

Document public



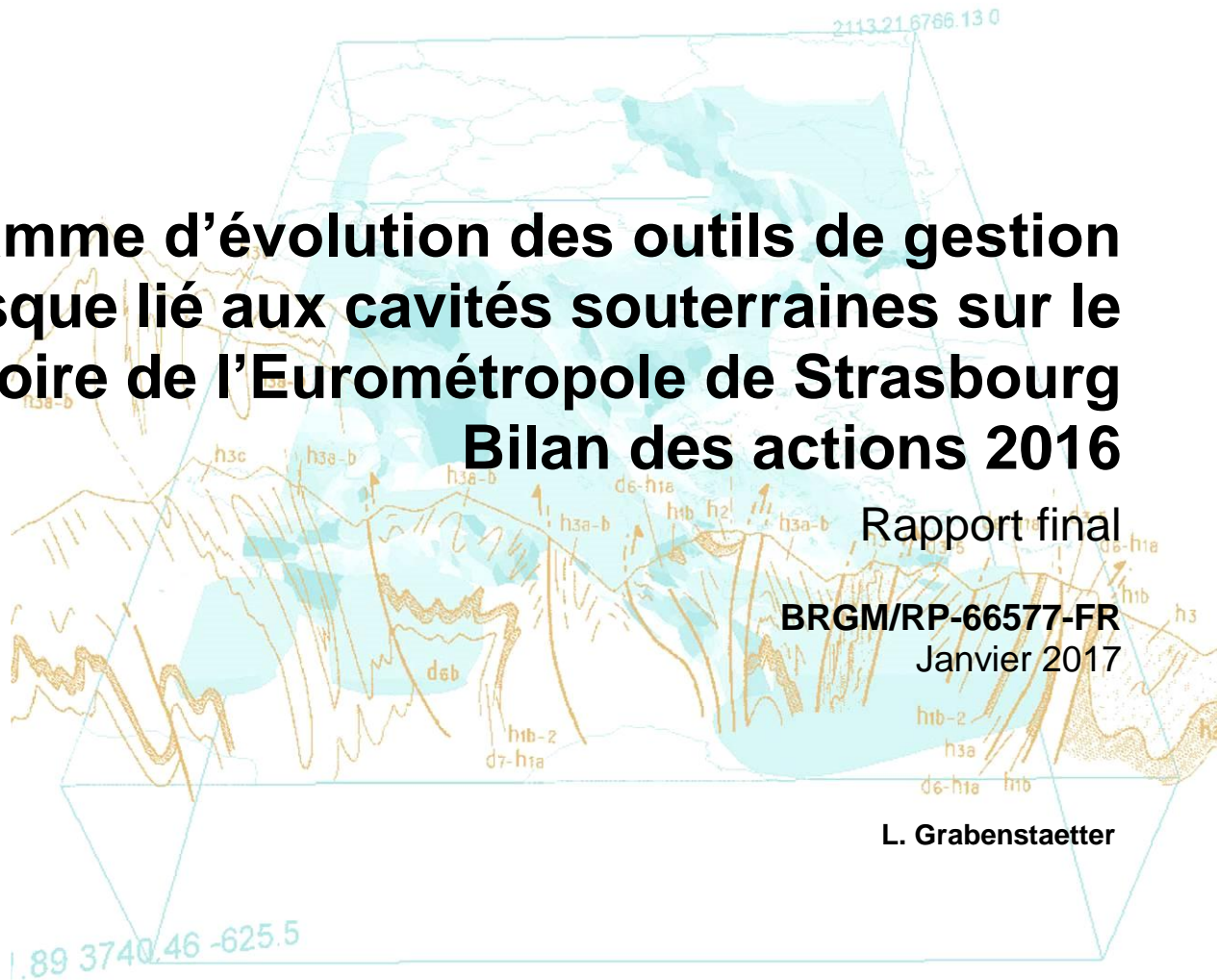
# Programme d'évolution des outils de gestion du risque lié aux cavités souterraines sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg Bilan des actions 2016

Rapport final

BRGM/RP-66577-FR

Janvier 2017

L. Grabenstaetter



Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2017-RIS-20

Ce document a été vérifié par : Emilie Vanoudheusden date : 25/01/2017

**Approbateur :**

Nom : Kévin Samyn

Fonction : Directeur Régional Délégué Date : 26/01/17



Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

**Mots clés** : galerie souterraine, risque naturel, galerie anthropique, base de données, cavité souterraine, inspection robotique, microgravimétrie, géoradar, Grand Est, Alsace, Bas-Rhin, Eurométropole de Strasbourg.

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

**Grabenstaetter L.** (2017) – Programme d'évolution des outils de gestion du risque lié aux cavités souterraines sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg – Bilan des actions 2016 – Rapport final. Rapport BRGM/RP-66577-FR, 16 p., 6 ill., 1 tabl.

## Synthèse

L'Eurométropole de Strasbourg (EMS), Service Environnement et Transition Energétique et le BRGM (Direction Régionale Grand Est – Délégation de Strasbourg) collaborent depuis 1996 dans un programme de prévention des risques d'effondrements liés à l'existence de cavités souterraines dans le sous-sol de l'agglomération strasbourgeoise. Cette action a été reconduite pour les années 2016 à 2018 comprise. Elle est financée par l'EMS et par la subvention pour charge de Service Public du BRGM et bénéficie d'une participation de l'Etat grâce au Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM).

En complément de ces actions de suivi, le BRGM et l'EMS ont signé un accord de collaboration afin de tester des actions nouvelles et complémentaires aux actions de suivi initiées depuis 20 ans permettant, par l'utilisation d'outils plus ou moins innovants, de gérer les crises le plus efficacement possible et de permettre des avancées technologiques et méthodologiques dans la prévention du risque. Les actions ciblées lors de la rédaction du cahier des charges de ce programme sont les suivantes :

- Refonte de la BD Cavités de l'EMS et rattachement à la base de données nationale ;
- Utilisation de moyens robotiques dans le cadre d'inspection de galeries souterraines ou d'apparition de désordres en surface ;
- Levé de galeries souterraines à l'aide de laser 3D et comparaison de 2 jeux de données entre 2 levés ;
- Reconnaissance de vides par méthodes géophysiques (microgravimétrie...);
- Expertise d'ingénieur structure dans le cas d'apparition de désordres en surface.

L'évolution de la base de données vers la base de données nationale répond à un objectif de mise à disposition des données « en temps réel » via la plate-forme gouvernementale des risques naturels ([www.georisques.gouv.fr](http://www.georisques.gouv.fr)). Cette fusion permettra également aux opérateurs techniques de la gestion du risque sur le territoire de l'EMS d'avoir accès, sur le terrain, aux informations contenues dans cette base de données.

L'inspection robotique réalisée sur le réseau de galeries souterraines ST009 à Strasbourg Koenigshoffen a permis de mettre à jour les connaissances sur une galerie souterraine qui n'était plus visitée depuis plusieurs années, malgré un niveau d'aléa élevé, et ce pour des raisons d'inaccessibilité dans des conditions de sécurité acceptables.

La réalisation de la campagne de géophysique a permis d'obtenir, relativement rapidement, une carte des zones susceptibles de présenter un risque d'effondrement au droit de la route de Bischwiller. Ces informations, une fois validées à l'aide de forages de reconnaissance, ont permis d'adapter les mesures de gestion du risque.

De manière générale, les méthodes d'investigations mises en place au cours de l'année 2016 (robotique et géophysique) ont contribué à une gestion rapide et efficace de période de crise (effondrement à proximité de la route de Bischwiller) et de suivi (mise à jour des connaissances sur le réseau ST009).

## Sommaire

<b>1. Rattachement de la base de données locales à la base de données Cavité nationale (www.georisques.gouv.fr) .....</b>	<b>5</b>
1.1. OBJECTIFS.....	5
1.2. REALISE EN 2016 .....	6
<b>2. Inspection robotique des galeries souterraines (BRGM/RP-66449-FR) .....</b>	<b>8</b>
2.1. INSPECTION REALISEE RUE LOTHAIRE A STRASBOURG – ST009.....	8
2.2. RETOUR D'EXPERIENCE SUR LA PREMIERE INSPECTION .....	9
<b>3. Réalisation d'une campagne de micro-gravimétrie suite à la découverte d'une zone d'effondrement (BRGM/RP-66426-FR) et (BRGM/RP-66221-FR) .....</b>	<b>10</b>
<b>4. Levé laser 3D .....</b>	<b>13</b>
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>14</b>
<b>6. Bibliographie .....</b>	<b>15</b>

### Liste des illustrations

Illustration 1 : Photographie du robot Magellan de la société CAMEXPLO utilisé lors de l'inspection de la galerie G1.....	8
Illustration 2 : Taux de remplissage de la galerie G1 du réseau ST009 – Capture d'écran de l'inspection vidéoscopique .....	9
Illustration 3 : Carte d'anomalie gravimétrique et anomalies radar (A0 à A6) .....	11
Illustration 4 : Diagramme de mise en relation des anomalies résiduelles et des épaisseurs de remblais .....	12
Illustration 5 : Exemple de levés réalisés en carrière souterraine (jaune) et en surface (bleu) superposés – vue en plan.....	13
Illustration 6 : Vue 3D des levés réalisés en carrière souterraine et en surface.....	14

### Liste des tableaux

Tableau 1 : Equivalence proposée entre les lexiques BD EMS et BD nationale .....	7
--	---

# 1. Rattachement de la base de données locales à la base de données Cavité nationale ([www.georisques.gouv.fr](http://www.georisques.gouv.fr))

Dans le cadre du projet de gestion et de suivi du risque, le BRGM a créé et développé, en 2000, une base de données multicritères regroupant l'ensemble des informations collectées depuis 1996 sur les cavités souterraines de l'EMS. En janvier 2017, après 20 ans de recensement, 517 sites et indices sont identifiés et référencés dans cette base de données.

## 1.1. OBJECTIFS

A l'heure actuelle cette base de données est constituée de deux volets au sein desquels les informations nouvelles doivent être saisies indépendamment :

- Une base de données Access, qui nécessite que le logiciel MapInfo soit installé sur le PC afin de permettre l'affichage d'une localisation sur un plan sommaire. Cette base de données contient les informations suivantes (liste non exhaustive) :
  - o L'origine des données ;
  - o La nature de l'objet ;
  - o Les dimensions du réseau / ouvrage / indice ;
  - o Un historique des travaux, actes administratifs... ;
  - o Un rapide historique des conclusions des différentes inspections ayant eu lieu.
  
- Une base de données SIG enregistrée avec le logiciel Arc-Gis. Cette base de données contient les informations suivantes :
  - o Plan des réseaux digitalisés et géoréférencés ;
  - o La localisation des accès et ouvertures (portes, trappes, cheminées...);
  - o L'ensemble des informations observées lors des inspections de sites (fissures, infiltrations, état du radier...).

Ces bases de données sont devenues compliquées à utiliser de par les points suivants :

- Double saisie importante (base de données Access et SIG comportent de nombreux champs communs à saisir) ;
- Aucun accès à la base de données sans être connecté au réseau BRGM ;
- Pas de possibilité de stocker d'image ou de document sur cette base de données ;
- L'envoi des données à l'EMS ne se fait que 2 fois par an, ce qui implique que le SIG de l'EMS n'est pas à jour en temps réel.

La nouvelle version de la base de données devra offrir les possibilités suivantes :

- Contenir les données disponibles actuellement sur les deux bases de données existantes ;
- Permettre la bancarisation de photographies, de rapports, de courrier... (quelques documents en basse qualité) ;
- La base de données devra être consultable et modifiable en ligne MAIS fournir un accès sécurisé (avec un mode saisi et un mode consultation) compte tenu des données sensibles qu'elle contient ;
- Editer des fiches cavités avec informations d'accès, photos récentes, contact, dernier diagnostic, plan.

## **1.2. REALISE EN 2016**

La première étape de travail pour corréliser les deux bases de données a été de mettre en cohérence les lexiques des deux environnements.

Le lexique de la base de données EMS a été réalisé lors de la création de la base au début des années 2000. L'ensemble des lexiques de cette base de données n'est pas existant dans la base de données nationale. Certains des termes référencés dans le lexique de la base de données EMS n'étant pas utilisés au sein de cette base, ils ne seront pas conservés. Pour les autres, les correspondances proposées sont présentées dans le Tableau 1.

Base de données EMS	Equivalence dans la BD nationale
<b>LexType_Site</b>	
Cave abri	cave
Désordre / Caves	cave
Divers	indéterminé
Indice	indéterminé
Ouvrage militaire	ouvrage militaire
Réseau galeries	ouvrage civil
<b>LexMateriau</b>	
Agglos béton	béton
Béton	
Béton armé	
Briques	briques
Briques, blocs, grès	grès
Grès	Grès
Non maçonné	lœss
<b>LexEtat_Cavite_Eau</b>	
Autre	a supprimer
Cavité sèche	non
Flaques au sol	localement
Humidité générale	oui
Humidité localisée	localement
Inondée partiellement	oui
Inondée périodiquement	oui
Noyée	oui
Venue d'eau	localement

Tableau 1 : Equivalence proposée entre les lexiques BD EMS et BD nationale

Ce travail réalisé principalement sur 3 lexiques est susceptible d'évoluer de manière ponctuelle. Certains termes vont faire l'objet d'un ajout dans la base de données nationale.

Le transfert des données cartographiques vers la base de données nationale a également débuté au courant de l'année 2016. Aucun visuel n'est disponible lors de la rédaction de ce rapport.

Le travail de migration de la base de données EMS vers la base de données nationale devrait s'achever en 2017.

L'évolution de la base de données vers la base de données nationale répond à un objectif de mise à disposition des données « en temps réel » via la plate-forme gouvernementale des risques naturels ([www.georisques.gouv.fr](http://www.georisques.gouv.fr)). Cette fusion permettra également aux opérateurs techniques de la gestion du risque sur le territoire

de l'EMS d'avoir accès, sur le terrain, aux informations contenues sur cette base de données.

## 2. Inspection robotique des galeries souterraines (BRGM/RP-66449-FR)

### 2.1. INSPECTION RÉALISÉE RUE LOTHAIRE À STRASBOURG – ST009

Le réseau de galeries souterraines ST009 – Rue Lothaire est constitué de deux galeries parallèles d'environ 80 mètres de longueur. Les deux galeries ne sont plus communicantes suite à l'occurrence d'effondrements au sein des couloirs de jonctions antérieurement à la découverte, en 1995, de la première galerie.

Pour des raisons de sécurité (taux de comblement important / une seule sortie existante), l'inspection de la galerie G1 n'est pas réalisée bien que son état requiert un suivi régulier. Il a donc été décidé de procéder à une inspection robotisée de la galerie G1.

L'inspection de la galerie G1 à l'aide d'un robot équipé de caméras HD a permis de réaliser les observations suivantes :

- De manière générale, la galerie G1 est comblée sur les  $\frac{3}{4}$  de sa hauteur. L'espace restant entre le sommet des remblais et la voûte est compris entre 50 et 70 centimètres et diminue à moins de 30 cm sur le dernier secteur.
- Lors de l'inspection robotique du 25 novembre 2016, il a été observé que, de manière générale, les joints entre les briques, notamment au droit de la voûte de la galerie, étaient en mauvais état de conservation. Le défaut de joint entre les briques facilite l'infiltration des terrains loessiques sus-jacents dans les galeries, pouvant entraîner l'apparition de zones de vide entre les galeries souterraines et la surface.
- Plusieurs cheminées sont le siège de débousses (arrivées de terrains naturels) importants.
- Les galeries de communications entre les galeries G1 et G2 sont comblées et ne permettent pas de circuler entre les deux galeries.



*Illustration 1 : Photographie du robot Magellan de la société CAMEXPLO utilisé lors de l'inspection de la galerie G1*





*Illustration 2 : Taux de remplissage de la galerie G1 du réseau ST009 – Capture d'écran de l'inspection vidéoscopique*

## **2.2. RETOUR D'EXPERIENCE SUR LA PREMIERE INSPECTION**

Le réseau de la rue Lothaire (ST009) a été choisi pour réaliser une inspection robotique pour plusieurs raisons :

- Galerie comblée sur  $\frac{3}{4}$  de sa hauteur rendant les déplacements et à plus forte raison, l'évacuation d'une personne compliquée ;
- A mi-distance de la galerie, un linteau est très abîmé et ne laisse que quelques dizaines de centimètres pour passer dans la seconde partie de la galerie ;
- Il n'existe pas de seconde sortie dans la deuxième moitié de la galerie.

L'inspection robotique permet de se déplacer dans la galerie. L'acquisition de fichiers numériques vidéo en haute définition et l'enregistrement audio (données vocales au niveau de l'ordinateur en surface) permet de conserver trace des observations réalisées en direct.

De manière générale, l'utilisation de l'outil robotique a permis de réaliser une inspection de la galerie G1 du réseau ST009. Cette galerie n'avait pas fait l'objet d'inspection depuis plusieurs années de par le niveau de dangerosité qu'elle représente pour les opérateurs qui se trouveraient en souterrain.

A l'heure actuelle, l'utilisation d'outils robotique ne remplace pas « l'œil » d'un opérateur en souterrain, mais lorsque les conditions de sécurité ne sont pas remplies ou que les conditions d'accès ne permettent pas une inspection « humaine », l'utilisation des moyens robotiques permet de réaliser une inspection et de tenir à jour les informations sur un réseau de galeries souterraines difficilement accessible.

L'ensemble de la galerie n'a pas pu faire l'objet d'une inspection. Les masses de remblais n'étant pas réparties de manière équitable au sein de la galerie, le robot n'a

pu se déplacer qu'en « sommet » de remblais sur une surface relativement plane. De la même manière, le robot n'a pas pu inspecter la totalité de la galerie souterraine car l'espace vide entre le sommet des remblais et la voûte ne permettait plus le passage du robot dans le dernier secteur de la galerie (le problème aurait vraisemblablement été le même pour un opérateur).

### **3. Réalisation d'une campagne de micro-gravimétrie suite à la découverte d'une zone d'effondrement (BRGM/RP-66426-FR) et (BRGM/RP-66221-FR)**

Suite à l'occurrence d'un effondrement du trottoir au droit de la route de Bischwiller à Schiltigheim (67) le 29 août 2016, l'EMS a sollicité le BRGM, dans le cadre de la convention d'évolution des outils de gestion et de prévention du risque lié à la présence de cavités souterraines pour mettre en œuvre une méthode d'investigation non intrusive permettant de caractériser les vides.

Une campagne de microgravimétrie, comprenant 148 stations, a été menée sur la voirie de la route de Bischwiller (67), afin de détecter la présence d'éventuelles anomalies liées à des cavités. Dans ce même but et en complément, 16 profils géoradar ont été levés.

L'objectif de l'étude géophysique est de déterminer la présence de vides sous la voirie, et de secteurs du sous-sol qui seraient décomprimés. Chacune des anomalies géophysiques se doit d'être vérifiée par un sondage (de préférence avec caméra pour mesurer le volume des vides éventuels), et/ou par essai géotechnique avec mesure de paramètres à l'avancement par exemple. L'étude géophysique n'a pas pour objectif d'évaluer le risque géotechnique de stabilité des terrains mais d'inventorier les anomalies gravimétriques pouvant être mises en relation avec la présence de vides ou de terrains décomprimés qui sont des zones favorables à l'aléa.

L'origine des cavités recherchées est anthropique : le vide a été relié à la présence de canalisations mobilisant le remblai et le loess sous-jacent. Il est à noter qu'un effondrement similaire est survenu en septembre 2014 à quelques mètres du vide apparu en août 2016.

La méthode microgravimétrique consiste en une mesure, à la surface du sol, des variations de pesanteur qui sont directement liées aux variations de masses existantes dans le sous-sol et en particulier à la présence de cavités souterraines, de niveaux de densité moindre tels que des niveaux altérés, décomprimés ou constitués de matériaux peu denses.

La méthode géoradar émet des ondes électromagnétiques hautes fréquences qui pénètrent dans les sols et sont réfléchies/réfractées par les structures du sous-sol. Elle permet de détecter les structures souterraines et particulièrement les vides francs. La profondeur d'investigation dépend de la nature des sols et de la fréquence des antennes utilisées. En zone urbanisée, la profondeur d'investigation attendue est d'au moins 1,5 à 2 m pour l'antenne 500 MHz. Dans le cas de sol plus argileux, la profondeur d'investigation peut être plus faible.

Six anomalies gravimétriques ont été décelées, dont quatre anomalies significatives, pouvant correspondre :

- à des variations de densités latérales au sein des terrains, liées à leur nature et à leur lithologie, à leur degré d'altération ou à leur degré de compaction ;
- à des cavités vides, ennoyées, ou partiellement remblayées ;
- à des variations d'épaisseur de remblais peu dense sur un substrat plus dense.

Six anomalies radar ont été décelées, dont au moins 3 ne correspondaient pas à des réseaux (eau/électricité/gaz) connus (Illustration 3).



Illustration 3 : Carte d'anomalie gravimétrique et anomalies radar (A0 à A6)

Le diagramme suivant (Illustration 4) présente une explication des différentes anomalies recensées.

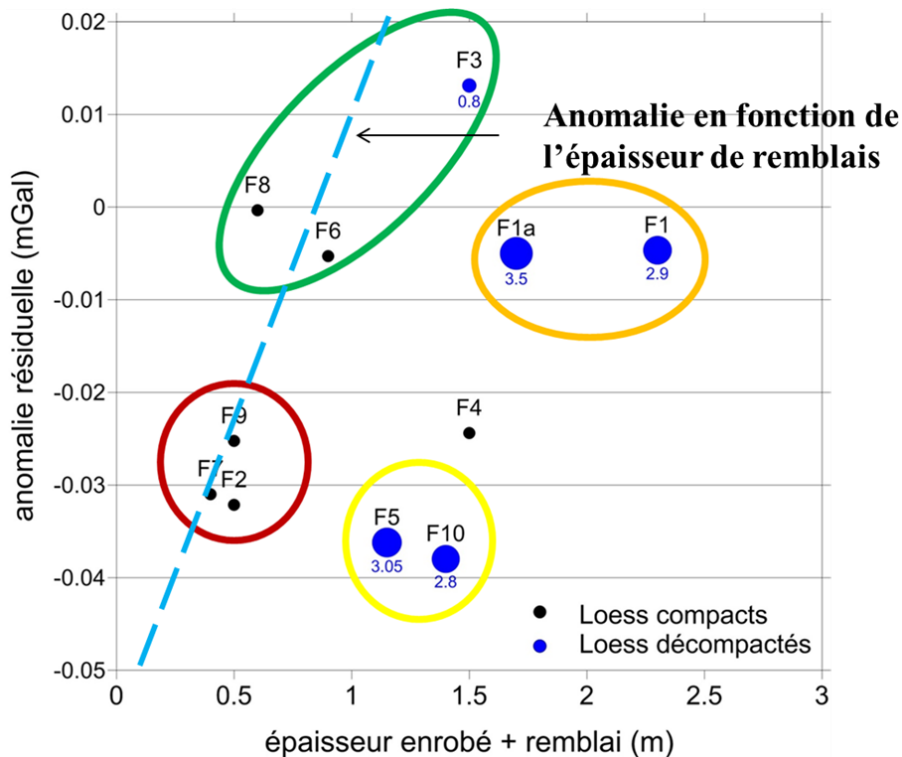


Illustration 4 : Diagramme de mise en relation des anomalies résiduelles et des épaisseurs de remblais

Les points suivants la ligne bleue correspondent majoritairement au forage ne montrant pas de loess décompactés. Les familles de points encerclées selon une couleur correspondent à des ensembles de points de foration présentant une épaisseur de remblais et enrobé similaire. Les points s'éloignant de cette droite présentent des zones de décompactations des loëss ou des zones de vides. La connaissance de l'anomalie résiduelle et de l'épaisseur de remblais anthropique permet de qualifier rapidement la présence de loess décompactés.

Les anomalies de gravimétrie observées sur le trottoir au Nord-Ouest de la zone d'étude sont dues à des paramètres anthropiques (forage F2, F7 et F9). L'épaisseur, la composition et le compactage des remblais présents sous le trottoir étant différents des remblais de chaussée. Les forages en question ne montrent pas de vides ou de passages décompactés au sein des loëss. L'anomalie la plus importante, située au sud-est de la zone (forages F5 et F10) est due à la présence de loess décompactés sur 2 à 3 mètres d'épaisseur.

Au droit du forage F3, des horizons de loess décompactés ont été rencontrés très localement entre 1,50 et 2,30 mètres de profondeur. Les forages F2, F4, F6, F7, F8 et F9 présentent des vitesses d'avancement faibles et homogènes laissant à penser que les terrains au droit de ces forages sont compacts.

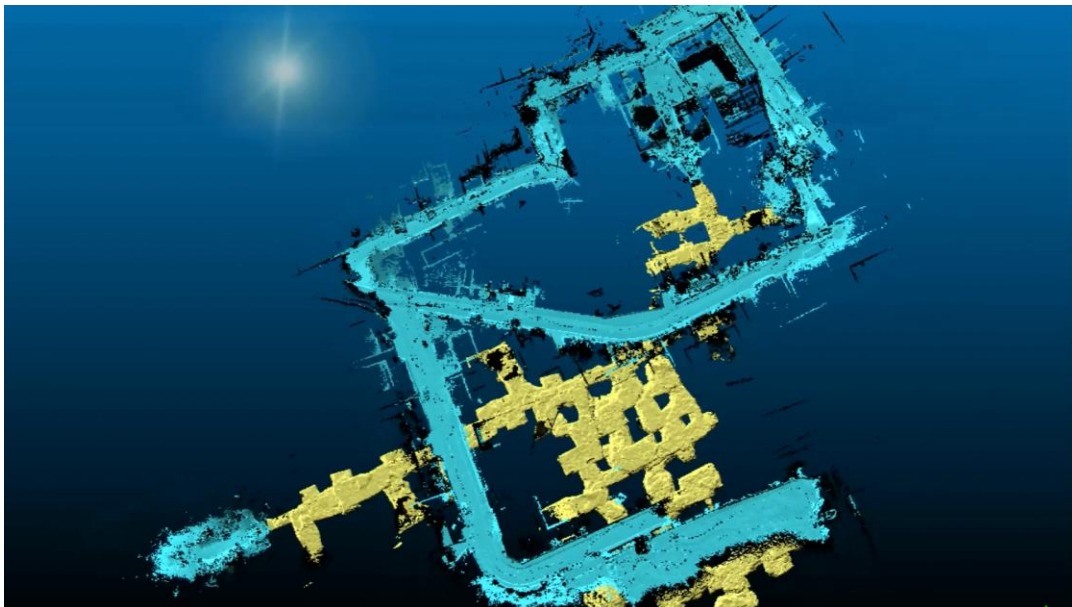
Les anomalies ont fait l'objet de validation par des sondages de reconnaissances qui ont permis de confirmer l'existence de zones de terrains décomprimés pouvant devenir, à terme, des zones de fragilité. Une zone de vide de faible emprise a été mise

en évidence grâce à la géophysique et confirmée par les forages. Cette zone de vide, située sur un autre secteur par rapport à la zone effondrée a pu faire l'objet d'un comblement.

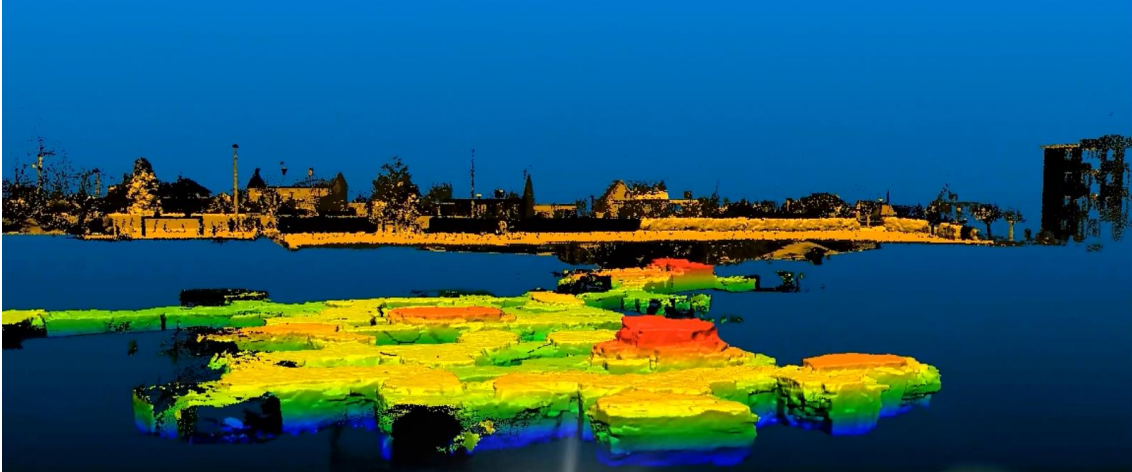
## 4. Levé laser 3D

Le premier levé laser 3D prévu au cahier des charges de la convention aura lieu au courant de l'année 2017. Les objectifs de ce levé laser 3D sont multiples :

- Le levé laser 3D représente une avancée technologique dans la prévention et la gestion du risque lié aux cavités souterraines. En effet, la précision du nuage de point qui sera obtenu lors de la réalisation de levé est telle que la comparaison entre 2 levés espacés dans le temps permettra d'identifier les zones d'arrivée de matériaux et volumes de terrain que cela représente, ainsi que des possibles remontées de désordres depuis la voûte des galeries souterraines. Ces informations sont capitales dans le cadre de la prévention des risques en surface mais également pour la compréhension des phénomènes ;
- Le levé laser étant géoréférencé, il permet une superposition exacte des ouvrages souterrain et des enjeux en surface (Illustration 5) ;
- La modélisation 3D permet d'obtenir une représentation en côte topographique qui permet de visualiser les épaisseurs de recouvrement. Cette information pourra aider les propriétaires des bâtiments sus-jacents à prendre conscience des phénomènes sous-jacents (Illustration 6) ;
- Dans le cadre des projets relatifs à la thématique « ville durable », il est intéressant de tester le potentiel des levés 3D qui permettront de nourrir des modèles 3D des sous-sols urbains pour permettre une meilleure gestion des usages du sous-sol.



*Illustration 5 : Exemple de levés réalisés en carrière souterraine (jaune) et en surface (bleu) superposés – vue en plan*



*Illustration 6 : Vue 3D des levés réalisés en carrière souterraine et en surface*

## 5. Conclusion

L'objectif du programme d'évolution des outils de gestion et de prévention des risques liés aux cavités souterraines est de mettre en place des méthodes « nouvelles » et de capitaliser sur le retour d'expérience issu de ces tests opérationnels.

L'évolution de la base de données vers la base de données nationale répond à un objectif de mise à disposition des données « en temps réel » via la plate-forme gouvernementale des risques naturels ([www.georisques.gouv.fr](http://www.georisques.gouv.fr)). Cette fusion permettra également aux opérateurs techniques de la gestion du risque sur le territoire de l'EMS d'avoir accès, sur le terrain, aux informations contenues dans cette base de données.

L'inspection robotique réalisée sur le réseau de galeries souterraines ST009 à Strasbourg Koenigshoffen a permis de mettre à jour les connaissances sur une galerie souterraine qui n'était plus visitée depuis plusieurs années, pour des raisons d'inaccessibilité dans des conditions de sécurité optimales, malgré un niveau d'aléa élevé.

La réalisation de la campagne de géophysique a permis d'obtenir, relativement rapidement, une carte des zones susceptibles de présenter un risque d'effondrement au droit de la route de Bischwiller. Ces informations, une fois validées à l'aide de forages de reconnaissance, ont permis d'adapter les mesures de gestion du risque et de fournir des informations dans le cadre de la prévention du risque sur des zones d'attention. L'année 2017 devrait voir se mettre en place une discussion pour la rédaction d'un avenant à la convention sur l'axe relatif à la micro-gravimétrie. En effet, une seconde phase de test est envisagée afin de valider la présence d'une cavité souterraine sur un secteur où sa présence est fortement suspectée (indice nombreux, bibliographie...), mais non avérée. Les acquisitions géophysiques devraient permettre de définir une emprise générale de la cavité et éventuellement de localiser des accès (anomalie plus importante en cas de remontée de vide jusqu'en surface).

En 2017, outre la finalisation des opérations de rattachement de la base de données cavités EMS à la base de données nationale, le premier levé laser 3D d'une cavité devrait être réalisé.

De manière générale, les méthodes d'investigations mises en place au cours de 2016 (robotique et géophysique) ont contribué à une gestion rapide et efficace de période de crise (effondrement à proximité de la route de Bischwiller) et de suivi (mise à jour des connaissances sur le réseau ST009).

## 6. Bibliographie

Grabenstaetter L. (2016). Diagnostic et investigations suite à l'effondrement du 29 août 2016 – Route de Bischwiller à Schiltigheim (67) – Indice SC020.

Grabenstaetter, L. (2016). Inspection du réseau de galeries souterraines situées Rue Lothaire à Strasbourg Koenigshoffen – Indice ST009.

Jacob, T., Lebert, F., & et al. (2016). Investigations par microgravimétrie et géoradar sur la route de Bischwiller à Schiltigheim (67), suite à la survenue d'un effondrement sous le trottoir.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale Grand Est  
Délégation de Strasbourg**  
Parc d'activité Porte sud – Bât H1  
Rue Pont du Péage  
67118 – Geispolsheim - France  
Tél. : 03 88 77 48 90