déficit de densité par rapport aux terrains encaissants, cette méthode est *a priori* adaptée pour la détection des vides souterrains. En effet, les variations relatives de densité des roches sédimentaires entre elles, telles que celles rencontrées en Haute-Normandie, sont relativement faibles (au maximum environ $0,8 \text{ g/cm}^3$), alors qu'elles atteignent leur paroxysme dans le cas d'un vide rempli d'air (environ -2 g/cm^3) ou, dans une moindre mesure, dans le cas d'un vide ennoyé (environ -1 g/cm^3).

2.2 MISE EN ŒUVRE

Les mesures sont réalisées à l'aide de **gravimètres** très sensibles dont la sensibilité est de l'ordre du μGal .

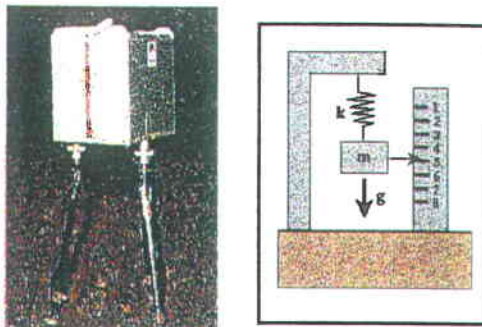


Photo d'un microgravimètre Scintrex. Le principe de fonctionnement est semblable à celui d'un peson à ressort de très grande précision auquel est suspendu une masse constante : pour mesurer les variations de l'accélération de la pesanteur entre deux endroits, on mesure les variations de poids.

Les stations de mesures microgravimétriques sont généralement réparties avec un espacement constant le long de **lignes** (profils) ou aux **nœuds d'une grille**. Cet espacement doit être adapté aux cibles que l'on recherche : en effet plus les structures sont de petites tailles et très localisées, plus les anomalies créées sont étroites et plus la maille de mesure doit être resserrée. Cette méthode non destructive ne produit aucun dégât sur le terrain pendant la campagne de mesure.

Les mesures prennent en compte de nombreuses influences qui ne sont pas directement en rapport avec une cavité recherchée. Ainsi, des facteurs correctifs doivent être appliqués aux mesures brutes avant de passer à la phase d'interprétation d'une anomalie microgravimétrique : en particulier, on peut citer les effets des structures géologiques de grandes dimensions qui peuvent masquer l'effet des structures très locales qui sont recherchées. L'information finale, qui ne contient plus que les influences des sources localisées uniquement sous la zone d'étude (dues à une éventuelle cavité, mais aussi dues au contexte géologique très local), se trouve dans la **carte d'anomalie résiduelle** : c'est le document de travail sur lequel se base

l'interprétation. On comprend ainsi aisément que cette carte sera d'autant plus informative et fiable que les facteurs correctifs auront été déterminés avec précision.

En conséquence, la mise en œuvre de cette méthode nécessite **un opérateur très qualifié**. Cet opérateur peut réaliser plusieurs dizaines de mesures par jour et il se doit de respecter certaines règles, en particulier :

- réaliser un relevé topographique précis (précision en altitude meilleure que le centimètre) des stations de mesures ;
- établir une ou des bases afin d'y effectuer des mesures toutes les heures pour corriger des dérives instrumentales ;
- faire un inventaire des éventuelles sources (bâtiments, caves...) qui pourraient venir parasiter les mesures afin de pouvoir corriger leurs effets ;
- répéter un certain nombre de mesures afin de s'assurer de leur qualité (en général, 20% des mesures doivent être reprises).

2.3 PERFORMANCES, LIMITES, RECOMMANDATIONS

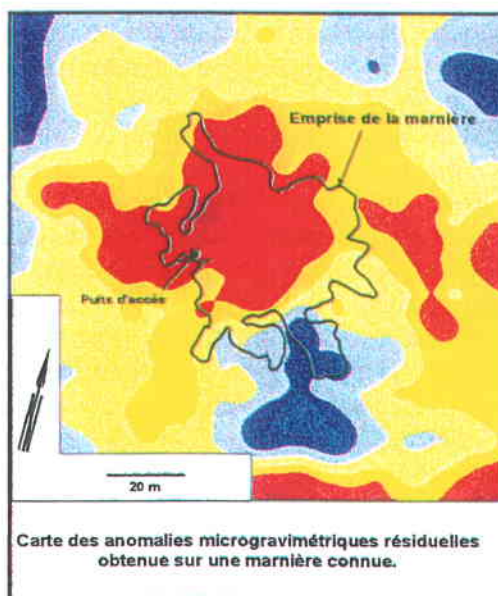
Compte tenu des différentes origines perturbatrices des mesures - vibrations, erreurs sur les mesures et les différentes corrections effectuées - un opérateur qualifié obtient généralement une précision sur les points répétés comprise entre 5 et 10 μ Gal.

En conséquence, la limite de détection communément admise pour cette méthode est d'environ 10 μ Gal. Pour fixer des ordres de grandeur, une cavité d'extension 10 m*10 m ayant une hauteur de vide de

3 m située à environ 20 m de profondeur produit une anomalie de cette amplitude.

Son **pouvoir de résolution** est fonction des caractéristiques de la cible recherchée - **profondeur** (l'anomalie gravimétrique est très rapidement atténuée de façon inversement proportionnelle au carré de la distance entre cette source et le sol), **taille** et **contraste de densité** par rapport au milieu environnant - et de **l'espacement des mesures**.

Les mesures étant souvent réalisées aux nœuds d'une grille, l'information résultante permet d'obtenir une carte des anomalies microgravimétriques résiduelles qui permet de préciser la position d'une cavité.

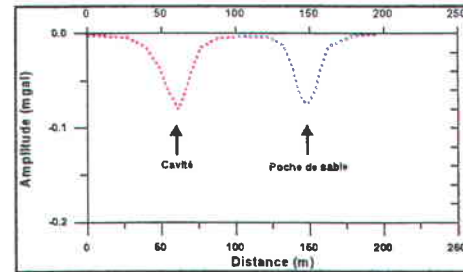
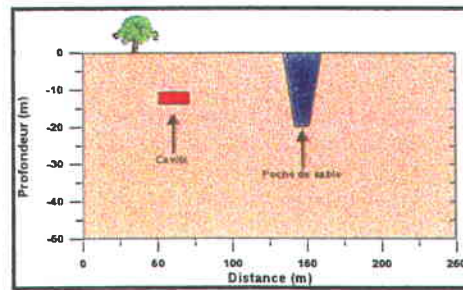


Exemple de carte microgravimétrique résiduelle obtenue sur un cas réel : en rouge, les zones présentant un déficit de masse ; en bleu, celles qui présentent un excès de masse. La méthode permet de détecter la marnière. Néanmoins, au sud, une zone "lourde" est également mise en évidence au dessus de cette marnière ; cette zone, liée à la présence de matériaux denses (silex) en subsurface, vient masquer la réponse gravimétrique de la cavité. Cet exemple confirme la nécessité déjà évoquée de contrôler les anomalies observées par des forages.

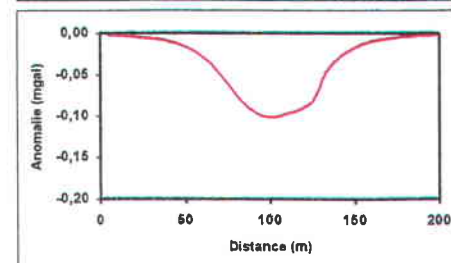
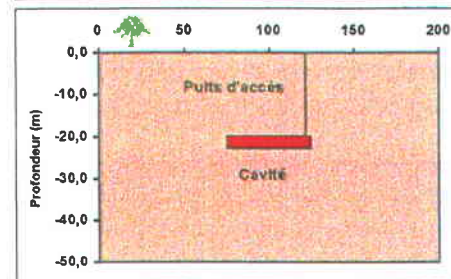
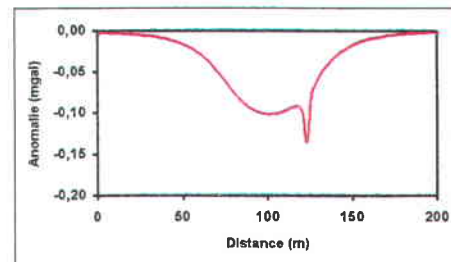
Dans des conditions favorables (bonnes connaissances des densités et des géométries des couches géologiques telles que les limons, et les argiles à silex), des outils de calcul permettent de fournir des informations sur la distribution des profondeurs et des dimensions des structures géologiques sous-jacentes à la zone d'étude.

Avant de réaliser une campagne de mesures, il est recommandé :

- de collecter et de fournir au géophysicien chargé de l'étude l'ensemble des informations disponibles concernant le lieu où la méthode sera appliquée : caractéristiques géologiques et physiques (contrastes de densité), taille et profondeur supposées de la cavité, relief topographique, présences de maisons, caves. Toutes ces informations seront utiles pour **dimensionner** une campagne de mesures (extension géométrique de l'étude, nombre de stations, espacement des mesures, etc.) en adéquation avec la cible recherchée. Elles pourront également lever certaines ambiguïtés au niveau de l'interprétation (**un défaut de masse peut avoir des origines multiples** qui ne sont pas nécessairement des cavités ; par exemple une même forme d'anomalie peut être provoquée par une cavité ayant une certaine caractéristique géométrique et située à une profondeur donnée, ou par une poche de sable de dimensions adéquates).
- De ne pas limiter les mesures à la zone d'extension supposée de la cavité proprement dite, mais plutôt de déborder de cette zone : ceci permettra une meilleure prise en compte de la composante régionale gravimétrique et ainsi de mieux définir l'anomalie résiduelle.



Exemple d'une cavité et d'une poche de sable produisant la même anomalie microgravimétrique.



En haut l'espacement des mesures permet de détecter la présence du puits d'accès à la cavité. En bas, cet espacement est trop grand et les mesures ne permettent pas de détecter sa présence.

- de faire des calculs prédictifs (modélisations) pour vérifier qu'une cavité d'une taille donnée située dans un environnement géologique supposé est détectable ou pas, et avec quel espacement de mesures. Ce dernier paramètre est fondamental : par exemple, un espacement trop grand entre les mesures peut ne pas permettre de repérer un ancien puits d'accès à une marnière qui souvent ne produit une anomalie gravimétrique discernable que sur des distances de quelques mètres.

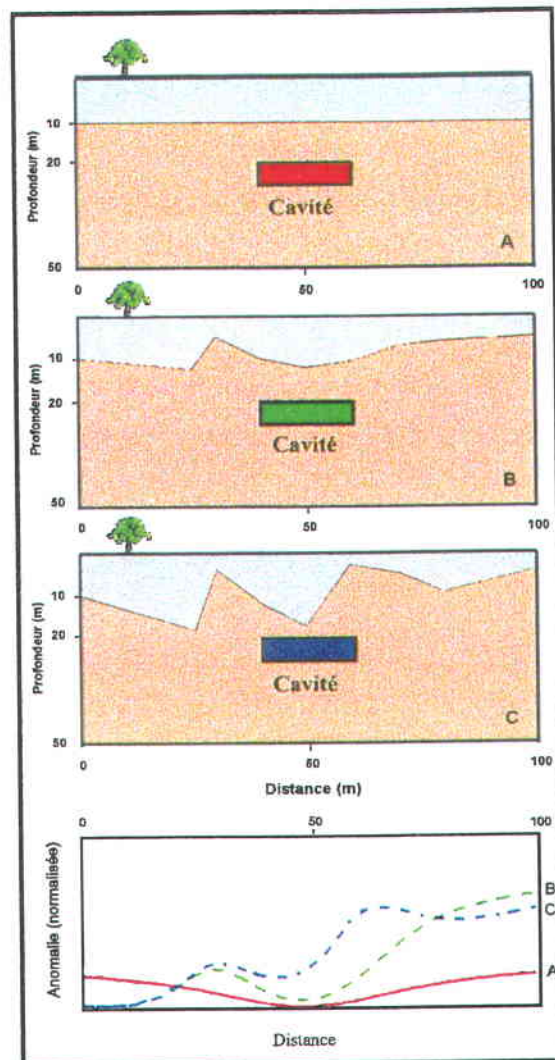
Il faut enfin noter que, malgré le fait que cette méthode soit sensible aux vibrations du sol, elle peut être utilisée dans des zones urbanisées (en travaillant de nuit par exemple).

La microgravimétrie demeure actuellement la méthode géophysique la plus à même de fournir une réponse sur la présence de cavité en Haute-Normandie.

Pour fixer des ordres de grandeurs, on peut indiquer qu'une marnière typique de la région d'extensions latérales 20 m*20 m et de 3 m de hauteur située à une profondeur de l'ordre de 10 m produit une anomalie tout à fait détectable d'environ 40 μ Gal. Cette même cavité située à une profondeur comprise entre 20 et 23 m produit une anomalie microgravimétrique d'environ 25 μ Gal : cette anomalie est détectable dans le cadre d'une étude, mais elle se rapproche des limites de la méthode compte tenues des perturbations des mesures liées aux hétérogénéités locales des terrains superficiels. Par contre, si elle se trouve à 40 m de profondeur, elle ne produit plus qu'une anomalie de quelques μ Gal, ce qui la rend alors indétectable avec les instruments actuellement disponibles.

Néanmoins, la variabilité des caractéristiques intrinsèques des marnières (extension, hauteur des vides, profondeur) couplée à une forte hétérogénéité du contexte géologique peut réduire largement ces capacités

théoriques de détection. En effet, les irrégularités des limites des couches géologiques de surface (en particulier argile - craie), perturbent les mesures pouvant rendre l'information provenant de la cavité difficilement discernable.



Influence des irrégularités géométriques des couches du sous-sol sur les anomalies microgravimétriques : en rouge, l'anomalie théorique en l'absence d'irrégularité (modèle A) - successivement en vert (modèle B) et en bleu (modèle C), les anomalies produites en présence d'irrégularités des terrains superficiels.

Enfin, il faut également noter qu'une cavité située au-delà de la profondeur théorique de détectabilité peut l'être en pratique de

façon indirecte si elle est le siège d'instabilités à l'origine de zones décomprimées se produisant à son aplomb : en effet, ces zones décomprimées induisent des déficits de densité des terrains surmontant la cavité qui peuvent, selon leur ampleur, influencer les mesures et servir ainsi d'indices révélateurs.

2.4 COÛTS INDICATIFS

Le coût de mise en œuvre de cette méthode est fonction du nombre de stations de mesures.

Un prix moyen incluant la mesure, le dépouillement, l'interprétation et le rapport d'étude est d'environ 250 F à 300 F TTC par point. Pour fixer les ordres de grandeurs, il faut compter sur la réalisation d'environ 400 stations pour réaliser une étude devant couvrir une zone de 1 ha ; ceci conduit à un coût global compris entre 100 kF et 120 kF TTC. On notera toutefois que pour un nombre de stations important (environ > 500 points), le prix moyen par station peut diminuer dans la mesure où les charges fixes contribueront plus faiblement au coût global de l'étude.

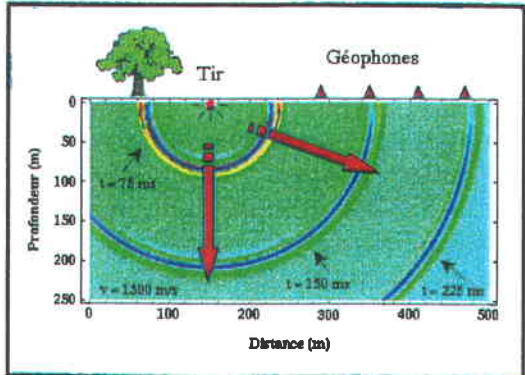
3. LES METHODES SISMIQUES

3.1 PRINCIPE ET GENERALITES

Les méthodes sismiques consistent à provoquer des ébranlements dans le sous-sol et à observer en surface différents types d'ondes générées au cours de ces ébranlements. A l'origine, elles ont été développées et elles sont toujours utilisées dans le domaine de l'exploration pétrolière, ou pour des objectifs de recherche fondamentale (Physique du Globe). Depuis une quinzaine d'années, les évolutions technologiques et l'amélioration des moyens de calculs informatiques ont conduit à l'utilisation de ces techniques pour des objectifs de détection des cavités. Les matériaux géologiques peuvent être caractérisés par leurs propriétés acoustiques ou par les vitesses de propagation des ondes sismiques.

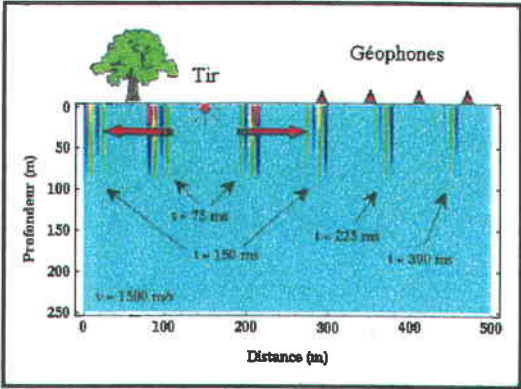
Deux principaux types d'ondes sont générées lors d'un ébranlement du sous-sol :

- les ondes de volume qui pénètrent à l'intérieur du sous-sol pour se réfléchir ou se réfracter sur des interfaces géologiques de natures différentes ;



Visualisation à différents instants d'une onde de volume se propageant dans un sous-sol homogène à une vitesse de 1500 m/s.

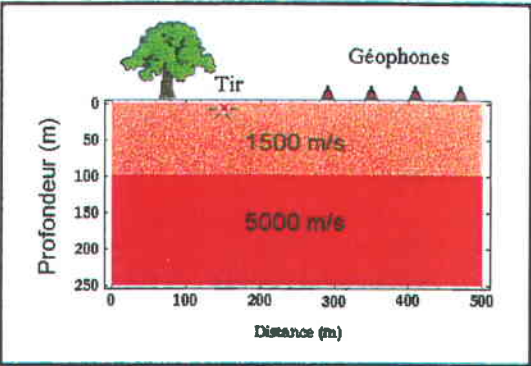
- les ondes de surface qui, comme leur nom l'indique, voyagent proche de la surface du sol.



Visualisation à différents instants d'une onde de surface se propageant près de la surface dans un terrain homogène.

La présence d'une cavité dans le sous-sol peut, sous certaines conditions physiques, constituer un obstacle à la propagation des ondes et entraîner des modifications de certains paramètres (temps de trajet, amplitudes et formes des signaux, vitesses de propagation des ondes, etc.) qui serviront de révélateurs de sa présence.

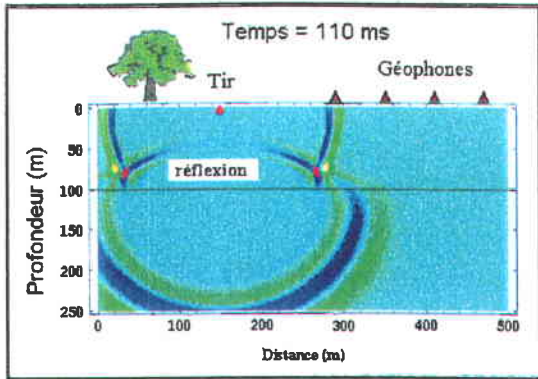
Différentes méthodes sismiques tirent partie des informations recueillies par ces ondes au cours de leur propagation dans le sol:



Exemple d'un modèle de sous-sol à 2 couches de vitesses sismiques différentes (respectivement 1500 m/s et 5000 m/s).

La sismique réflexion haute résolution s'intéresse aux ondes de volume qui se

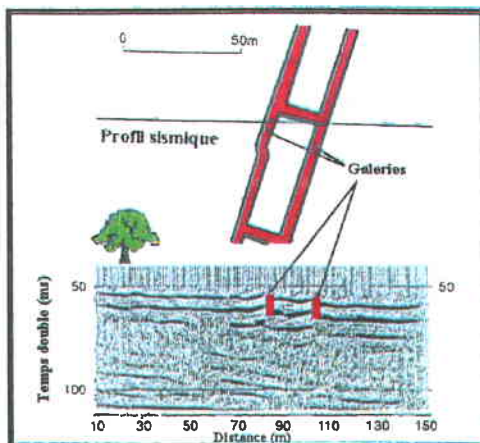
réfléchissent et se transmettent sur les différents horizons géologiques.



Sur la base du modèle précédent, une onde de volume se réfléchit sur la 2^{ème} couche.

Différents phénomènes peuvent révéler la présence d'une cavité :

- une perturbation et une atténuation de l'amplitude des ondes enregistrées sur les géophones situées au-dessus de la cavité : les ondes réfléchies sur une interface située sous la cavité verront leurs énergies diminuées par la présence de cette cavité au cours de leur propagation vers la surface. Ceci aura pour effet de provoquer une zone d'ombre et corrélativement une certaine désorganisation des horizons réflecteurs est alors observée.

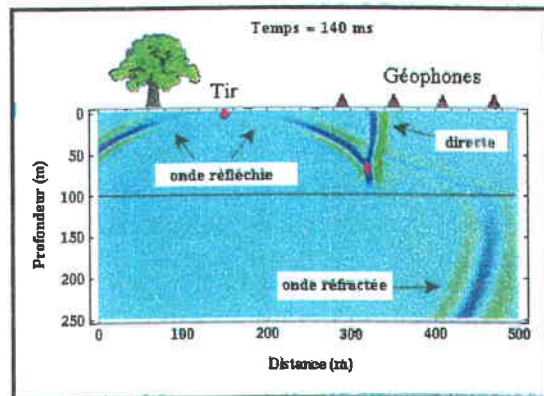


Exemple réel de profil sismique réflexion réalisé au-dessus de galeries de mines de gypse : en haut, plan de situation du profil. En bas, l'image sismique obtenue mettant en évidence une désorganisation des réflecteurs sismiques à l'aplomb des galeries.

- une réflexion sur le toit de la cavité : elle se produit lorsque les dimensions du vide sont suffisamment grandes pour perturber la propagation de l'onde dans les terrains.

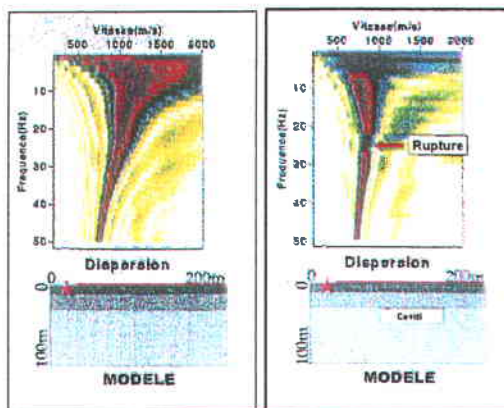
La *sismique réfraction* s'intéresse aux ondes réfractées le long des interfaces entre couches géologiques de vitesses différentes : les vitesses de propagation et les profondeurs de ces couches peuvent être ainsi déterminées.

Avec cette méthode, la présence de cavités se traduit par des **micro-retards** et des **atténuations des ondes** dans le milieu.



Sur la base du modèle précédent, une onde réfractée apparaît à la limite des deux couches considérées.

Récemment, des recherches sont menées sur une nouvelle méthode fondée sur l'analyse de la dispersion des ondes de surface (c.à.d. une variation de la vitesse des ondes sismiques en fonction de leur fréquence). Des résultats préliminaires encourageants ont été récemment obtenus avec cette méthode. S'ils s'avéraient concluants dans le futur, cette technique pourrait constituer une approche originale et de mise en œuvre relativement aisée.



Exemple de diagramme présentant : à gauche une réponse théorique en absence de cavité dans le sous-sol; à droite, la présence d'une cavité se manifeste par une rupture dans le diagramme pour certaines fréquences.

3.2 MISE EN ŒUVRE

Quelles que soient les méthodes sismiques, le matériel d'acquisition de données se compose d'une source d'ébranlement, d'un dispositif de mesure composé de plusieurs capteurs d'ondes sismiques (géophones - communément entre 12, 24 et 48) et d'un enregistreur sismique.

Il existe différents types de source sismique choisis en fonction des conditions de l'environnement du terrain étudié. On distingue les sources de surface et les sources enterrées. Les premières sont : les sources à impact (marteau, chute de poids), les fusils, les sources vibrantes. Les sources enterrées comprennent principalement les explosifs (dynamites, cordaux détonants, détonateurs).

Les géophones sont généralement disposés en surface à intervalles réguliers le long d'une ligne (profil) par rapport à la source.

La distance entre géophones, la distance entre la source et les géophones et la longueur de la ligne doivent être choisies en tenant compte de la profondeur supposée de la cible recherchée. La fréquence naturelle des géophones utilisés en sismique de

surface est communément de l'ordre de 30 Hz à 100 Hz.



Photo d'un géophone avec sa pointe permettant de l'enfoncer dans le sol.

Dès l'émission d'un train d'ondes produit par une source sismique, on enregistre les déplacements du sol pendant une durée déterminée qui est fonction de la profondeur d'investigation et des vitesses supposées du milieu étudié.

Pour réaliser un profil de mesure, selon les méthodes sismiques choisies, différentes configurations de dispositifs peuvent être mis en œuvre : tirs en début ou en fin de la ligne des géophones, tirs au centre de la ligne des géophones.

La mise en œuvre de ces méthodes nécessite au moins 2 opérateurs qualifiés (un géophysicien et un technicien). Un levé topographique peut être requis en cas de topographie accidentée.

Après la campagne de mesures, une phase de traitement des données est nécessaire. Cette phase a pour objet la remise en forme de l'information sismique enregistrée sur le terrain, de manière à mettre en évidence les caractères géologiques du sous-sol. Les séquences de traitement sont nombreuses avant d'aboutir à la section sismique finale interprétée. Ces méthodes nécessitent des moyens de calculs assez importants (en particulier pour la sismique réflexion) qui demandent une compétence affirmée ainsi qu'une bonne expérience de la part de l'ingénieur.

3.3 PERFORMANCES, LIMITES, RECOMMANDATIONS

Les signaux sismiques peuvent être parasités par différents types de bruits : véhicules, interférences électromagnétiques qui affectent la transmission des données dans les câbles, ou toute autre source de bruit sonore. En général l'influence de ces bruits peut être réduite en utilisant des sources plus puissantes ou en filtrant les données.

D'une façon générale, l'emploi des méthodes sismiques est **d'utilisation très délicate en milieu urbanisé**, en particulier à cause des sources explosives. On peut noter toutefois, que depuis une dizaine d'années, l'apparition sur le marché de nouvelles sources vibrantes permet d'élargir des champ d'application de cette technique dans de tels environnements. Si l'explosif a été retenu comme source d'ébranlement, un boutefeu habilité est requis et des autorisations doivent être obtenues auprès des autorités compétentes.

L'application de ces méthodes à la détection des cavités souterraines en région Haute-Normandie, en particulier de type marnières, qu'elles soient de sismique réflexion haute résolution, ou fondées sur l'analyse des ondes de surface reste encore limitée à des études ayant un caractère de recherche. Elles nécessitent la mise en place de programmes de R&D complémentaires pour mieux déterminer leurs capacités et limites.

La présence de limites très irrégulières entre les différentes couches géologiques rend l'application de la **sismique réflexion inadaptée à la détection des cavités de la région** : par contre, elle peut apporter des informations sur la distribution des vitesses

sismiques en fonction de la profondeur.

Les **facteurs limitant** les capacités des techniques sismiques à détecter les marnières en région Haute-Normandie sont principalement :

- les irrégularités et hétérogénéités des différentes couches géologiques particulièrement l'interface craie - argile à silex.
- la grande variabilité des vitesses sismiques caractérisant les différentes couches géologiques ainsi que leurs épaisseurs,
- les faibles dimensions des cavités elles-mêmes dans ce contexte structural géologique très hétérogène et variable.

3.4 COÛTS INDICATIFS

Ces méthodes, en particulier la sismique réflexion, ont récemment bénéficié d'une amélioration des moyens d'acquisition et des moyens de calcul qui vont dans le sens d'une diminution des coûts de mise en œuvre, de traitement et d'interprétation.

En sismique réfraction, le coût journalier (pour le déploiement de 3 dispositifs comprenant 24 géophones et la réalisation de 5 tirs à l'explosif) peut varier entre 15 000 et 20 000 F TTC, rapport d'interprétation compris.

En sismique réflexion haute résolution, un facteur 3 à 4 doit être appliqué à ces dernières estimations.

Pour la *méthode d'analyse des ondes de surface*, si les études ultérieures précisait son adaptation à la détection des cavités, on peut estimer que les coûts à prévoir seraient équivalents à ceux de la sismique réfraction.

4. LES METHODES ELECTRIQUES

4.1 PRINCIPE ET GENERALITES

Les méthodes électriques consistent à mesurer une différence de potentiel entre deux électrodes plantées dans le sol, qui aura été créée par une injection de courant continu entre deux autres électrodes. Ce qui différencie les méthodes électriques des méthodes électromagnétiques repose sur le fait que dans le premier cas les courants sont injectés dans le sol par l'intermédiaire d'électrodes, alors que dans le second cas les courants sont induits grâce à l'application de champs électromagnétiques variables en fonction du temps.

Le paramètre physique analysé par ces méthodes est la **résistivité électrique** (exprimée en Ohm.m). La résistivité est une propriété physique caractéristique d'une roche qui conditionne la circulation d'un courant dans un matériau. Ce paramètre varie en fonction de la nature de la roche, et différents facteurs vont affecter sa valeur : on peut citer, entre autres, la texture, la porosité, la fracturation, la teneur en eau, l'altération, la salinité.

Les cavités, lorsqu'elles sont vides, sont caractérisées par une **résistivité très importante** (en théorie la résistivité de l'air est infinie) par rapport aux résistivités des terrains environnants. Ces techniques s'appuient donc sur un fort contraste de la résistivité entre l'encaissant géologique et la cavité elle-même.

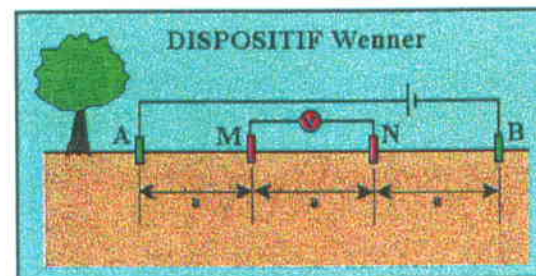
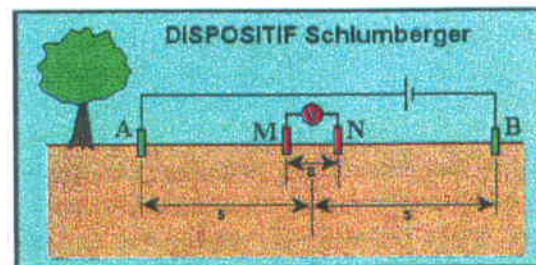
4.2 MISE EN ŒUVRE

Sur le terrain, on mesure le potentiel et l'intensité du courant, et on en déduit une **résistivité apparente** : le terme "apparent" est important, car ce n'est pas la résistivité vraie d'une roche qui est obtenue, mais une sorte de "moyenne" des différentes

résistivités des roches contenues dans un volume dépendant du dispositif de mesure utilisé (on dit aussi que la méthode est intégrante).

Cette résistivité apparente s'exprime sous la forme d'un rapport entre la différence de potentiel mesurée et l'intensité du courant émis à un facteur géométrique près. Ce facteur géométrique dépend de la position des électrodes les unes par rapport aux autres.

Un grand nombre de géométries de dispositifs existent ; les électrodes de mesures de potentiel peuvent être encadrées par celles qui servent à l'injection (dispositifs Schlumberger et Wenner), ou au contraire elles peuvent être séparées.



Schémas de principe pour 2 dispositifs électriques : un courant connu est injecté dans le sous-sol par les électrodes A et B, et la différence de potentiel est mesurée entre les électrodes M et N.

Chacun de ces dispositifs possède ses défauts et ses qualités (résolutions de stratifications horizontales, rapport signal sur bruit, sensibilité aux interfaces géologiques verticales, etc.).

Deux modes de mesures existent : le **profilage** et le **sondage**. Dans le premier

cas, on enregistre des variations latérales de la résistivité apparente. Dans le second cas, on étudie la variation de la résistivité en fonction de la profondeur, ce qui permet d'établir un modèle géoélectrique du sous-sol à l'aplomb de l'endroit où la mesure est réalisée. La combinaison du sondage et du profilage est appelée panneau électrique. Il permet de reconstruire une coupe géoélectrique en 2 dimensions, c'est à dire latéralement et en fonction de la profondeur. Dans tous les cas, la profondeur d'investigation dépend de l'écartement des électrodes du dispositif et de la résistivité du sous-sol.

4.3 PERFORMANCES, LIMITES, RECOMMANDATIONS

Les méthodes électriques en courant continu sont d'utilisation courante. Elles ne produisent aucun dégât sur le site de mesure. Elles présentent l'inconvénient d'être relativement lentes (mise en place des électrodes dans le sol, déroulage de câbles) et de nécessiter, outre un opérateur qualifié, une main d'œuvre qui peut selon les cas comporter plus de deux manœuvres.

Si leur mise en œuvre est relativement aisée, certaines de ces techniques requièrent une véritable expérience pour leur interprétation.

Ces méthodes sont de mise en œuvre limitée en milieu urbanisé et l'interprétation des résultats est complexe en présence d'infrastructures industrielles ou agricoles à cause des courants électriques parasites.

Pour des *applications en région Haute-Normandie*, elles peuvent permettre de préciser les géométries de la limite entre les argiles à silex et la craie, informations qui peuvent être utiles pour compléter les résultats d'autres méthodes géophysiques. Par contre, à ce jour, elles n'ont pas démontré leur fiabilité en terme de détection directe des cavités dans cette région. Les raisons sont principalement liées aux faibles dimensions des cavités eu égard à leur profondeur, entraînant des variations de résistivité apparente très faibles et donc difficilement détectables ; de plus, les effets sur les mesures des irrégularités des géométries des terrains situés au-dessus des cavités viennent s'ajouter à cette difficulté.

4.4 COUTS INDICATIFS

Selon les difficultés d'interprétation et le nombre de personnes nécessaires pour la réalisation des mesures, le coût journalier peut varier de 10 000 F à 15 000 F TTC.

5. LES METHODES ELECTROMAGNETIQUES

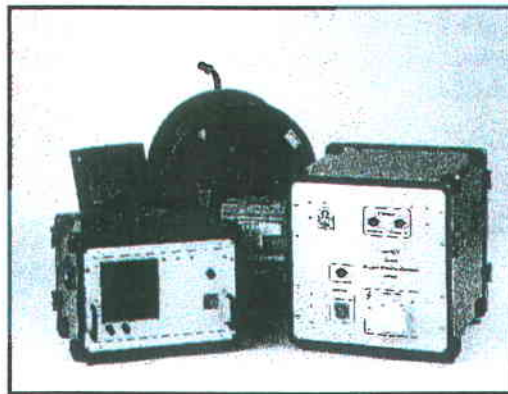
5.1 PRINCIPE ET GENERALITES

Ces méthodes regroupent de nombreuses techniques. On présentera ici 4 principales techniques : le radar géologique, la résonance magnétique protonique (RMP), les techniques à émetteur proche ou mobile (dites EM, Slingram), et les techniques à émetteur lointain ou mobile (par exemple le VLF).

D'une façon générale, les méthodes électromagnétiques s'appuient sur le principe suivant : tout champ électromagnétique se diffusant dans un milieu conducteur (on parle de champ primaire) génère un courant induit dans le sol qui génère en retour un champ électromagnétique (champ secondaire) qui se superpose au champ primaire. Les mesures de ce champ secondaire vont renseigner sur la conductivité (inverse de la résistivité électrique) des terrains investigués. La conductivité s'exprime en millimho/mètre ou millisiemens/mètre (1 millimho = 1 millisiemens). Les courants induits sont d'autant plus élevés que la conductivité du milieu est importante. La profondeur de pénétration dans le sous-sol est fonction de la fréquence des champs et de la résistivité des terrains.

Le radar géologique : cette méthode, utilisée de manière relativement routinière depuis une dizaine d'années dans le domaine du génie civil, est fondée sur l'émission de brèves impulsions électromagnétiques de hautes fréquences (50 MHz à 2 GHz) qui se réfléchissent partiellement sur des interfaces de milieux présentant des caractéristiques électriques différentes. Les échos produits sur ces interfaces sont enregistrés en fonction du temps au moyen d'une antenne réceptrice, puis exploités.

La résonance magnétique protonique : cette méthode très récente utilise le principe physique de la résonance magnétique nucléaire, comme dans le cas de l'imagerie médicale. Elle se fonde sur l'excitation des moments magnétiques des protons, principaux constituants des molécules d'eau. Elle est principalement développée pour l'exploration des ressources en eau dans le sous-sol, car c'est la *seule méthode* géophysique qui soit *directement sensible à l'eau*. La RMP permet de déduire la répartition de l'eau dans le sous-sol et de qualifier l'état dans lequel elle se trouve emmagasinée dans le sous-sol (eau libre, estimation de la taille des pores des roches magasins). Ainsi, et dans l'objectif de détecter des cavités ennoyées, cette technique peut s'avérer intéressante : il est néanmoins encore nécessaire de réaliser des études méthodologiques afin de déterminer précisément ses réelles capacités et limites pour répondre à cette problématique.



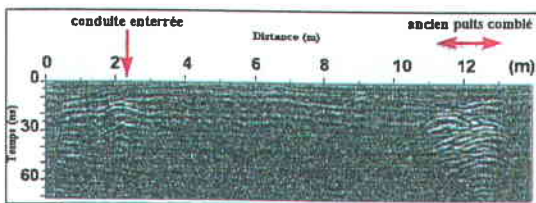
Equipement "NUMIS" de mesures RMP.

Les techniques à émetteur mobile : le dispositif comporte son propre émetteur qui se compose d'une bobine d'un type identique à celui de la bobine réceptrice (la gamme de fréquence va ici de 100 Hz à 10 kHz). La conductivité apparente des terrains investigués est fonction du rapport entre les champs primaires et secondaires et la profondeur d'investigation est liée à la fréquence, à l'écartement des bobines et à la conductivité des terrains.

Les techniques à émetteur fixe : pour ces techniques, les champs primaires sont fournis par des émetteurs militaires ou privés lointains, dont les fréquences vont de 8 kHz à 1,6 MHz. L'appareil mesure à la fois les composantes du champ magnétique vertical et horizontal à l'aide de bobine ainsi que le champ électrique à l'aide d'électrodes. La résistivité déduite varie en fonction du rapport des champs électriques et magnétiques.

5.2 MISE EN ŒUVRE

Selon les configurations choisies dans le cas du *radar géologique*, l'antenne émettrice peut être déplacée continûment ou positionnée à intervalles réguliers le long d'un profil. La mise en œuvre de cette technique ainsi que l'interprétation des données nécessitent un personnel très qualifié. De façon assez analogue aux résultats obtenus en sismique réflexion, l'information obtenue avec le radar géologique se présente sous la forme d'une image du sous-sol en fonction du temps et selon l'axe de déplacement de l'antenne émettrice.



Exemple d'image radar du sous-sol montrant les détections d'une conduite enterrée et d'un ancien puits d'accès à une cavité.

La *résonance magnétique protonique* utilise une antenne déployée sur le sol dans laquelle un courant alternatif d'une fréquence spécifique est injecté pendant des durées très brèves à intervalles réguliers. Ceci a pour effet de produire une excitation des moments magnétiques des protons contenus dans l'eau qui peut être mesurée. A partir d'un sondage, on peut directement déduire l'absence ou la présence d'eau, et dans ce dernier cas, déterminer sa

distribution en fonction de la profondeur. La réalisation de différents sondages le long de profils ou aux nœuds d'une maille permet de déterminer une carte des différents aquifères reconnus. La profondeur d'investigation maximale actuelle de la RMP se situe aux environs de 100 m. L'extension latérale de la zone investiguée par un sondage est de l'ordre de 200 m. Sa mise en œuvre et son interprétation nécessite un ingénieur très qualifié.

Pour les *autres techniques*, les mesures sont réalisées en différentes stations le long de profils ou aux nœuds d'une grille, le plus souvent à intervalles réguliers. Leur mise en œuvre est relativement simple, et un à deux opérateurs sont nécessaires suivant les appareillages utilisés.

Aucune de ces méthodes ne produit de dégât sur le terrain.

5.3 PERFORMANCES, LIMITES, RECOMMANDATIONS

En général, la limitation principale pour l'utilisation du *radar géologique* est liée à la résistivité des terrains superficiels : pour des valeurs de ce paramètre inférieures à 50 ohm.m, la profondeur d'investigation est très diminuée (moins de 1 m dans des sols conducteurs argileux).

Toutes les méthodes électromagnétiques sont très sensibles aux interférences d'origines industrielles (courants de fuite, lignes électriques, émetteurs proches ou lointains), orages magnétiques, à la présence de structures métalliques enfouies ou aériennes : ceci ne permet donc pas leur utilisation en milieux urbanisés, voire sub-urbanisés. A noter également le risque d'arrêt d'émission de l'émetteur pour les techniques à émetteur fixe.

Appliquées à la *détection des cavités dans le contexte de la Haute Normandie*, ces méthodes n'ont jusqu'alors pas démontré une réelle efficacité qui puissent permettre

de préconiser leur utilisation systématique. Pour ce qui concerne la méthode du radar géologique, utilisée avec succès dans cet objectif dans d'autres contextes géologiques, la présence de terrains superficiels (limons, argiles) relativement conducteurs (résistivités inférieures à 50 ohm.m) réduit largement la profondeur d'investigation, la rendant ainsi totalement inefficace pour des cavités situées majoritairement dans la craie. Enfin, comme indiqué précédemment les performances de la résonance magnétique protonique appliquée à cette problématique ne sont actuellement pas connues précisément, cette méthode étant trop récente.

5.4 COUTS INDICATIFS

La technique du radar géologique est une technique relativement onéreuse à cause du prix élevé de l'équipement lui-même.

La réalisation d'une journée de mesure radar s'élève à environ 15 000 à 20 000 F TTC, auquel il faut toujours rajouter un coût pour l'interprétation des données selon la complexité du problème.

Le coût moyen d'un sondage RMP se situe aux environs de 6 000 F TTC et, dans des conditions de bruits électromagnétiques favorables, de l'ordre de 3 sondages par jour peuvent être réalisés.

Pour les autres techniques, les rendements moyens de ces méthodes sont d'environ une centaine de stations de mesures par jour. Le coût journalier avec cartographie simple des résultats et un rapport d'exécution est de l'ordre de 10 000 F TTC.

**TABLEAU RECAPITULATIF DES PERFORMANCES
DE DIFFERENTES METHODES GEOPHYSIQUES A LA
DETECTION DES CAVITES EN REGION HAUTE-NORMANDIE**

	Performances actuelles	Possibilités de développements futurs	Applicabilité en milieu urbain ou péri-urbain	Applicabilité en milieu rural
MICROGRAVIMETRIE	***	*	**	***
METHODES SISMIQUES				
<i>Sismique réflexion</i>	R&D	**	*	***
<i>Sismique réfraction</i>	-	-	-	***
<i>Sismique "ondes de surface"</i>	R&D	***	**	***
METHODES ELECTRIQUES				
<i>Dispositifs traditionnels</i>	*	-	-	***
<i>Panneau électrique</i>	*	**	-	***
METHODES ELECTROMAGNETIQUES				
<i>Radar géologique</i>	-	-	-	**
<i>RMP</i>	R&D	***	*	***
<i>EM31, EM34, VLF</i>	-	-	-	**

bonne : ***

moyenne : **

médiocre : *

insatisfaisante ou non-applicable : -

recherche et développement : R&D