

Document public

Recherche de cavité par couplage de microgravimétrie et scan laser 3D au droit de l'église Notre-Dame de Montmorillon (86)

Rapport final

BRGM/RP-70958-FR

Juillet 2021



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Recherche de cavité par couplage de microgravimétrie et scan laser 3D au droit de l'église Notre-Dame de Montmorillon (86)

Rapport final

BRGM/ RP- 70958-FR

Juillet 2021

T. Jacob, S. Yart, L. Closset, L. Ardito, F. Masson

Vérificateur :

Nom : F. ASFIRANE

Fonction : Géophysicienne

Date : 28/06/2021

Signature :



Approbateur :

Nom : DARNET

Fonction : Responsable d'Unité

Date : 01/07/2021

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Microgravimétrie, Cavité souterraine, Scan laser 3d, Montmorillon.

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

T. Jacob, S. Yart, L. Closset, L. Ardito, F. Masson (2021) – Recherche de cavité par couplage de microgravimétrie et scan laser 3D au droit de l'église Notre-Dame de Montmorillon (86), BRGM/RP-70958-FR, 63 p., 18 ill., 3 tab., 3 ann.

Synthèse

Dans le cadre d'une convention de recherche et développement avec la mairie de Montmorillon (86), une campagne de microgravimétrie, comprenant 306 stations, a été menée au sein et autour de l'église Notre-Dame, afin de détecter la présence d'éventuelles anomalies liées à des cavités souterraines, suite à la survenue d'un effondrement impactant le mur nord de l'église.

Parallèlement, nous avons réalisé un levé au scanner laser mobile qui a permis d'obtenir la géométrie 3D :

- des cavités connues et accessibles du site ;
- de la structure de l'église ;
- de la topographie escarpée du site.

Ce levé a permis d'effectuer les corrections gravimétriques des effets précités, afin d'obtenir une carte d'anomalies gravimétriques en lien avec les possibles vides non reconnus. Du fait de l'amplitude très importante de ces corrections, le site d'étude est en limite d'applicabilité de la méthode microgravimétrique.

Néanmoins, 10 anomalies gravimétriques négatives ou « légères » ont été décelées, qui, d'une manière générale, peuvent correspondre à :

1. des cavités vides, partiellement remplies ou remblayées ;
2. des variations latérales de densité au sein des terrains, liées à leur nature et à leur lithologie, à leur degré d'altération ou à leur degré de compaction ;
3. des variations latérales d'épaisseur de terrains ayant un contraste de densité important, tels des remblais peu denses sur un substrat plus dense, ou inversement.

Sur la base de ces résultats, le BRGM recommande de contrôler la présence de vides éventuels au droit des anomalies décelées, par 17 sondages destructifs verticaux de reconnaissance jusqu'à l'altitude 98 m NGF, dont 9 en priorité 1, et 8 en priorité 2.

Six sondages inclinés sont aussi préconisés afin de vérifier la présence de vide résiduel sous et à proximité de l'effondrement.

Si des cavités sont détectées par ces sondages, leur stabilité potentielle devra être évaluée en fonction de leurs caractéristiques et des méthodes de confortement éventuellement mises en place.

Une zone d'extension de la zone d'étude est également préconisée, au sud-ouest, afin de bien circonscrire l'anomalie A1. À l'issue de ce complément, de nouveaux sondages de reconnaissance pourront être préconisés pour préciser la source des anomalies.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. GÉOLOGIE DU SECTEUR D'ÉTUDE.....	10
1.3. CHOIX DE LA MÉTHODE MICROGRAVIMÉTRIQUE ET OBJECTIFS	10
2. Mesures, moyens mis en œuvre et traitements	13
2.1. IMPLANTATION ET CALENDRIER	13
2.2. TOPOGRAPHIE.....	13
2.3. SCAN 3D DES CAVITÉS ACCESSIBLES ET DE L'ÉGLISE.....	15
2.4. MESURES GRAVIMÉTRIQUES	18
2.5. RÉDUCTION DES DONNÉES VERS L'ANOMALIE DE BOUGUER.....	20
2.5.1. Principe de calcul.....	20
2.5.2. Densité de réduction adoptée	21
2.5.3. Corrections gravimétriques	21
2.6. PRÉCISION DE L'ANOMALIE DE BOUGUER.....	27
3. Résultats	31
3.1. ANOMALIE DE BOUGUER ET ANOMALIE RÉGIONALE	31
3.2. ANOMALIE RÉSIDUELLE	34
4. Interprétation et recommandations.....	37
4.1. INTERPRÉTATION GÉNÉRALE	37
4.2. PRÉCONISATIONS.....	39
4.2.1. Sondages de contrôle	39
4.2.2. Extension du levé	41
5. Conclusions.....	43
6. Bibliographie	45

Liste des figures

Illustration 1 :	Photographies de la tranchée attenante au mur N et de l'effondrement au premier plan (droite), et de l'étalement en place au sein de l'église (gauche).....	11
Illustration 2 :	Carte d'implantation des stations microgravimétriques (ronds noirs). Fond couleur : modèle numérique de terrain généré avec les données du scanner laser mobile. Les courbes de niveau sont tous les 0,5 m.	14
Illustration 3 :	Profondeur du toit des cavités visitées, d'après le levé au scanner laser mobile.	16
Illustration 4 :	Hauteur de vide des cavités visitées, d'après le levé au scanner laser mobile.....	17
Illustration 5 :	Vues du modèle maillé des murs de la nef, réalisé à partir des nuages de points levés par nos soins et mis à disposition par Art Graphique et Patrimoine.....	18
Illustration 6 :	Photographies de la base gravimétrique sur le seuil de l'église, montrant les gravimètres CG-6 en cours de mesure : le #0293 (en bleu) en stationnement sur la base, le #006 (en orange) en chauffe.....	19
Illustration 7 :	Méthode de Parasnis : report des valeurs de l'anomalie à l'air libre en fonction des termes dépendants de la densité de l'équation 1 (points rouges). La pente de la droite passant au mieux par les points permet d'obtenir la densité de réduction.....	21
Illustration 8 :	Corrections (mGal) liées à l'effet de la topographie pour une densité 1,95, à apporter aux valeurs de l'anomalie de Bouguer (carte interpolée entre les valeurs aux stations). .	23
Illustration 9 :	Effet gravimétrique de la structure de l'église, pour un contraste de densité de 2,2 (carte interpolée entre les valeurs aux stations).	24
Illustration 10 :	Effet gravimétrique des cavités levées au scanner laser mobile (polygones violets), pour un contraste de densité de -2,2 (carte interpolée entre les valeurs aux stations).....	25
Illustration 11 :	Corrections à apporter à l'anomalie de Bouguer, provenant de la topographie, du bâti de l'église, des cavités présentes sur site (carte interpolée entre les valeurs aux stations).....	26
Illustration 12 :	Histogramme des valeurs absolues des écarts de reprises et pourcentage cumulé associé. Dans ce cas, l'erreur moyenne est estimée à 0,005 mGal (tracé vert).	28
Illustration 13 :	Carte du seuil de signification de l'étude (mGal). Pour être retenues, les anomalies doivent en théorie avoir une amplitude supérieure au seuil de signification.	30
Illustration 14 :	Carte d'anomalie de Bouguer (mGal) pour une densité de 1,95. Les courbes d'isovaleur sont tous les 0,01 mGal. Les effets gravifiques de tous les effets anthropiques et topographiques corrigés.....	32
Illustration 15 :	Carte d'anomalie régionale (mGal). Les courbes d'isovaleur sont tous les 0,01 mGal.	33
Illustration 16 :	Carte d'anomalie résiduelle (mGal). Les anomalies négatives retenues sont entourées par un trait discontinu violet et numérotées de A1 à A10. Les sondages AIS sont représentés avec la cote du calcaire dolomitique (m NGF), ainsi que les anomalies radar AGC.....	35
Illustration 17 :	Carte d'implantation des sondages de reconnaissance préconisés sur l'anomalie résiduelle, sd1 à sd17, et si1-2 à si5-6. Les sondages à réaliser en priorité 1 sont en magenta et en rouge, ceux en priorité 2 en vert.	38
Illustration 18 :	Vu en coupe des sondages inclinés proposés (traits bleus), au niveau de l'effondrement.	41

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des cavités relevées.....	15
Tableau 2 : Caractéristiques des anomalies décelées.....	34
Tableau 3 : Préconisations de sondages.	40

Liste des annexes

Annexe 1 : Note du BRGM en date du 19 novembre 2019.....	47
Annexe 2 : Limite de détectabilité des cavités par microgravimétrie	57
Annexe 3 : Anomalie de Bouguer simple	61

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Dans le cadre d'un chantier d'assainissement de l'église Notre-Dame de Montmorillon (86), une tranchée drainante a été creusée le long du mur Nord du bâtiment, au printemps 2018. Suite à de fortes précipitations, un fontis s'est déclaré dans le fond de la tranchée, mettant en danger le mur nord de l'Édifice (Illustration 1).

Des travaux d'investigation de géophysique par méthode géoradar (étude de Setec-Lerm de 2018 (rapport 18.44071.001.01.A), et étude d'Analyse Géophysique Conseil de 2019) ont alors été réalisées pour ausculter le sous-sol de l'église, afin de déterminer la présence de vide résiduel autour du fontis, ainsi que la présence d'éventuelles autres cavités sous l'emprise de l'église et de ses alentours.

Les profondeurs de pénétration des ondes radar, spécifiées dans les rapports, n'atteignent pas plus de 2 à 3 m de profondeur, au maximum. Des anomalies radar pouvant correspondre à des vides ont toutefois été décelées par les deux études, notamment entre le deuxième et troisième contrefort du mur nord.

Une étude géotechnique basée sur la réalisation de trois forages pressiométriques et de six forages destructifs de 10 m de profondeur, conduite à proximité du mur nord par la société AIS (rapport 18.431-10, 2019), a permis de préciser la géologie du sous-sol et n'a pas mis en évidence de vides francs notables.

Suite à l'aggravation des désordres affectant le mur nord, un étaielement a été mis en place (Illustration 1) courant 2019 en urgence pour décharger ce mur, vraisemblablement affaibli par son affouillement causé par la remontée du fontis.

Dans le cadre de sa mission de service public, le BRGM a produit une note de synthèse (voir annexe 2) dans laquelle la réalisation d'un levé microgravimétrique est recommandée, en amont de sondages complémentaires, afin de déceler la présence d'éventuelles cavités sous ou à proximité de l'église.

Dans ce contexte, la mairie de Montmorillon a initialement sollicité le BRGM pour l'assister en appui à maîtrise d'ouvrage pour la réalisation d'un levé microgravimétrique et de sondages de contrôle associés. Une réévaluation fine de la technicité requise pour mener à bien ce levé microgravimétrique spécifique, a conduit le BRGM à proposer une convention de recherche et développement, dont les résultats sont présentés dans ce rapport.

En effet, le BRGM a identifié trois facteurs critiques, à risques, sur le site d'étude, qui nécessitent un savoir-faire de haut-niveau en microgravimétrie :

- la présence de l'église, édifice massif en pierre de taille, va influencer la gravité et nécessiter des corrections de ces effets. L'excès de masse de l'église, situé au-dessus du sol, a un effet comparable au déficit de masse d'une cavité souterraine. Cette correction nécessite un modèle 3D de la structure de l'église, et de codes de correction adaptés. L'absence de correction de ces effets mène à des anomalies fictives, qui ne sont pas liées aux cavités souterraines recherchées ;

- la présence de cavités connues sous l'église, dont notamment sa crypte, va générer une anomalie notable, qu'il convient de corriger pour bien mettre en évidence les anomalies provenant de cavités inconnues, objet de l'étude. Cette correction nécessite un modèle 3D des structures souterraines connues, et de codes de correction adaptés ;
- la présence d'une topographie escarpée aux abords de l'église, qui est située en bordure d'une falaise, influe, elle aussi, sur la gravité. La non prise en compte de ces effets mène à des anomalies fictives, qui peuvent masquer les anomalies recherchées.

1.2. GÉOLOGIE DU SECTEUR D'ÉTUDE

D'après l'interprétation des sondages réalisés (rapport AIS, 2019), la géologie du secteur d'étude consiste, de la surface vers la profondeur, en :

- une couche de remblais sableux, localement limoneux et argileux, pouvant atteindre jusqu'à 2 à 3 m d'épaisseur ;
- une couche de sable dolomitique fin, d'épaisseur variable, et pouvant atteindre plus de 5 m d'épaisseur ;
- des calcaires dolomitiques du Bajocien, présentant des passées sableuses pouvant atteindre une taille métrique. La profondeur du toit des calcaires dolomitiques varie grandement sur le site d'étude, entre 0.8 m et 8.3 m au niveau des sondages réalisés.

Ce calcaire dolomitique est très plausiblement altéré/karstifié, et les passées sableuses et la présence de sable en son toit en sont l'expression.

1.3. CHOIX DE LA MÉTHODE MICROGRAVIMÉTRIQUE ET OBJECTIFS

La méthode microgravimétrique consiste à mesurer, à la surface du sol, les variations de la pesanteur. Ces dernières sont directement liées aux variations de masses existantes dans le sous-sol, en particulier, à la présence de cavités souterraines ou de niveaux de densité moindre (niveaux altérés, décomprimés ou constitués de remblais peu denses).

La méthode microgravimétrique a des limites en termes de détectabilité des cavités, fonction de leur volume, de leur profondeur, et de leur contraste de densité avec l'encaissant. Des cavités de taille métrique à infra-métrique ne pourront être décelées quelle que soit leur profondeur, et seules les cavités de dimensions pluri-métriques pourront être décelées (voir annexe 2).

Le présent rapport décrit la tâche de reconnaissance par microgravimétrie. Cette tâche a pour but de guider l'implantation de sondages de reconnaissance, afin de déceler et cartographier les potentiels vides non-accessibles.

Ce travail n'a été possible que grâce à l'obtention de la géométrie 3D, par levé au scanner laser mobile :

- des vides connus et accessibles sous ou en proximité immédiate de l'église ;
- de la structure du bâti de l'église ;
- de la topographie fine autour de l'église.

Ces levés ont permis de corriger le signal gravimétrique des effets perturbateurs précités, permettant ainsi d'évaluer la présence d'anomalies persistantes, en lien avec de possibles cavités inaccessibles.

Une campagne de microgravimétrie, comprenant 306 stations, a ainsi été menée afin de détecter la présence d'éventuelles anomalies liées à des cavités, à l'intérieur et sur le pourtour de l'église.

Le présent rapport décrit la mise en œuvre, le traitement et les résultats de la microgravimétrie, et du levé au scanner laser mobile, et se termine sur une préconisation d'implantation de sondages de contrôle.



Illustration 1 : Photographies de la tranchée attenante au mur N et de l'effondrement au premier plan (droite), et de l'étalement en place au sein de l'église (gauche).

2. Mesures, moyens mis en œuvre et traitements

2.1. IMPLANTATION ET CALENDRIER

Au total, 306 stations gravimétriques ont été implantées, nivelées et mesurées en gravimétrie sur la zone d'étude (*Illustration 2*). La maille utilisée est de 2 m x 2 m dans les endroits accessibles et dégagés (la zone au nord de l'église était en chantier, et l'implantation au sein de l'église a été gênée par l'étalement), et de 4 m x 4 m sur le pourtour de l'étude. Ces mailles sont adaptées à la détection de cavité de taille plurimétrique en proche surface (voir annexe 1), telles que recherchées ici.

L'implantation des stations et les mesures gravimétriques ont été réalisées par des agents du BRGM, techniciens et ingénieurs en géophysique, entre les 8 et 12 mars 2021.

Le levé au scanner laser mobile a été réalisé pendant la journée du 10 mars 2021, par un ingénieur et un technicien du BRGM.

2.2. TOPOGRAPHIE

Le positionnement en X, Y et Z des stations gravimétriques dans le référentiel RGF93 – L93, et dans le système altimétrique IGN 69, a été obtenu à l'aide d'une station totale Trimble S7 (*Illustration 2*), pour obtenir les coordonnées relatives des stations dans un repère local, et d'un GPS différentiel Trimble Geo 7X, pour le recalage de l'étude dans le référentiel RGF93 – L93. Ce recalage a été effectué par l'obtention de coordonnées, précises au cm, de deux stations de base topographique utilisées pour la mise en station de la station totale. La précision centimétrique a nécessité des mesures d'au moins 15 minutes au GPS différentiel sur ces deux bases, au regard de la distance, inférieure à 15 km, à la station du réseau GNSS permanent de l'IGN utilisée pour le post-traitement du GPS différentiel.

Les données enregistrées ont été post-traitées à l'aide du logiciel Trimble Business Center v3.60 pour la station totale, et Trimble Pathfinder Office 5.65 pour le GPS.

Un modèle numérique de terrain (MNT) à la maille 0,1 m a été réalisé par nos soins (*Illustration 2*), en combinant le nuage de points du scanner laser mobile préalablement nettoyé des éléments parasites et le MNT IGN RGE Alti à la maille 1 m hors du secteur d'étude.

Le secteur d'étude présente un relief extrêmement accidenté, avec des escarpements majeurs au sud et à l'est de l'église, et une rugosité importante en lien avec la tranchée et la présence de terrasses (*Illustration 2*).

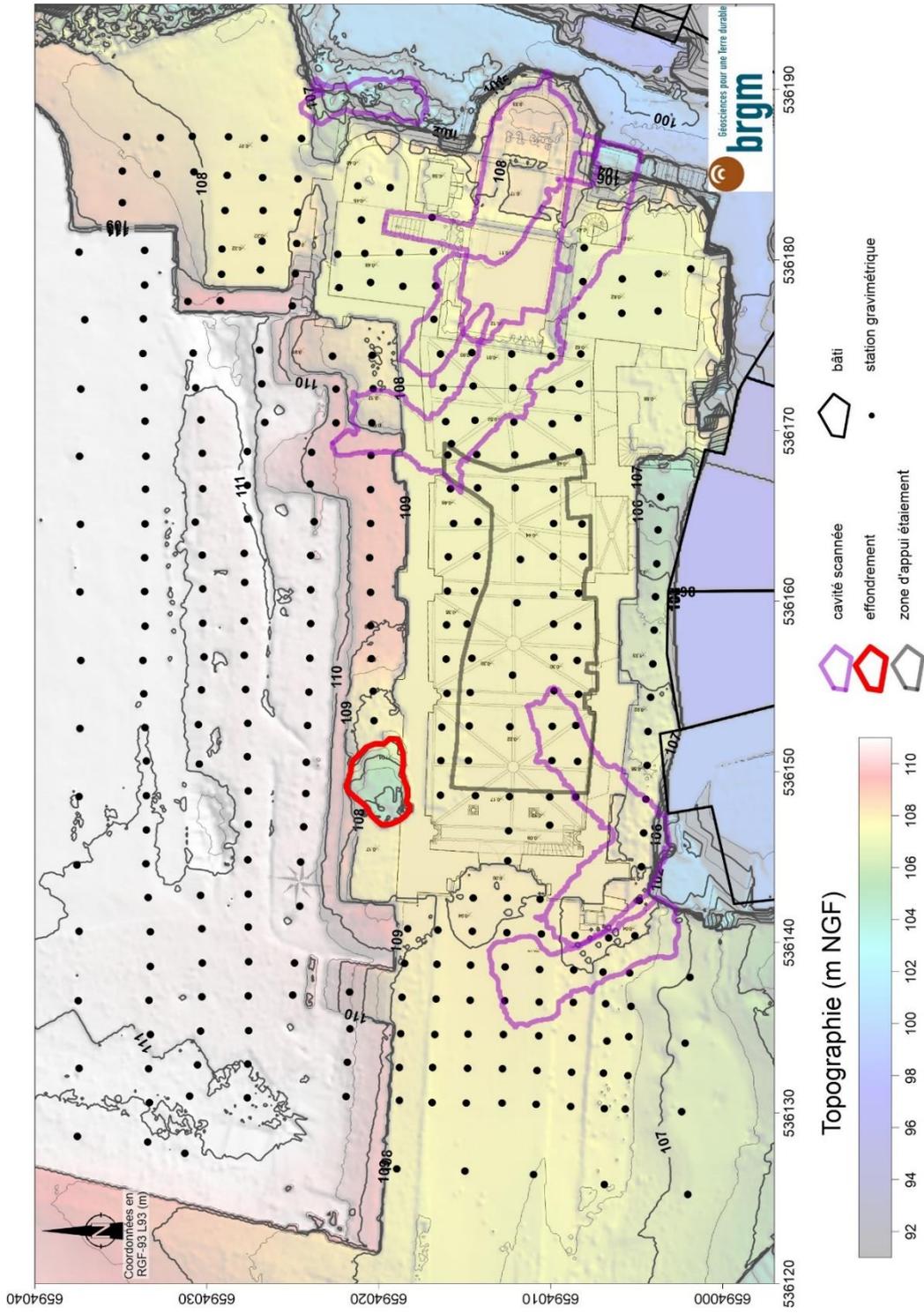


Illustration 2 : Carte d'implantation des stations microgravimétriques (ronds noirs). Fond couleur : modèle numérique de terrain généré avec les données du scanner laser mobile. Les courbes de niveau sont tous les 0,5 m.

2.3. SCAN 3D DES CAVITÉS ACCESSIBLES ET DE L'ÉGLISE

Un scan 3D des cavités accessibles ainsi que du bâti de l'église a été réalisé avec des scanners lasers mobiles ZEB-REVO et ZEB-HORIZON de Geoslam. Les données ont été traitées avec les logiciels Geoslam Hub et CloudCompare.

Les cavités suivantes ont été levées au scanner laser mobile (voir Tableau 1 pour leurs caractéristiques) :

- la crypte de l'église ;
- la grotte sous la crypte ;
- une pièce sous la crypte ;
- la grotte attenante au bras Nord du transept ;
- la grotte Est, accessible depuis le 14 rue de Montebello ;
- la grotte Ouest, accessible depuis le 14 rue de Montebello ;
- la zone sous-cavée de l'effondrement.

Description	Surface (m ²)	Volume (m ³)	Hauteur moyenne (m)	Profondeur moyenne du toit (m)
Crypte de l'église	79	267	3,4	2
Grotte sous la crypte	123	218	1,8	8,2
Grotte attenante au bras N du transept	14	16	1,1	1,4
Grotte Est, 14 rue de Montebello	55	91	1,7	4,2
Grotte Ouest, 14 rue de Montebello	37	67	1,8	4,1
Sous-cavage effondrement	4	2	0,7	1,2
Pièce sous crypte	21	53	2,5	6,3

Tableau 1 : Caractéristiques des cavités relevées.

Les grottes visitées sont très vraisemblablement d'origine anthropique, avec toutefois localement des faciès de vide karstique identifiables dans les parois.

La présence de galeries au 12 et 10 rue de Montebello, comparables à celles du 14 rue de Montebello, n'a pu être vérifiée.

Les cartes de profondeur du toit et de hauteur de vide sont présentées aux figures suivantes. On note que plusieurs cavités sous-cavent l'église, dont notamment la grotte est du 14 rue de Montebello.

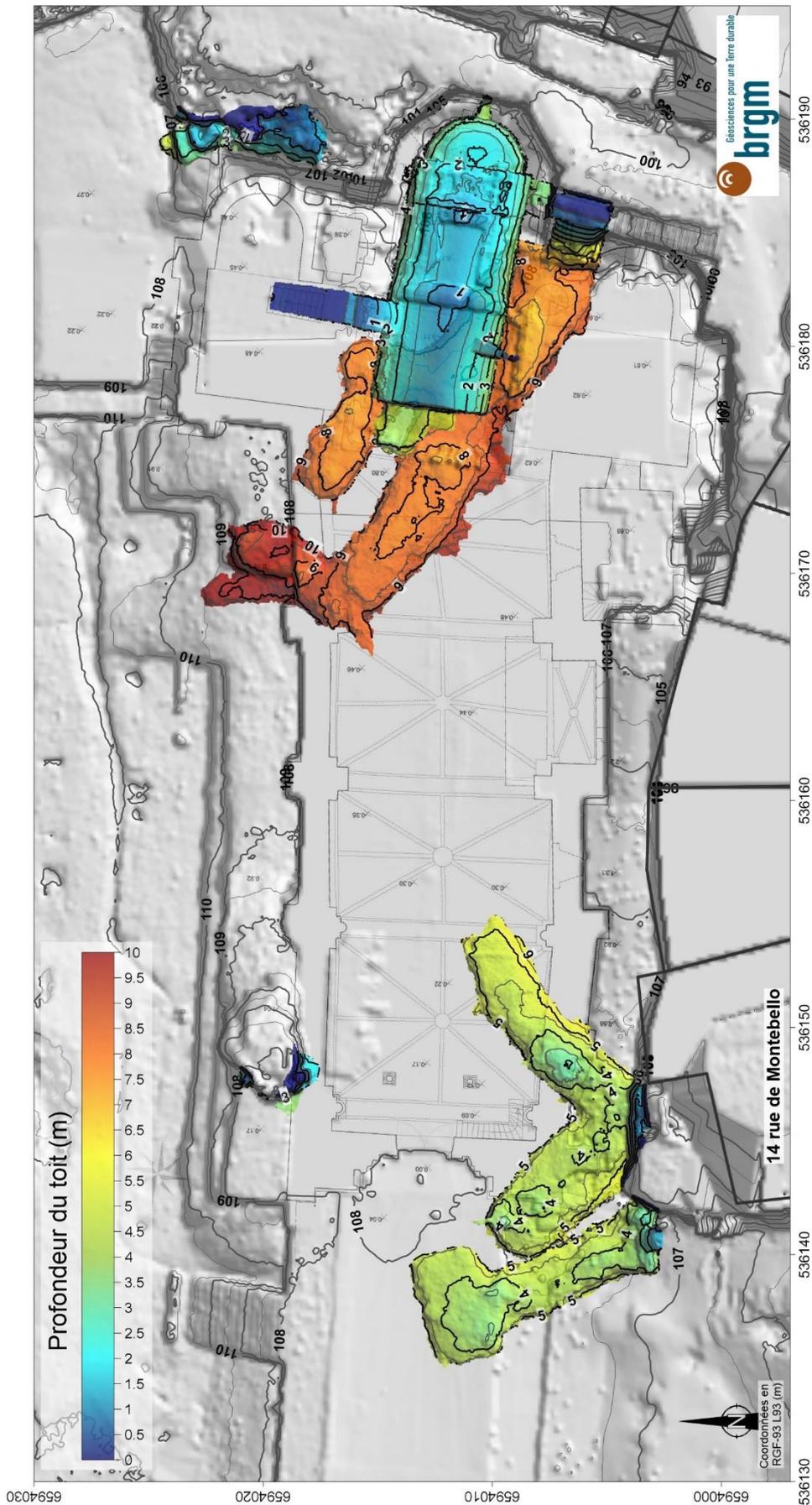


Illustration 3 : Profondeur du toit des cavités visitées, d'après le levé au scanner laser mobile.

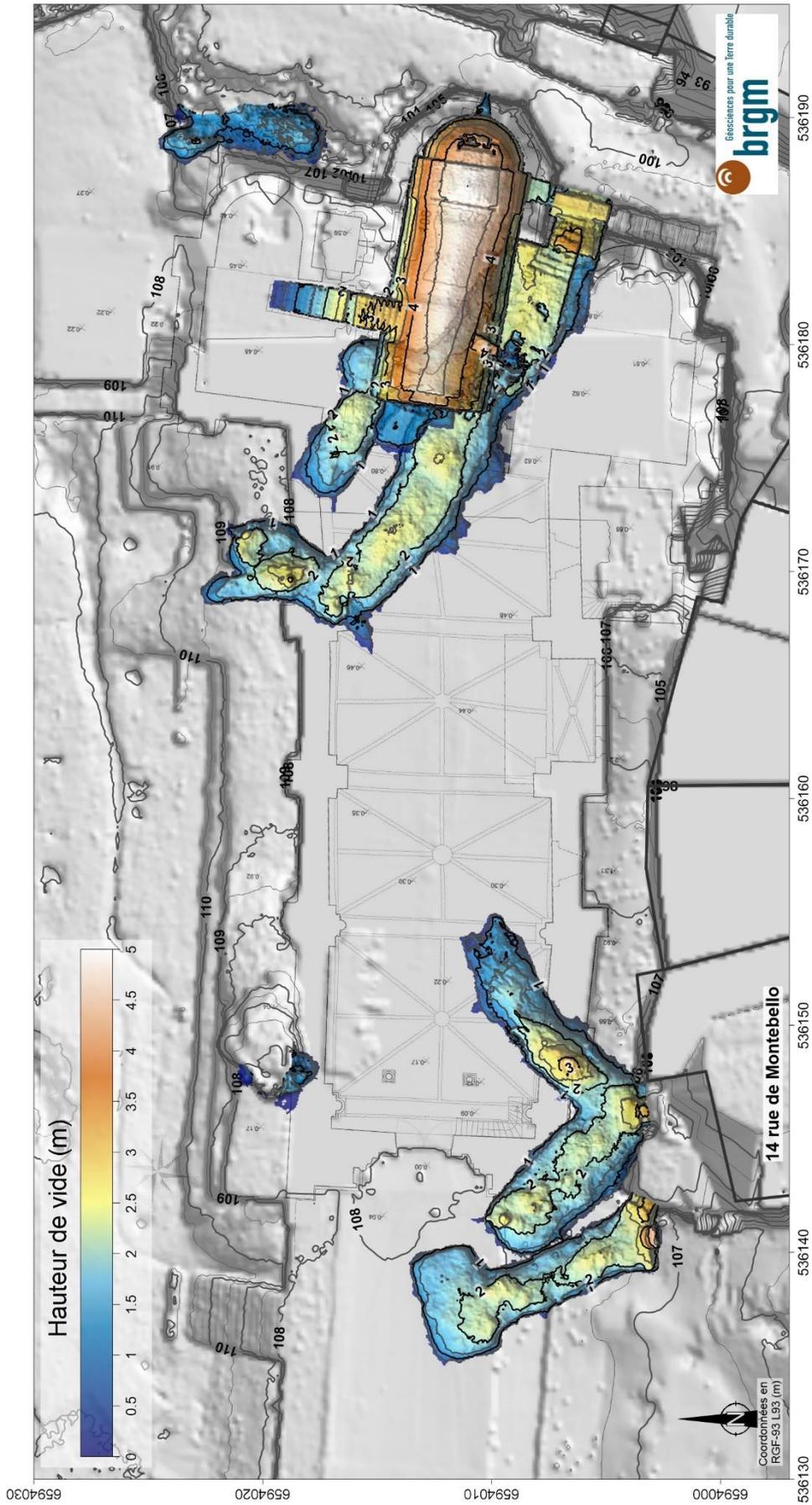


Illustration 4 : Hauteur de vide des cavités visitées, d'après le levé au scanner laser mobile.

Le scan de l'église a été enfreint par la présence de l'étaie (Illustration 1). Nous avons pu récupérer le nuage de points levé par la société ART GRAPHIQUE & PATRIMOINE avant la mise en place de l'étaie. À partir de ce nuage de points et du nuage de points levé par nos soins, un modèle maillé de la nef de l'église a pu être réalisé (Illustration 5). Ce modèle est un polyèdre clos comprenant plus de 50 000 facettes triangulaires. Il est utilisé dans les corrections des effets gravimétriques de l'église (voir §2.5.3).

Pour des raisons techniques, le restant de l'église n'a pu être maillé de la sorte.

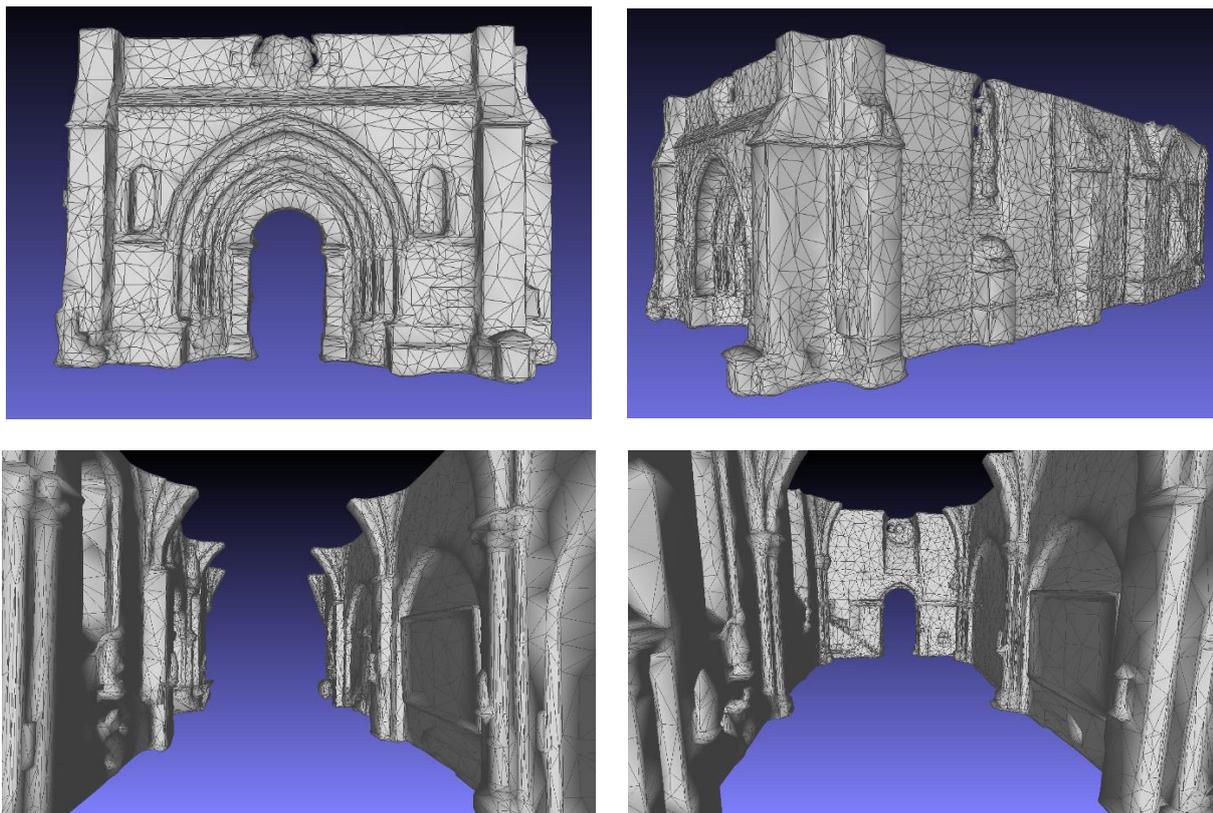


Illustration 5 : Vues du modèle maillé des murs de la nef, réalisé à partir des nuages de points levés par nos soins et mis à disposition par ART GRAPHIQUE ET PATRIMOINE.

2.4. MESURES GRAVIMÉTRIQUES

Deux gravimètres Scintrex CG-6 (#0006 et #0293) ont été utilisés pour le levé gravimétrique. Le coefficient de calibration des gravimètres a été pris à 1.00000, au regard de l'amplitude limitée de la variation de la pesanteur sur la zone (inférieure à 1,3 mGal) en lien avec le dénivelé contenu sur le site.

Une base gravimétrique a été utilisée pour l'ensemble du levé (Illustration 6), située au niveau du seuil de l'entrée principale de l'église.

La valeur de g a été arbitrairement choisie égale à 0 mGal à la base centrale, car aucun raccord avec une base absolue n'a été effectué. Cela n'a pas d'incidence pour l'étude car c'est une analyse relative par rapport à cette base qui est réalisée. La valeur absolue de g est donc peu pertinente pour une étude locale.



Illustration 6 : Photographies de la base gravimétrique sur le seuil de l'église, montrant les gravimètres CG-6 en cours de mesure : le #0293 (en bleu) en stationnement sur la base, le #006 (en orange) en chauffe.

L'ensemble des mesures gravimétriques a été effectué en 26 programmes dont la durée n'a pas excédé une heure. Un programme de mesures, pendant lequel 15 à 25 stations gravimétriques sont typiquement mesurées, débute et se termine par une mesure à la base gravimétrique pour contraindre la dérive instrumentale temporelle du gravimètre relatif. Cette dérive est approximée comme étant linéaire dans le temps.

Les paramètres d'acquisition ont été les suivants :

- à la base, 5 à 10 mesures de 30 s ;
- à chaque station, 1 à 2 mesures de 30 s.

Si l'écart-type affiché sur le gravimètre était supérieur à 0,1 mGal à cause d'un fort bruit vibratoire ambiant (véhicule proche, vent) au moment de la mesure, une nouvelle mesure a systématiquement été réalisée. De même, si l'inclinaison de l'instrument dépassait +/- 10 secondes d'arc sur la composante X ou Y, une nouvelle acquisition a systématiquement été réalisée, avec des inclinaisons réajustées inférieures à +/- 10 secondes d'arc.

Les mesures ont été réalisées sur trépied bas ou sur trépied haut, en fonction des conditions de stabilité du terrain et de son dénivelé, et la hauteur du gravimètre a systématiquement été mesurée avec un mètre ruban. Cette hauteur a été utilisée pour projeter au sol les valeurs de g en utilisant un gradient vertical usuel de 0,3086 mGal m⁻¹.

Soixante-trois stations gravimétriques ont été reprises au moins une fois, pour un taux de reprises total de 20 %, conforme au taux de 20 % préconisé par l'Association pour la qualité en géophysique appliquée, AGAP (<https://www.agapqualite.org>).

2.5. RÉDUCTION DES DONNÉES VERS L'ANOMALIE DE BOUGUER

L'ensemble du traitement des données a été réalisé avec des codes développés par le BRGM.

2.5.1. Principe de calcul

La réduction des données gravimétriques vise à corriger tous les effets (variations temporelles, différences d'altitudes, effets topographiques, etc.) qui influent sur les données brutes acquises, et qui ne présentent pas d'intérêt pour l'interprétation des données relatives à la structure du sous-sol. Cette réduction conduit à l'anomalie de Bouguer qui est une anomalie gravimétrique rendant compte de l'ensemble des variations de densité sous la surface topographique.

La réduction de données vers l'anomalie de Bouguer suit les traitements suivants :

- correction de la marée terrestre gravimétrique (algorithmes de Longman, 1959) ;
- correction de la dérive temporelle du gravimètre, déterminée par la première et dernière occupation de la station de base au sein d'un programme de mesure ;
- projection de la valeur de g au niveau du sol à partir de la hauteur du capteur mesurée sur le terrain, via un gradient vertical standard de $0,3086 \text{ mGal m}^{-1}$;
- les trois précédentes corrections permettent d'obtenir les valeurs relatives de g aux stations par rapport à la base, appelées valeurs compensées g_{comp} ;
- soustraction du g théorique g_{th} (formule GRS80), fonction de la latitude, qui permet de passer d'une valeur de g à une anomalie ;
- correction d'air libre pour compenser les effets des variations d'altitude entre les stations, on obtient alors l'anomalie à l'air libre ;
- correction de plateau, qui permet d'obtenir l'anomalie de Bouguer dite « simple », en compensant l'effet du relief approximé comme plat autour des points de mesures ;
- correction de terrain (appelée aussi correction topographique), pour compenser l'effet des reliefs non pris en compte dans la correction de plateau, à proximité des points de mesures ;
- corrections des effets des structures anthropiques (murs des bâtiments, caves et sous-sols).

L'anomalie de Bouguer A_B s'exprime ainsi :

$$A_B = \underbrace{g_{comp} - g_{th} + (dg/dz)h}_{\text{Anomalie à l'air libre}} - \underbrace{2\pi G\rho_b h + \rho_b T + T_A}_{\text{Anomalie de Bouguer Simple}} \quad (\text{eq. 1})$$

où ρ_b est la densité de réduction de Bouguer, h l'altitude du point considéré (en mètre), dg/dz le gradient vertical dit à « l'air libre », G la constante de gravitation universelle, T la correction de terrain pour un terrain de densité 1 et T_A la correction liée aux masses anthropiques (bâti et sous-sols).

2.5.2. Densité de réduction adoptée

La densité ρ_B de réduction de l'anomalie de Bouguer est un paramètre important pour l'interprétation de cette anomalie. Elle doit correspondre au mieux à la densité des terrains superficiels.

Nous utilisons la méthode de Parasnis (1952) pour déterminer la densité de réduction (Illustration 7), et nous obtenons une densité de 1.95, que nous adoptons pour la réduction des données. Cette densité est typique de celle des remblais superficiels et des sables présents sur les premiers mètres sur le site.

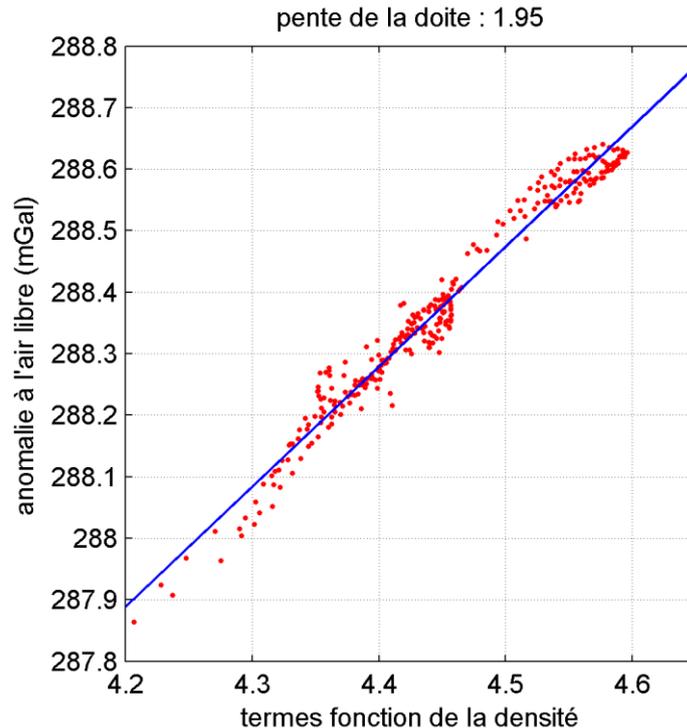


Illustration 7 : Méthode de Parasnis : report des valeurs de l'anomalie à l'air libre en fonction des termes dépendants de la densité de l'équation 1 (points rouges). La pente de la droite passant au mieux par les points permet d'obtenir la densité de réduction.

2.5.3. Corrections gravimétriques

Les corrections gravimétriques sont à apporter à l'anomalie de Bouguer « simple », afin d'obtenir l'anomalie de Bouguer « complète », rendant compte exclusivement des variations de densité dans le sous-sol.

- **Corrections topographiques**

Les corrections de terrain (CT) ont été réalisées en prenant en compte la topographie entre 0 et 750 m de chaque station, en utilisant des modèles numériques de terrain (MNT) imbriqués, avec des routines basées sur le calcul par prismes (Nagy, 1966) selon le protocole suivant :

- entre 0 m et 15 m, le MNT fabriqué à partir du scan laser mobile et du IGN RGE Alti à la maille de 1 m (Illustration 2) est utilisé pour calculer les CT. Ce MNT a une maille de 0.1 m ;

- entre 15 m et 100 m, le même MNT qu'entre 0 m et 15 m est utilisé, mais décimé à la maille 1 m ;
- au-delà de 100 m et jusqu'à 750 m, le MNT IGN RGE Alti à la maille de 5 m est utilisé pour calculer les CT.

Les corrections topographiques à chaque station sont représentées à l'illustration 8, pour une densité de 1,95. Celles-ci varient de 0,110 à 0,520 mGal sur le secteur d'étude selon un gradient ouest-est, les plus fortes valeurs étant situées dans ou à proximité des zones de forte rugosité topographique : notamment les escarpements majeurs qui encadrent le site au sud-est et à l'est. Ces valeurs de CT sont très élevées, en lien avec la proximité d'une topographie extrêmement escarpée.

- **Corrections de l'effet de l'église**

L'effet gravifique de l'église est calculé de la façon suivante :

- à partir du polyèdre maillé de la nef (Illustration 5), selon les algorithmes d'Okabe (1979) ;
- hors du volume du polyèdre maillé, les murs, voutes et ouvertures sont discrétisés en prismes plats verticaux à section polygonale, dont l'effet est calculé selon les algorithmes de Murthy & Swamy (1996).

La densité des murs est prise égale à 2,2, typique de celle d'un mur en pierre de taille. L'effet gravifique de l'église est supérieur à 0,1 mGal en amplitude au sein et sur le pourtour de l'église, et atteint -0,173 mGal (Illustration 9), avec des valeurs d'autant plus élevées que l'on se rapproche des murs et piliers. Cet effet est à soustraire de l'anomalie de Bouguer simple, résultant en une correction positive.

- **Corrections des cavités souterraines relevées au scanner laser mobile**

Les cavités levées au scanner laser mobile ont été corrigées par la méthode des lignes de masse. Le toit et le fond des cavités sont discrétisés selon des grilles à la maille carrée de 0,05 m, et le volume des vides est modélisé par des lignes de masse selon chaque élément de la maille des grilles. La méthode est expliquée dans le rapport BRGM/RP- 69950-FR. Le contraste de densité entre les vides et le calcaire dolomitique altéré encaissant a été pris égal à -2,2.

L'effet gravifique des vides (Illustration 10) est d'autant plus important que les stations sont proches des cavités, et que les cavités sont proches de la surface et volumineuses. Cet effet atteint -0,107 mGal en proximité immédiate de la crypte, qui est une cavité proche de la surface et de grande dimension (Tableau 1). Les deux cavités accessibles depuis le 14 rue de Montebello génèrent une anomalie coalescente atteignant plus de 0,035 mGal d'amplitude.

Cet effet est à soustraire de l'anomalie de Bouguer simple, résultant en une correction positive.

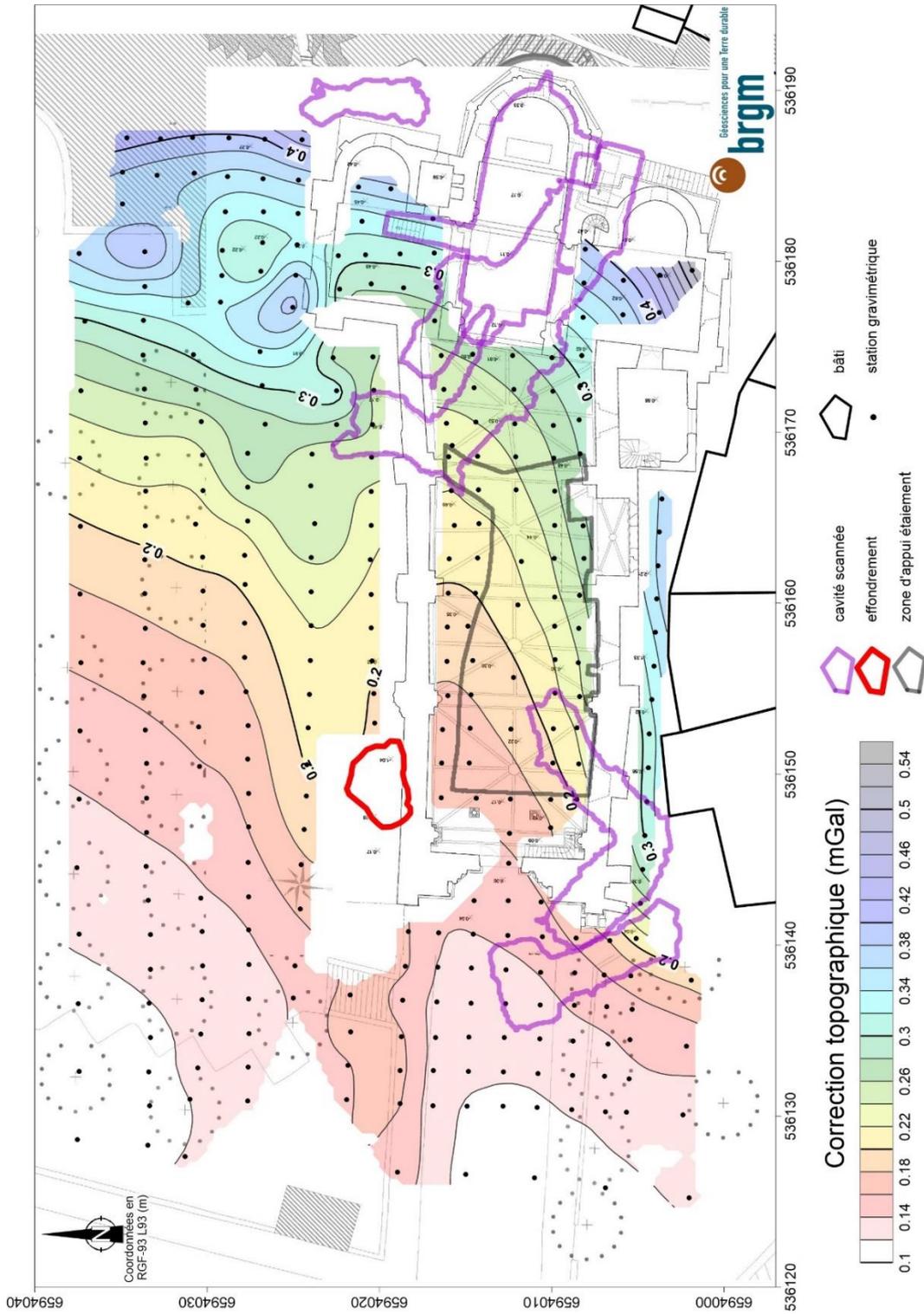


Illustration 8 : Corrections (mGal) liées à l'effet de la topographie pour une densité 1,95, à apporter aux valeurs de l'anomalie de Bouguer (carte interpolée entre les valeurs aux stations).

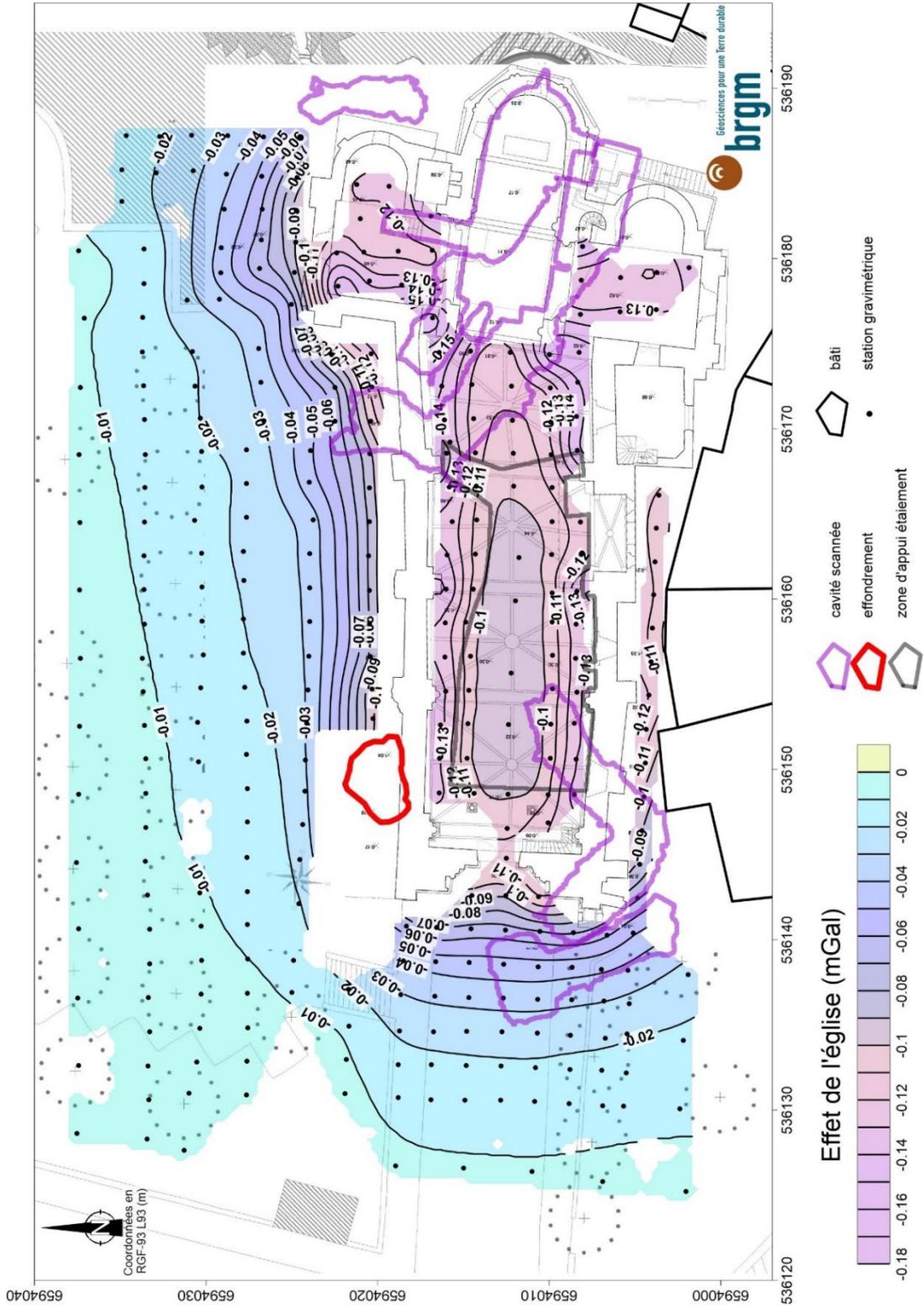


Illustration 9 : Effet gravimétrique de la structure de l'église, pour un contraste de densité de 2,2 (carte interpolée entre les valeurs aux stations).

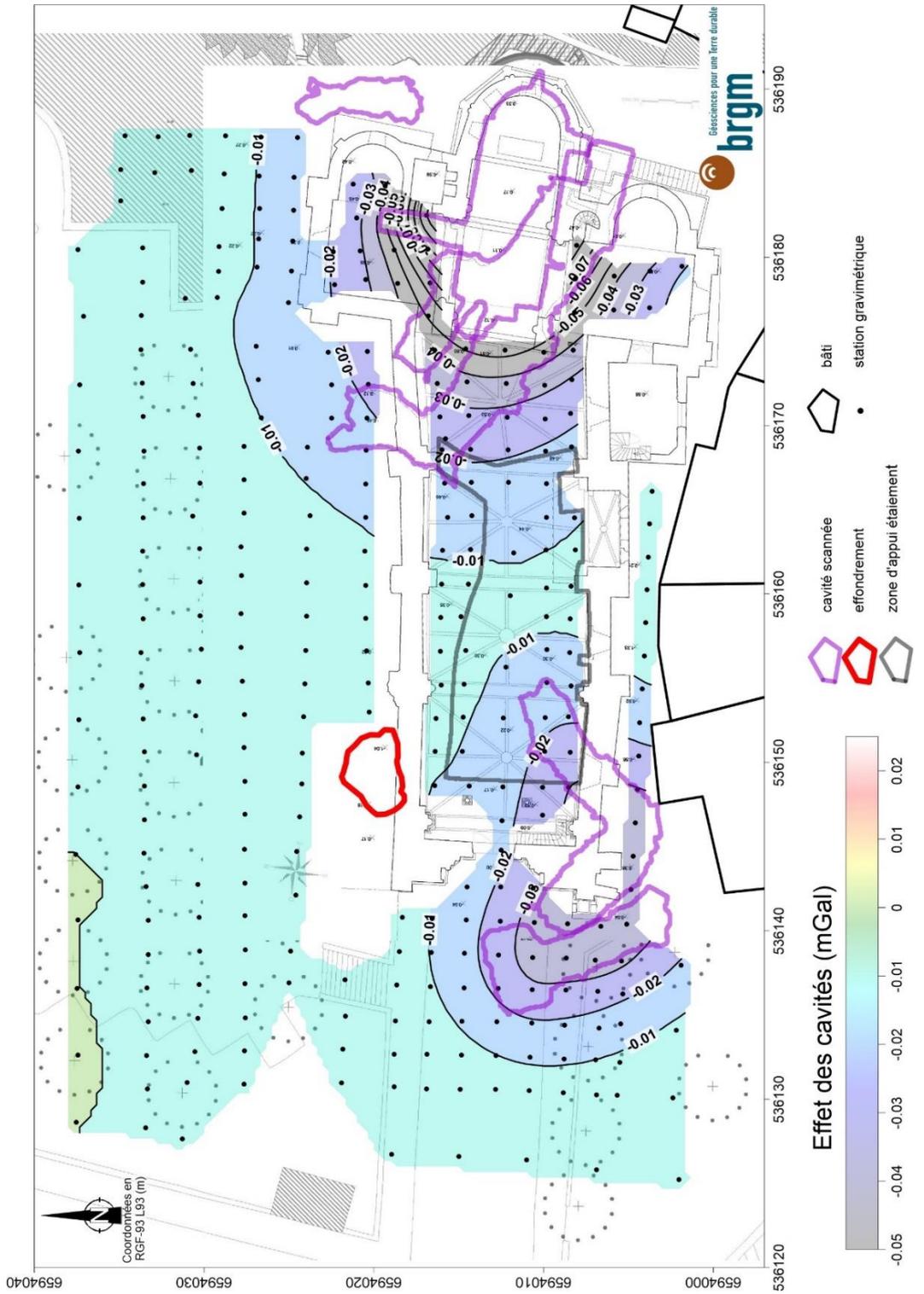


Illustration 10 : Effet gravimétrique des cavités levées au scanner laser mobile (polygones violets), pour un contraste de densité de -2,2 (carte interpolée entre les valeurs aux stations).

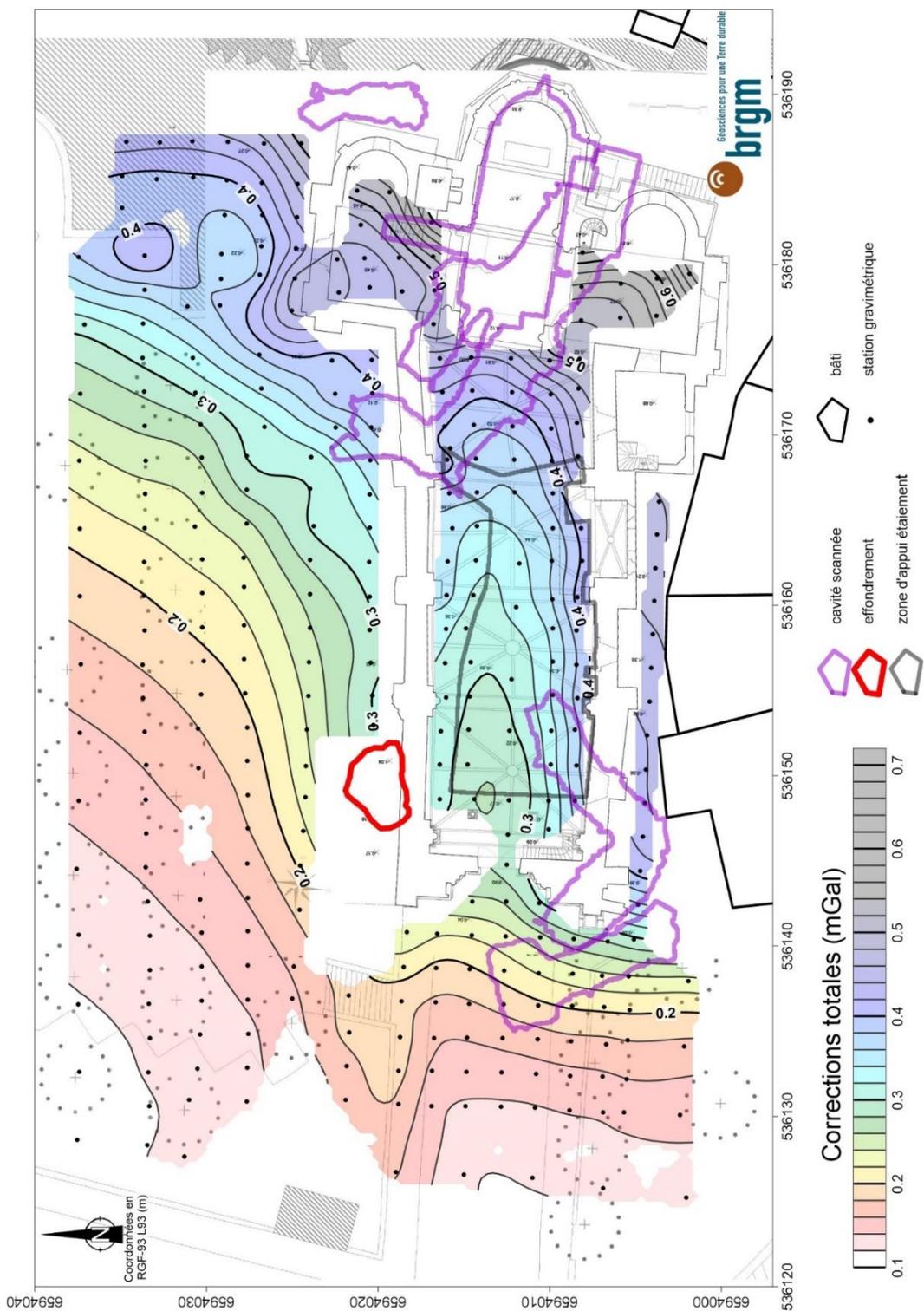


Illustration 11 : Corrections à apporter à l'anomalie de Bouguer, provenant de la topographie, du bâti de l'église, des cavités présentes sur site (carte interpolée entre les valeurs aux stations).

- **Correction du plancher de l'étalement**

La présence d'un plancher en bois soutenant l'étalement, dont la densité est plus faible (densité de 0,5 pour du pin) que la densité de réduction utilisée, a été corrigé pour les stations localisées sur ce plancher, à partir des hauteurs des planches de bois mesurées sur site. Cette correction fait au plus 0,01 mGal.

L'effet gravifique des cintres et des poutres constituant l'étalement n'a pas été corrigé, cet effet pouvant être considéré faible, car :

- les stations ont été implantées de manière à être distantes de plus d'un mètre des cintres, et pas directement dessous ;
- la masse de bois est répartie sur la hauteur de l'étalement, et n'est pas concentrée proche des stations (voir Illustration 1, sauf au niveau du plancher, qui est corrigé). Considérant la faible densité du bois, et la décroissance selon l'inverse de distance au carré de l'attraction gravimétrique, les masses de bois au-dessus des stations gravimétriques ont plausiblement un effet très faible.

La somme des corrections précitées est représentée à l'illustration 11, et présente une gamme de valeurs extrêmement importante comprise entre 0,11 mGal à l'ouest et 0,68 mGal à l'est.

À l'échelle de la carte, la dynamique des corrections atteint donc plus de 0,5 mGal, ce qui est un ordre de grandeur supérieur à l'amplitude usuelle des anomalies recherchées (voir annexe 2).

On se trouve ainsi en limite de l'applicabilité de la méthode microgravimétrique sur ce site.

2.6. PRÉCISION DE L'ANOMALIE DE BOUGUER

L'erreur totale sur l'anomalie de Bouguer est évaluée classiquement comme la somme quadratique des erreurs élémentaires sur les variables entrant dans son calcul, soit :

$$\varepsilon_{AB} = \sqrt{\varepsilon_g^2 + \varepsilon_{gth}^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_{CT,TA}^2} \quad (\text{eq. 2})$$

Le détail de ces erreurs est précisé ci-après.

- **Erreur sur g (ε_g)**

Cette erreur est estimée à partir de l'histogramme des écarts sur les stations occupées plusieurs fois au cours des programmes successifs, appelées reprises.

On appelle « reprise », la mesure de la gravité sur une station qui a déjà fait l'objet d'une mesure dans un programme de mesure antérieur. Une station peut être reprise plus d'une fois. Les écarts entre les valeurs de l'accélération de la pesanteur g compensées (corrigées de la dérive instrumentale et de la hauteur de trépied), issus de ces reprises, donnent la répétabilité de la mesure au sein d'une étude microgravimétrique, et sont une bonne indication de la précision de mesure de l'étude.

Les reprises sont aléatoires, pour obtenir la précision d'un levé, ou ciblées, pour vérifier une anomalie décelée, une mesure douteuse ou un écart de reprise trop important. L'histogramme des valeurs absolues de ces écarts (Illustration 12) et le pourcentage cumulé associé (courbe rouge) sont généralement utilisés pour définir l'erreur moyenne de l'étude. Cette dernière est donnée quand le pourcentage cumulé atteint 68 %, ce qui correspond statistiquement à l'écart-type d'une distribution gaussienne.

Soixante-trois stations ont été reprises (sur un total de 306). Le pourcentage de stations reprises est de 20 %, conformément aux préconisations de l'AGAP qualité. Sur ces stations reprises, 15 stations ont été mesurées par les deux gravimètres, pour s'assurer qu'il n'y a pas de biais systématique entre les deux instruments. La moyenne des reprises entre les deux instruments est de 0,003 mGal, ce qui témoigne de l'absence d'écart systématique significatif entre les mesures des variations de g des deux instruments.

L'erreur associée à la mesure de g est estimée à 0,005 mGal (Illustration 12), selon la méthode décrite précédemment.

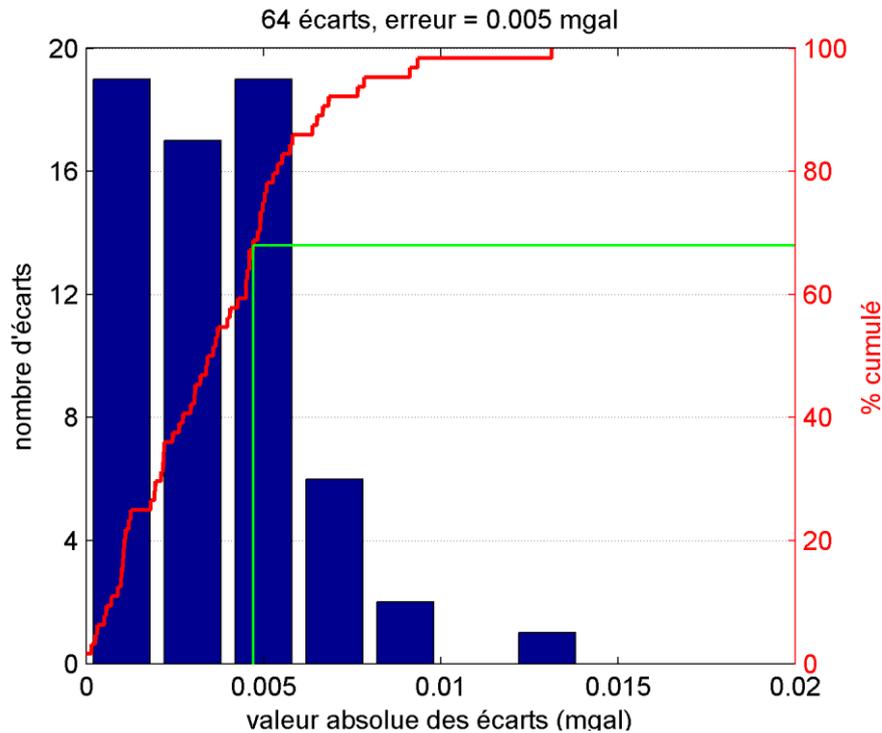


Illustration 12 : Histogramme des valeurs absolues des écarts de reprises et pourcentage cumulé associé. Dans ce cas, l'erreur moyenne est estimée à 0,005 mGal (tracé vert).

- **Erreur sur l'altitude (ε_z)**

On estime à 0,01 m la précision du levé altimétrique réalisé à la station totale. Cette estimation provient de reprises topographiques de vérification.

Ceci mène à une erreur de 0,002 mGal sur l'anomalie de Bouguer pour une densité de 1,95.

De plus, on estime à 0,01 m la précision de la mesure de la hauteur du gravimètre par rapport au sol. Ceci se traduit par une erreur de 0,003 mGal sur l'anomalie de Bouguer, liée à l'effet « d'air libre ».

L'erreur sur l'altitude est évaluée comme la somme quadratique des deux erreurs précitées, soit 0,004 mGal.

- **Erreur sur g_{th} (ε_{gth})**

L'erreur sur g_{th} est fonction de l'erreur sur le positionnement en latitude. Les positions des stations levées à la station totale sont données à +/- 0,01 m, ce qui mène à une erreur négligeable sur g_{th} .

- ***Erreur sur les corrections des effets des bâtiments, des structures souterraines et de la topographie (ϵ_{CT_TA})***

De manière empirique, l'erreur sur l'effet des bâtiments, des structures souterraines, de la topographie est considérée égale à 20 % de la différence entre la correction à la station concernée et la correction minimale de l'étude. Cette erreur provient d'erreurs sur les paramètres utilisés pour modéliser ces effets : épaisseur et densité des murs, positionnement et dimensions des murs et des structures souterraines, ainsi que de la précision et de la maille du MNT utilisées pour les corrections topographiques.

L'incertitude sur le contraste de densité entre les structures souterraines et le terrain encaissant influe également sur ce bilan d'erreur.

Cette erreur varie spatialement : les stations présentant des fortes corrections, typiquement celles proches des murs de l'église, des ruptures topographiques, ou au droit des structures souterraines auront une erreur supérieure à celles situées loin des bâtiments et des caves, en relief doux, et loin de la carrière. L'allure générale de cette erreur est la même que celle de la carte de la correction totale (topographie, bâti de l'église et structures souterraines, Illustration 11), à une constante et un facteur près. Dans le cas présent, cette erreur peut atteindre plus de 0,100 mGal pour les stations présentant les plus fortes corrections.

- ***Erreur totale sur l'anomalie de Bouguer (ϵ_{AB})***

L'erreur sur l'anomalie de Bouguer est calculée selon l'équation (2), et varie spatialement selon l'erreur sur les corrections des effets des bâtiments et caves, et de la topographie. La contribution dominante dans le bilan d'erreur provient des effets des structures anthropiques et de la topographie. L'allure de cette erreur est donnée à l'illustration 11 (les valeurs sont à un facteur 2 près, voir section suivante).

- ***Seuil de signification***

On définit le seuil de signification de l'étude en chaque station comme étant 2 fois l'erreur totale sur l'anomalie de Bouguer à la station considérée, ce seuil de signification varie spatialement et est présenté à l'illustration 13. Le seuil de signification varie de 0,013 mGal à 0,230 mGal, les zones de forte erreur sont situées en proximité immédiate des structures anthropiques et des escarpements topographiques.

Un niveau de confiance supérieur à 95 % est à accorder aux anomalies dont l'amplitude est supérieure au seuil de signification et sur au moins deux stations contiguës.

Ainsi, pour être considérée significative, une anomalie située en zone de fort seuil de signification (zones escarpées, proche des bâtiments ayant des structures souterraines) devra avoir une amplitude bien supérieure à une anomalie située en zone de faible seuil de signification (loin des bâtiments et des carrières connues, en relief plat). En termes de détection de cavités, cela implique que les cavités situées en zone de fort seuil de signification doivent avoir un volume plus important et/ou une profondeur moindre que celles situées en zone de faible seuil de signification, pour être décelable avec un bon niveau de confiance.

Étant donné les fortes valeurs du seuil de signification sur cette étude, il est possible qu'aucune anomalie ne soit considérée significative – nous définirons donc les anomalies selon un autre critère (voir §3.2). Cela témoigne du caractère exceptionnel de ce site, qui est peu favorable à la microgravimétrie.

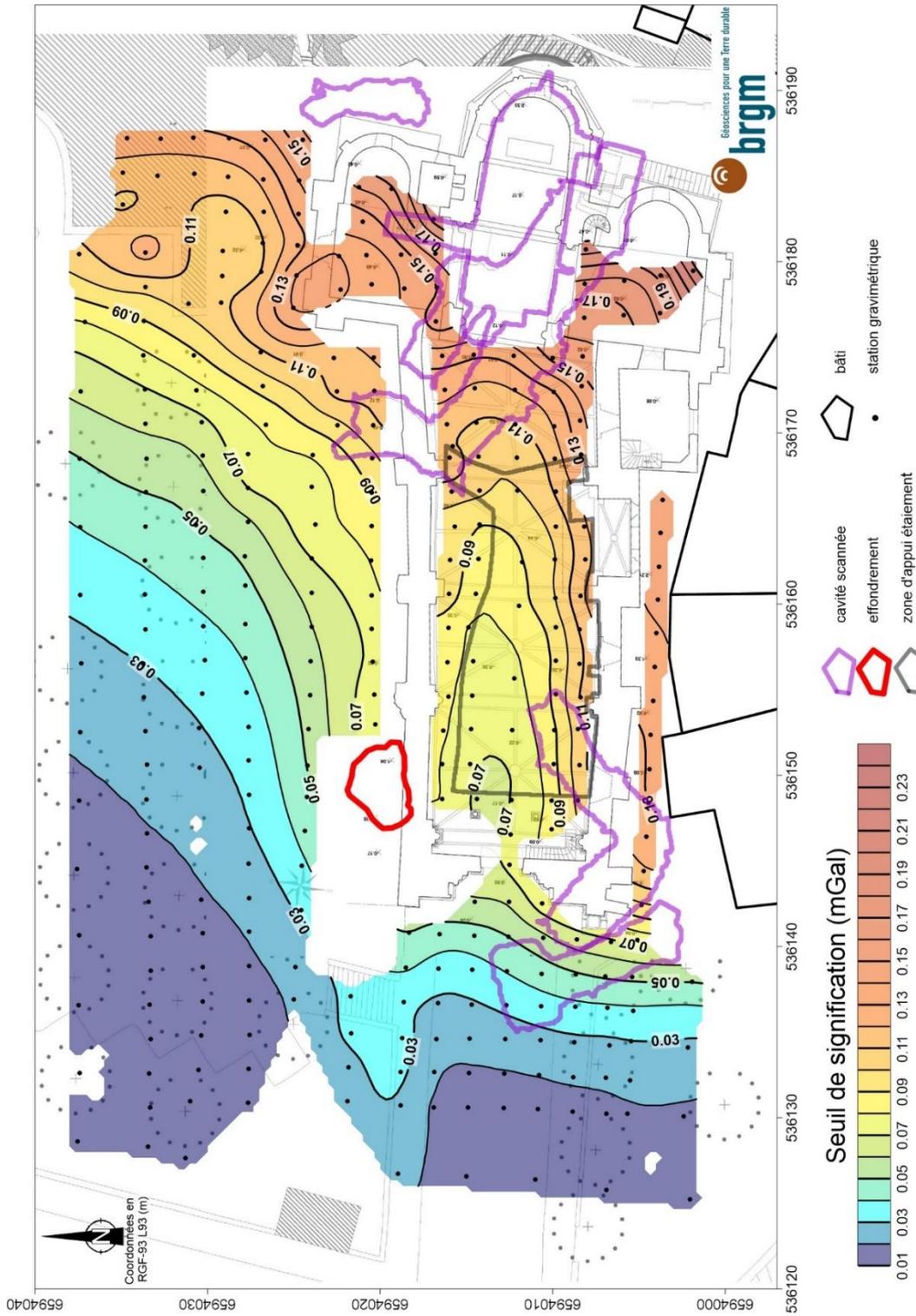


Illustration 13 : Carte du seuil de signification de l'étude (mGal). Pour être retenues, les anomalies doivent en théorie avoir une amplitude supérieure au seuil de signification.

3. Résultats

3.1. ANOMALIE DE BOUGUER ET ANOMALIE RÉGIONALE

L'anomalie de Bouguer est fonction de l'ensemble des variations de densité sous la surface topographique. Ces variations peuvent être localisées superficiellement ou en profondeur. Les valeurs élevées de l'anomalie de Bouguer sont caractéristiques de matériaux plus denses, alors que les valeurs faibles caractérisent des matériaux moins denses.

L'anomalie de Bouguer, corrigée des effets anthropiques (dont les carrières dont la géométrie 3D est connue) et de la topographie, est présentée à l'illustration 14. Elle a été créée par interpolation bicubique entre les valeurs aux stations, implémentée dans le code Matlab `RegularizeData3D.m` (Jamal, 2014), basé sur le code `Gridfit.m` (D'Errico, 2005). Le paramètre de lissage (« smoothness ») utilisé est de 2×10^{-5} . L'anomalie de Bouguer simple, non corrigée des effets de topographie et des structures anthropiques, est présentée en Annexe 3.

La carte d'anomalie de Bouguer présente une dynamique de 0,160 mGal et ne présente pas de gradients marqués, avec des valeurs plus élevées du nord-est au sud-ouest de la zone d'étude (teintes vertes à orange), et des valeurs plus faibles en périphérie (teintes bleues à violettes). On observe dès lors des anomalies négatives, encore appelées anomalies « légères », bien identifiables (teintes bleues), qui correspondent à des cuvettes ou « fonds de vallées » dans l'anomalie de Bouguer.

Pour accéder aux courtes longueurs d'ondes liées aux variations de densités superficielles objet de cette étude, les grandes longueurs d'onde doivent être retirées de l'anomalie de Bouguer via l'anomalie régionale. L'anomalie régionale, présentée à l'illustration 15, est obtenue par la même méthode d'interpolation que l'anomalie de Bouguer, mais avec un paramètre de lissage de 0,03. Ce paramètre de lissage contrôle le contenu fréquentiel de la surface interpolée et son écart avec les données mesurées : plus il est faible, plus les petites longueurs d'ondes sont présentes dans la surface interpolée, et plus la surface interpolée est proche des points de mesure. À l'inverse, plus ce paramètre est grand, plus la surface interpolée ne contiendra principalement que les grandes longueurs d'ondes, et plus l'écart avec les points de mesure sera important. Le paramètre retenu de 0,03 est obtenu par essai-erreur, et l'anomalie régionale est retenue après examen visuel sur l'ensemble des données considérées, selon le savoir-faire du géophysicien.

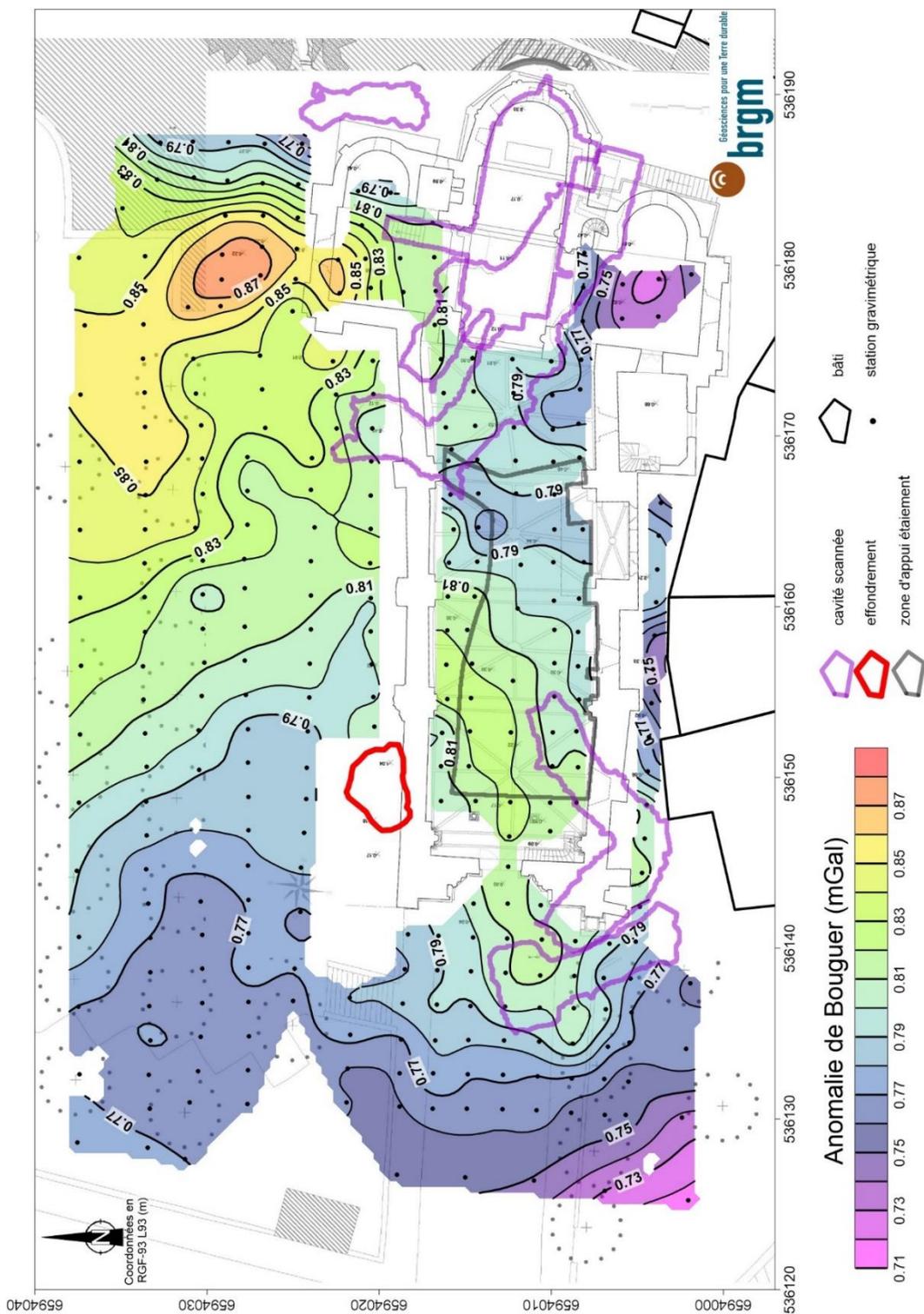


Illustration 14 : Carte d'anomalie de Bouguer (mGal) pour une densité de 1,95. Les courbes d'isovaleur sont tous les 0,01 mGal. Les effets gravifiques de tous les effets anthropiques et topographiques corrigés.

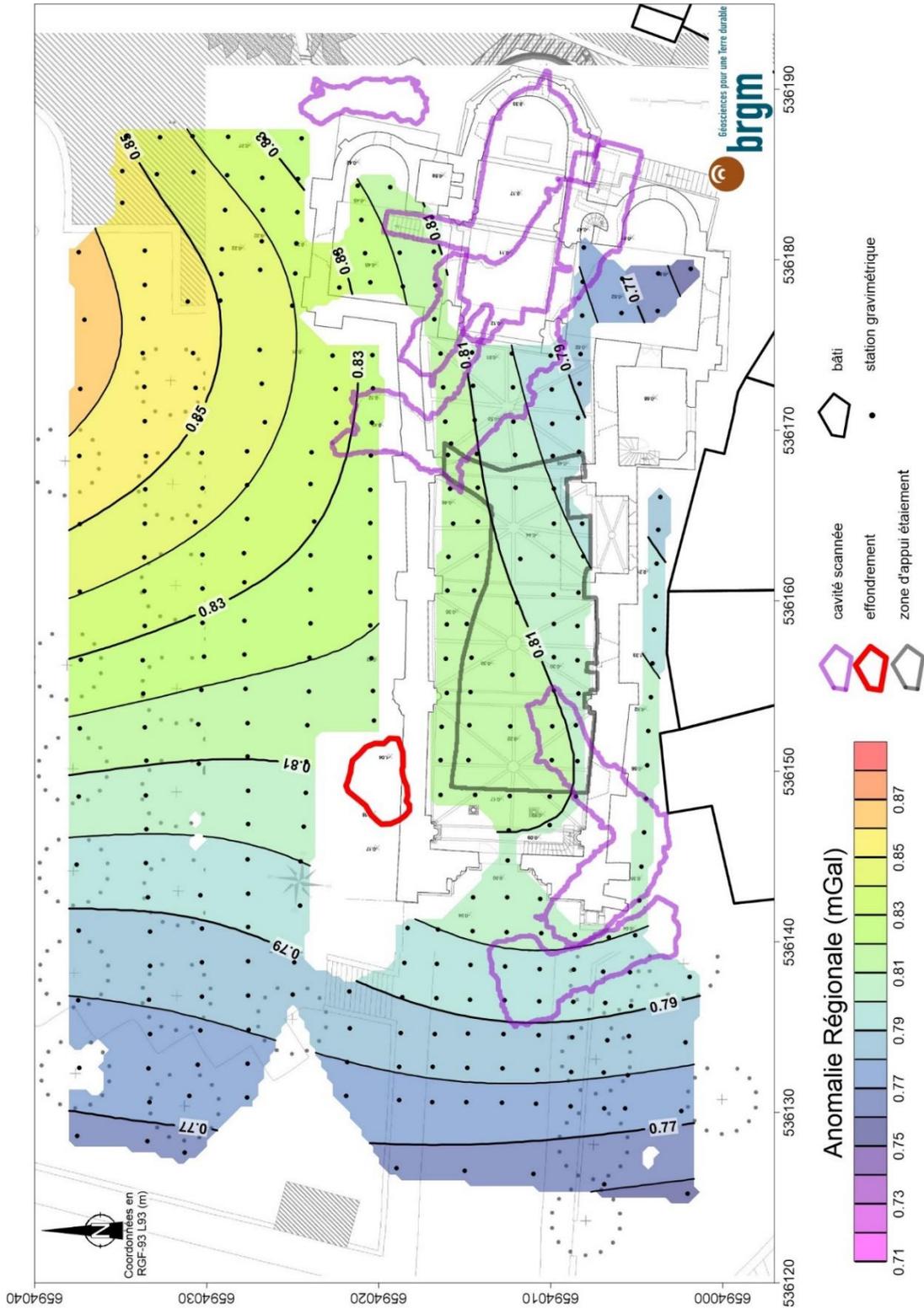


Illustration 15 : Carte d'anomalie régionale (mGal). Les courbes d'isovaleur sont tous les 0,01 mGal.

3.2. ANOMALIE RÉSIDUELLE

L'anomalie résiduelle est obtenue en soustrayant l'anomalie régionale à l'anomalie de Bouguer, et fait ressortir les variations de gravité en lien avec les variations de densité de la subsurface, objet de cette étude. Elle est présentée à l'illustration 16. Cette carte d'anomalie résiduelle rend compte des hétérogénéités de densité du sous-sol non liées aux structures connues aériennes et souterraines qui ont été préalablement corrigés.

L'anomalie résiduelle a une dynamique de 0,090 mGal, variant de -0,060 mGal à 0,03 mGal.

Habituellement, les anomalies retenues sont celles dont l'amplitude est supérieure au seuil de signification. Dans le cas présent, étant donné :

- qu'une large portion de la carte du seuil de signification est supérieure à 0,05 mGal (voir Illustration 13), en lien avec les corrections topographiques et anthropiques extrêmement importantes sur le site d'étude (Illustration 11) ;
- que l'amplitude usuelle pour une cavité est généralement inférieure à 0,05 mGal (voir annexe 2) ;
- que nous sommes confiants dans les corrections effectuées.

Nous décidons de retenir toute anomalie « légère », affectant au moins deux stations contigües, dont l'amplitude est supérieure à 0,020 mGal. Cette valeur de seuil est légèrement supérieure au seuil usuel de 0,015 mGal.

Selon les critères énoncés précédemment, 10 anomalies « légères » sont retenues (Illustration 16), dénommées A1 à A10. Les caractéristiques de ces anomalies sont précisées dans le tableau suivant.

Anomalies	Nombre de stations affectées	Amplitude maximale (mGal)	Description / commentaires
A1	6	0.041	Moyenne amplitude, forte extension, non-circonscrite, bordière
A2	2	0.021	Faible amplitude, faible extension, circonscrite
A3	8	0.029	Faible amplitude, forte extension, quasi-circonscrite
A4	4	0.028	Faible amplitude, moyenne extension, quasi-circonscrite
A5	2	0.022	Faible amplitude, faible extension, circonscrite
A6	3	0.035	Moyenne amplitude, faible extension, quasi-circonscrite, concomitance avec anomalie radar
A7	2	0.023	Faible amplitude, faible extension, circonscrite
A8	5	0.039	Moyenne amplitude, moyenne extension, non-circonscrite, située en zone de très importantes corrections
A9	5	0.052	Forte amplitude, moyenne extension, non-circonscrite
A10	10	0.064	Forte amplitude, forte extension, non-circonscrite, située en zone de très importantes corrections

Tableau 2 : Caractéristiques des anomalies décelées.

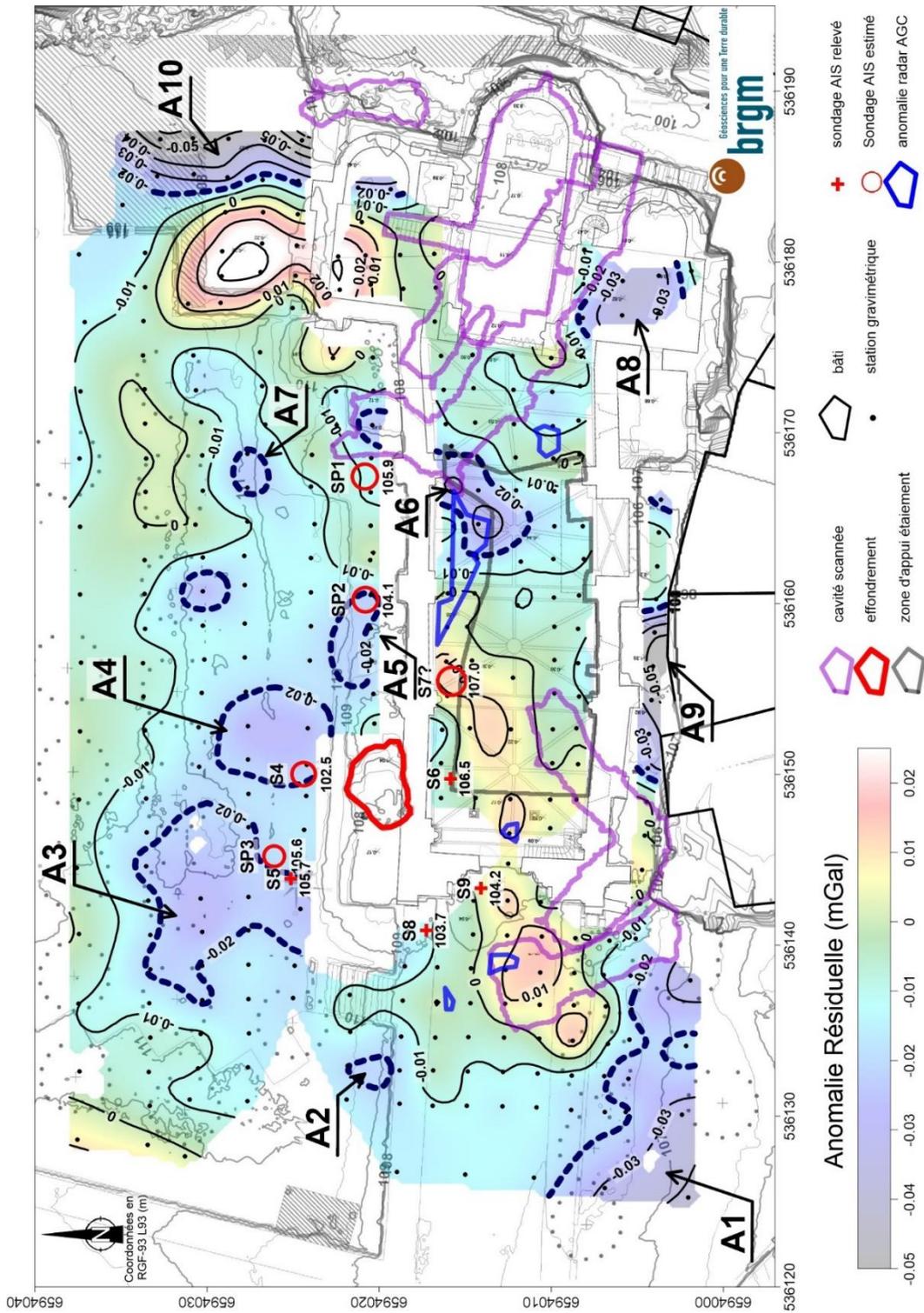


Illustration 16 : Carte d'anomalie résiduelle (mGal). Les anomalies négatives retenues sont entourées par un trait discontinu violet et numérotées de A1 à A10. Les sondages AIS sont représentés avec la cote du calcaire dolomitique (m NGF), ainsi que les anomalies radar AGC.

4. Interprétation et recommandations

4.1. INTERPRÉTATION GÉNÉRALE

Les anomalies gravimétriques négatives décelées ne peuvent être interprétées de manière univoque, sans informations complémentaires fournies par des données de sondages mécaniques. En effet, pour une anomalie gravimétrique donnée, il existe une infinité de géométries et de contrastes de densité de sources potentielles rendant compte de l'anomalie.

D'une manière générale, les anomalies peuvent correspondre à :

1. des cavités vides, partiellement remplies ou remblayées ;
2. des variations latérales de densité au sein des terrains, liées à leur nature et à leur lithologie, à leur degré d'altération ou à leur degré de compaction ;
3. des variations latérales d'épaisseur de terrains ayant un contraste de densité important, tels des remblais peu denses sur un substrat plus dense, ou inversement.

Dans le cas présent, le cas 1 décrit ci-dessus est plausible.

La présence de cavités souterraines est avérée sur le site d'étude ; celles qui sont connues/accessibles ont été levées et corrigées de l'anomalie résiduelle. Les anomalies négatives décelées pourraient ainsi être en lien avec des vides souterrains. La bonne correspondance entre l'anomalie A6 et une anomalie radar détectée par AGC (Illustration 16) va dans ce sens.

Néanmoins, les cas 2 et 3 peuvent être invoqués sur le site d'étude car :

- le site est en milieu urbain et les terrains sont remaniés selon l'occupation humaine passée et présente (remblais, voirie, ancien cimetière...) ;
- la géométrie du toit du calcaire dolomitique présente une forte variabilité, d'après les sondages AIS (voir cotes Illustration 16 – les têtes de sondage retrouvées ont été levées par nos soins, et les autres sondages ont été repositionnés par rapport au plan du rapport AIS, dont le géoréférencement est douteux). En faisant l'hypothèse plausible que la densité des remblais et des sables dolomitiques est plus faible que celle du calcaire dolomitique, un approfondissement local du toit du calcaire pourrait se traduire par une anomalie légère, et inversement, une surélévation locale de ce toit pourrait se traduire par une anomalie lourde. Au niveau des sondages existants, ceci n'est pas observé de manière systématique :
 - l'altitude élevée du toit du calcaire au niveau de S7 (107 m) est bien corrélée avec une anomalie lourde,
 - le plus fort approfondissement du toit calcaire au niveau de S4 (102.5 m) est situé au sein de l'anomalie légère A4,
 - pour une même profondeur de toit à ~104.1 m, les sondages SP2 et S9 sont sis dans respectivement une anomalie légère (A5) et au sein d'une anomalie lourde,
 - les sondages S4 et S5 sont au sein d'anomalies A4 et A3, d'amplitude comparable, mais le toit du socle est 3 m plus profond au niveau de S4.

Nous n'accordons que peu de confiance à l'anomalie A10 : celle-ci se développe vers la bordure de falaise, dans une zone de très importantes corrections, et pourrait être en lien avec des corrections topographiques localement erronées.

Il convient de sonder les anomalies pour vérifier leur nature.

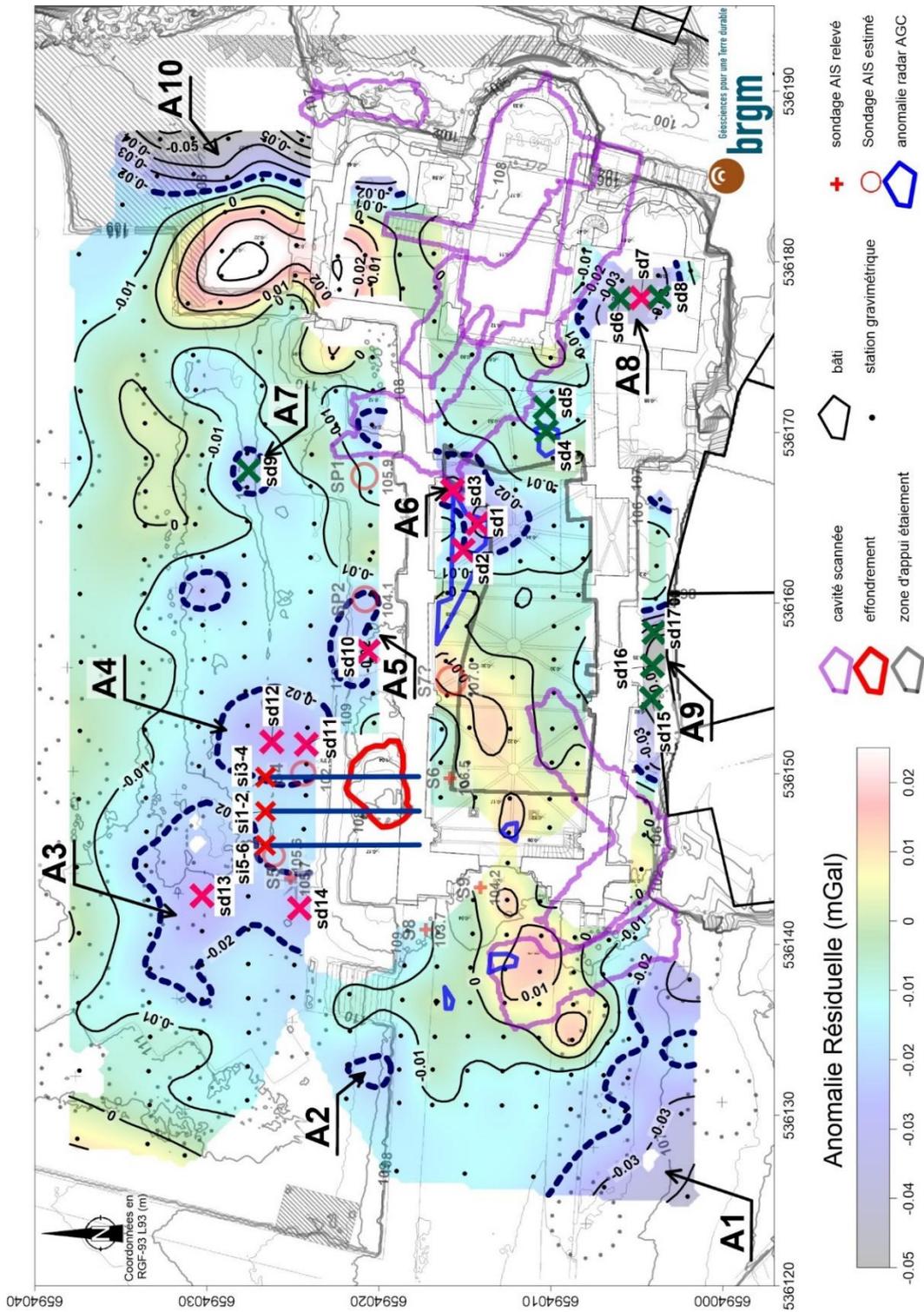


Illustration 17 : Carte d'implantation des sondages de reconnaissance préconisés sur l'anomalie résiduelle, sd1 à sd17, et si1-2 à si5-6. Les sondages à réaliser en priorité 1 sont en magenta et en rouge, ceux en priorité 2 en vert.

4.2. PRÉCONISATIONS

4.2.1. Sondages de contrôle

Pour lever les ambiguïtés d'interprétation, il est préconisé d'effectuer des sondages de contrôle au niveau des zones caractérisées par des anomalies négatives.

Un total de 17 sondages destructifs verticaux est préconisé (voir Illustration 17 et Tableau 3), dont 9 en priorité 1, et 8 en priorité 2. Les sites de sondages sont positionnés sur les apex ou les axes négatifs de l'anomalie résiduelle.

Sont classés en priorité 1, les sites au droit d'anomalies présentant un apex marqué, à proximité de l'effondrement recensé, ou présentant un indice de présence de vide vu par l'étude géoradar d'AGC.

Les sites classés en priorité 2 sont à réaliser une fois les préconisations les concernant effectuées (Tableau 3), notamment la vérification de la présence de galeries au droit de l'anomalie A9, partant des habitations au 12 et au 10 rue de Montebello. De telles galeries pourraient rendre compte de l'anomalie A9.

En ce qui concerne les profondeurs, des sondages atteignant l'altitude 98 m NGF sont recommandés, correspondant à une profondeur de 10 m au niveau de l'église, et de 13 m sur la terrasse nord.

Nous préconisons des sondages destructifs, avec :

- diamètre supérieur ou égal à 80 mm (dans la mesure du possible, tricône en rotation pure avec pression sur l'outil faible et constante) ;
- enregistrement numérique des paramètres de sondage (*a minima* vitesse d'avancement, pression sur l'outil, pression du fluide d'injection, couple de rotation) ;
- calibration de l'outil (chute de l'outil avant foration et avec train de tige complet) ;
- analyse des cuttings.

L'implantation précise des sondages sur le terrain nécessite un moyen de positionnement avec une précision meilleure que 0,1 m, en utilisant des outils de géomètre (tachéomètre ou GPS différentiel).

S'il y a découverte d'une cavité souterraine vide ou noyée, la foration sera maintenue jusqu'à la profondeur requise, afin de vérifier l'état du plancher de la cavité, ainsi que la présence d'un éventuel deuxième, ou troisième niveau de cavité. La cavité mise à jour fera alors l'objet d'une investigation par caméra et laser (si absence d'eau dans la cavité) ou sonar (si présence d'eau), dans le but de visualiser la cavité en direct et d'en mesurer les dimensions.

Dans le cas où des cavités seraient mises en évidence par les forages, il conviendra qu'un géotechnicien les visite, dans la mesure du possible, afin d'établir leur état de stabilité. Ceci permettra de prendre les mesures nécessaires pour la sécurité des biens et des personnes en fonction des enjeux en surface. Pour accéder aux éventuels vides, un forage de gros diamètre, ou la localisation d'éventuels accès par décapage des terrains de surface seront nécessaires.

Si les vides sont accessibles, nous préconisons la cartographie complète de l'éventuel réseau mis en évidence, par scanner laser mobile, afin de localiser précisément les vides vis-à-vis des enjeux en surface. Si les vides ne sont pas accessibles, un scan laser 3D en forage pourra être effectué dans les forages les recoupant, afin de les cartographier au moins en partie.

Nom	X (L93)	Y (L93)	Priorité	Profondeur	Justification	préconisation
sd1	536164.7	6594014.2	1	10	A6, anomalie radar	
sd2	536163.1	6594015.1	1	10	A6, anomalie radar	
sd3	536166.6	6594015.7	1	10	A6, anomalie radar	
sd4	536170.1	6594010.2	2	10	anomalie radar	
sd5	536171.4	6594010.4	2	10	Faible anomalie gravi	
sd6	536177.9	6594005.9	2	10	A8	À réaliser si sd7 ne rencontre pas de vide
sd7	536177.9	6594004.7	1	10	A8	
sd8	536177.9	6594003.7	2	10	A8	À réaliser si sd7 ne rencontre pas de vide
sd9	536167.7	6594027.6	2	13	A7	
sd10	536157.2	6594020.6	1	13	A5	
sd11	536151.7	6594024.2	1	13	A4	
sd12	536151.9	6594026.2	1	13	A4	
sd13	536142.9	6594030.3	1	13	A3	
sd14	536142.1	6594024.6	1	13	A3	
sd15	536154.4	6594004.1	2	10	A9	Vérifier la présence de galerie avant sondage
sd16	536156.3	6594004.1	2	10	A9	Vérifier la présence de galerie avant sondage
sd17	536158.3	6594004.0	2	10	A9	Vérifier la présence de galerie avant sondage
si1-2	536147.8	6594026.6	1	15 m inclinée	Effondrement	2 sondages inclinés, direction sud, angle 51° et 59°
si3-4	536149.8	6594026.6	1	15 m inclinée	Effondrement	2 sondages inclinés, direction sud, angle 51° et 59°
si5-6	536145.8	6594026.6	1	15 m inclinée	Effondrement	2 sondages inclinés, direction sud, angle 51° et 59°

Tableau 3 : Préconisations de sondages.

De manière indépendante aux résultats de l'étude microgravimétrique, dont la couverture n'a pas pu encadrer la zone d'effondrement, nous préconisons la réalisation de sondages destructifs inclinés afin de vérifier la présence de vides résiduels sous et en proximité immédiate de l'effondrement. Trois séries de deux sondages inclinés sont préconisés, depuis la terrasse au nord et dans la direction sud, selon une inclinaison de 51° et 59° par rapport à l'horizontale, de façon à sonder à 3 m et à 6 m sous l'effondrement (Illustration 18). En cas de rencontre de vides francs, il convient d'effectuer un passage caméra et un scan laser en forage, afin de dimensionner au mieux les vides.

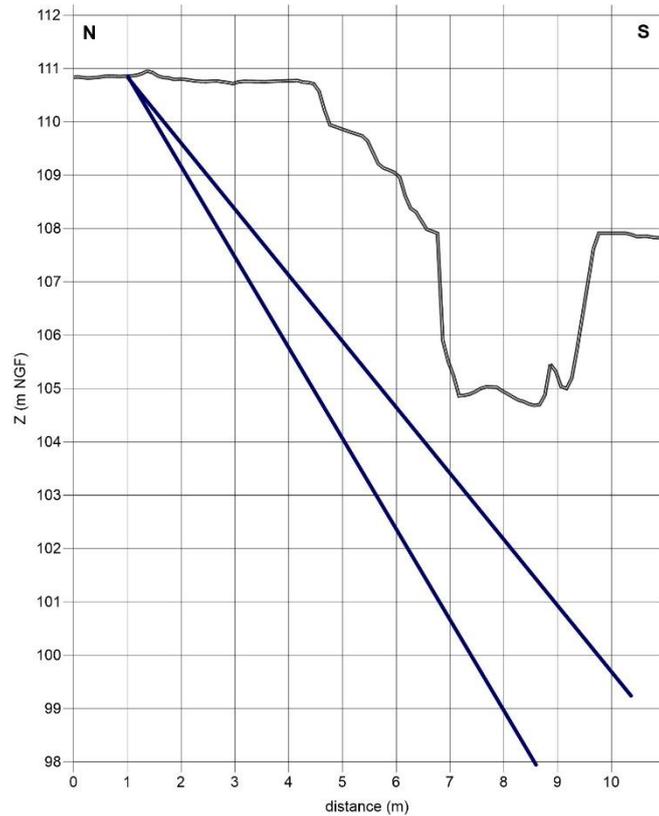


Illustration 18 : Vu en coupe des sondages inclinés proposés (traits bleus), au niveau de l'effondrement.

4.2.2. Extension du levé

Dans le but de circonscrire l'anomalie A1, qui est bordière, et de localiser son apex, nous préconisons une extension du levé microgravimétrique selon une surface située à une distance de 15 m de A1, vers le sud-ouest.

Ceci permettra de positionner au mieux les sondages de contrôle, ce qui maximisera les chances de déterminer la source des anomalies.

Une telle extension n'est pas proposée pour l'anomalie A10, car nous considérons que celle-ci est possiblement en lien avec la présence proche de la bordure de falaise.

5. Conclusions

Une campagne de microgravimétrie, comprenant 306 stations, a été menée au sein et autour de l'église Notre-Dame de Montmorillon (86), afin de détecter la présence d'éventuelles anomalies liées à des cavités souterraines, suite à la survenue d'un effondrement impactant le mur nord de l'église.

Parallèlement, nous avons réalisé un levé au scanner laser mobile qui a permis d'obtenir la géométrie 3D :

- des cavités connues et accessibles du site ;
- de la structure de l'église ;
- de la topographie escarpée du site.

Ce levé a permis d'effectuer les corrections gravimétriques des effets précités, afin de d'obtenir une carte d'anomalies gravimétriques en lien avec les possibles vides non reconnus. Du fait de l'amplitude très importante de ces corrections, le site d'étude est en limite d'applicabilité de la méthode microgravimétrique.

Néanmoins, 10 anomalies gravimétriques négatives ou « légères » ont été décelées, qui, d'une manière générale, peuvent correspondre à :

1. des cavités vides, partiellement remplies ou remblayées ;
2. des variations latérales de densité au sein des terrains, liées à leur nature et à leur lithologie, à leur degré d'altération ou à leur degré de compaction ;
3. des variations latérales d'épaisseur de terrains ayant un contraste de densité important, tels des remblais peu denses sur un substrat plus dense, ou inversement.

Sur la base de ces résultats, le BRGM recommande de contrôler la présence de vides éventuels au droit des anomalies décelées, par 17 sondages destructifs verticaux de reconnaissance jusqu'à l'altitude 98 m NGF, dont 9 en priorité 1, et 8 en priorité 2.

Six sondages inclinés sont aussi préconisés afin de vérifier la présence de vide résiduel sous et à proximité de l'effondrement.

Si des cavités sont détectées par ces sondages, leur stabilité potentielle devra être évaluée en fonction de leurs caractéristiques et des méthodes de confortement éventuellement mises en place.

Une zone d'extension de la zone d'étude est également préconisée, au sud-ouest, afin de bien circonscrire l'anomalie A1. À l'issue de ce complément, de nouveaux sondages de reconnaissance pourront être préconisés pour préciser la source des anomalies.

6. Bibliographie

AIS Centre Atlantique (2018). Montmorillon (86) – Eglise Notre-Dame – Diagnostic de cavité – rapport réf 18.431-10. Décembre 2018.

Analyse Géophysique Conseil (2019). Église Notre Dame de Montmorillon - Étude au radar de sol - Rapport d'intervention. Juillet 2019.

BRGM (2019). Note préliminaire : Eglise de Montmorillon – présence de cavités. Novembre 2019.

D'Errico, J. (2005).- Surface Fitting using gridfit, MATLAB Central File Exchange. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8998>

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

Jamal, (2014) - RegularizeData3D, MATLAB Central File Exchange. <http://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46223-regularizedata3d>

Lerm Setec (2018). Recherche de cavité par réflectométrie Radar en surface et en sondages depuis le dallage intérieur et en périphérie de l'Eglise Notre-Dame de Montmorillon (86). Rapport N°18.44071.001.01.A. Décembre 2018.

Longman, I. M. (1959). Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun. *Journal of Geophysical Research*, 64(12), 2351-2355.

Murthy, I.V.R., Swamy, K.V., (1996). Gravity anomalies of a vertical cylinder of polygonal cross-section and their inversion. *Computers & Geosciences*, 22(6): 625-630.

Nagy, D. (1966). The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics*, 31(2), 362-371.

Okabe, M. (1979) - Analytical expressions for gravity anomalies due to homogeneous polyhedral bodies and translations into magnetic anomalies. *Geophysics*, 44(4): 730-741.

Parasnis, D.S., (1952) - A study of rock densities in English Midlands: *Geophysical Journal International*, 6, 252-271.

Annexe 1

Note du BRGM en date du 19 novembre 2019



Orléans, le 19 novembre 2019

Note préliminaire : Eglise de Montmorillon – présence de cavités

Introduction et synthèse rapide des travaux et études antérieurs.

Dans le cadre de la restauration de l'Eglise Notre Dame de Montmorillon, une tranchée drainante a été prescrite le long du mur Nord du bâtiment et les travaux ont débuté au printemps 2018. Suite à un orage violent semble-t-il, un fontis s'est déclaré dans le fond de la tranchée mettant en danger le mur Nord de l'Edifice.

Des travaux d'investigation de géophysique par méthode RADAR ont alors été réalisés pour essayer de mieux localiser les cavités qui, par leur effondrement, pourraient créer ces remontées de fontis. Toutefois, les profondeurs de pénétration des ondes RADAR, spécifiées dans les rapports, n'atteignent pas, semble-t-il, plus de 2 m de profondeur, au maximum.

Une étude géotechnique basée sur la réalisation de 3 forages pressiométriques de 10 m de profondeur, conduite à proximité du mur Nord par la société AIS, a permis de définir le substratum de calcaire dolomitique. Il est coupé par des passées sableuses et présent à une profondeur variant de 3 à 5 m. Il est surmonté par des sables et localement des argiles (au droit du forage SP1).

Un étaielement a été mis en place en urgence pour décharger le mur Nord de l'Edifice affaibli par son affouillement causé par la remontée du fontis.

La consultation de la Banque du Sous-Sol (BSS) indique qu'aucun sondage n'est renseigné à proximité de l'Eglise.

Aucune cavité n'est mentionnée à proximité dans la Banque de données Nationale BD-Cavité, pourtant un PERN (Plan d'Exposition aux Risques Naturels - Inondations et Mouvements de Terrain) datant des années 1990 existe et indique que de nombreuses cavités naturelles ont été détectées. Ce PERN est en cours de révision. Des études de sols réalisées pour des projets sur la commune évoque aussi la présence de cavités anthropiques.

Les plans et sections de l'Edifice réalisés par méthode lasergrammétrique dans le cadre des investigations actuelles, montre la présence, en coupe et en plan, d'une cavité naturelle accessible, se trouvant sous l'Eglise et sous la crypte. Le sondage SP1 réalisé dans le cadre de l'investigation géotechnique est passé a priori à moins d'1 m de cette cavité. A noter qu'en première analyse la stabilité de cette cavité est critique pour la stabilité de l'Edifice.

Présence de cavités naturelles

C'est dans le massif calcaire, partiellement reconnu par l'étude géotechnique, que se trouve les cavités naturelles et donc à une profondeur supérieure à 3 m d'après l'étude de la société AIS. Si elles ne sont pas stables, elles peuvent en s'effondrant provoquer des désordres en surface, par soutirage des sables superficiels, désordres qui peuvent être dommageables aux constructions en surface.



Il semble qu'il existe dans le massif de calcaire dolomitique sous l'Eglise Notre Dame, un certain nombre de cavités, principalement naturelles, et qui sont soit :

1. Parfaitement connues : c'est le cas de la crypte et de la grotte située en dessous de l'Eglise ;
2. Partiellement connues : c'est le cas de la cavité qui a provoqué un fontis au Nord de l'Edifice ;
3. Inconnues.

Pour permettre la réalisation des travaux nécessaires à la stabilisation de l'Eglise Notre-Dame, il est préférable de caractériser au mieux l'ensemble des cavités qui se trouvent à proximité et qui pourraient influencer sa stabilité.

Investigations liées aux cavités

Deux types d'investigations sont nécessaires pour permettre la connaissance des cavités.

Il faut d'abord localiser les cavités et dans un second temps obtenir leurs caractéristiques géométriques de manière à pouvoir les positionner dans l'espace souterrain. La méthode la plus utilisée pour détecter la présence de cavité est la méthode micro-gravimétrique.

Dans un second temps, il est nécessaire d'évaluer les caractéristiques géométriques des cavités (formes et volumes) ainsi que leurs caractéristiques de stabilité.

Détection des cavités : La méthode micro-gravimétrique

La présence d'une cavité dans le sous-sol provoque une anomalie de la force de gravité en surface.

Cette anomalie de la force de gravité (anomalie de Bouguer) peut être mesurée et cartographiée et devrait permettre de détecter la présence de cavités. On réalise cette cartographie en effectuant des mesures de gravité suivant une maille spécifique qui est adaptée aux caractéristiques de la cavité connue ou supposée (profondeur, volume, remplissage etc.).

Il est important de noter cependant que de petites cavités à grandes profondeurs ne peuvent être détectées (seuil de détectabilité des appareils de mesure). La grandeur de l'anomalie est proportionnelle au volume de la cavité et inversement proportionnel à la profondeur de celle-ci

La cartographie doit être corrigée pour les effets suivants :

1. La topographie de la surface investiguée ;
2. La variation régionale de la gravimétrie ;
3. La présence de cavités ou de structures bâties de poids importants.

Pour permettre la réalisation des travaux nécessaires à la stabilisation de l'Eglise Notre-Dame, il est préférable de caractériser au mieux l'ensemble des cavités qui se trouvent à proximité et qui pourraient influencer sa stabilité.

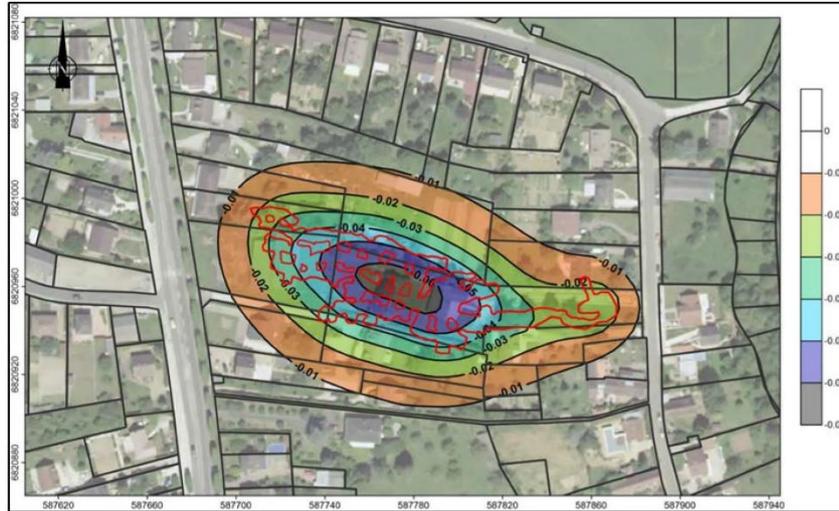


Figure 1 : Exemple de cartographie de Bouguer associé à la présence d'une cavité située en milieu péri-urbain (modélisation à partir d'une cavité réelle –contour en rouge – profondeur = +/- 20 m).

Il est à noter que la signature micro-gravimétrique d'une cavité n'est pas univoque. D'autres phénomènes comme la variation de densité, d'humidité, l'altération peuvent aussi provoquer des défauts de densité et, de ce fait, des anomalies micro-gravimétriques.

Pour valider ou invalider la présence d'une cavité au droit d'une anomalie microgravimétrique la réalisation d'un ou plusieurs forages verticaux de contrôle est nécessaire. On réalise généralement des forages destructifs avec enregistrement de paramètres techniques (vitesse d'avancement, couple de rotation, poids sur l'outil, pression de fluide de forage, etc.). Ces forages permettent d'obtenir l'épaisseur et le remplissage potentiel des vides rencontrés.

Dans un second temps, ils pourront servir de moyens d'accès pour permettre l'utilisation de moyens vidéos permettant d'examiner et d'évaluer le volume de cavité.

Application de la Méthode micro-gravimétrique à l'Eglise de Montmorillon

La réalisation d'une étude micro-gravimétrique sur le site de l'Eglise Notre-Dame, en utilisant une maille de mesure de 3m x 3m sur un rectangle de l'ordre de 70 m par 40 m, semble valide pour une première investigation. Ce rectangle englobe a priori toute l'emprise du bâtiment. Il serait préférable qu'une ou deux rangées de points soient réalisées sur tout le pourtour extérieur du bâtiment. Cela conduit à un nombre de mesure de l'ordre de 400 points.

Une investigation de ce type devrait durer de l'ordre de 1 à 2 semaines et avoir un coût de l'ordre de 20 k€ H.T.

L'interprétation des mesures devra prendre en compte notamment la présence des cavités connues (crypte et grotte) ainsi que la présence de l'Edifice en pierre et de la structure de renforcement actuelle en bois (correction de la carte d'anomalie).



Cette prestation n'inclut cependant pas la réalisation des forages de contrôle. Le nombre de contrôle devra être adapté à l'intensité et au nombre des anomalies gravimétriques. Leurs profondeurs devraient être supérieures de 5 m au moins à la profondeur de la grotte située sous l'église. A noter que certains forages de contrôle pourraient devoir être réalisés à l'intérieur de l'Edifice.

Détermination des caractéristiques géométriques des cavités

Si la cavité n'est pas accessible, il est possible d'inspecter la cavité au moyen de caméra ou de dispositifs laser ou sonar envoyés dans les forages de contrôles. Cette méthodologie peut permettre de reconnaître de manière appropriée des cavités et d'envisager une méthode pour les combler par exemple.

La technique vidéo est souvent mise en œuvre lors de la réalisation des forages de contrôle et permet d'utiliser les capacités de la foreuse pour amener les appareils. Certains sondeurs propose cette technique en compléments de leurs réalisations. Pour les autres types d'acquisitions (laser, sonar), il s'agit plus souvent de campagnes spécifiques qui nécessitent la stabilité à moyen terme des sondages de contrôle.

Dans le cas de grande cavités aux formes complexes, il peut aussi être envisagé de créer des accès plus larges pour permettre l'accessibilité à des moyens humains ou robotisés (forages ou puits d'accès à des cavités de grandes dimensions).

Dans le cas de cavités accessibles, les formes et les dimensions de cavités peuvent être acquises par des équipes spécialisées, dotées d'appareils laser portables (voir figure 2 ci-dessous).

Conclusions

Les travaux de restauration de l'Eglise Notre-Dame de Montmorillon ont permis de découvrir la présence de cavités sous l'Edifice. Pour assurer sa stabilité, il semble nécessaire de détecter et de caractériser les cavités du massif de calcaire dolomitique pouvant influencer la stabilité de l'Edifice.

Pour cela nous recommandons la réalisation d'investigations géophysiques de type micro-gravimétrie associée à des forages de contrôles et éventuellement, si des cavités sont détectées, à des inspections vidéos.

Les résultats de ces investigations permettant de mieux connaître les caractéristiques du massif de fondations devraient guider la conception des travaux de reprises des fondations nécessaire pour assurer la stabilité à long terme de l'Edifice.

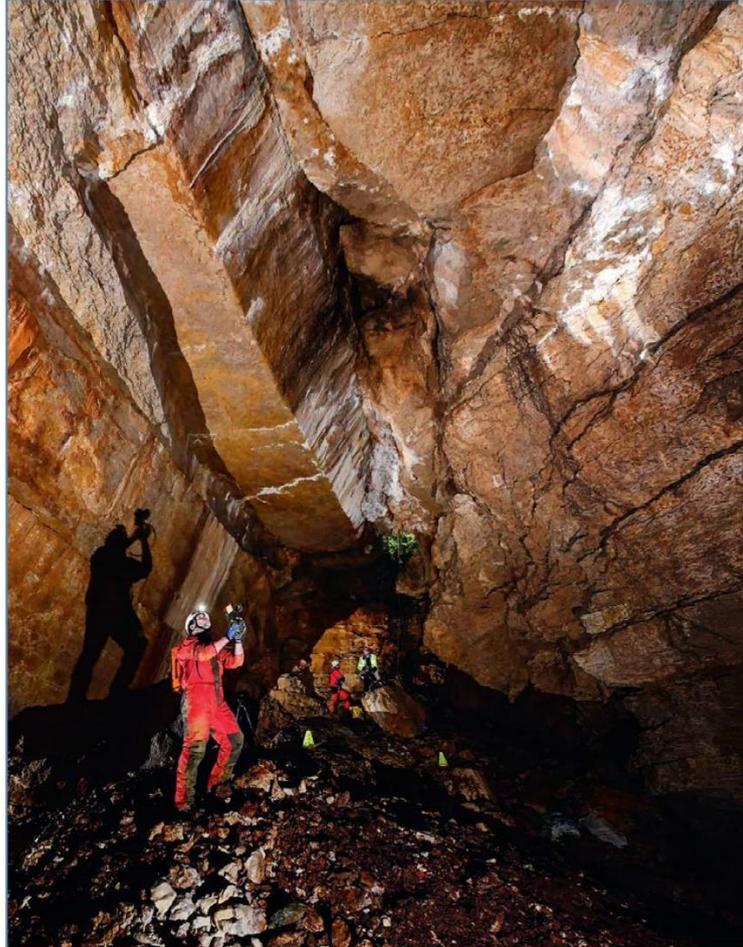


Figure 2. - Opération de numérisation 3D d'une grotte en appui à l'expertise de stabilité de la cavité – Doubs – Mai 2019- © BRGM



Bibliographie

- 1) Rapport intitulé : Montmorillon (86) – Eglise Notre-Dame – Diagnostic de cavité – Réf 18.431-10. AIS Centre Atlantique. Décembre 2018.
- 2) Rapport intitulé : Recherche de cavité par réflectométrie Radar en surface et en sondages depuis le dallage intérieur et en périphérie de l'Eglise Notre-Dame de Montmorillon (86). Rapport N°18.44071.001.01.A. Lerm Setec. Décembre 2018.
- 3) Rapport intitulé : Église Notre Dame de Montmorillon - Étude au radar de sol - Rapport d'intervention. Analyse Géophysique Conseil SARL. Juillet 2019.
- 4) Extraits du rapport : Montmorillon - Eglise Notre-Dame - Principe de l'étalement d'urgence à mettre en œuvre. BMI Juin 2019
- 5) Rapport de Présentation – Ville de Montmorillon – Plan d'exposition aux risques naturels prévisibles – Inondations et Mouvements de Terrain. Direction Départementale de l'Équipement, SOGREAH, SOLETCO – Document non daté.
- 6) Plan et documents divers fournis par la Mairie de Montmorillon.
- 7) <https://www.agapqualite.org/>



Annexe 1 – Exemple de Société spécialisée en vidéo inspection de cavité

JOLY
ISS

IMAGERIE INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE
Jean Yves & Sébastien JOLY
06 14 17 70 34
MAIL: etsjoly@gmail.com
<http://youtu.be/auH1HfWzqgg>

Plan horizontal

**INSPECTION DE VIDES
&
ANOMALIES SOUTERRAINES**
par CAMÉRA HAUTE DÉFINITION & ENDOSCOPE
CALCUL DE VOLUMÉTRIE

Annexe 2

Limite de détectabilité des cavités par microgravimétrie

L'effet gravimétrique généré par une cavité dépend :

- De ses dimensions : l'anomalie gravimétrique sera d'autant plus importante que la cavité aura un volume important ;
- De sa profondeur : le signal gravimétrique sera d'autant plus important que la cavité sera proche de la surface ;
- De son contraste de densité avec l'encaissant, une cavité vide créera une anomalie plus importante qu'une cavité ennoyée et /ou remplie de matériaux alluvionnaires ou de remblais.

Outre les paramètres géométriques et physiques des cavités, leur détectabilité dépend aussi des paramètres du levé gravimétrique, et notamment:

- De la maille d'acquisition : une maille trop lâche ne permettra pas systématiquement de déceler des anomalies de faible emprise, qui témoignent de cavités peu profondes ;
- Du seuil de signification de l'étude, qui correspond à un bilan d'erreur de la mesure et des corrections qui lui sont appliquées: si l'erreur sur la mesure est supérieure à l'amplitude de l'anomalie générée par une cavité, celle-ci ne sera pas décelée avec certitude.

Fort de ces concepts, nous considérons qu'une cavité est décelable si et seulement si l'anomalie qu'elle génère est supérieure au seuil de signification de l'étude sur au minimum deux stations contigües. Nous prenons un seuil de signification usuel de 0,015 mGal, et testons la détectabilité des cavités pour une maille de 2 m en fonction de leur dimension et de leur profondeur, pour une cavité cubique vide (contraste de densité de -1.8 entre l'encaissant et la cavité), et pour une cavité de type tunnel horizontal (ou galerie) de plus grande longueur égale à 25 m, à section carrée, et vide (Illustration A1).

Sur l'illustration A1, les zones où les cavités ne sont pas détectables (zones blanches) correspondent aux domaines dimension-profondeur du toit des cavités où l'anomalie générée est inférieure au seuil de signification sur 2 stations contigües. Ainsi, à la maille 2 m, une cavité vide de type cubique vide pourra être décelée si et seulement si son côté est supérieur à ~1.6 m, et ce pour les profondeurs de toit les plus faibles (Illustration A1a). Une cavité cubique de 1 m de côté n'est pas décelable avec cette maille, quelle que soit la profondeur de son toit (zone blanche Illustration A1a).

Pour les cavités de type tunnel ou galerie de 25 m de longueur et de section carrée variable, le domaine de non-détectabilité se réduit nettement par rapport aux cavités cubiques (Illustration A1b) : ceci est la conséquence directe du signal plus important généré par ce type de cavité, lié à leur volume bien plus important. Ainsi, à la maille 2 m, et pour un toit à 4 m de profondeur, une telle cavité est décelable si et seulement si sa section est supérieure à ~2 m de côté, alors que pour une cavité cubique, celle-ci est décelable si et seulement si son côté est supérieur à 3.5 m.

Il est donc plus aisé de détecter des cavités de grande emprise, de type tunnel, que des cavités ponctuelles, de type cubique.

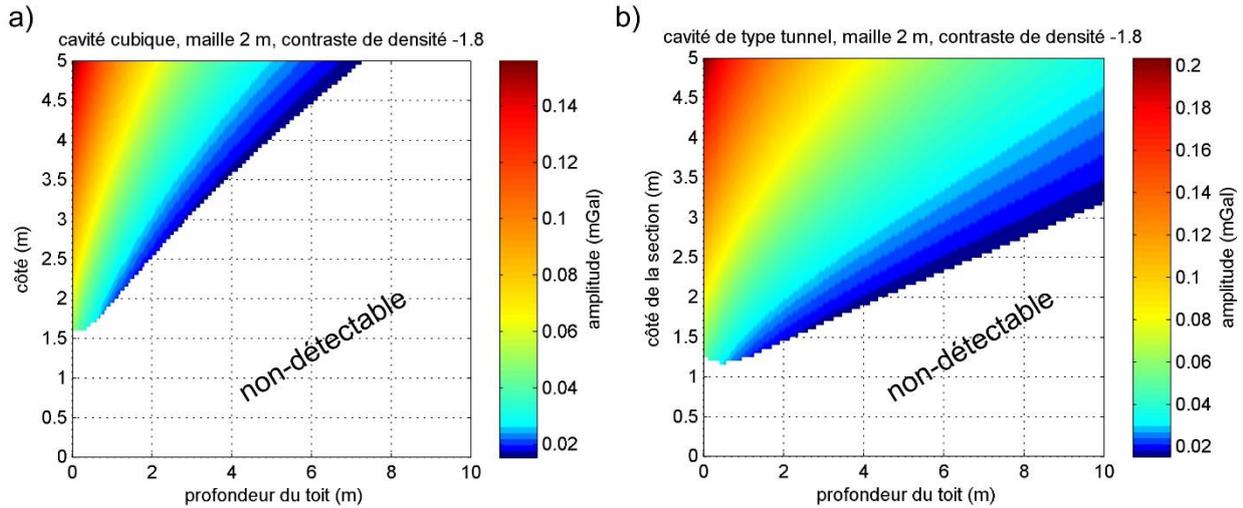


Illustration A1 : diagramme de détectabilité en surface des cavités en fonction de leur dimension et de la profondeur de leur toit, avec une maille de mesure de 2 m. Les zones colorées représentent les régions où les cavités sont décelables, et le code couleur représente les amplitudes maximales des anomalies (mGal), les zones blanches représentent les régions où les cavités ne sont pas décelables. Deux cas sont considérés : a) une cavité cubique vide, pour un contraste de densité -1.8 et b) une cavité vide de type tunnel ou galerie horizontale à section carrée dont la plus grande dimension horizontale est fixée à 25 m.

Annexe 3

Anomalie de Bouguer simple

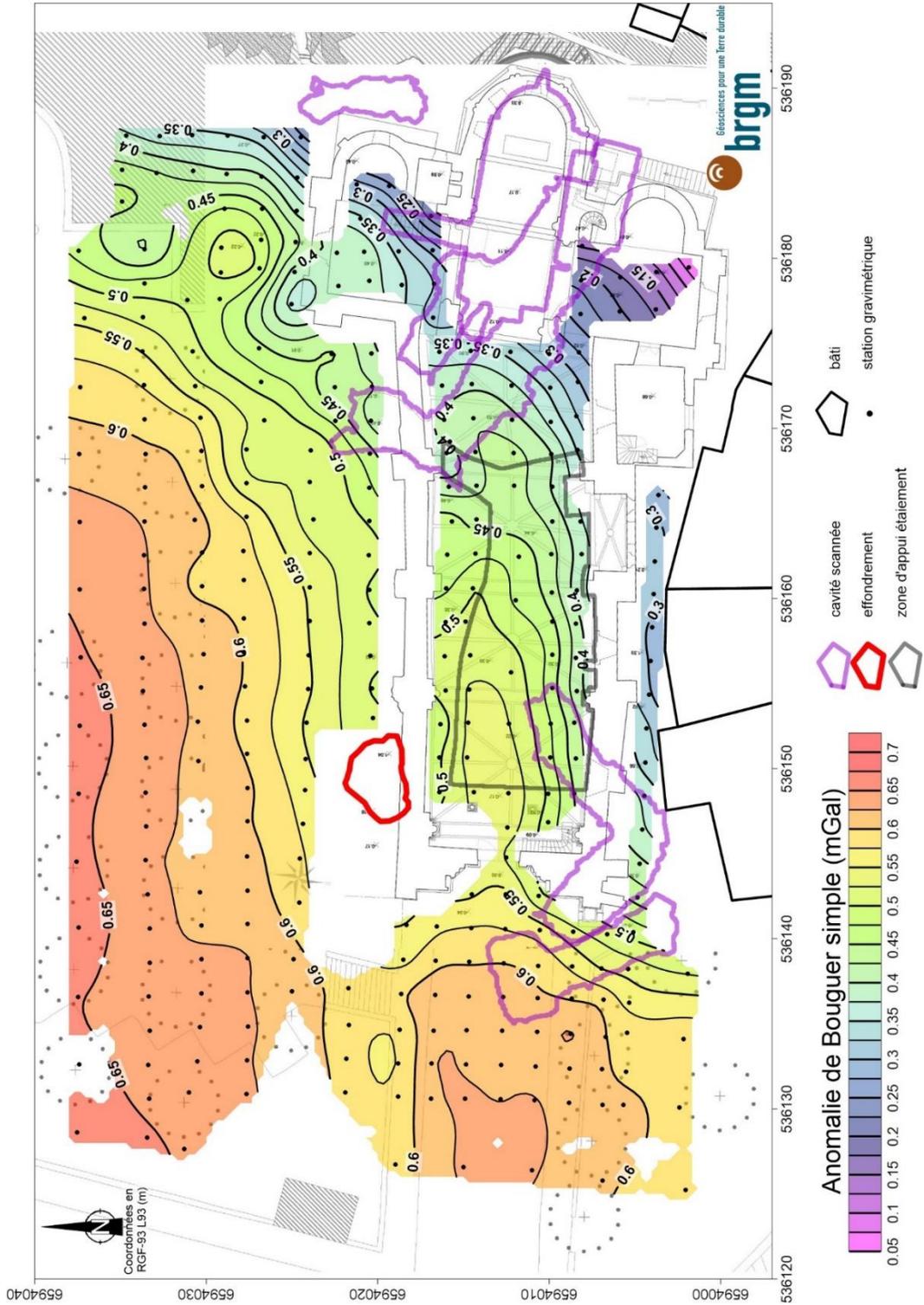


Illustration A 2 : Anomalie de Bouguer simple (densité = 1.95) , sans correction de terrain, ni de structures anthropiques (structures souterraines et bâti de l'église).



Centre scientifique et technique
Direction risque et prévention
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr