



Inventaire des cavités souterraines d'origine anthropique dans le centre-ville historique de Limoges (87)

Détection des cavités souterraines par microgravimétrie

Rapport final

BRGM/RP-70067-FR

Juillet 2020



Inventaire des cavités souterraines d'origine anthropique dans le centre- ville historique de Limoges (87)

Détection des cavités souterraines par microgravimétrie

Rapport final

BRGM/RP-70067-FR

Juillet 2020

A. Portal et T. Jacob

Avec la collaboration de
F. Beaubois, A. Grandemange, B. Maurice, G. Roussez, D. Dugrillon

Vérificateur :

Nom : Benjamin FRANÇOIS

Fonction : Ingénieur géophysicien

Date : 22/09/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : Mathieu DARNET

Fonction : Responsable d'unité

Date : 20/10/2020

Signature :



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

Avertissement

Le présent rapport est complémentaire et indissociable du rapport RP-70005-FR qui synthétise l'ensemble de l'étude.

Remerciements

Le BRGM tient à remercier l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) et sa plateforme Gmob (parc national des gravimètres mobiles, <https://www.resif.fr/actions/parc-des-gravimetres-mobiles-gmob/>) pour le prêt d'instruments lors de la campagne d'acquisition de 2018.

Mots-clés : microgravimétrie, cavité, Limoges

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

Portal A. et Jacob T (2020) – Inventaire des cavités souterraines d'origine anthropique dans le centre-ville historique de Limoges (87) - Détection des cavités souterraines par microgravimétrie. Rapport final. BRGM/RP-70067-FR, 55 p., 24 ill., 3 tabl., 4 ann., 1 pl. hors texte.

Synthèse

Dans le cadre du projet de recensement des cavités souterraines anthropiques sous la ville de Limoges, le BRGM a réalisé une campagne microgravimétrique visant à ausculter le domaine public du centre historique de la ville (*cf.* rapport complémentaire RP-70005-FR, 2020). Celui-ci, divisé en deux grandes zones d'intervention, le secteur « Château » et le secteur « Cité », représente une surface de 8.77 ha, investiguée selon un maillage 5 x 5 m en quinconce, pour un total de **7013 points de mesure**.

Lors du traitement des données, **l'effet de 138 cavités connues a été corrigé** (sur les 801 cavités connues et inventoriées dans le cadre de cette étude, rapport BRGM/RP-70005-FR, 2020). 663 cavités n'ont pas pu être intégrées à cette correction à cause d'une connaissance incomplète de leur géométrie. La carte d'anomalie microgravimétrique ainsi obtenue rend compte **d'anomalies négatives persistantes, rendant compte de possibles vides souterrains non connus**.

L'analyse de la carte d'anomalie microgravimétrique résiduelle, a permis de mettre en évidence **416 apex négatifs**. Ces apex ont fait l'objet d'une classification en trois types et quatre sous-types selon la significativité de l'anomalie concernée, la présence de cavité(s) au droit ou à proximité immédiate de l'apex, et la position bordière ou non de l'anomalie. Pour **chaque type d'apex, des recommandations spécifiques sont préconisées** selon un ordre de priorité établi en fonction du niveau de connaissance disponible sur l'origine des anomalies concernées.

- **Apex de Type 1a : anomalie significative d'origine inconnue > sondages de reconnaissance de priorité 1 (35 apex concernés) ;**
- **Apex de Type 1b : anomalie non-significative retenue d'origine inconnue > sondages de reconnaissance de priorité 2 (5 apex concernés) ;**
- **Apex de Type 2 : anomalies situées au droit ou à proximité de cavités connues dont l'effet microgravimétrique n'a pu être corrigé > amélioration de la connaissance sur la géométrie de la/des cavité(s) et correction de l'effet microgravimétrique correspondant ;**
- Apex de Type 3a : anomalies significatives ou non-significatives retenues, bordières de bâtiments et d'origine inconnue, ou non-bordières et situées à proximité d'une ou plusieurs cavité(s) connue(s) > *Recherche, par consultation, de l'existence de cavité(s), détermination de la géométrie et correction de l'effet microgravimétrique correspondant ;*
- Apex de Type 3b : anomalies situées en limites de zones d'investigations et d'origine inconnue > *Extension du levé microgravimétrique et mise à jour des résultats de cette étude pour nouvelle analyse.*

La mise en œuvre de ces recommandations devra être suivie d'une mise à jour des résultats présentés dans ce rapport et d'une analyse des nouveaux résultats ainsi obtenus pouvant conduire à l'émission de nouvelles préconisations. Cette stratégie itérative a vocation à éliminer progressivement toutes anomalies négatives persistantes associées à de possibles vides non connus.

Le présent rapport est complémentaire et indissociable du rapport RP-70005-FR qui synthétise l'ensemble de l'étude.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Acquisition	9
2.1. IMPLANTATION ET CALENDRIER.....	9
2.2. LEVE TOPOGRAPHIQUE.....	10
2.3. PARAMETRES D'ACQUISITIONS.....	13
3. Traitements	15
3.1. CALCUL DE L'ANOMALIE DE BOUGUER.....	15
3.1.1.Principe de calcul	15
3.1.2.Détermination de la densité de correction.....	16
3.1.3.Corrections de terrain	16
3.1.4. Correction des structures anthropiques	21
3.1.4.a. Correction de l'effet des bâtiments et des murs	21
3.1.4.b. Correction de l'effet des vides souterrains (e.g. parking)	21
3.1.4.c. Correction des cavités souterraines recensées.....	21
3.2. PRECISION DE L'ANOMALIE DE BOUGUER	28
3.2.1. Erreur sur g (ϵ_g)	28
3.2.2. Erreur sur l'altitude (ϵ_z)	29
3.2.3. Erreur sur g_{th} ($\epsilon_{g_{th}}$)	29
3.2.4. Erreur sur les corrections des effets des bâtiments, de la topographie et des vides corrigés (ϵ_{CT_TA})	29
3.3. SEUIL DE SIGNIFICATION.....	29
4. Résultats	33
4.1. ANOMALIE DE BOUGUER ET ANOMALIE REGIONALE.....	33
4.2. ANOMALIE RESIDUELLE	38
4.2.1. Définitions	38
4.2.2. Carte d'anomalie résiduelle	39
5. Analyse des résultats et recommandations	40
6. Conclusion	43
7. Bibliographie	45

Liste des figures

Illustration 1 – Localisation du secteur d'étude et des quartiers auscultés sur la base de la carte de densité des cavités souterraines.	8
Illustration 2 - Station Trimble S7 en cours d'acquisition.	10
Illustration 3 – Secteur Château : carte de localisation des stations microgravimétriques, des bases microgravimétriques, des stations topographiques et bases GPS. Fond : orthophoto, Ville de Limoges.....	11
Illustration 4 – Secteur Cité : carte de localisation des stations microgravimétriques, des bases microgravimétriques, des stations topographiques et bases GPS. Fond : orthophoto, Ville de Limoges.....	12
Illustration 5 – Photo d'un gravimètre CG-5 sur son trépied bas (gauche) et d'un gravimètre CG-6 sur trépied bas et haut (droite).....	14
Illustration 6 – Schéma de synthèse des différentes étapes de la réduction des données microgravimétriques vers l'anomalie de Bouguer.....	16
Illustration 7 – Modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude. Résolution 1 m (source : RGE ALTI®, IGN). Les secteurs d'acquisition sont représentés.	17
Illustration 8 – Secteur Château – Carte des valeurs de la correction de terrain calculée pour une densité de correction de 2.0.	18
Illustration 9 – Secteur Cité – Carte des valeurs de la correction de terrain calculée pour une densité de correction de 2.0.	19
Illustration 10 – Comparaison de l'anomalie microgravimétrique résiduelle sans (haut) et avec (bas) correction de l'effet microgravimétrique des cavités souterraines connues (extrait de la Rue des Arènes).	22
Illustration 11 – Modèle numérique de la hauteur des bâtiments (MNBat) de la zone d'étude. Résolution 0.25 m (source : Ville de Limoges).	23
Illustration 12 - Secteur Château – Carte des valeurs de la correction de l'effet des bâtiments et des murs.	24
Illustration 13 - Secteur Cité – Carte des valeurs de la correction de l'effet des bâtiments et des murs.	25
Illustration 14 - Secteur Château – Carte des valeurs de la correction de l'effet des vides souterrains (e.g. parking) et des cavités connus.	26
Illustration 15 - Secteur Cité – Carte des valeurs de la correction de l'effet des vides souterrains (e.g. parking) et des cavités connus.	27
Illustration 16 - Histogramme des valeurs absolues des écarts de reprises et pourcentage cumulé.	28
Illustration 17 - Secteur Château - Carte du seuil de signification. Pour être retenues, les anomalies doivent avoir une amplitude supérieure au seuil de signification.	31
Illustration 18 - Secteur Cité - Carte du seuil de signification. Pour être retenues, les anomalies doivent avoir une amplitude supérieure au seuil de signification.	32
Illustration 19 – Comparaison de l'anomalie de Bouguer, de la composante régionale et de l'anomalie résiduelle résultante, le long de la coupe 1 (voir encart).....	33
Illustration 20 - Secteur Château - Carte d'anomalie de Bouguer calculée pour une densité de correction de 2.0.	34
Illustration 21 - Secteur Cité - Carte d'anomalie de Bouguer calculée pour une densité de correction de 2.0.	35

Illustration 22 - Secteur Château - Carte de la composante régionale du signal microgravimétrique.	36
Illustration 23 - Secteur Cité - Carte de la composante régionale du signal microgravimétrique.	37
Illustration 24 – Représentation des éléments de descriptions des résultats microgravimétriques.	38

Liste des tableaux

Tableau 1 – Chronogramme de la campagne microgravimétrique	9
Tableau 2 - Caractéristiques des bases gravimétriques implantées.	13
Tableau 3 – Caractéristiques et recommandations associées aux apex négatifs répertoriés dans le cadre de cette étude. Les figurés correspondent à ceux indiqués sur la carte d'anomalie résiduelle (Planche 1).	41

Liste des annexes

Annexe 1 Principe de la microgravimétrie	47
Annexe 2 Caractéristiques des sondages de contrôle	51
Annexe 3 Coordonnées des apex faisant l'objet d'une recommandation de sondages	53
Annexe 4 Procédure de levé des caves souterraines pour la correction de leur effet sur les données microgravimétriques.	55

Planche hors texte

Planche 1 – Carte de l'anomalie microgravimétrique résiduelle de l'hyper-centre-ville historique de Limoges

1. Introduction

Suite à la mise au jour d'une cinquantaine de cavités en 2016 dans l'hyper-centre-ville historique de la ville de Limoges, et afin de pouvoir anticiper les travaux à faire au cours de l'entretien de la voirie et de mieux connaître les désordres potentiels attribuables à la présence de cavités souterraines dans ce secteur, Limoges Métropole a débuté un projet d'inventaire des cavités existantes d'origine anthropique. Une convention de recherche et développement partagés entre le BRGM et l'Agglomération Limoges Métropole a ainsi été élaborée.

Ce recensement (cf. rapport complémentaire BRGM/RP-70005-FR, 2020) se base sur la synthèse et la mise à jour des données déjà existantes, au travers de l'étude publiée par l'association Archéa en 1995 et des informations détenues actuellement par, entre autres, la Ville de Limoges et Limoges Métropole. En complément, le BRGM a réalisé une campagne de levés microgravimétriques, pour participer au recensement des cavités souterraines intéressant le domaine public, dans le centre historique de Limoges (87). Ce dernier a été divisé en deux grandes zones d'intervention (Illustration 1) : le secteur « Château » (autour de l'ancienne abbatale S^t-Martial) et le secteur « Cité » (autour de la cathédrale S^t-Etienne).

Ces secteurs se situent en zone de densité de cavités supérieure à 1 cavité/ha¹ (Illustration 1) héritage de l'époque gallo-romaine durant laquelle de nombreux ouvrages souterrains ont été creusés (caves, cryptes, aqueducs, ...) et dont les emplacements ont été oubliés au gré des remaniements des rues et des bâtiments, de l'obstruction des entrées ou plus simplement du non entretien de ces cavités.

La méthode microgravimétrique consiste à mesurer, à la surface du sol, les variations de la pesanteur terrestre qui sont directement liées aux variations de masses existantes dans le sous-sol. Cette technique est particulièrement sensible à la présence de cavités souterraines et/ou de niveaux de densité moindre (niveaux altérés, décomprimés ou constitués de remblais peu denses). L'Annexe 1 présente les détails concernant la méthode microgravimétrique.

Le levé gravimétrique a été dimensionné pour la détection de cavités de type cave d'habitation parallélépipédique, de dimensions pluri-métriques, située entre 0 et 10 m de profondeur (cas de la majorité des caves de Limoges). Les cavités de type aqueduc, tunnel, ou puits, ayant de moindres dimensions, ne font pas l'objet de la présente reconnaissance.

D'un point de vue géologique, la partie de la ville de Limoges qui a été investiguée se situe sur des roches métamorphiques, plus précisément des migmatites (qui résultent de la fusion partielle de gneiss qui eux-mêmes résultent de la transformation de granites). L'aspect est celui des gneiss, une roche grisâtre avec des lits plus clairs.

Le présent rapport décrit la mise en œuvre des levés microgravimétriques, le traitement et les résultats des données acquises. Au vu des résultats obtenus, le BRGM préconise des actions complémentaires spécifiques selon le type d'anomalie observée.

¹ Sur la base des données issues de l'inventaire départemental des cavités de la Haute-Vienne réalisé en 2009 (rapport BRGM/RP-56808-FR) et des données disponibles dans le Base de Données Cavités (2017).

Limoges

Carte du zonage de la densité de cavités

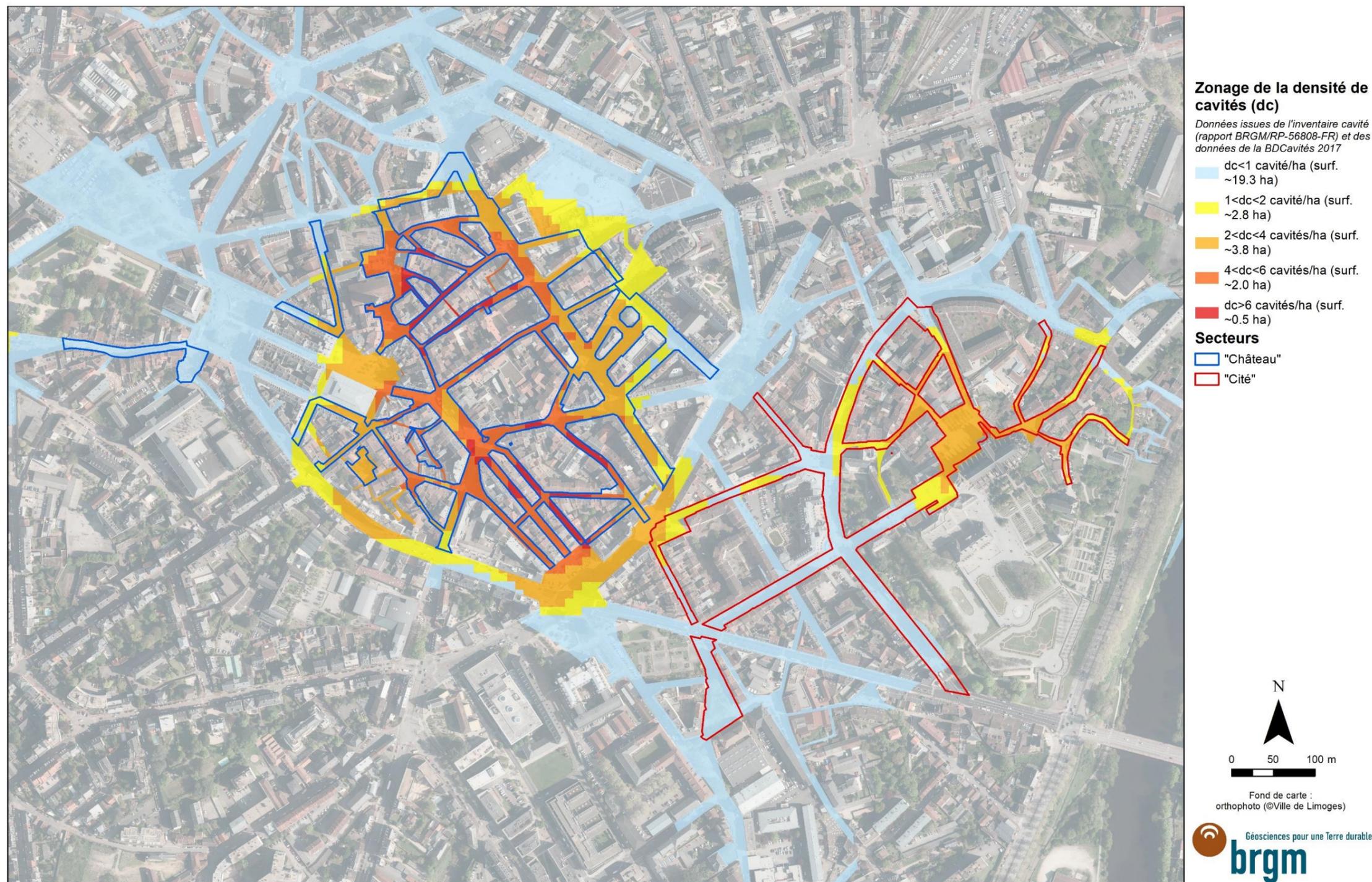


Illustration 1 – Localisation du secteur d'étude et des quartiers auscultés sur la base de la carte de densité des cavités souterraines.

2. Acquisition

2.1. IMPLANTATION ET CALENDRIER

Au total, 7013 stations gravimétriques ont été implantées, nivelées et mesurées sur l'ensemble de la zone d'étude. Une maille de 5 x 5 m en quinconce, produisant un point de mesure tous les 3.5 m selon une maille régulière, a été utilisée sur l'ensemble des rues auscultées. Localement, dans les rues les plus étroites (largeur <10 m), ce maillage a été resserré pour permettre au minimum l'implantation de 2 points d'acquisition par section transverse.

	2017		2018									2019
	Juil.	Août	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	/
Phase 1 Acquisitions hyper centre historique – Secteur Château (2435 pt)												
Phase 2 Acquisition secteur Château et Cité (3844 pt)												
Phase 3 Acquisition sujettes aux contraintes TCL (arrêt des lignes de transport) (734 pt)												
Traitement et compilation des données												

Tableau 1 – Chronogramme de la campagne microgravimétrie

En amont des investigations, compte tenu des contraintes relatives à l'occupation des voiries publiques (circulation et stationnement), un phasage a été programmé avec les services techniques de Limoges Métropole. Différentes dispositions ont été mises en œuvre afin d'assurer des conditions de mesures optimales :

1. Prise d'arrêtés municipaux interdisant le stationnement et la circulation dans les rues auscultées. Les premiers arrêtés (Phase 1) ont été demandés par le BRGM auprès de la Mairie de Limoges. Pour les phases suivantes, les services techniques de Limoges Métropole ont pris le relai des demandes sous les indications des agents BRGM ;
2. Affichage de panneaux d'information indiquant les périodes d'intervention et les secteurs concernés ;
3. Nombreux actes de communication.

Les deux grands quartiers ont été divisés en secteurs hebdomadaires, chacun contenant un volume moyen de 400 stations. Les voies concernées ont ensuite été auscultées une à une afin de limiter au maximum la durée de fermeture.

L'implantation et les levés des stations ont été réalisés par des ingénieurs et techniciens en géophysique du BRGM en 3 grandes phases de travail :

1. Phase 1 - entre juillet et août 2017 : cette première phase a permis de réaliser 2435 stations. L'un des objectifs, au-delà d'initier la campagne de mesures, était également de synchroniser les équipes de travail (le BRGM, les services techniques de Limoges Métropole et les services de la Mairie de Limoges concernés). Cette phase s'est essentiellement focalisée sur le centre historique du secteur « Château » ;
2. Phase 2 et 3 – entre janvier et mars, puis entre mai et juin 2018 : avec un total de 3844 stations cette phase a permis de terminer les voiries du secteur « Château » et de réaliser les mesures dans le secteur « Cité » ;
3. Phase 4 – entre juillet et août 2018 : avec un total de 734 stations, cette phase de travaux a permis d'ausculter les voies impossibles à réaliser jusqu'alors, car situées sur des axes importants du réseau de Transport en Commun de Limoges (TCL). À la demande des services de TCL, ces axes ont été auscultés durant les travaux de maintenance des lignes (arrêt des tramways et déviation des bus).

2.2. LEVE TOPOGRAPHIQUE

Le positionnement en X, Y et Z de l'ensemble des stations et bases gravimétriques a été réalisé à l'aide d'une station totale Trimble S7 (Illustration 2). Les données enregistrées ont ensuite été post-traitées à l'aide du logiciel Trimble Business Center v3.60.

Un GPS différentiel Trimble Geo7X a été utilisé pour recalibrer l'étude dans le référentiel RGF – Lambert 93. Ce recalage a été effectué par l'obtention de coordonnées, précises à 2-3 cm, de deux stations de base topographique (utilisées pour la mise en station de la station S7) par des mesures d'au moins 20 min au GPS différentiel sur chaque point.

L'étendue et la complexité de la zone d'étude ont conduit à créer 3 zones de levé topographique, chacune définie par un couple de stations de base distinct (Illustration 3 et Illustration 4) :

- st1-st2
- st8-st9
- st48-st49



Illustration 2 - Station Trimble S7 en cours d'acquisition.

Des mesures croisées entre les différentes zones ont été réalisées. L'écart altimétrique mesuré, <1 cm, a permis d'utiliser les données topographiques de manière globale dans la suite des traitements.

Limoges

Carte de localisation des points de mesure microgravimétrique et topographique

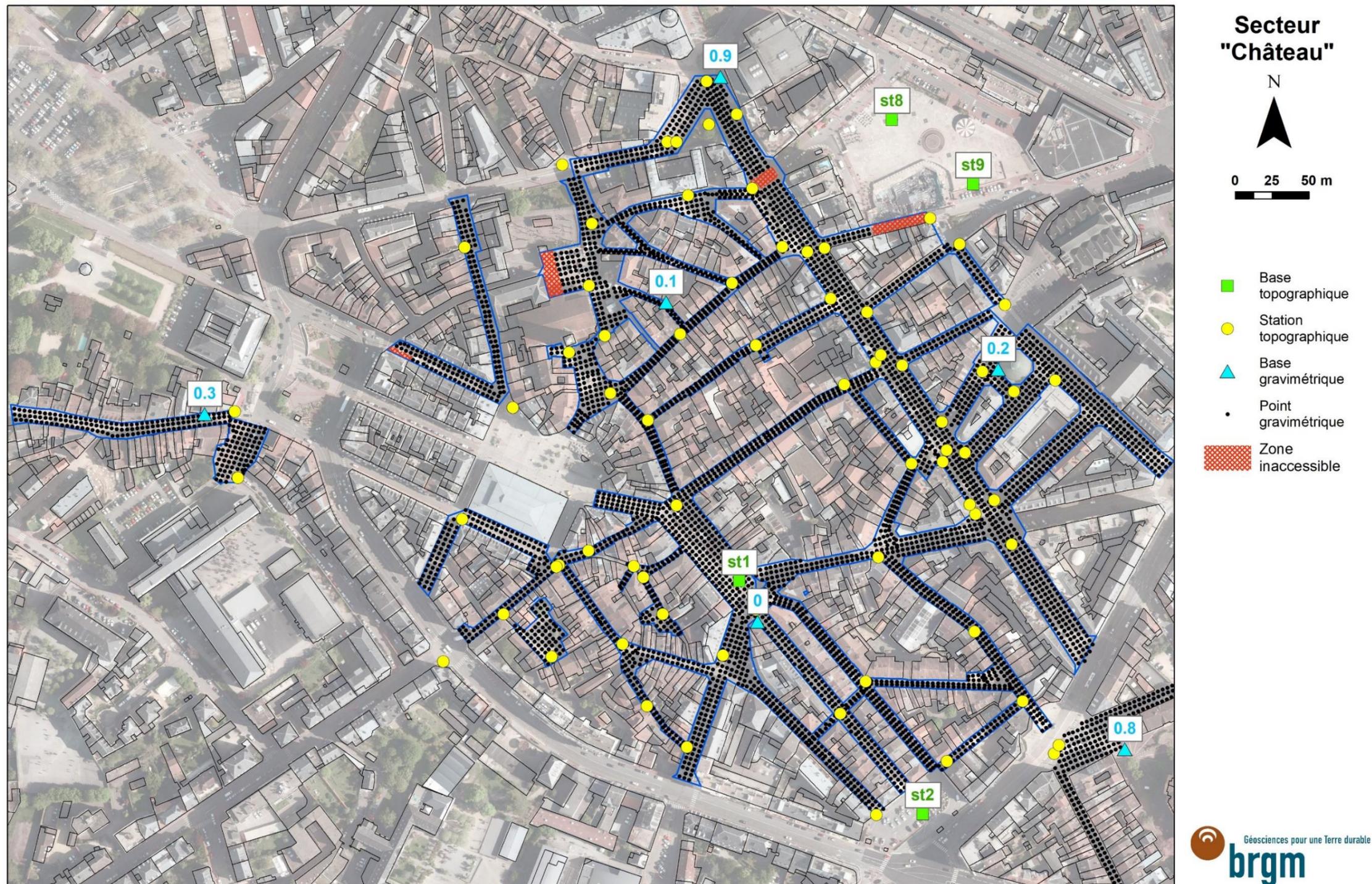


Illustration 3 – Secteur Château : carte de localisation des stations microgravimétriques, des bases microgravimétriques, des stations topographiques et bases GPS. Fond : orthophoto, Ville de Limoges.

Limoges

Carte de localisation des points de mesure microgravimétrique et topographique

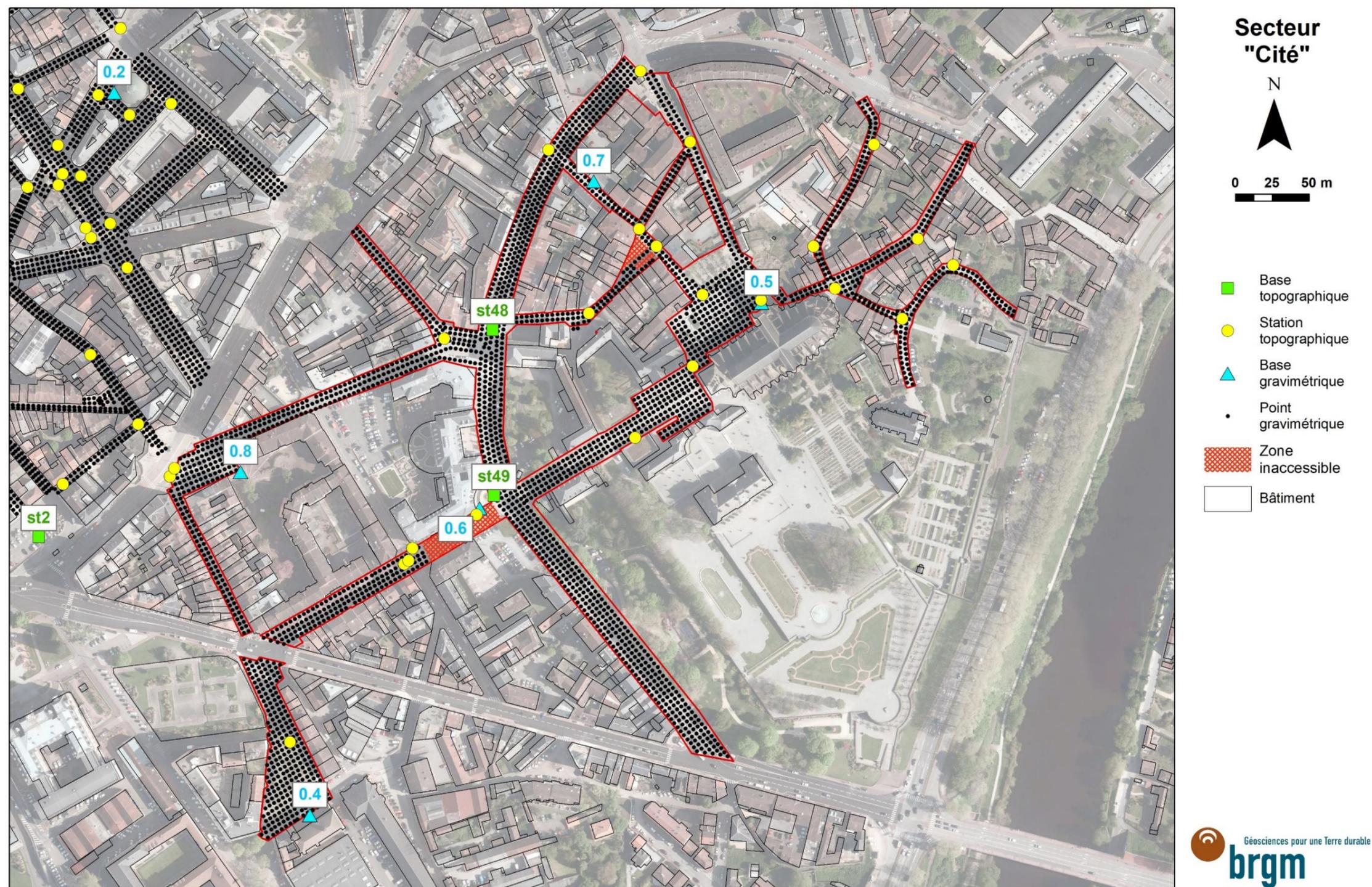


Illustration 4 – Secteur Cité : carte de localisation des stations microgravimétriques, des bases microgravimétriques, des stations topographiques et bases GPS. Fond : orthophoto, Ville de Limoges.

2.3. PARAMETRES D'ACQUISITIONS

7 gravimètres Scintrex CG-5 et CG-6 ont été utilisés lors de cette campagne :

- 3 instruments du parc BRGM (CG-5 #0539, CG-5 #0028 et CG-6 #0006) ;
- 2 gravimètres du parc instrumental de l'INSU (CG-5 #1151 et CG-5 #1215) ;
- 1 gravimètre CG-5 #0974 de Géoreva ;
- 1 gravimètre CG-6 #0043 de Geomatrix ;
- 1 gravimètre CG-3+ #0018 du parc de prêt du constructeur Scintrex.

Le coefficient de calibration des gravimètres a été pris à 1.00000.

9 bases gravimétriques ont été utilisées pour l'ensemble du levé (Illustration 3, Illustration 4 et Tableau 2). La base fondamentale est la base 0, située en haut de la rue Haute-Vienne. L'ensemble des autres bases a été rattaché à celle-ci avec au moins trois déterminations d'écart de g, pour une détermination des différences de g meilleure que 0.005 mGal² entre les bases. La valeur de g a été arbitrairement choisie égale à 0 mGal pour la base 0, car aucun raccord avec une base absolue n'a été effectué. Le détail des caractéristiques des bases est donné dans le Tableau 2.

Base	Coordonnées (m, L93)			Nombre de déterminations	Valeur de g (mGal)	Écart-type (mGal)
	X	Y	Z			
0.0	564835.63	6526952.18	280.17		0	
0.1	564773.80	6527168.06	282.40	4	-0.364	0.001
0.2	564998.90	6527123.65	268.68	4	2.188	0.004
0.3	564461.49	6527092.43	296.82	3	-3.254	0.004
0.4	565131.10	6526635.51	258.12	4	4.095	0.003
0.5	565437.47	6526980.62	257.11	4	4.450	0.003
0.6	565246.44	6526841.53	250.48	3	5.828	0.004
0.7	565323.86	6527062.82	257.10	4	4.565	0.002
0.8	565084.72	6526868.37	261.49	4	3.544	0.003
0.9	564810.59	6527320.46	271.25	4	2.008	0.004

Tableau 2 - Caractéristiques des bases gravimétriques implantées.

Les mesures microgravimétriques ont été réalisées en 543 programmes d'une durée moyenne d'1h. Le nombre moyen de stations mesurées par programme est de 13 dans le cadre de cette étude. Un programme de mesure débute et se termine par une mesure sur une base

² 1 mGal = 10⁻⁵ m/s², voir Annexe 1 pour plus de détails.

gravimétrie afin de contraindre la dérive instrumentale temporelle du gravimètre relatif. Au cours d'un programme, cette dérive est supposée linéaire dans le temps.

Hormis la durée d'acquisition, de 50 s pour un CG-5 ou un CG-3+, et de 30 s pour un CG-6, les paramètres d'acquisition sont les mêmes quels que soient les gravimètres utilisés :

- Mesures à la base : 5 ;
- Mesures à chaque station : 1 à 2 ;
- Inclinaison : $-10'' < i < +10''$ (seconde d'arc³) ;
- Ecart-type affiché : < 0.1 mGal.

Lorsque l'écart-type affiché était supérieur à 0.1 mGal au moment de la mesure, à cause d'un fort bruit vibratoire ambiant (e.g. piéton(s), véhicule proche, vent), une nouvelle acquisition a été réalisée. De même, les mesures effectuées avec une inclinaison en dehors de la tolérance de $\pm 10''$ ont été systématiquement renouvelées.

Les mesures ont été réalisées sur trépied bas et trépied haut en fonction de la pente des rues auscultées (Illustration 5). La hauteur d'un gravimètre par rapport au sol a été systématiquement mesurée grâce à un mètre à ruban. Cette hauteur a été utilisée pour projeter au sol les valeurs de g suivant un gradient vertical usuel de $0.3086 \text{ mGal.m}^{-1}$.



Illustration 5 – Photo d'un gravimètre CG-5 sur son trépied bas (gauche) et d'un gravimètre CG-6 sur trépied bas et haut (droite).

1562 stations gravimétriques ont été reprises au moins 1 fois, soit 22% de stations reprises. Une reprise consiste à réitérer une mesure sur un point déjà mesuré dans un programme précédent. Cette méthode permet de contrôler en temps réel la qualité du levé et d'estimer l'erreur sur les données (voir détail en section 3.2.1). Le taux de reprises de 22% de cette étude est en parfait accord avec les recommandations de l'AGAP (Code de bonnes pratiques en Géophysique Appliquée, 1992; taux de reprise recommandé de 20%).

³ $1'' = 1/3600^\circ$ est une unité de mesure d'angle.

3. Traitements

3.1. CALCUL DE L'ANOMALIE DE BOUGUER

3.1.1. Principe de calcul

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

La réduction des données gravimétriques vise à corriger tous les effets (variations temporelles, différences d'altitudes, effets topographiques, etc.) qui influent sur les données acquises brutes, et qui ne présentent pas d'intérêt pour l'interprétation des données relatives à la structure du sous-sol. Ce traitement 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 des données gravimétriques, représentée schématiquement à l'illustration 6, se fait selon les étapes suivantes :

1. Correction de la marée terrestre gravimétrique (algorithmes de Longman (1959)) ;
2. 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 ;
3. 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 usuel 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}

4. Retrait du g théorique g_{th} (formule GRS80), fonction de la latitude, qui permet de passer d'une valeur de g à une anomalie ;
5. Correction d'air libre pour compenser les effets des variations d'altitude entre les stations gravimétriques ;
6. Corrections de relief (appelées correction de plateau + corrections de terrain), pour compenser l'effet des reliefs à proximité des points de mesures ;
7. Corrections des effets des structures anthropiques connues (bâtiments, murs, parking, caves...).

L'anomalie de Bouguer A_B s'exprime ainsi :

$$A_B = g_{comp} - g_{th} + \left(\frac{dg}{dz}\right)h - 2\pi G\rho_B h + \rho_B T + T_A \quad 3.1$$

où ρ_B est la densité de réduction de Bouguer, h l'altitude du point considéré (en mètres), 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.

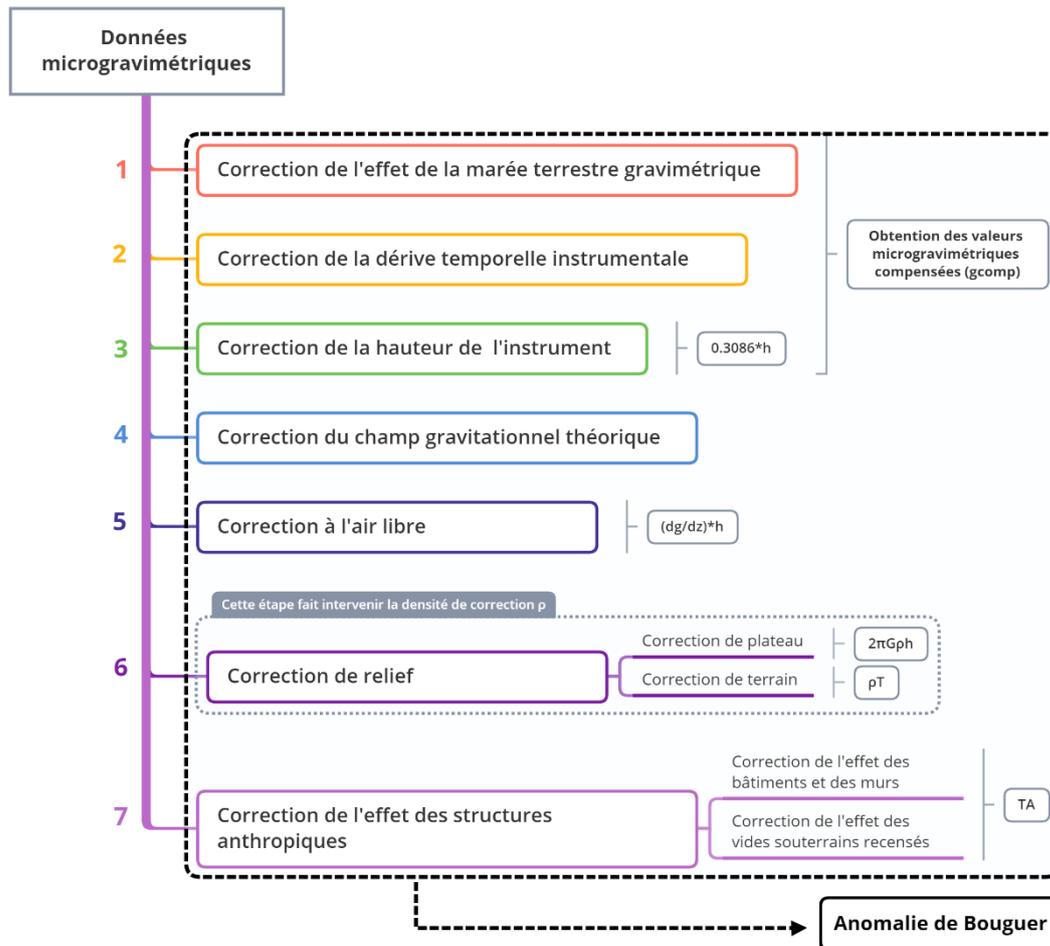


Illustration 6 – Schéma de synthèse des différentes étapes de la réduction des données microgravimétriques vers l'anomalie de Bouguer.

3.1.2. Détermination de la densité de correction

La densité ρ_B de réduction de l'anomalie de Bouguer est un paramètre important pour l'interprétation de cette anomalie. Celle-ci doit correspondre au mieux avec la densité des terrains superficiels. D'après les sondages géologiques présents dans le secteur d'étude, la tranche de terrain superficielle (entre 0 et 10 m de profondeur) est constituée de remblais (environ 3 m) puis d'arènes plus ou moins compactes (sables provenant de l'altération des gneiss). Par conséquent, une densité de 2.0 a été sélectionnée pour la suite des traitements. Cette valeur est davantage représentative des formations peu compactes qui constituent les 10 premiers mètres du sous-sol de la ville de Limoges.

3.1.3. Corrections de terrain

Les valeurs de la correction de terrain ont été calculées pour une densité de correction de 2.0. L'effet de la topographie a été corrigé sur un rayon de 100 m autour des stations, grâce à un modèle numérique de terrain (MNT) d'une résolution de 1 m, issu du RGE ALTI® de l'IGN (Illustration 7). Les Illustration 8 et Illustration 9 présentent les valeurs de cette correction qui s'étend de 0.001 à 0.200 mGal.

Limoges

Modèle numérique de terrain (MNT)

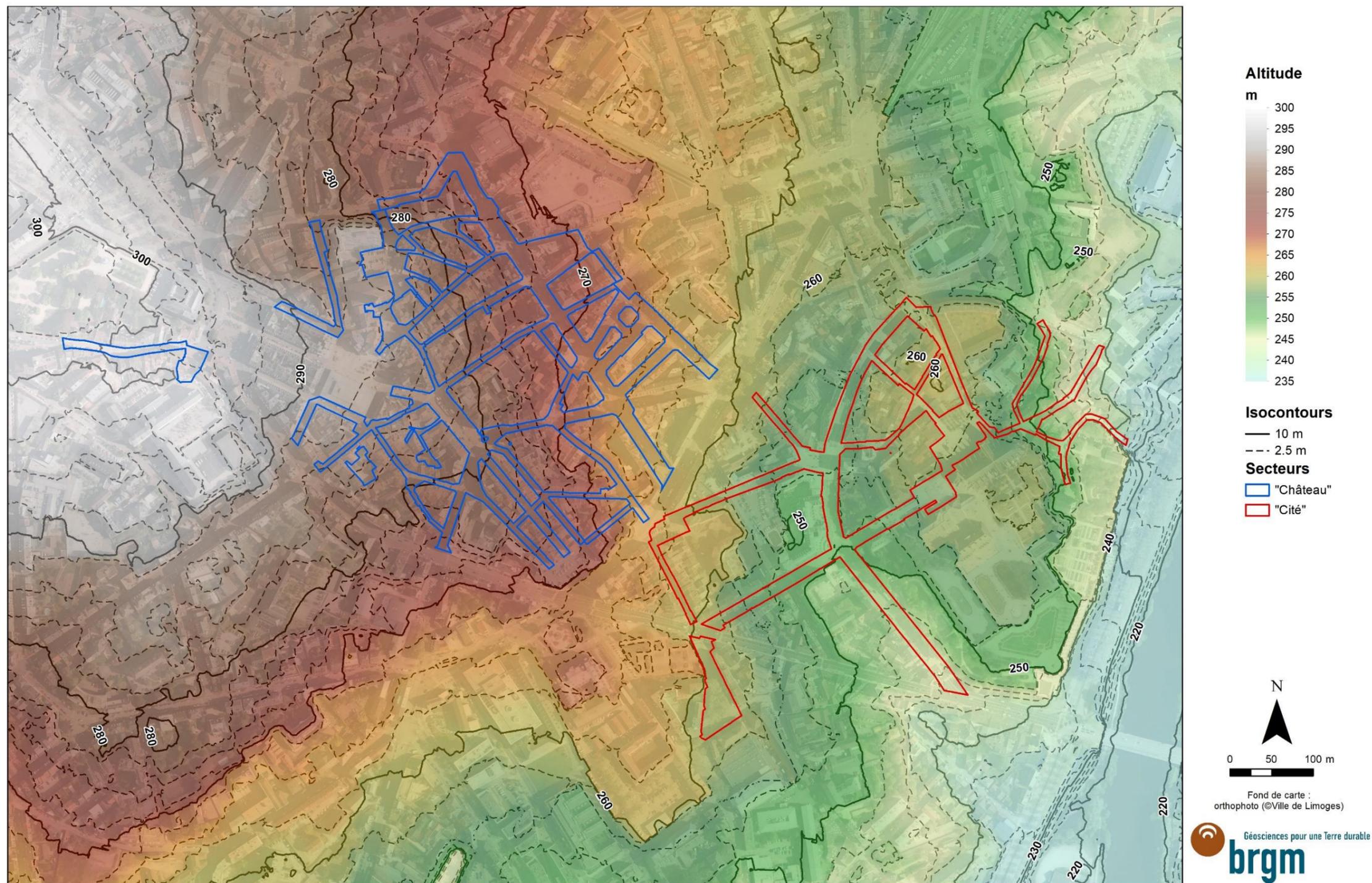


Illustration 7 – Modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude. Résolution 1 m (source : RGE ALTI®, IGN). Les secteurs d'acquisition sont représentés.

Limoges

Carte des valeurs de la correction de terrain

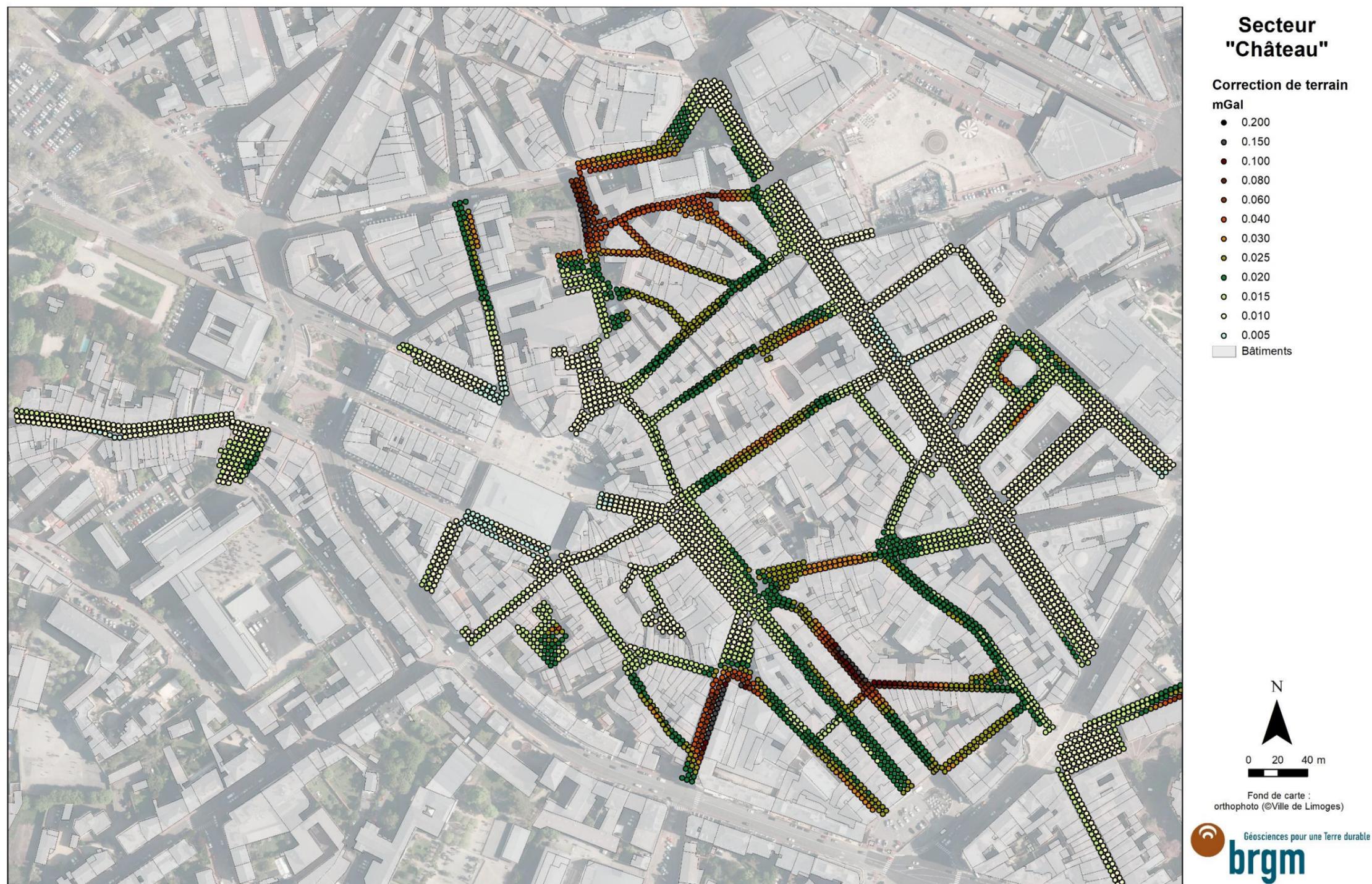


Illustration 8 – Secteur Château – Carte des valeurs de la correction de terrain calculée pour une densité de correction de 2.0.

Limoges

Carte des valeurs de la correction de terrain



Illustration 9 – Secteur Cité – Carte des valeurs de la correction de terrain calculée pour une densité de correction de 2.0.

3.1.4. Correction des structures anthropiques

3.1.4.a. Correction de l'effet des bâtiments et des murs

Les corrections anthropiques suivantes (bâtiments, murs, vides souterrains et cavités) sont basées sur la méthode décrite par Jacob et al. (2020) et détaillée ci-après.

La correction de l'effet des bâtiments et des murs a été réalisée à partir de l'emprise des bâtiments donnée par le cadastre (contours sur Illustration 11) et contrôlée par des levés topographiques de la position de certains bâtiments lors des campagnes. Les murs non recensés par le cadastre ont fait l'objet d'un levé topographique en marge des mesures microgravimétriques.

La hauteur des murs a été extraite d'un modèle numérique de la hauteur des bâtiments (MNBat, Illustration 11). Ce modèle numérique a été obtenu par soustraction du MNT au MNS ; ces deux modèles numériques, d'une résolution de 1 m, proviennent d'une acquisition par levé LiDAR aéroporté et ont été fournis par le service géomatique de la Ville de Limoges.

L'épaisseur des murs a été fixée à 0.3 m et leur densité a été prise égale à 1.8, la plupart des constructions du centre ancien étant réalisées en moellons de pierre de taille (roche locale).

La méthode de calcul utilisée pour corriger les effets des murs est celle des lignes de masses : en prenant en compte hauteur, épaisseur et densité des murs, ces derniers sont discrétisés en lignes de masses équivalentes à un pas de 0,1 m, et leur effet calculé sur les stations. Pour chaque station, l'effet des murs a été calculé sur un périmètre de 30 m.

Les Illustration 12 et Illustration 13 présentent la répartition des valeurs de cette correction. Les valeurs s'étendent de 0.005 mGal à 0.200 mGal.

3.1.4.b. Correction de l'effet des vides souterrains (e.g. parking)

L'effet microgravimétrique des vides souterrains (de type parking, niveaux souterrains d'immeuble...) a été corrigé par la méthode de calcul d'un prisme plat à section polygonale (Murthy & Swamy, 1996).

L'emprise de ces vides souterrains (polygones pleins et hachurés vert sur l'illustration 14 et l'illustration 15) a été déterminée grâce aux plans de sécurité incendie recueillis en marge des levés microgravimétriques, à l'exception des bâtiments de l'Hôtel de Région (Illustration 15) dont les plans détaillés nous ont été fournis par la Région Limousin.

Les hauteurs de vide des souterrains accessibles ont été mesurées au télémètre laser. Pour les niveaux souterrains non visités (manque d'autorisation, polygones hachurés vert), une hauteur de vide moyenne de 2 m par niveau et une épaisseur de recouvrement de 0.5 m ont été choisies.

3.1.4.c. Correction des cavités souterraines recensées

L'effet sur les données microgravimétriques des cavités souterraines recensées dans le cadre de cette étude (BRGM/RP-70005-FR, 2020) a été corrigé par la méthode précédemment décrite (Murthy & Swamy, 1996).

L'objectif de cette correction est de retirer l'effet des vides connus afin d'obtenir une carte d'anomalie microgravimétrique rendant compte des vides non-connus.

L'illustration 10 présente un exemple de carte d'anomalie microgravimétrique résiduelle avant et après correction de l'effet des cavités recensées. Sur cet extrait de la Rue des Arènes, on observe des anomalies négatives résiduelles persistantes après correction des cavités, pouvant indiquer la présence de possibles vides résiduels non connus.

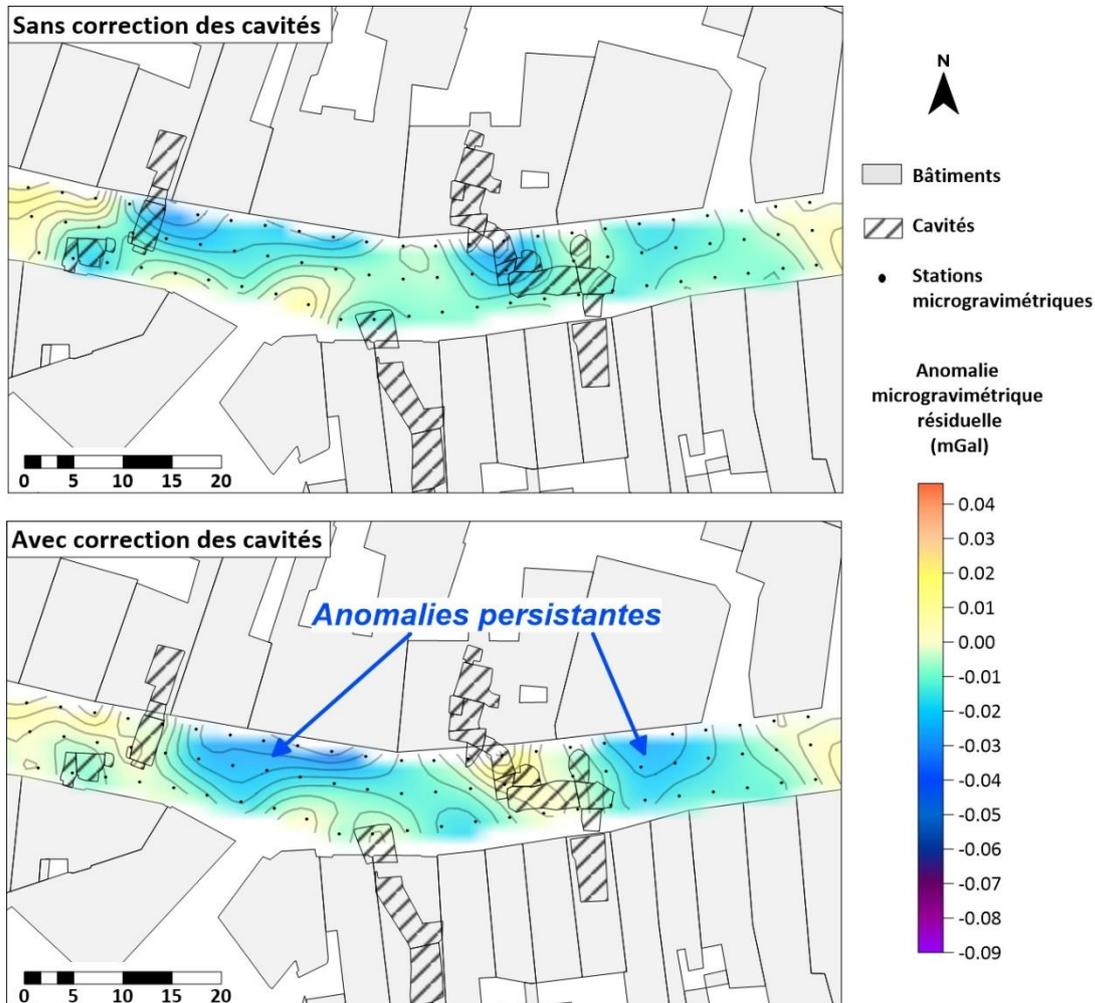


Illustration 10 – Comparaison de l'anomalie microgravimétrique résiduelle sans (haut) et avec (bas) correction de l'effet microgravimétrique des cavités souterraines connues (extrait de la Rue des Arènes).

Ainsi, 138 cavités ont fait l'objet de cette correction (polygones noirs pleins, Illustration 14 et Illustration 15) ; 801 n'ont pu y être intégrées à cause d'une connaissance incomplète de leur géométrie exacte (emprise, profondeur du toit ou hauteur de vide ; polygones rouges).

Les Illustration 14 et Illustration 15 présentent les valeurs de la somme des corrections précédemment décrites (vides souterrains et cavités recensées), qui s'étendent de 0.001 à 0.208 mGal.

Limoges

Carte de répartition de la hauteur des bâtiments

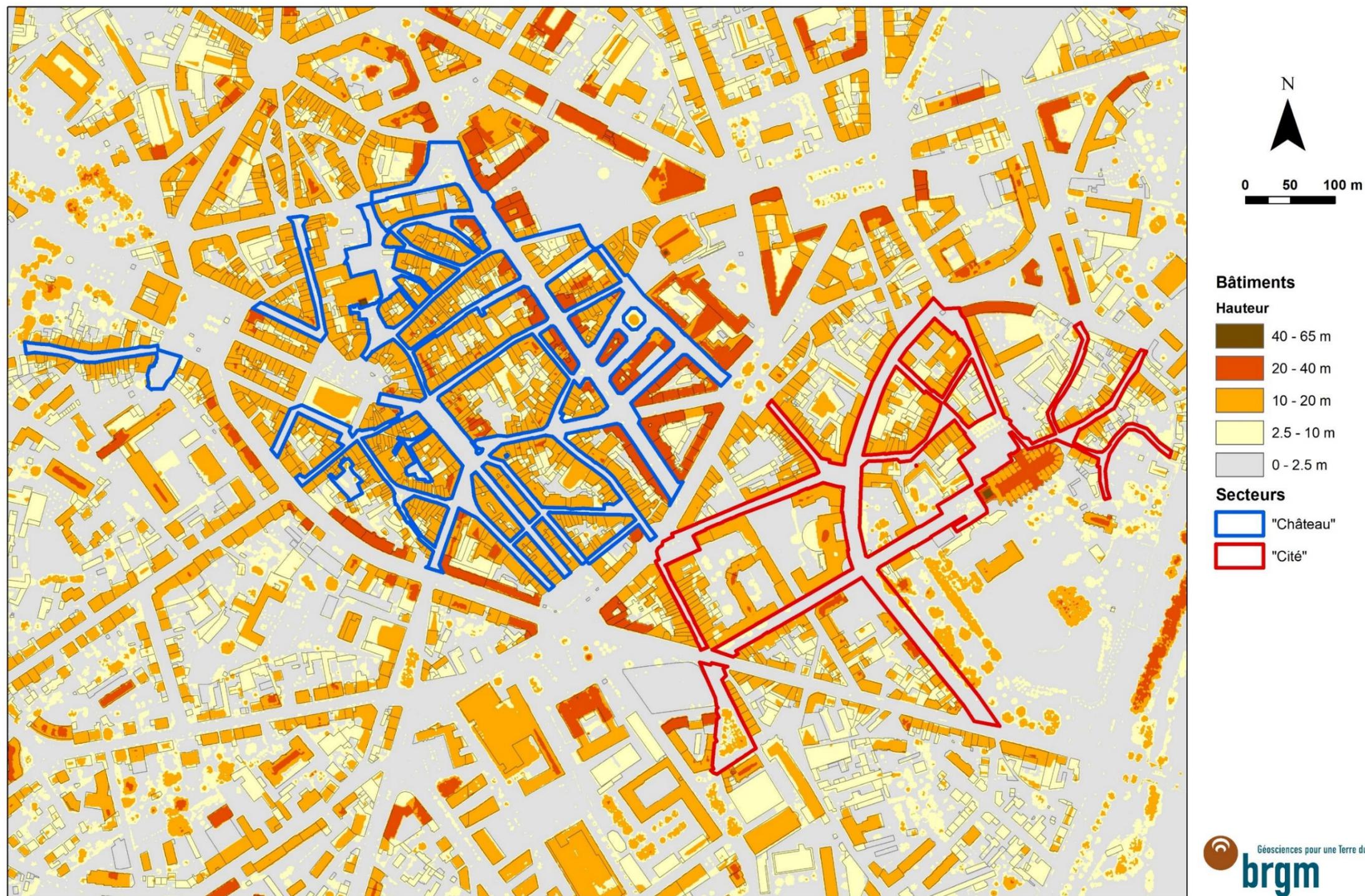


Illustration 11 – Modèle numérique de la hauteur des bâtiments (MNBat) de la zone d'étude. Résolution 0.25 m (source : Ville de Limoges).

Limoges

Carte des valeurs de la correction de l'effet des bâtiments et des murs



Illustration 12 - Secteur Château – Carte des valeurs de la correction de l'effet des bâtiments et des murs.

Limoges

Carte des valeurs de la correction de l'effet des bâtiments et des murs



Illustration 13 - Secteur Cité – Carte des valeurs de la correction de l'effet des bâtiments et des murs.

Limoges

Carte des valeurs de la correction de l'effet des vides souterrains (e.g. parking) et des cavités connus



Illustration 14 - Secteur Château – Carte des valeurs de la correction de l'effet des vides souterrains (e.g. parking) et des cavités connus.

Limoges

Carte des valeurs de la correction de l'effet des vides souterrains (e.g. parking) et des cavités connus

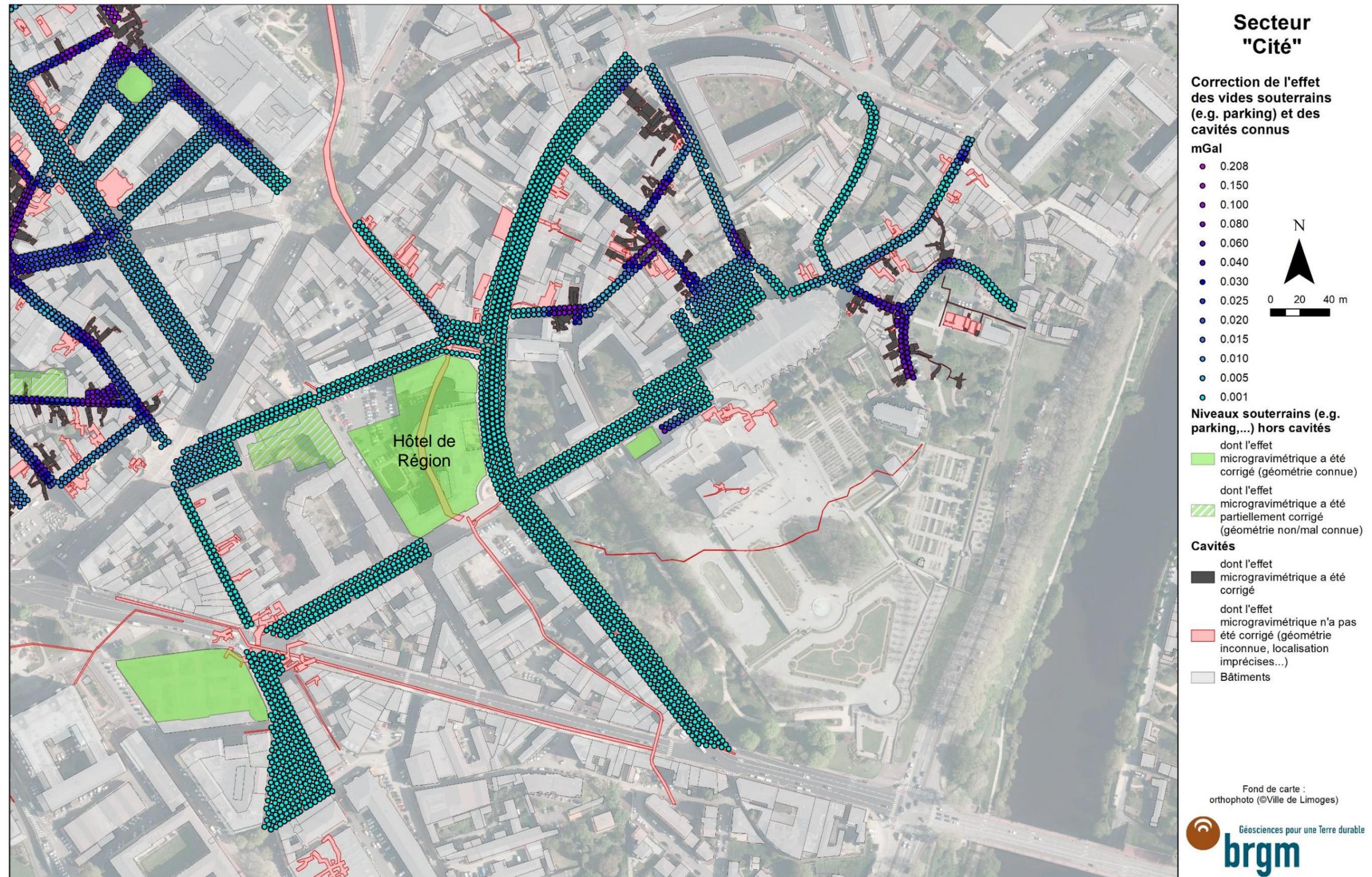


Illustration 15 - Secteur Cité – Carte des valeurs de la correction de l'effet des vides souterrains (e.g. parking) et des cavités connus.

3.2. PRECISION 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 (eq. 3.2).

$$\varepsilon_{AB} = \sqrt{\varepsilon_g^2 + \varepsilon_{g_{th}}^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_{CT_TA}^2} \quad 3.2$$

Le détail de ces erreurs est précisé ci-après.

3.2.1. 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 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 (en bleu sur l'illustration 16) 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.

1522 stations ont été reprises, dont 1450 une fois, 65 deux fois et 7 trois fois. Le pourcentage de stations reprises est de 21.7%.

L'erreur associée à la mesure de g est estimée à 0,006 mGal (Illustration 16), selon la méthode décrite précédemment et appliquée sur 1601 mesures d'écart.

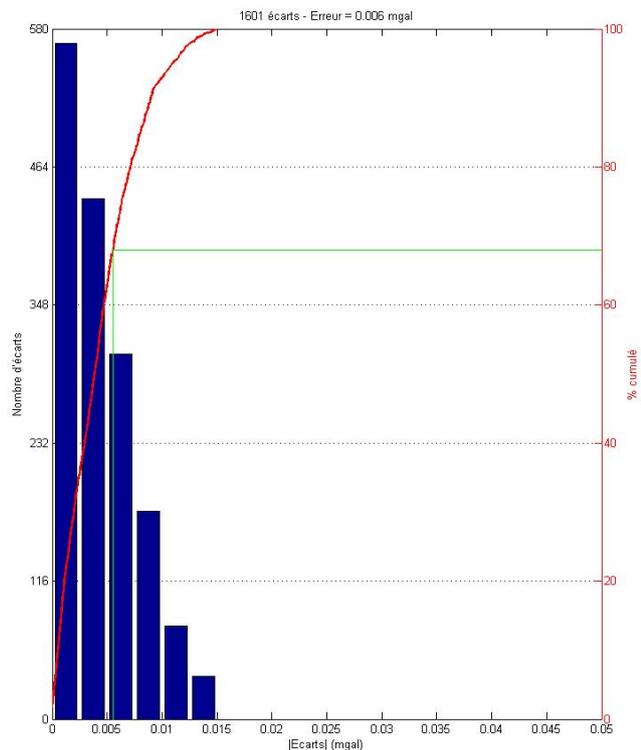


Illustration 16 - Histogramme des valeurs absolues des écarts de reprises et pourcentage cumulé.

3.2.2. Erreur sur l'altitude (ϵ_z)

On estime à 0,01 m la précision du levé altimétrique réalisé à la station totale. Ceci mène à une erreur de 0,002 mGal sur l'anomalie de Bouguer pour une densité de 2.0.

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, lié 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.

3.2.3. Erreur sur g_{th} ($\epsilon_{g_{th}}$)

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} .

3.2.4. Erreur sur les corrections des effets des bâtiments, de la topographie et des vides corrigés ($\epsilon_{CT,TA}$)

L'erreur sur l'effet des bâtiments, de la topographie et des vides corrigés est considérée, de manière empirique égale à 10% 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 caves, ainsi et surtout de la précision et de la maille du MNT utilisé pour les corrections topographiques. Ce dernier ayant une résolution de 1 m, le pourcentage d'erreur a été fixé à 10 % dans le cadre de cette étude.

Cette erreur varie spatialement : les stations présentant des fortes corrections, typiquement celles proches des bâtiments et des ruptures topographiques auront une erreur supérieure à celles situées loin des bâtiments et des caves, en relief doux.

3.3. SEUIL DE SIGNIFICATION

On définit le seuil de signification de l'étude (noté s) comme étant égale à 2 fois l'erreur totale sur l'anomalie de Bouguer de l'étude :

$$s = 2 * \epsilon_{AB} \quad 3.3$$

Ce seuil de signification varie spatialement et est présenté aux Illustration 17 et Illustration 18. Le seuil de signification varie de 0,013 mGal à 0,050 mGal. Il est élevé à proximité immédiate des bâtiments, des ruptures topographiques et au droit des cavités connues dont l'effet a été corrigé. En effet, le seuil étant proportionnel à la somme quadratique des erreurs sur les corrections appliquées à l'anomalie de Bouguer en chaque station, plus les corrections sont fortes, plus le seuil augmente.

Un niveau de confiance supérieur à 95% est à accorder aux anomalies dont l'amplitude⁴ est supérieure au seuil de signification et concernant au moins deux stations contiguës ; ces anomalies sont alors considérées comme significatives.

Ainsi, pour être considérée significative, une anomalie située en zone de fort seuil de signification (zones escarpées, proche des bâtiments ou au droit de structures souterraines) devra avoir une amplitude bien supérieure à une anomalie située en zone de faible seuil de signification (loin des bâtiments en relief plat).

En termes de détection de cavités, cela implique que les cavités situées en zone de fort seuil de signification aient 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.

⁴ Le terme amplitude représente ici l'ampleur de l'anomalie par rapport à zéro (ou encore la valeur absolue de l'anomalie).

Limoges

Carte du seuil de signification

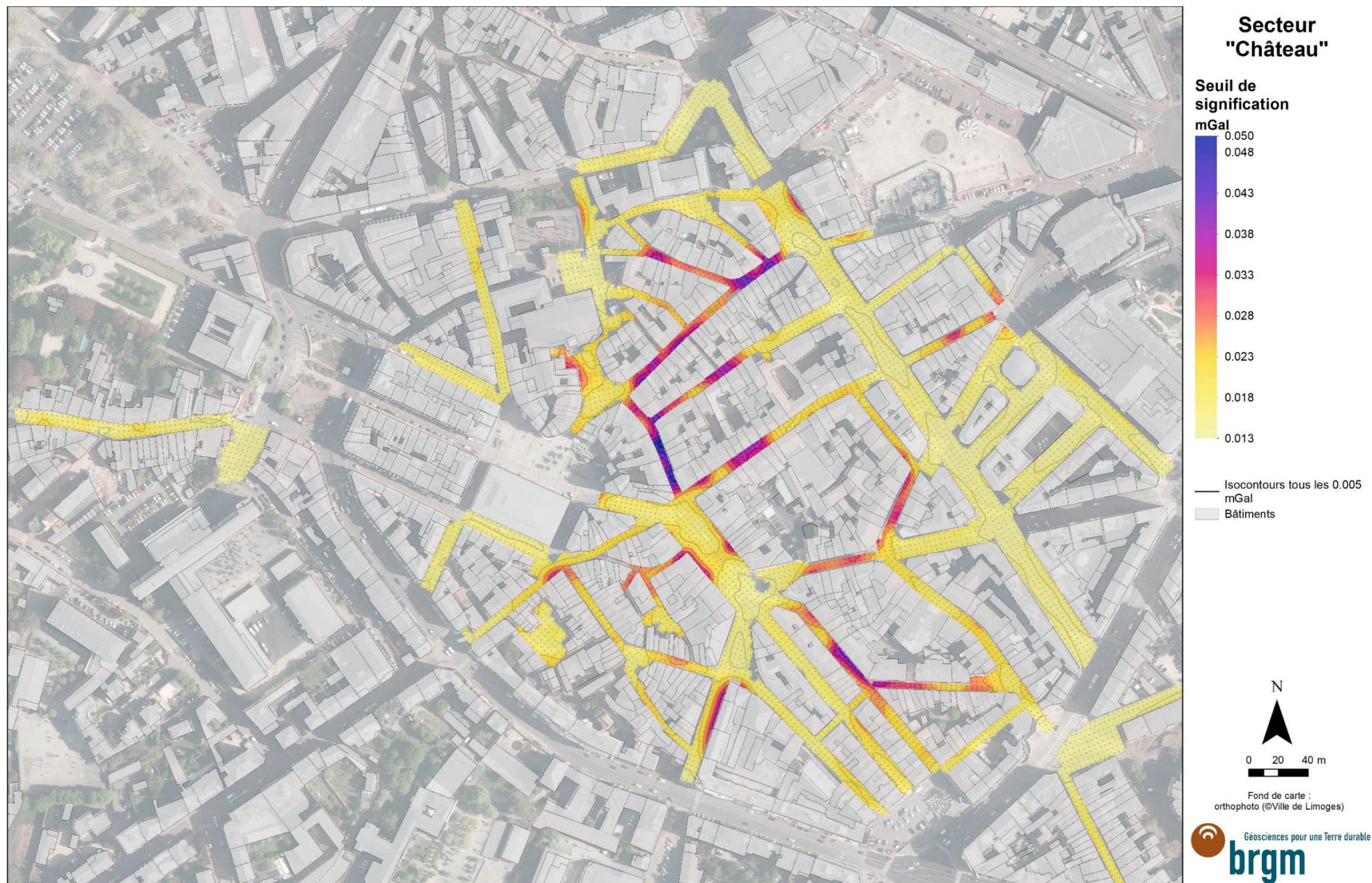


Illustration 17 - Secteur Château - Carte du seuil de signification. Pour être retenues, les anomalies doivent avoir une amplitude supérieure au seuil de signification.

Limoges

Carte du seuil de signification

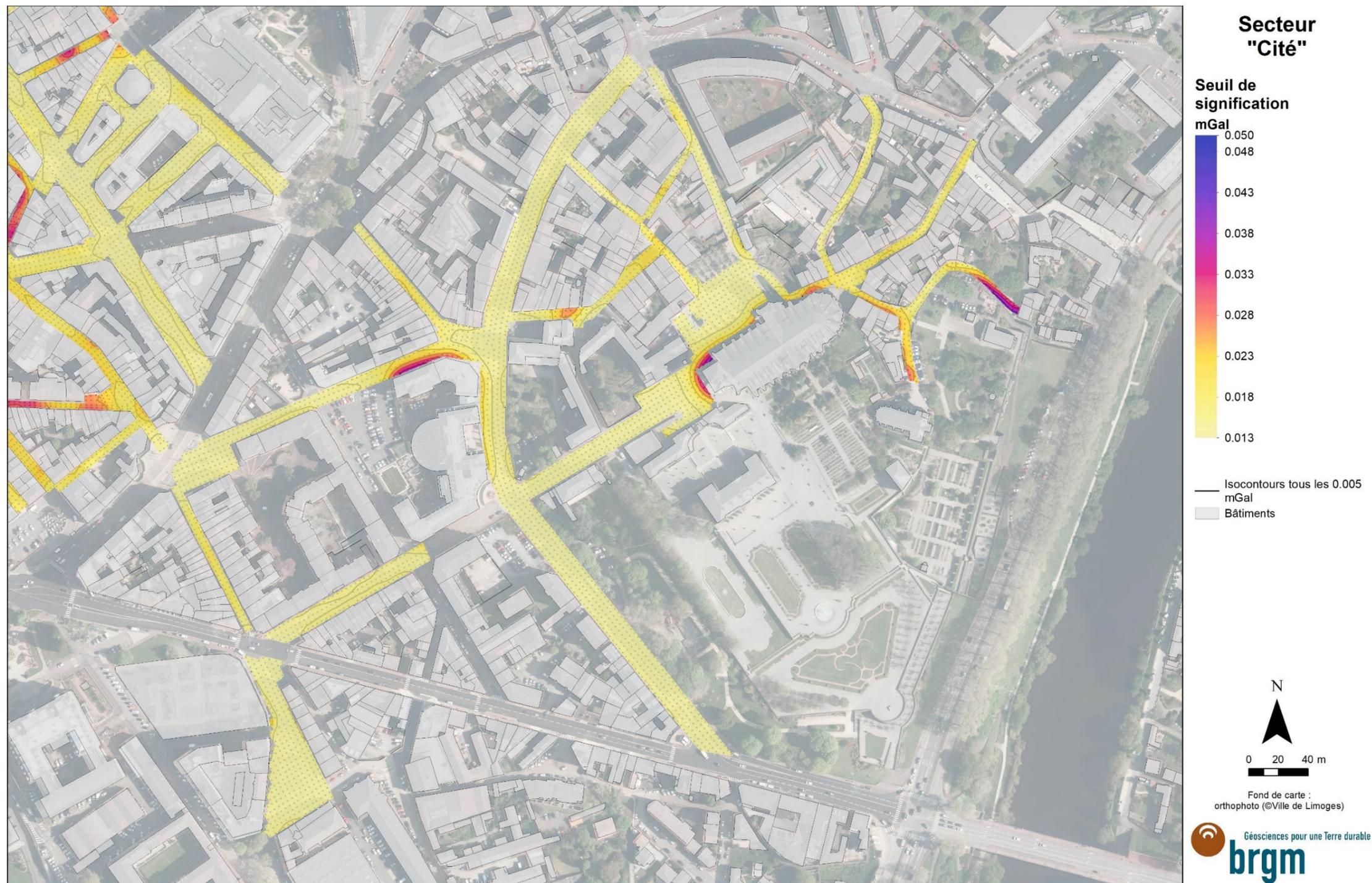


Illustration 18 - Secteur Cité - Carte du seuil de signification. Pour être retenues, les anomalies doivent avoir une amplitude supérieure au seuil de signification.

4. Résultats

4.1. ANOMALIE DE BOUGUER ET ANOMALIE REGIONALE

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 denses, alors que les valeurs faibles caractérisent des matériaux moins denses.

L'anomalie de Bouguer est présentée dans les Illustration 20 et Illustration 21. Elle a été créée par interpolation 'bicubic' 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 'smoothness' utilisé est de 1.10^{-5} . La carte présente une dynamique de 0,555 mGal, avec des valeurs faibles (couleurs froides) et des valeurs élevées (couleurs chaudes) sans gradient clairement identifié. On observe des anomalies négatives bien identifiables, qui correspondent à des cuvettes 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 dans les Illustration 22 et Illustration 23, est obtenue par ajustement itératif d'une surface interpolée avec la méthode d'interpolation précédemment décrite, avec un paramètre de 'smoothness' de 2.10^{-4} . L'Illustration 19 permet de visualiser l'ajustement de la composante régionale (courbe rose) à l'anomalie de Bouguer (courbe bleue). La soustraction des deux (anomalie de Bouguer - composante régionale) permet d'obtenir l'anomalie résiduelle (courbe rouge, voir section 4.2).

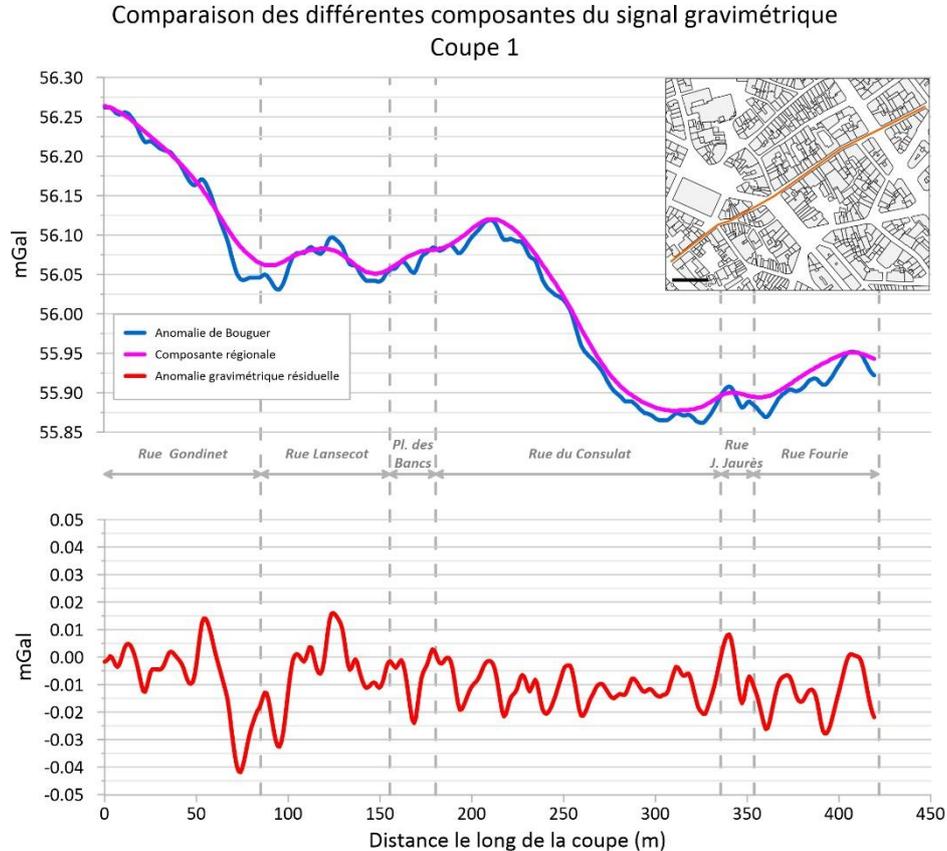


Illustration 19 – Comparaison de l'anomalie de Bouguer, de la composante régionale et de l'anomalie résiduelle résultante, le long de la coupe 1 (voir encart).

Limoges

Carte de l'anomalie de Bouguer



Illustration 20 - Secteur Château - Carte d'anomalie de Bouguer calculée pour une densité de correction de 2.0.

Limoges

Carte de l'anomalie de Bouguer



Illustration 21 - Secteur Cité - Carte d'anomalie de Bouguer calculée pour une densité de correction de 2.0.

Limoges

Carte de la composante régionale



Illustration 22 - Secteur Château - Carte de la composante régionale du signal microgravimétrique.

Limoges

Carte de la composante régionale



Illustration 23 - Secteur Cité - Carte de la composante régionale du signal microgravimétrique.

4.2. ANOMALIE RESIDUELLE

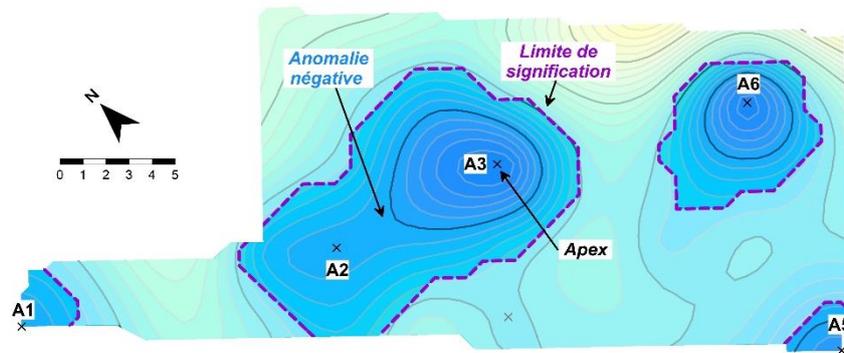
4.2.1. Définitions

L'anomalie résiduelle est obtenue en soustrayant l'anomalie régionale à l'anomalie de Bouguer. Les anomalies positives ne feront pas l'objet d'une analyse détaillée, car elles marquent les excès de masse, qui sortent du cadre de cette étude.

La carte d'anomalie microgravimétrique résiduelle représente les anomalies négatives persistantes suite à la correction de l'effet des cavités recensées dont la géométrie était connue (voir détail paragraphe 3.1.4.c) ; ces **anomalies négatives persistantes rendent donc compte de possibles vides non connus sous la surface**.

Une **anomalie microgravimétrique négative** est définie comme une dépression (un « creux ») dans l'anomalie résiduelle (Illustration 24).

Carte d'anomalie résiduelle



Représentation 3D de la carte d'anomalie résiduelle

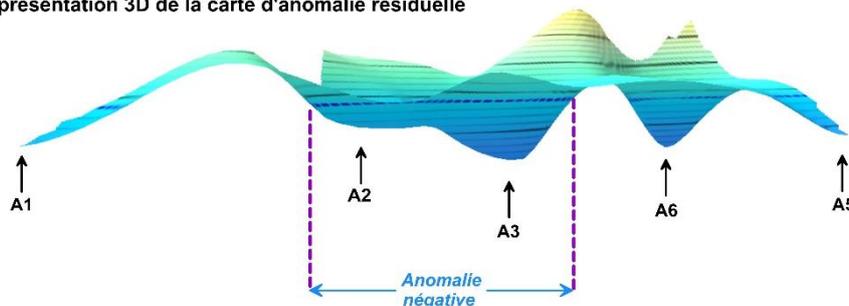


Illustration 24 – Représentation des éléments de descriptions des résultats microgravimétriques.

Une anomalie est **significative** lorsqu'un **niveau de confiance supérieur à 95 % lui est accordé**. Une anomalie significative est ainsi délimitée par la limite de signification (niveau de confiance = 95 %, trait en pointillés violet sur l'illustration 24).

Une anomalie est **non-significative retenue** lorsqu'un **niveau de confiance inférieur à 95 % lui est accordé** mais que sa **valeur est inférieure à -0.015 mGal ET qu'elle est localisée dans une zone où des cavités ont été inventoriées**.

Une anomalie est **bordière** lorsqu'elle longe un bâtiment/une surface libre ou qu'elle se trouve en limite de zone investiguée (e.g. extrémité d'une rue).

Une anomalie est caractérisée par un ou plusieurs apex. Un **apex est un minimum local** : considérant une anomalie négative comme un « creux », l'apex en représente le « fond » (Illustration 24). En gravimétrie, une anomalie a une emprise plus étendue que la source dont elle est issue. L'apex représente ainsi la projection en surface du centre de la source de l'anomalie. L'objectif de l'étude étant de déterminer l'origine des anomalies négatives persistantes, les résultats seront décrits et analysés sur la base de leurs apex.

4.2.2. Carte d'anomalie résiduelle

La Planche 1 (hors texte) présente la carte d'anomalie microgravimétrique résiduelle de l'hyper-centre-ville de Limoges, sur laquelle sont représentés :

- Les stations de mesure (points noirs) ;
- L'anomalie microgravimétrique résiduelle variant de -0,090 mGal (rose) à 0,046 mGal (orangé) (isocontours tous les 0.010 mGal) ;
- La limite de signification (trait pointillé violet) qui délimite les anomalies résiduelles dites significatives (*i.e.* anomalies négatives dont le niveau de confiance dépasse 95 %, voir section 3.3) ;
- Un filtre opaque sur les zones non-significatives (anomalies positives, et anomalies négatives dont le niveau de confiance est inférieur à 95% ou qui n'affectent qu'une seule station) ;
- Les apex de chaque anomalie significative et anomalie non significative retenue (voir détail section 4.2.1). Ces apex représentent les minima microgravimétriques locaux (voir descriptions section 4.2.1) et sont classés en 3 types (voir section 5) ;
- Les cavités connues dont l'effet microgravimétrique a été corrigé (polygones pleins gris foncé) et celles dont l'effet n'a pas été corrigé (paramètres géométriques incomplets, contour rouge) ;
- Les zones pour lesquelles une extension du levé microgravimétrique est proposée (hachuré marron, voir détail en section 5).

5. Analyse des résultats et recommandations

L'analyse de la carte microgravimétrique a permis de répertorier 416 apex. Le Tableau 3 regroupe la typologie des apex identifiés et les recommandations du BRGM qui leur sont associés. Les apex ont été classés selon les critères suivants :

- La significativité des anomalies concernées pas l'apex ; on distinguera les anomalies significatives et les anomalies non-significatives retenues (voir définitions section 4.2.1) ;
- La présence de cavités au droit ou à proximité de l'apex (dans un rayon de 5 m) ;
- La localisation des anomalies (bordière ou non).

35 apex de Type 1a et les 5 apex de Type 1b (soit 10 % des apex) sont identifiés. Ils concernent des anomalies significatives ou non-significatives retenues, dont l'origine est indéterminée à ce jour. Le BRGM recommande pour ces apex la réalisation de sondages de reconnaissance en suivant la procédure décrite en Annexe 2.

73 apex concernent des anomalies situées au droit ou à proximité de cavités connues dont l'effet microgravimétrique n'a pu être corrigé à cause de connaissance incomplète sur leur géométrie (Type 2). Le BRGM recommande d'améliorer les connaissances sur la géométrie de ces cavités (d'après la procédure décrite en Annexe 4), et d'en corriger les effets.

274 apex (Type 3a, soit 66% des apex) concernent des anomalies significatives ou non-significatives retenues, bordières de bâtiments et d'origine inconnue, ou non-bordières et situées à proximité d'une ou plusieurs cavité(s) connue(s). Pour ces apex, le BRGM recommande des investigations supplémentaires afin de rechercher d'éventuelles cavités non connues ou extensions de caves connues. En cas d'identification d'une nouvelle cave ou extension, le BRGM recommande d'en faire un levé géométrique (voir détails en Annexe 4) pour corriger les effets de cette cavités/extension sur la présente carte d'anomalie microgravimétrique.

29 apex concernent des anomalies situées en limites de zones d'investigations et d'origine inconnue (Type 3b). Le BRGM recommande pour ces apex des extensions du levé microgravimétrique. Pour les anomalies situées en extrémité de rues et bordant des rues non investiguées, l'emprise devra être définie conjointement avec Limoges Métropole afin d'optimiser le volume des travaux (levé total/partiel des rues non investiguées à ce jour, en fonction des enjeux de surface). Pour toutes les autres anomalies bordières, des propositions d'extension ont été faites (hachuré marron sur Planche 1). Ces extensions touchent soit au domaine privé (cours, jardin...), soit au domaine public n'ayant pas fait l'objet d'investigations dans le cadre de cette étude (place, parc...). Leur emprise a été définie sur la base des enjeux de surface (e.g. jusqu'au bâtiment le plus proche) ou, en l'absence d'enjeu fort, sur une largeur d'environ 10 m (distance nécessaire pour réaliser 3 lignes supplémentaires de points de mesure). Au vu des résultats de la présente étude, le BRGM recommande d'ajuster la maille des levés complémentaires à 3x3 m en maille régulière.

La réalisation des recommandations faites ci-avant impliquera une mise à jour de la carte microgravimétrique résiduelle présentée dans ce rapport. Une analyse de cette carte mise à jour conduira à de nouvelles préconisations, etc. Cette stratégie permettra, progressivement, d'éliminer les anomalies négatives persistantes (associées à de possibles vides non reconnus).

Type d'apex	Caractéristiques	Nombre d'apex	Recommandations
Type 1a 	Apex d'une anomalie significative, non bordière et d'origine inconnue	35	Réalisation de sondages de reconnaissance <i>Priorité 1</i>
Type 1b 	Apex d'une anomalie non-significative retenue, non bordière et d'origine inconnue	5	Réalisation de sondages de reconnaissance <i>Priorité 2</i>
Type 2 	Apex d'une anomalie significative/non significative retenue, bordière ou non, située à proximité d'une/plusieurs cavité(s) connue(s) non corrigée(s)	73	Correction de l'effet microgravimétrique avant toute action complémentaire
Type 3a 	Apex d'une anomalie significative/non significative retenue, bordière ou non, d'origine inconnue ou située à proximité d'une/plusieurs cavité(s) connue(s) corrigée(s)	274	Recherche par consultation de cavité(s) autour de l'anomalie concernée
Type 3b 	Apex d'une anomalie significative/non significative retenue, en limite de zone d'investigation et d'origine inconnue	29	Extension du levé microgravimétrique

Tableau 3 – Caractéristiques et recommandations associées aux apex négatifs répertoriés dans le cadre de cette étude. Les figurés correspondent à ceux indiqués sur la carte d'anomalie résiduelle (Planche 1).

6. Conclusion

Dans le cadre du projet de recensement des cavités souterraines anthropiques sous la ville de Limoges, le BRGM a réalisé une campagne microgravimétrique visant à ausculter le domaine public, dans le centre historique de la ville. Ce dernier, divisé en deux grandes zones d'intervention que sont le secteur « Château » et le secteur « Cité », représente une surface de 8.77 ha, investiguée selon un maillage 5 x 5 m en quinconce, pour un total de **7013 points de mesure**.

Lors du traitement des données, **l'effet de 138 cavités connues a été corrigé** (sur les 801 cavités connues et inventoriées dans le cadre de cette étude, rapport BRGM/RP-70005-FR, 2020). 663 cavités n'ont pas pu être intégrées à cette correction à cause d'une connaissance incomplète de leur géométrie. La carte d'anomalie microgravimétrique ainsi obtenue rend compte **d'anomalies négatives persistantes, qui mettent en évidence de possibles vides souterrains non connus**.

L'analyse de la carte d'anomalie microgravimétrique résiduelle, a permis d'identifier **416 apex négatifs**. Ces apex ont fait l'objet d'une classification en trois types et quatre sous-types selon la significativité de l'anomalie concernée, la présence de cavité(s) au droit ou à proximité immédiate de l'apex, et la position bordière ou non de l'anomalie. Pour **chaque type d'apex, des recommandations spécifiques sont préconisées** selon un ordre de priorité établi en fonction du niveau de connaissance disponible sur l'origine des anomalies concernées.

- **Apex de Type 1a : anomalies significatives d'origine inconnue > sondages de reconnaissance de priorité 1 (35 apex concernés) ;**
- **Apex de Type 1b : anomalies non-significatives retenues d'origine inconnue > sondages de reconnaissance de priorité 2 (5 apex concernés) ;**
- **Apex de Type 2 : anomalies situées au droit ou à proximité de cavités connues dont l'effet microgravimétrique n'a pu être corrigé > amélioration de la connaissance sur la géométrie de la/des cavité(s) et correction de l'effet microgravimétrique correspondant ;**
- Apex de Type 3a : anomalies significatives ou non-significatives retenues, bordières de bâtiments et d'origine inconnue, ou non-bordières et situées à proximité d'une ou plusieurs cavité(s) connue(s) > *Recherche, par consultation, de l'existence de cavité(s), détermination de la géométrie et correction de l'effet microgravimétrique correspondant ;*
- Apex de Type 3b : anomalies situées en limite de zone d'investigation et d'origine inconnue > *Extension du levé microgravimétrique et mise à jour des résultats de cette étude pour nouvelle analyse.*

La mise en œuvre de ces recommandations devra être suivie d'une mise à jour des résultats présentés dans ce rapport et d'une analyse des nouveaux résultats obtenus pouvant conduire à l'émission de nouvelles préconisations. Cette stratégie itérative à vocation à éliminer progressivement toutes anomalies négatives persistantes associées à de possibles vides non connus.

Le présent rapport est complémentaire et indissociable du rapport RP-70005-FR qui synthétise l'ensemble de l'étude.

7. Bibliographie

AGAP. (1992). *Géophysique Appliquée - Code de bonne pratique*.

Dugrillon, D., & Portal, A. (2020). *Inventaire des cavités souterraines d'origine anthropique dans le centre-ville historique de Limoges (87). Rapport final. BRGM/RP-70005-FR*.

Jacob, T., Pannet, P., Beaubois, F., Baltassat, J. M., & Hannion, Y. (2020). Cavity detection using microgravity in a highly urbanized setting: A case study from Reims, France. *Journal of Applied Geophysics*, 179, 104113. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104113>

Lions, A., Delpont, G., Karnay, G., & Aubié, S. (2009). *Inventaire départemental des cavités souterraines hors mines de Haute Vienne - Rapport final. BRGM/RP-56808-FR, 71 p., 1 carte HT*.

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. <https://doi.org/10.1029/JZ064i012p02351>

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. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(95\)00126-3](https://doi.org/10.1016/0098-3004(95)00126-3)

Annexe 1

Principe de la microgravimétrie

La gravimétrie consiste à mesurer les variations de l'attraction de la pesanteur à la surface du sol due à l'inégale répartition des masses dans le sous-sol. Elle est la méthode la plus fréquemment utilisée pour détecter les vides, ces derniers se manifestant par une diminution de l'attraction ou anomalie gravimétrique négative. Dans ce cas où les variations mesurées sont très faibles, on parle alors de microgravimétrie.

La profondeur d'investigation varie de quelques mètres à quelques dizaines de mètres, en fonction de la taille, de la profondeur, et du contraste de densité des cibles recherchées. Très utilisée dans le domaine du génie civil pour la recherche de cavités et des désordres associés, la microgravimétrie est une méthode non destructive et légère. Elle n'est pas perturbée par les effets électromagnétiques environnants et peut être utilisée en milieu urbain ou industriel.

L'application de la microgravimétrie à la détection de cavités souterraines repose sur la mesure extrêmement précise des variations relatives de la gravité à la surface du sol. La mesure des variations de g se fait avec un gravimètre de terrain (Illustration A1.1).



Illustration A1.1 - Photo d'un gravimètre CG-5 sur son trépied bas (gauche) et d'un gravimètre CG-6 sur trépied bas et haut (droite).

Les anomalies gravimétriques attendues ont une amplitude généralement faible comparée à la précision des mesures qui, compte tenu des différentes causes d'erreur qui les affectent, peut être estimée à 0.05 à 0.010 mGal (1 mGal = 10^{-5} m/s²).

L'unité employée en microgravimétrie est le mGal (ou le μ Gal = 10^{-3} mGal). **1 mGal égal 10^{-5} m/s²**. Ainsi, à titre d'exemple, la valeur de la pesanteur normale $g = 9.80665$ m/s⁻² s'écrit également $g = 980,665$ Gal = 980665 mGal.

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 ;
- sa profondeur : le signal gravimétrique sera d'autant plus important que la cavité sera proche de la surface (Illustration A1.2) ;
- 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.

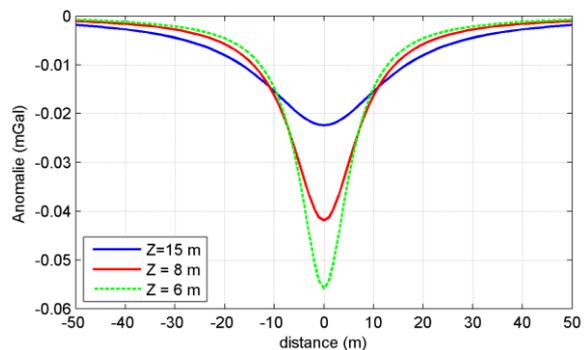


Illustration A1.2 – Exemple d'anomalies microgravimétriques dues à une galerie horizontale vide, de rayon égal à 2 m, située à l'abscisse 0 et aux profondeurs $Z=6$ m (vert), 8 m (rouge) et 15 m (bleu).

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 : 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.

Avant toute intervention, des tests numériques de détectabilité peuvent être réalisés, afin d'ajuster la géométrie des levés aux dimensions des cavités recherchés (Illustration A1.3).

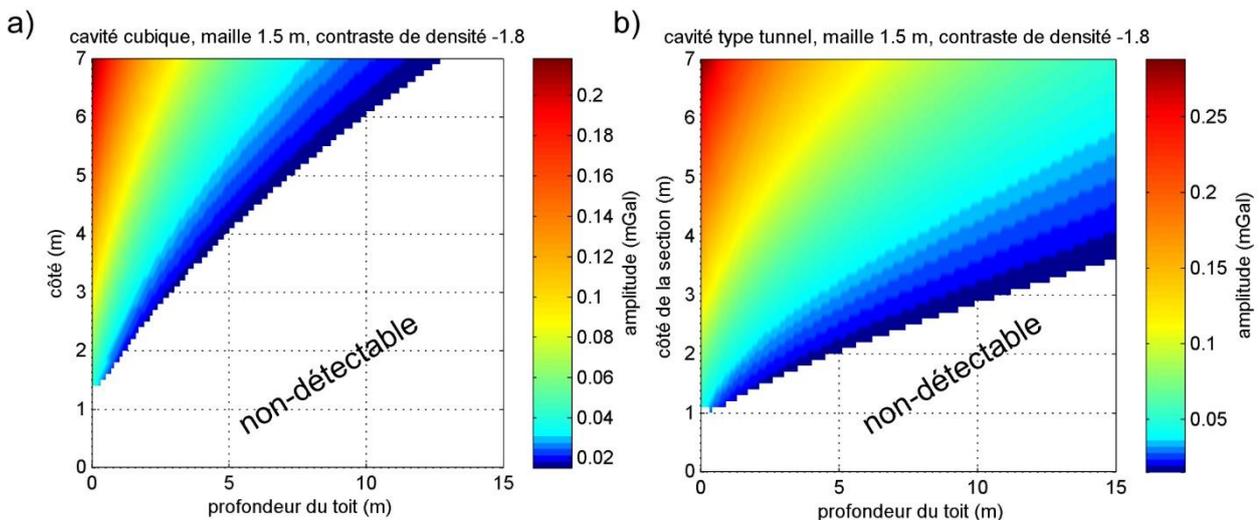


Illustration A1.3 : Exemple de diagramme de détectabilité en surface des cavités en fonction de leur dimension et de la profondeur de leur toit, pour une maille de mesure de 1.5 m. Les zones colorées représentent les régions où les cavités sont détectables, et le code couleur représente les amplitudes 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 -2 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.

Les mesures gravimétriques sont influencées par :

- l'altitude des stations - un nivellement des stations gravimétriques au cm est nécessaire pour corriger ces effets ;
- la latitude des stations – un positionnement planimétrique des stations à 0.1 m est nécessaire pour corriger ces effets
- la topographie – un relevé de la topographie aux alentours de chaque station permet de corriger ces effets ;
- en milieu urbain, par les bâtiments et les caves, qui représentent des excès et des déficits de masses.

La correction des effets précités permet d'obtenir l'anomalie de Bouguer, qui est fonction de l'ensemble des contrastes de densités sous la surface topographique :

- contrastes de densités profonds, liés à la structure géologique de la zone d'étude ;
- contrastes de densités superficiels, liés aux désordres recherchés tels les cavités.

Les effets profonds sont soustraits de l'anomalie de Bouguer pour obtenir l'anomalie résiduelle, représentative des contrastes de densités superficiels (Illustration A1.4). La carte d'anomalie résiduelle permet ainsi de cartographier les objets recherchés, telles les cavités.

L'interprétation finale sera d'autant plus fiable que les mesures auront été réalisées selon un protocole soigné, permettant en particulier de limiter l'influence des vibrations urbaines ou industrielles, et que les éléments perturbateurs auront pu être inventoriés et corrigés. Ces corrections devront être d'autant plus précises que les vides recherchés sont petits et profonds. L'interprétation d'anomalies gravimétriques n'est jamais univoque : une même anomalie peut être générée par un vide profond de grande dimension, ou par un vide peu profond mais ayant une plus grande emprise que le vide profond avec une hauteur moindre (Illustration A1.5). Ainsi, des sondages de contrôle sont systématiquement proposés pour vérifier les anomalies gravimétriques et lever les ambiguïtés d'interprétation, notamment concernant la profondeur du toit de la cavité.

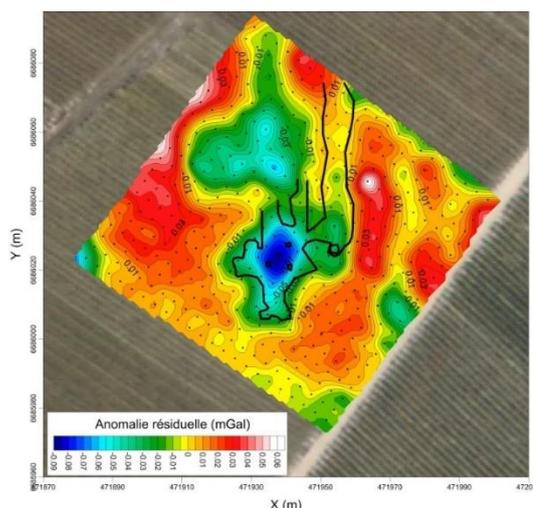


Illustration A1.4 - Anomalie résiduelle à l'aplomb d'une ancienne carrière dont l'emprise a été partiellement levée (traits noirs).

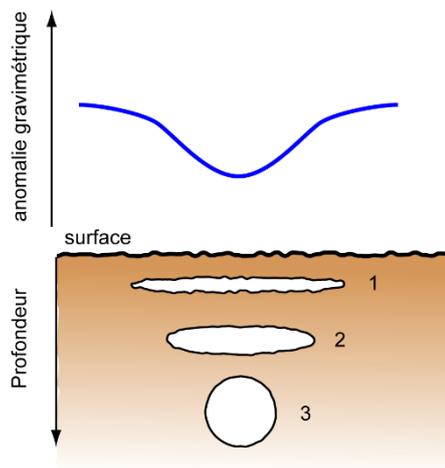


Illustration A1.5 - Une même anomalie gravimétrique (courbe bleue) peut être générée par les cavités 1, 2 ou 3.

Annexe 2

Caractéristiques des sondages de contrôle

Des sondages de contrôle sont préconisés pour déterminer l'origine de certaines anomalies gravimétriques. Ces sondages sont positionnés aux apex négatifs des anomalies.

Pour une anomalie donnée, un site de sondage est implanté. Pour chaque site, la réalisation d'un à deux sondages est recommandée. En effet, les apex microgravimétriques négatifs ne sont pas nécessairement situés au droit des vides. Par conséquent, un sondage au droit d'un apex peut ne pas rencontrer de vide. Dans ce cas, un second sondage doit être réalisé. Sa position sera alors déterminée conjointement par le maître d'œuvre du sondage et le BRGM, en fonction des résultats du premier sondage et des caractéristiques de l'anomalie concernée.

Les sondages sont à réaliser selon les paramètres suivants :

- 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) ;
- analyse des cuttings.

La profondeur des sondages de reconnaissance est fixée à 10 m. Lors du sondage, si une/plusieurs cavité(s) souterraine(s), vide(s) ou noyée(s), est/sont découverte(s), elle(s) devra/devront faire l'objet d'une investigation par caméra et laser (pas d'eau dans la cavité) ou sonar (présence d'eau) dans le but de visualiser en direct la géométrie du/des vide(s) et d'en mesurer les dimensions. Ces investigations en forage viseront également à localiser d'éventuels accès aux cavités afin d'en permettre une exploration détaillée en vue de la correction de leur effet microgravimétrique sur les données.

L'implantation précise des sondages sur le terrain nécessite un moyen de positionnement avec une précision meilleure que 0,5 m, par exemple un GPS avec correction différentielle en temps réel, et **ne doit en aucun cas être faite à partir de la lecture seule des cartes présentées dans ce rapport.**

Annexe 3

Coordonnées des apex faisant l'objet d'une recommandation de sondages

ID	X	Y	Priorité
165	565370.0	6526917.5	1
183	565022.5	6527139.5	1
497	565107.5	6527056.5	1
526	565427.5	6526997.5	1
565	564855.5	6527211.0	1
610	564802.0	6527235.5	1
614	565379.0	6526923.0	1
824	564992.0	6527033.5	1
846	565255.0	6526976.5	1
848	565398.5	6526951.5	1
849	565414.0	6526965.0	1
863	565063.0	6526875.0	1
866	565101.0	6526716.0	1
872	565115.5	6526754.5	1
888	565112.0	6526639.5	1
901	564794.5	6527303.5	1
942	565004.0	6527015.0	1
945	565321.0	6527109.0	1
971	565320.5	6526969.0	1
978	564998.5	6527016.5	1
980	565068.5	6526869.5	1
988	565393.0	6526693.5	1
992	564989.5	6527121.0	1
1006	564928.5	6527128.5	1
1008	565325.5	6527114.0	1
1012	565409.0	6526987.0	1
1014	565127.0	6526661.5	1
1019	565108.0	6526635.0	1
1022	564804.0	6527305.0	1
1032	565256.5	6526983.5	1
1033	565313.5	6526794.5	1
1037	564806.5	6527299.0	1
1040	565313.0	6527103.0	1
1048	565094.0	6527072.5	1
1051	564489.0	6527075.0	1
1013	564792.0	6526863.0	2
1023	564726.5	6527105.0	2
1049	564892.0	6526889.5	2
1062	564907.0	6526909.0	2
1072	564825.0	6526927.5	2

Annexe 4

Procédure de levé des caves souterraines pour la correction de leur effet sur les données microgravimétriques

L'effet microgravimétrique d'un vide anthropique de type cave d'habitation peut être corrigé grâce à des codes de traitement développés au BRGM (Jacob et al., 2020). Pour cela, la cave est numériquement modélisée par un parallélépipède rectangle. Cette correction nécessite de connaître la géométrie de la/des cave(s) dont l'effet doit être corrigé. Plus particulièrement, il s'agit d'obtenir :

- L'emprise au sol géoréférencée de la cave (Illustration A3.1, vue de dessus) ;
- La hauteur de vide ;
- L'altitude du toit de la cave.

La modélisation de caves à géométrie et/ou agencement complexe (plusieurs niveaux, plusieurs salles, recouvrement d'une cave sur l'autre...) nécessite de les subdiviser en sous-entités distinctes (*i.e.* polygones), pour lesquelles les paramètres géométriques décrits ci-dessus devront être connus (Illustration A3.1).

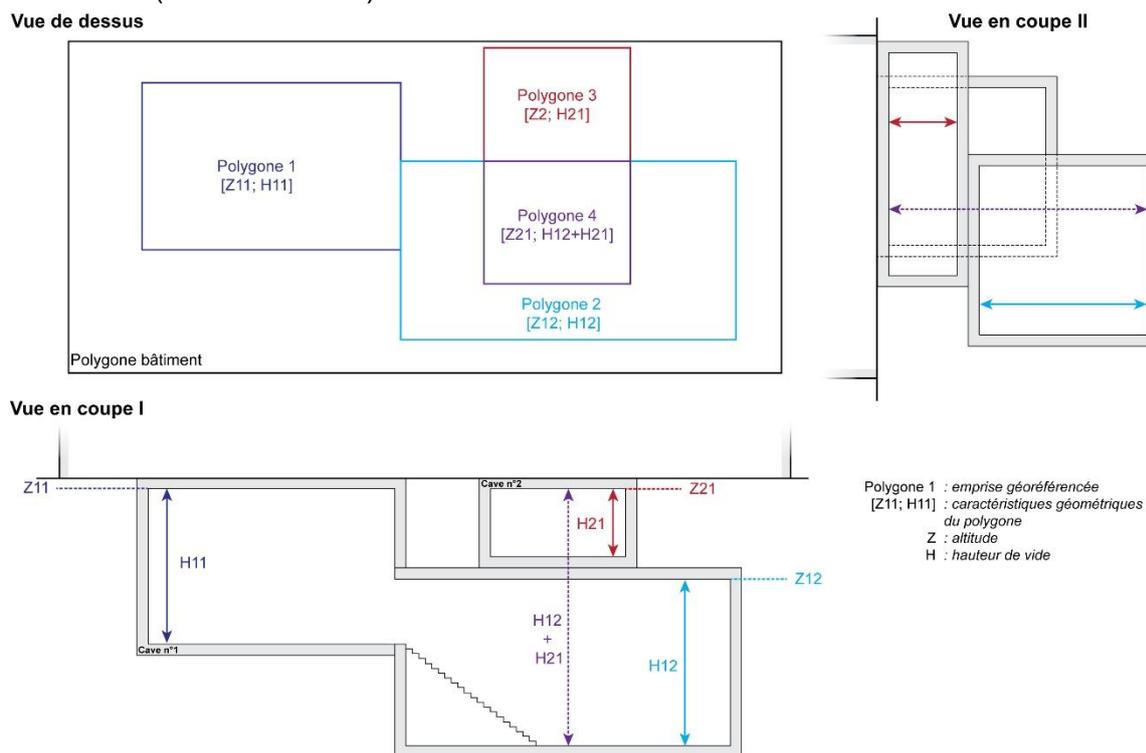


Illustration A3.1 - Schéma de deux caves à géométrie et agencement complexes, représentées en vue de dessus (emprise) et en coupes verticales. La cave n°1 est subdivisée en deux sous-entités (1 bleu foncé et 1 bleu clair). La cave n°2 recouvre en partie la partie basse de la cave n°1, cet agencement nécessite la création d'une quatrième polygone dont la hauteur de vide est égale à la somme des hauteurs de chaque caves..

Les levés de caves peuvent être réalisés manuellement (GPS + télémètre laser) ou grâce à un scanner laser rotatif.



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