REDECOUVERTE DE LA PLUS VASTE CARRIERE SOUTERRAINE ANTHROPIQUE D'ORLEANS

REDISCOVERING THE LARGEST UNDERGROUND QUARRY IN ORLEANS

Alexandre PHILIPPE[1], Ludovic DORE[1], Thomas JACOB[2], Silvain YART[2]
[1] *Cerema Direction Territoriale Normandie-Centre, Blois, France*
[2] *Brgm, Orléans, France*

RÉSUMÉ – A la suite d'un effondrement de terrain survenu au mois de mars 2019, une vaste carrière souterraine a été redécouverte dans le centre-ville d'Orléans (45). Afin de déterminer son extension exacte, une étude de recherche de cavités souterraines a été lancée. Cette dernière a conduit au développement d'une procédure d'investigation itérative mêlant topographie 3D, microgravimétrie et investigations géotechniques. La méthode s'est révélée concluante et a permis de redécouvrir 2000 m² de vides supplémentaires.

ABSTRACT – The study presented in this paper started after a sinkhole occurred in a backyard in the city of Orleans, revealing a wide cavity. In order to determine the extent of the cavity, the city of Orleans decided to fund a study combining complementary methods. An iterative process was implemented. The methodology was effective and led to the discovery of other large cavities, whose total area was roughly 2000 square meters in footprint.

1. Introduction

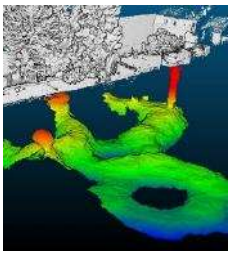
La ville d'Orléans est connue pour ses nombreuses anciennes zones d'extraction souterraines de calcaire. Au fur et à mesure de leur dégradation et de leur comblement, leurs localisations ont progressivement disparu de la mémoire collective. La ville ayant subi d'importantes phases d'expansion, des bâtiments ont été construits dans leur environnement ou à l'aplomb de ces vides oubliés.

A la suite d'un effondrement de terrain survenu le 18 mars 2019 sur la commune d'Orléans (45), une vaste carrière souterraine de calcaire a été redécouverte. L'exploration réalisée immédiatement après la survenue du mouvement de terrain a mis en évidence un développement de plus de 3000 m² de surface, constituant ainsi le plus vaste réseau souterrain connu à ce jour sur le territoire orléanais. Positionnée dans un secteur urbanisé, la carrière redécouverte pose des questions évidentes de risque de mouvement de terrain. Les visites et premières opérations de topographie ont par ailleurs montré que les galeries étaient pour une grande partie d'entre elles obstruées par des éboulis, laissant présager de possibles extensions aveugles.

Devant cette découverte majeure pour le territoire communal, la ville d'Orléans a confié au groupement Cerema/Brgm une étude de recherche de cavités souterraines. Dans ce cadre, une procédure d'investigation itérative a été mise en place sur une superficie de 3,5 ha très urbanisée.

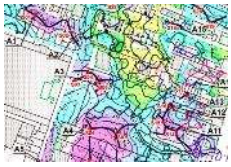
2. Présentation de la méthodologie

La méthodologie de recherche de cavités souterraines développée se base sur les connaissances synthétisées dans le guide « Méthode de reconnaissances des cavités » (Bénot et al., 2021). Les investigations géophysiques et géotechniques ont été intégrées à une boucle itérative (Figure 1).



Recueil des données de base

- Enquête (archives, témoignages…)
- Exploration des cavités accessibles
- Scan 3D des cavités connues
- Relevés topographiques des sous-sols



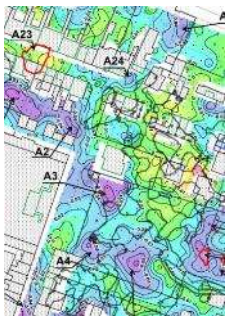
ETAT 0
Carte d'anomalie microgravimétrique initiale

Caractérisation des anomalies microgravimétriques

- Campagnes de sondages destructifs avec enregistrement des paramètres de forages
- Inspection vidéoscopique des vides francs découverts

Topographie des vides francs découverts

- Désobstruction de galerie pour création de liaison vers les vides francs découverts et scan 3D des vides accessibles
- Mesures laser depuis les points de sondages



Correction de la carte d'anomalie microgravimétrique initiale

- Calcul de l'effet des vides reconnus
- Correction de l'anomalie résiduelle de l'effet des vides reconnus
- Correction estimative des effets des zones d'effondrement reconnues

Reste-t-il de l'anomalie persistante non expliquée?

OUI

ITERATIONS SUCCESSIVES

NON

Toutes les anomalies sont expliquées.
La phase de caractérisation des anomalies s'arrête.

Figure 1 : Processus de recherche de cavité souterraine itératif

La boucle itérative (Figure 1) permet à chaque itération d'améliorer la caractérisation des anomalies géophysiques découvertes et d'affiner le plus exhaustivement possible l'extension maximale des cavités existantes.

3. Etat 0 – constitution de la carte d'anomalies géophysiques initiales

3.1. Choix de la méthode d'investigations géophysiques

Les investigations en zone urbaines posent généralement des problèmes assez lourds pour la plupart des techniques géophysiques (Bénot et al., 2021). Dans le contexte orléanais, l'utilisation d'un géoradar est peu recommandée au regard de la profondeur des cavités souterraines et de la présence d'horizons argileux dans les terrains de recouvrement. L'éventail des méthodes pertinentes est ainsi restreint et le choix s'est porté vers la microgravimétrie.

La méthode microgravimétrique consiste à mesurer, à la surface du sol, les variations du champ de pesanteur. Ces dernières sont directement reliées aux variations de masses existantes dans le sous-sol qui peuvent être liées à la présence de cavités souterraines ou de niveaux de densité moindre. Pour interpréter les mesures, il convient de corriger les données brutes de tous les effets qui ne présentent pas d'intérêt pour l'interprétation des données relatives à la structure du sous-sol. Sur le périmètre de terrain étudié, il convient ainsi de disposer de données nécessaires à la réalisation de l'ensemble des corrections.

3.2. Collecte des données d'entrée

Pour permettre l'établissement de la carte d'anomalies gravimétriques, une phase d'enquête a été réalisée (étude des archives, photo-interprétation, recueil de témoignages et d'indices de cavités, exploration des vides accessibles…). De manière à permettre la correction des données microgravimétriques des effets perturbateurs d'origine anthropique (bâtiments, caves, carrières connues) et topographique, l'enquête s'est accompagnée :

- d'un scan 3D des carrières souterraines visitables. Les scans ont été réalisés avec des scanners laser mobiles de technologie Geoslam de type ZEB-REVO/HORIZON (données brutes traitées avec les logiciels Geoslam Hub et CloudCompare) ;
- de la constitution d'un modèle numérique de terrain (MNT) réalisé à l'aide d'une station Trimble S7 et d'un GPS Trimble Geo 7X ;
- d'un levé de la hauteur et de l'épaisseur des murs des bâtiments ;
- d'un levé systématique des caves et sous-sols simples à l'aide d'une boussole et d'un lasermètre. Leurs emprises ont été recalées sur le MNT.

Au cours de cette enquête de terrain, une carrière souterraine de 1000 m² de superficie a été redécouverte, accessible par un puits d'aération au sein d'une propriété privée.

3.3. Carte d'anomalie géophysique initiale

Une campagne de mesures microgravimétriques a été réalisée entre le 12 novembre et le 20 décembre 2019. 804 stations ont été implantées, nivelées et mesurées en microgravimétrie. La maille d'implantation qui a été retenue a été de 7x7 m au droit des zones de cavités souterraines connues et de 5x5 m en dehors. Les mesures ont été réalisées à l'aide de deux gravimètres Scintrex CG-5 et CG-6.

L'anomalie de Bouguer est obtenue en incluant les corrections anthropiques (bâtis, caves) selon la méthodologie développée par Jacob T. et al. 2020 (a). Les effets des parties de carrière connues, levée au scanner laser mobile, ont été corrigées selon la méthodologie de Jacob T. et al. 2020 (b). L'anomalie résiduelle est obtenue en soustrayant l'anomalie régionale à l'anomalie de Bouguer. L'anomalie résiduelle a une dynamique de 0,115 mGal, variant de -0,090 à 0,025 mGal (Figure 2). Ces valeurs sont à comparer au seuil de signification qui varie de 0,013 à 0,046 mGal.

La carte d'anomalie microgravimétrique à l'état 0 montre la présence de vastes secteurs d'anomalies négatives. Les anomalies sont jointives et parfois coalescentes. Les anomalies viennent se positionner dans l'environnement de bâtiments d'habitation. La suite de l'étude se focalisera sur la partie sud de la zone d'étude, où les anomalies les plus significatives (de A4 à A11) ont été constatées (Figure 2).

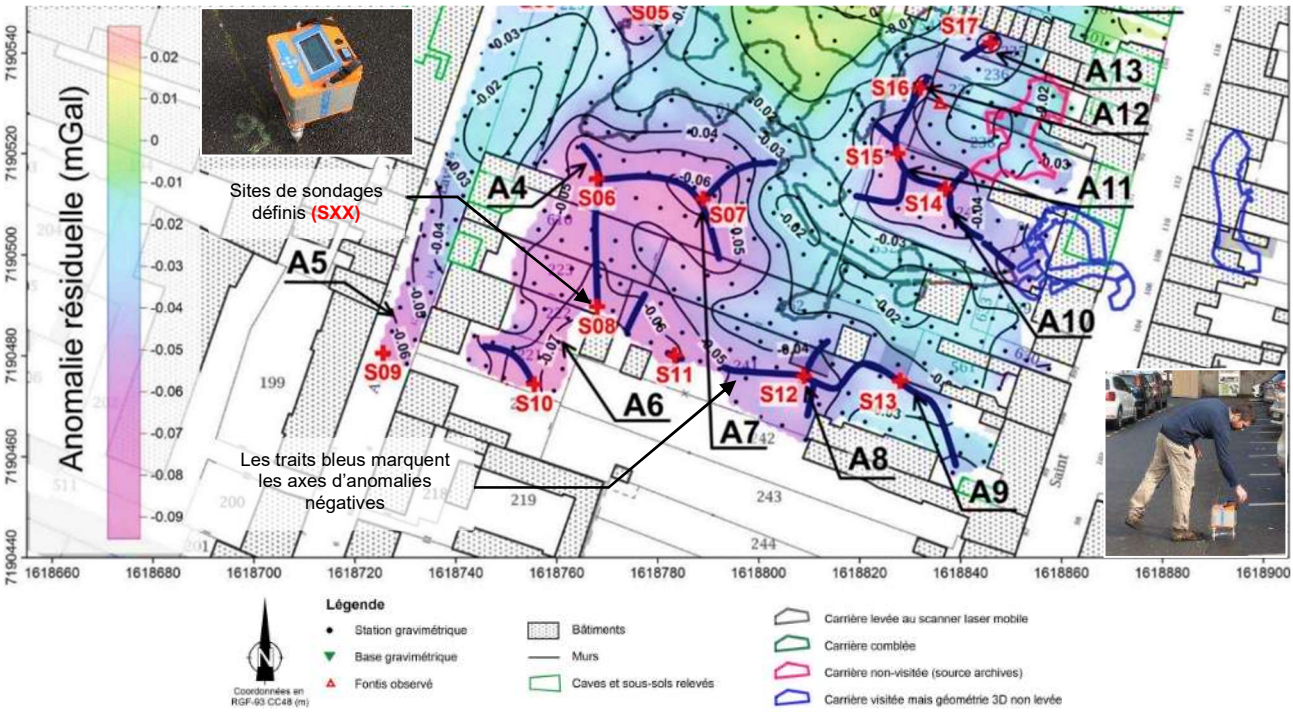


Figure 2 : Etat 0 de la carte d'anomalie résiduelle (mGal)

4. Itération n°1 – sondages de reconnaissance géotechnique

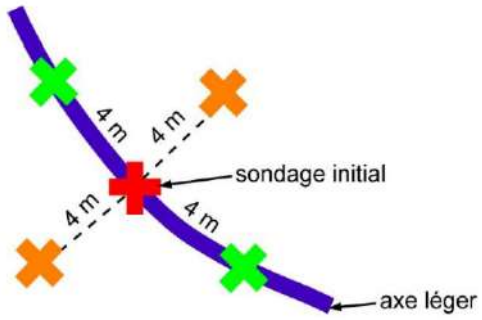
4.1. Campagne de reconnaissance géotechnique

L'exploitation de la carte d'anomalie résiduelle a conduit à la définition d'une campagne d'investigations géotechniques. Cette dernière s'est orientée classiquement vers une campagne de sondages destructifs suivis d'inspections vidéoscopiques (Bénot et al., 2021).

A l'échelle du périmètre d'étude, 61 sondages destructifs ont été réalisés à l'aide 3 ateliers de sondages différents de type COMACCHIO GEO601, SEDIDRILL 500 et SOMAC SD210-50. Les sondages ont été réalisés verticalement, au tricône Ø 116 mm, en rotation pure à l'aide d'un fluide de forage (eau claire + GSP). Des tiges de Ø 76 mm ont été employées de manière à limiter les déviations du train de tiges en profondeur. La profondeur des sondages a été définie au regard de la profondeur du toit et du sol des carrières souterraines connues, soit entre 15 et 18 m de profondeur. Les paramètres ont été enregistrés à l'aide d'un appareillage Lutz.

En cas de découverte de vides francs, les sondages ont été équipés de tubes PVC Ø 110 mm descendus jusqu'au toit des cavités. Ces dernières sont alors inspectées au moyen d'une caméra couleur béquillable. Munie d'un compas gyroscopique, elle permet d'obtenir une vidéo de la cavité orientée par rapport au nord magnétique selon un azimut de 360° et un angle vertical de 110°. La caméra est munie d'un télémètre laser d'une portée de 12 m et d'un zoom optique x 10 permettant d'évaluer la géométrie des vides inspectés.

Les sites de sondages ont été définis sur la base des résultats des mesures microgravimétriques et en respectant une stratégie d'implantation définie sur la base de la largeur des galeries connues de carrière. Les sondages sont positionnés dans l'environnement des axes gravimétriques (Figure 3) et en limitant à 5 le nombre de sondages exécutés par sites de sondages définis.



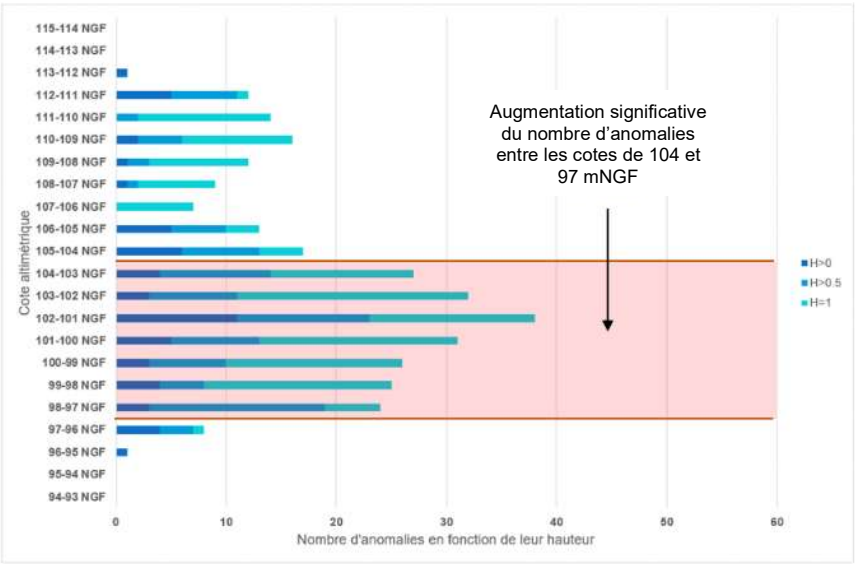
croix rouge : sondage initial – croix vertes : les deux sondages à réaliser selon l'axe gravimétrique léger si le sondage initial ne rencontre pas de vides – croix oranges : les deux sondages à réaliser perpendiculairement à l'axe gravimétrique léger si les trois premiers sondages ne rencontrent pas de vides

Figure 3 : Stratégie d'implantation des sondages

4.2. Résultats de la campagne de reconnaissance géotechnique

Les sondages de reconnaissance ont été interprétés sur la base de l'analyse des diagraphies de paramètres de forage enregistrés lors de l'exécution des sondages destructifs, des essais de chute libre (ECL) et du résultat des inspections vidéoscopiques. L'interprétation des résultats confirme la présence d'anomalies dans le sous-sol. Les hauteurs d'anomalies mises en évidence ont pu être classées en plusieurs catégories :

- 12% correspondent à des vides francs de carrière souterraine ;
- 42% correspondent à des vides supposés remblayés et/ou effondrés ;
- 26% correspondent à des anomalies verticales de type puits remblayés ou ancien effondrement ;
- 11% correspondent à des anomalies de décompression de surface induites par la présence de remblais décomprimés ;
- 9% correspondent à de probables variations lithologiques.



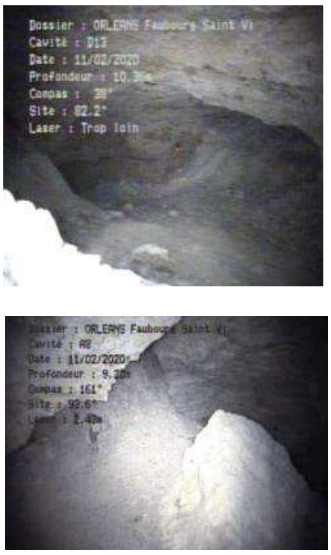


Figure 4 : Distribution des anomalies en fonction de leur hauteur et de leur profondeur

Au droit des anomalies A4 à A11, 5 vides francs ont été découverts en sondages. Ils ont fait l'objet d'une inspection vidéoscopique. Leurs dimensions varient de 4 à plus de 50 m² (Tableau 1). Les vides repérés sont éloignés les uns des autres de plusieurs dizaines de mètres, ne laissant pas présager de liaison les uns avec les autres.

Tableau 1 : Dimensions des vides découverts au droit des anomalies A4 à A11

Sondage	Anomalie micro-gravimétrique	Prof. Sondage (m)	Altitude toit cavité mNGF	Altitude sol cavité mNGF	L_{max} (m) Direction nord-sud	L_{max} (m) Direction est-ouest
SD1011	A6	10,24	102,70	101,26	9,45	3,48
SD1017	A6	13,92	103,50	102,00	13,05	2,91
SD1027	A4	15,86	103,00	101,50	11,46	7,23
SD1033	A10	15,18	102,60	100,70	5,67	4,99
SD1035	A10	15,13	109,20	107,00	2,59	2,19

4.3. Mise à jour de la carte d'anomalie résiduelle

Lors de cette première mise à jour, une correction supplémentaire a été apportée à la carte d'anomalie résiduelle initiale. La correction a été calculée pour prendre en compte l'effet des vides reconnus en sondages. Les données géométriques prises en compte sont celles définies sur la base des sondages et des inspections vidéoscopiques. A l'issue de cette première mise à jour, la carte d'anomalie résiduelle est peu modifiée. Les 5 vides francs découverts dans ce secteur ne permettent pas à eux seuls d'expliquer la nature des anomalies mesurées dans la partie sud de la zone d'étude.

5. Itération n°2 – désobstruction de vides et topographie 3D complémentaire

5.1. Désobstruction d'un accès à une carrière souterraine

La première mise à jour de la carte d'anomalie résiduelle a montré qu'il existait certainement d'autres vides non reconnus à ce stade par les sondages de reconnaissance géotechnique. Au préalable à la réalisation de sondages complémentaires, il a pu être constaté que le vide découvert au droit du sondage SD1027 était relativement proche de la carrière initiale (distance de l'ordre de la dizaine de mètres). Une tentative de désobstruction a été tentée pour rejoindre le vide découvert en sondage avec l'aide du Comité Départemental de Spéléologie du Loiret (CDS45). L'opération a été couronnée de succès, évitant ainsi l'exécution de sondages complémentaires.

5.2. Exploration et topographie 3D complémentaire

L'exploration depuis le fond (Figure 5) a mis en évidence que les vides des sondages SD1017 et SD1027 font partie du même réseau de galeries souterraines. Ce dernier présente une forme labyrinthique et une superficie totale de l'ordre de 1000 m².

Figure 5 : Aperçu de la carrière souterraine redécouverte

Ce développement souterrain a fait l'objet d'une opération de topographie 3D à l'aide d'un scanner de type ZEB-HORIZON (Figure 6). La méthodologie de prise de mesures est similaire à celle développée pendant la phase de collecte de données initiales. Le nuage de points de la carrière redécouverte a été recalé avec les autres levés par corrélation nuage/nuage et en utilisant les coordonnées des points de sondages traversant le toit de la carrière.

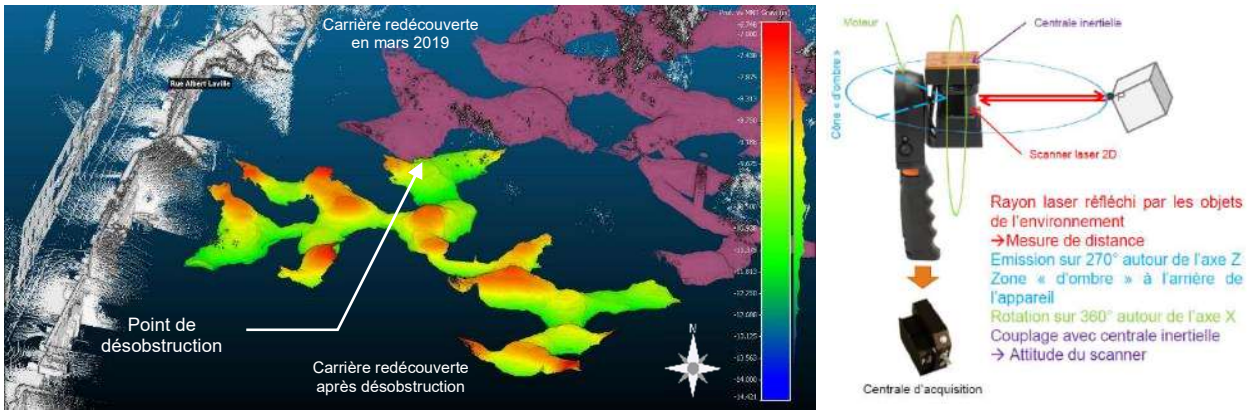


Figure 6 : Scan 3D du développement souterrain redécouvert

5.3. Mise à jour de la carte d'anomalie résiduelle

Lors de cette deuxième mise à jour, une correction supplémentaire a été apportée à la carte d'anomalie résiduelle. La correction a été calculée pour prendre en compte l'effet des vides de la carrière redécouverte. A l'issue de cette deuxième mise à jour, la carrière souterraine permet d'expliquer une large partie des anomalies A4 à A11. Il subsiste néanmoins des anomalies de 0,03 à 0,05 mGal (Figure 7).

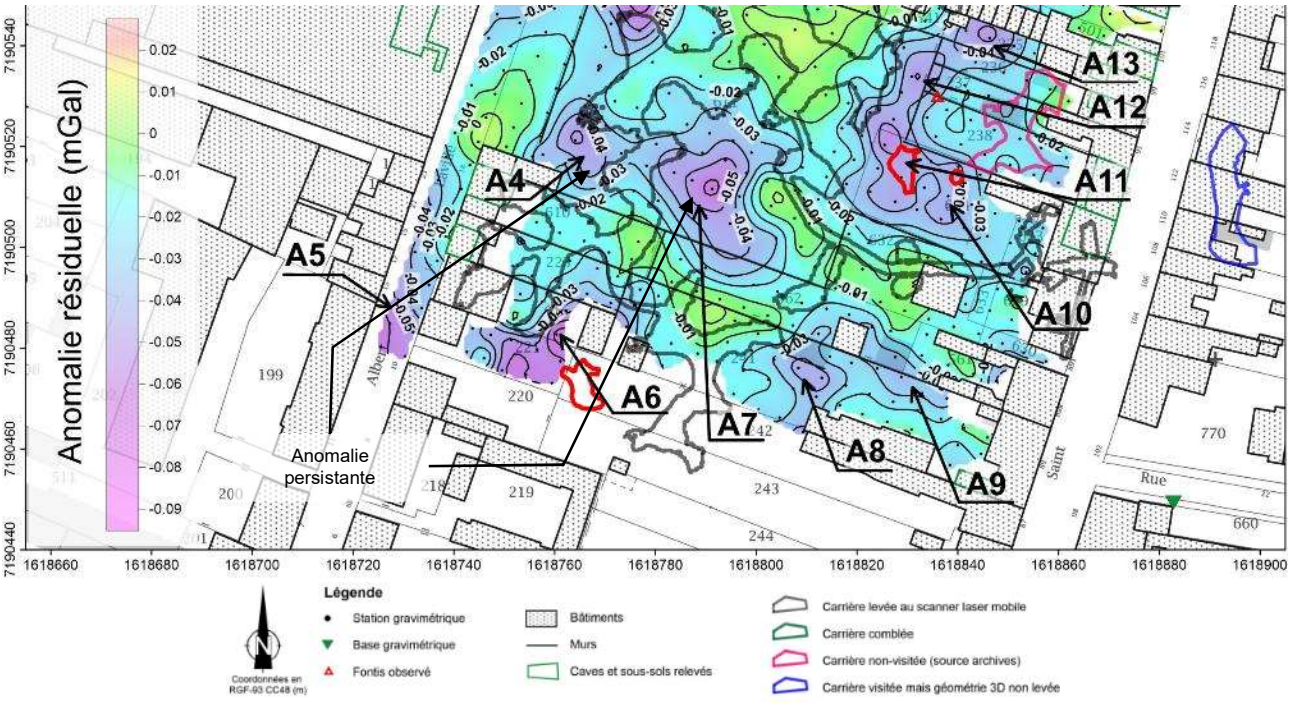


Figure 7 : Itération n°2 : carte d'anomalie résiduelle mise à jour

6. Itération n°3 – hypothèse sur les extensions inaccessibles

6.1. Extensions inaccessibles

Bien qu'un important réseau de galeries ait été redécouvert, il subsiste des anomalies non expliquées. Certaines anomalies, notamment A4 et A7 sont localisées entre deux développements souterrains limitrophes. L'exploration des développements montrent que les zones d'anomalies se positionnent à l'aplomb d'anciens effondrements du toit.

Sur la base de l'exploration des vides accessibles, de l'analyse des résultats de sondages et de l'extrapolation de la géométrie des vides aux secteurs inaccessibles, il est possible de redessiner approximativement les contours de carrière souterraines et les zones d'effondrement subies.

6.2. Carte d'anomalie résiduelle finale

Au cours de cette dernière mise à jour, une correction supplémentaire a été apportée à la carte d'anomalie résiduelle en A4 et A7, en supposant que les secteurs de carrières souterraines inaccessibles sont entièrement comblés par des remblais et/ou des éboulis et que les effondrements constatés en carrière correspondent à des effondrements pseudo-cylindriques. Un contraste de densité de -0,5 est supposé pour ces secteurs ce qui correspond à un coefficient de foisonnement des matériaux de remblais et d'éboulis de 1,2.

Les anomalies A4 et A7 sont bien corrigées avec une amplitude de signal résiduel de l'ordre de 0,02 à 0,03 mGal, soit du niveau du seuil de signification (Figure 8). La présence d'anomalie persistante peut être due aux approximations de cette dernière itération.

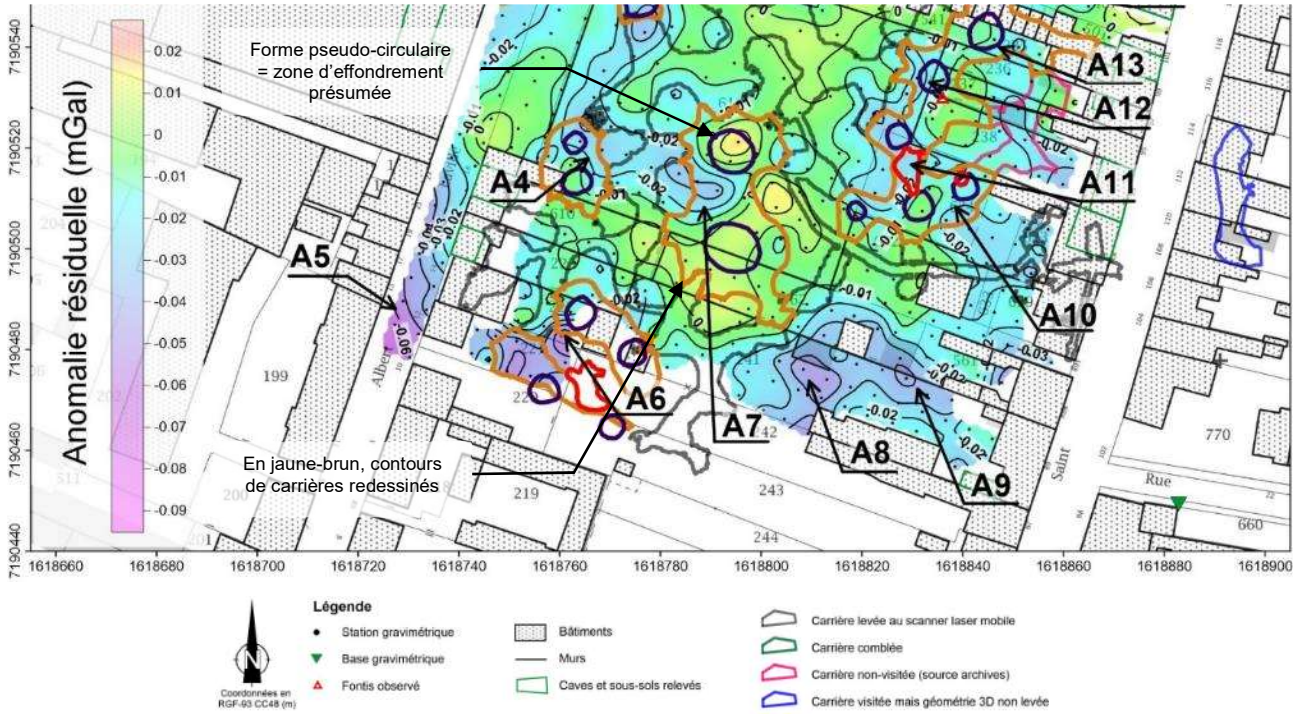


Figure 8 : Itération n°3 : carte d'anomalie résiduelle mise à jour

7. Conclusions

Au cours des études de recherches de cavités souterraines, les investigations géophysiques et géotechniques sont complémentaires. Un processus itératif permet de proche en proche d'expliquer au mieux les anomalies géophysiques découvertes tout en limitant le volume et le coût des investigations géotechniques à mener. Sur ce cas d'étude, le processus s'est révélé fructueux puisqu'il a permis de redécouvrir 2000 m² de vides supplémentaires.

8. Bibliographie

Bénot R., Azémard P., Cote P. (2021). Méthodes de reconnaissance des cavités. Synthèse des connaissances actuelles. Cerema. ISBN : 978-2-37180-486-9. 72 pages.

Jacob T., Pannet P., Beaubois F., Baltassat JM., Hannion Y. (2020) a. Cavity detection using microgravimetry in a highly urbanized settings : a case study from Reims, France. Journal of Applied Geophysics. 179 (2020) 104113. 14 pages.

Jacob T., Yart S., Masson F. (2020) b. Utilisation du scanner laser mobile pour modéliser et corriger les effets des structures anthropiques des données microgravimétriques en milieu urbain : phase 1. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-69950-FR. 41 p. et 18 ill.