

## Les reconnaissances géophysiques appliquées à la recherche de cavités en sous-sol

Franck Rivière<sup>1</sup>.

### Introduction

Qu'elles soient anthropiques ou naturelles, la présence de cavités souterraines est un risque pour le bâtisseur, risque dont il doit se prémunir lors d'un projet de construction (Fig. 1).

L'un des cas les plus répandus de problème lié aux cavités est certainement celui des anciennes exploitations artisanales de craie pour amender les terres cultivables, connues sous le nom de marnières dans l'ouest ou de catiches dans le nord. Ces exploitations, souvent creusées dans la propriété agricole, à la périphérie des villages d'autrefois, étaient la plupart du temps tout sim-

plement bouchées lorsqu'elles présentaient des risques pour l'exploitant (Fig. 2). Ce n'est que plus tard, avec le développement des zones urbanisées qu'elles se retrouvent en zone constructible. Ce risque est bien réel, et à l'origine de plusieurs sinistres chaque année en région ouest.

On pourrait alors penser que les régions présentant ce type de risque peuvent être limitées aux régions du nord et de l'ouest de la France. Ce serait faire abstraction des galeries et puits de mines dans la région de Saint-Étienne pour le charbon, ou en région Île-de-France pour le gypse. Ce serait aussi faire abstraction des galeries drainantes de plus de 10 km de longueur découvertes en vallée du Rhône jusqu'à des profondeurs de plus de 6 mètres en site alluvionnaire. Ce serait également faire abstraction des tunnels, galeries, caves anciennement utilisés dont



Figure 1. Ouverture d'un fontis en zone urbaine (cliché CEBTP-SOLEN).



Figure 2. Exploitation souterraine en milieu rural (cliché CEBTP-SOLEN).



Figure 3. Vestiges souterrains situés en milieu urbain (cliché CEBTP-SOLEN).

1. Division Géophysique CEBTP-SOLEN.

les habitations sus-jacentes ont été rasées depuis et dont l'emplacement a été oublié au fil des années (Fig. 3).

Enfin ce serait faire abstraction de tous les problèmes liés aux cavités naturelles issues de la dissolution, phénomènes karstiques et autres.

Il est donc important de prendre ce risque en compte lors d'un projet de construction. C'est le cas de missions géotechniques particulières, spécifiques au risque lié à la présence de cavités en sous-sol. Les recommandations sur la consistance de ces investigations sont évoquées, abordées et décrites dans plusieurs documents tels que ceux de l'Inspection générale des Carrières (IGC), des directions départementales de l'Équipement (DDE), des organismes de contrôle (COPREC). Ces recommandations se présentent généralement sous la forme de préconisations sur la démarche globale à mettre en œuvre, avec l'utilisation de plusieurs outils.

S'affranchir du risque d'effondrement nécessite en tout premier lieu l'identification et la localisation de la cavité susceptible d'en être à l'origine et c'est dans cette démarche que s'insère l'outil géophysique.

## La démarche globale de recherche de cavités

L'étude de risque liée à la présence de cavités démarrera, à l'**échelle de la commune**, par une enquête sur les cavités susceptibles d'exister au droit du projet, enquête historique et de voisinage pour les événements passés, sur documents géologiques régionaux, pour le contexte géologique. Elle pourra être complétée par l'observation de photos aériennes. Cette recherche permettra de définir le contexte géologique et le type de cavités susceptibles d'exister dans la zone d'étude mais aussi parfois de relever plus ou moins précisément la présence d'anciennes cavités.

Les éléments obtenus en premier lieu doivent alors permettre de poser le problème de façon suffisamment précise pour pouvoir établir un programme de reconnaissance géophysique qui y réponde, à l'**échelle de la parcelle**. Si le problème peut être résolu par une ou plusieurs méthodes géophysiques, cet outil sera alors employé avec succès. À ce niveau, une opération de décapage de la couverture végétale pourra aussi être envisagée afin de mettre en évidence d'éventuels indices de subsurface (ancien puits comblé). Ces reconnaissances devront identifier et localiser de façon précise toute anomalie en sous sol susceptible d'être attribuée à une cavité et donc d'orienter sans ambiguïté une reconnaissance de détail sur les points singuliers relevés.

La reconnaissance de cavité devra se terminer, à l'**échelle du bâtiment projeté**, par la réalisation de sondages destructifs avec enregistrement de paramètres de façon à valider les anomalies relevées et apporter des précisions sur le contexte géotechnique. Ces sondages pourront être complétés par des diagraphies permettant d'apporter des éléments de réponse sur les dimensions et l'origine de la cavité.

## La reconnaissance de cavités par méthodes géophysiques appliquées

À l'échelle de la parcelle, la géophysique appliquée est un des outils de reconnaissance permettant de mettre en évidence une cavité. D'un point de vue technique, une cavité souterraine se caractérise par :

- son **contexte géologique**, c'est à dire les caractéristiques physiques de l'encaissant, la présence ou non de nappe phréatique, la profondeur de la cavité au sein de cet encaissant, et les caractéristiques du recouvrement la surmontant ;
- son **origine** ; une cavité anthropique peut avoir des origines variées : moyen de se cacher en période de guerre (galeries), salle de stockage de denrées (caves), exploitation souterraine (mines et carrières souterraines), origine religieuse (crypte, chambre funéraire), et peut être renforcée par la présence de contreforts (boiseries) ou d'une structure maçonnée ou même bétonnée. La cavité naturelle est, quant à elle, dans la plupart des cas, liée à la présence d'eau ;
- ses **dimensions** : la géométrie de la cavité en elle-même, le « vide » proprement dit. Sous nappe, elle sera remplie d'eau ; anthropique elle pourra être confortée par une maçonnerie ; vide elle pourra être en partie comblée.

Plusieurs méthodes de reconnaissance existent, basées sur la mise en évidence d'une anomalie physique au sein d'un encaissant considéré comme homogène et sain. Ces méthodes basées sur des principes différents auront, selon le contexte et le problème posé, leurs avantages et leurs limites. Le principe de ces méthodes et leur utilisation pour la recherche de cavités sont largement abordés dans le guide de bonne pratique en géophysique appliquée de l'AGAP (Association pour la Qualité en Géophysique Appliquée). Ce guide décrit méthode par méthode le principe, les capacités et les limites de chacune et aide l'utilisateur dans sa recherche de l'outil adapté à son problème (guide d'adéquation des méthodes en fonction de l'étude).

## Anciennes exploitations souterraines de craie

Prenons l'exemple de la localisation d'anciennes

exploitations souterraines de craie avec le cas d'une recherche de cavité par microgravimétrie en région ouest où la présence de marnières est soupçonnée. Si cette méthode est actuellement la méthode la plus couramment utilisée dans le cadre de la recherche d'anciennes exploitations souterraines c'est parce qu'elle permet, par une mesure de l'accélération de la pesanteur en plusieurs points donnés, d'établir une carte d'anomalie de densité en sous sol et donc de mettre en évidence un défaut de masse (une cavité étant, en tout premier lieu, un défaut de masse). Trois paramètres régissent les capacités de la méthode à détecter une cavité : sa taille, sa profondeur, et son remplissage (air, eau).

Dans un contexte géologique simple de substratum crayeux, présentant peu de variations du toit et avec un recouvrement considéré comme homogène, la capacité de la méthode pour mettre en évidence une cavité franche (vide) sera donc conditionnée par deux paramètres : sa taille et sa profondeur. Dans le cas présent d'anciennes exploitations de craie, si l'on considère qu'une marnière était abandonnée lorsqu'elle présentait des risques de fatigue, c'est-à-dire lorsque l'exploitant estimait qu'il courait un danger à continuer d'excaver, on pourra retenir comme taille moyenne d'une marnière un volume de 400 m<sup>3</sup>. Si l'on admet que l'exploitation recherchée se situe dans les premiers 15 m du massif crayeux, il est alors possible de se fixer des limites de détection en fonction de la profondeur du toit du massif (Fig. 4).

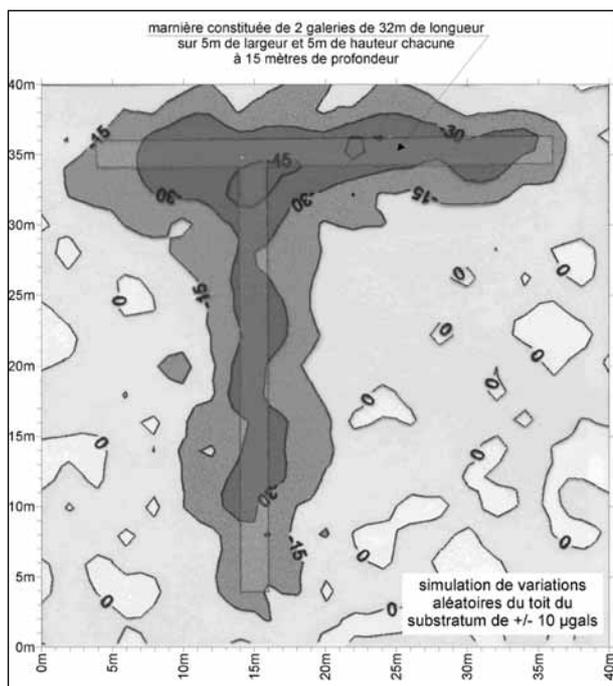


Figure 4. Exemple de modélisation de marnière à une profondeur de 15 m (cliché CEBTP-SOLEN).

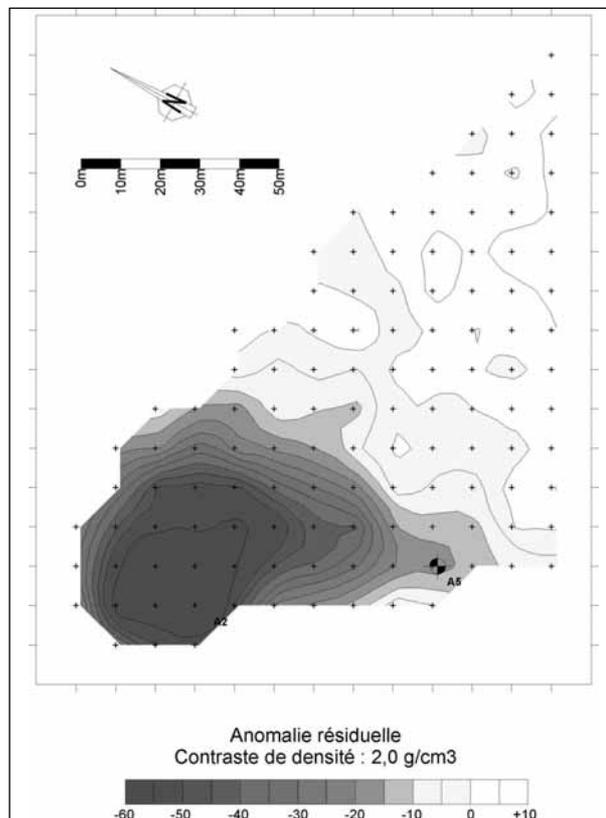


Figure 5. Carte d'anomalie résiduelle de Saint-Valery-en-Cau (cas d'étude CEBTP-SOLEN).

Dans le cas d'un massif de craie dont le toit se situe à 5 m de profondeur, le problème sera alors de mettre en évidence un défaut de masse de 20 µgals (volume de 400 m<sup>3</sup> à 20 m de profondeur avec un contraste de densité de 2 g/cm<sup>3</sup>). Avec les appareils de mesure actuels, un opérateur spécialisé pourra alors répondre au problème. Si, par contre, la cavité est remplie d'eau la mise en évidence de cavité sera deux fois plus limitée (contraste de densité deux fois moindre) (Fig. 5).

La carte d'anomalie gravimétrique résiduelle de la figure 5, tirée d'un cas d'étude réel réalisé à Chalons-en-Champagne, a permis de détecter et de délimiter une cavité dont le toit était situé à plus de 10 m. Par contre cette méthode, délicate à mettre en œuvre et contraignante en termes de mesures sur site, nécessite un environnement calme et un temps de réalisation important.

### Cavités anthropiques de type vestiges de bâtiments

Un autre type de cavités auquel le constructeur est souvent confronté sont les cavités anthropiques liées, non plus à l'exploitation, mais au contexte urbain passé d'un site. Elles sont la plupart du temps associées à des



Figure 6. Cavité partiellement comblée à Clermont Ferrand (cliché CEBTP-SOLEN).

structures maçonnées, parfois même bétonnées avec présence de ferrillages (passé plus récent). Dans ce cas, il n'est pas rare que ces cavités soient en partie détruites, ou encore en place mais partiellement comblées (Fig. 6). Si cela n'enlève rien à leur caractère dangereux (en effet, un vide de 40 cm à faible profondeur peut induire un risque pour la pérennité d'un ouvrage), cela conditionne beaucoup le choix de la méthode géophysique à mettre en œuvre. Ce que l'on cherche à mettre en évidence n'est plus, dans ce cas, la présence d'une cavité en tant que vide mais plutôt la présence d'une « hétérogénéité » de dimension plurimétrique, à une profondeur comprise en général entre 0 et 10 m, au sein d'un encaissant considéré comme naturel.

Dans un tel contexte les méthodes électriques, électromagnétiques à émetteur proche contrôlé et radar géologique s'avèrent être des outils de reconnaissance particulièrement adaptés. On se rapproche des outils géophysiques utilisés en archéologie pour la reconnaissance de vestiges de fondations et structures enterrées. Ces méthodes seront alors mises en œuvre lorsque que l'on considère que le contraste des caractéristiques électriques

entre encaissant et vestiges est suffisant pour être significatif.

Dans le cas de la figure 7 il s'agit de vestiges de fondation d'une ancienne habitation mis en évidence par leurs résistivités élevées (supérieures à 500 ohm.m) dans un contexte général de faibles résistivités (inférieures à 100 ohm.m). Le fontis ouvert, à l'origine de l'étude, se présente alors en bordure de l'ancienne habitation et semble correspondre à la présence d'une fosse, c'est l'anomalie A, l'anomalie B, relevée en profondeur à la périphérie de la zone d'étude, étant plutôt à mettre en relation avec la présence de cave. Par contre, ces méthodes restent assez délicates à mettre en œuvre en contexte urbain pour des raisons de mise en place contraignante et d'environnements « pollués » par la présence de structures métalliques à proximité ou d'émissions d'ondes électromagnétiques au voisinage de la zone d'étude.

L'utilisation du radar géologique présente alors un intérêt certain. Cette méthode, basée sur la propagation d'une impulsion d'onde radio, a l'avantage de pouvoir être utilisée dans un contexte urbain dense étant donné la faible emprise au sol nécessaire pour la réalisation des mesures et la focalisation de l'appareil. Le radar géologique permettra alors de mettre en évidence un corps étranger dans un ensemble considéré comme homogène

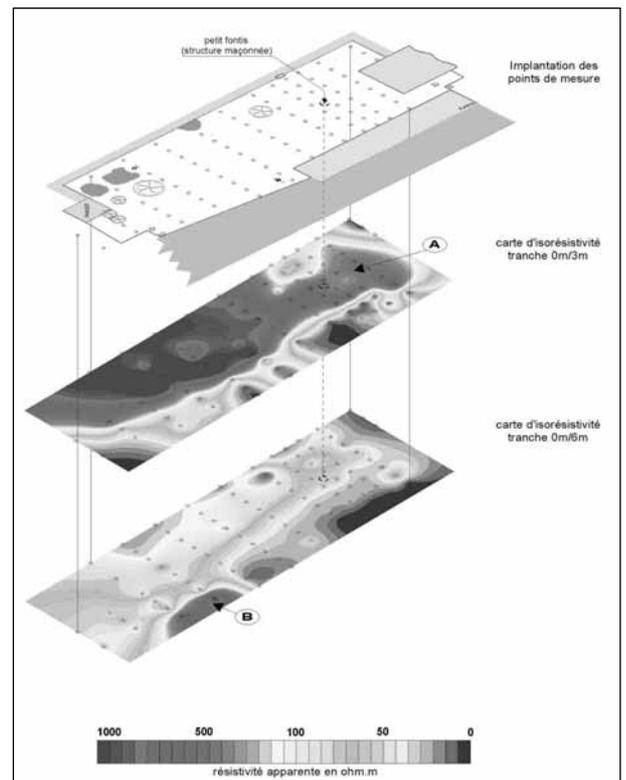


Figure 7. Cartes d'isorésistivités obtenues par méthode électromagnétique sur vestiges de fondations (cas d'étude CEBTP-SOLEN).

(Fig. 8). Par contre, si cette méthode permet d'obtenir une reconnaissance en sous sol de très haute résolution, elle est très souvent pénalisée par sa faible capacité d'investigation en terme de profondeur. En outre, cette méthode n'est utilisable que sur des matériaux de résistivité élevée (inutilisable sur terrains argileux par exemple).

Dans le cas de la figure 8, la méthode s'insère en phase travaux suite à l'ouverture d'un petit affaissement, après le passage de camions de chantier, laissant apercevoir un début de voûte maçonnée. Elle permet la mise en évidence non seulement d'une galerie de 3 mètres de largeur s'étendant sur plus de 30 m (anomalie A), expliquant l'apparition de l'affaissement, mais aussi la présence d'une surprenante galerie jumelle (anomalie B) mitoyenne de la première et de même dimension.

### Réseau karstique en Dordogne

La cavité naturelle aura toujours une origine liée à la présence d'eau d'infiltration. Si l'on prend l'exemple de réseaux karstiques, les cavités qui leur sont liées seront toujours associées à la présence d'eau s'infiltrant dans les parties fracturées du massif encaissant et à des argiles de décalcification, produit d'altération de ce massif. La cavité se forme alors par l'activation du réseau karstique lors de périodes de pluies importantes (ou par décapage de la couverture superficielle imperméable, lors de travaux de terrassement par exemple), la circulation d'eau entraînant un tassement hydraulique des matériaux de remplissage.

L'anomalie à mettre en évidence n'est donc pas, dans ce cas, la cavité franche souvent de petite taille, mais plutôt le conduit karstique susceptible d'être réactivé. Sa localisation pourra alors être envisagée en utilisant des méthodes électriques, le problème posé étant de mettre en évidence des réseaux plurimétriques de matériaux conducteurs (les argiles) au sein d'un encaissant qui lui est

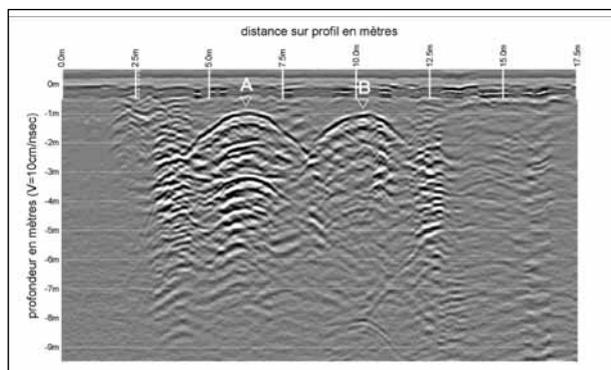


Figure 8. Section radar présentant 2 galeries contiguës (cas d'étude CEBTP-SOLEN).

très résistant lorsque qu'il ne présente pas d'altération (calcaire caractérisé par des résistivités de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'ohm.m).

Dans le cas de la figure 9, la réalisation de panneaux électriques, suite à l'apparition d'un affaissement à proximité d'un ouvrage situé en Dordogne, permet de détecter une anomalie conductrice. La mise en évidence de cette anomalie, attribuée à un conduit karstique rempli de matériaux argileux affectant un massif calcaire résistant, permet donc de répondre au problème posé. Une campagne de mesures microgravimétriques a cependant été réalisée en complément, au droit de l'anomalie électrique, afin d'apporter des précisions sur les zones décomprimées au sein du conduit karstique, campagne qui a permis de localiser deux anomalies gravimétriques contiguës, de plusieurs dizaines de  $\mu\text{gals}$  au droit de l'anomalie électrique, complétant l'hypothèse d'un réseau karstique de grande dimension présentant des défauts de masse importants attribués à des cavités franches.

### Conclusion

La reconnaissance géophysique de cavité aura d'autant plus de chances de réussir que le problème aura été posé de façon précise initialement. Il est donc primordial de disposer de toutes les informations pour pouvoir choisir l'outil géophysique approprié et établir un programme de reconnaissance qui puisse y répondre.

Dans certains cas, il reste cependant très difficile de mettre en évidence une cavité parce que le contexte ne le permet pas : profondeur de la cible, contexte urbain pré-

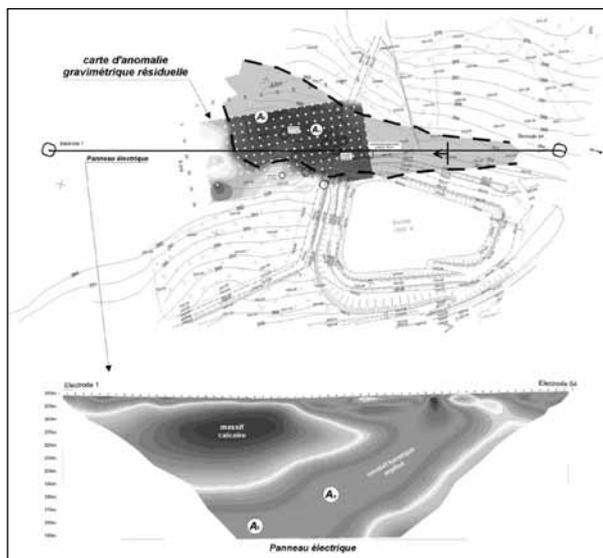


Figure 9. Section électrique et carte d'anomalie gravimétrique sur modèle karstique (cas d'étude CEBTP-SOLEN).

sentant des sources de vibrations (proximité de routes, de voies ferrées), présence de pollutions électromagnétiques (émetteur radio, antennes, réseaux électriques...). Dans ces environnements difficiles, l'association de plusieurs méthodes permet parfois d'apporter des éléments de réponse. Notons enfin que l'utilisation de nouveaux outils et le développement de certaines méthodes devraient per-

mettre de repousser les limites d'utilisation de l'outil géophysique pour la détection de cavités souterraines comme par exemple avec les méthodes basées sur la propagation d'ondes de surface, la réflexion d'ondes sismiques, ou même la thermographie infrarouge aérienne.