



Recherche des vides par microgravimétrie dans le quartier de l'Hôtel de Ville à Reims (51)

Rapport final

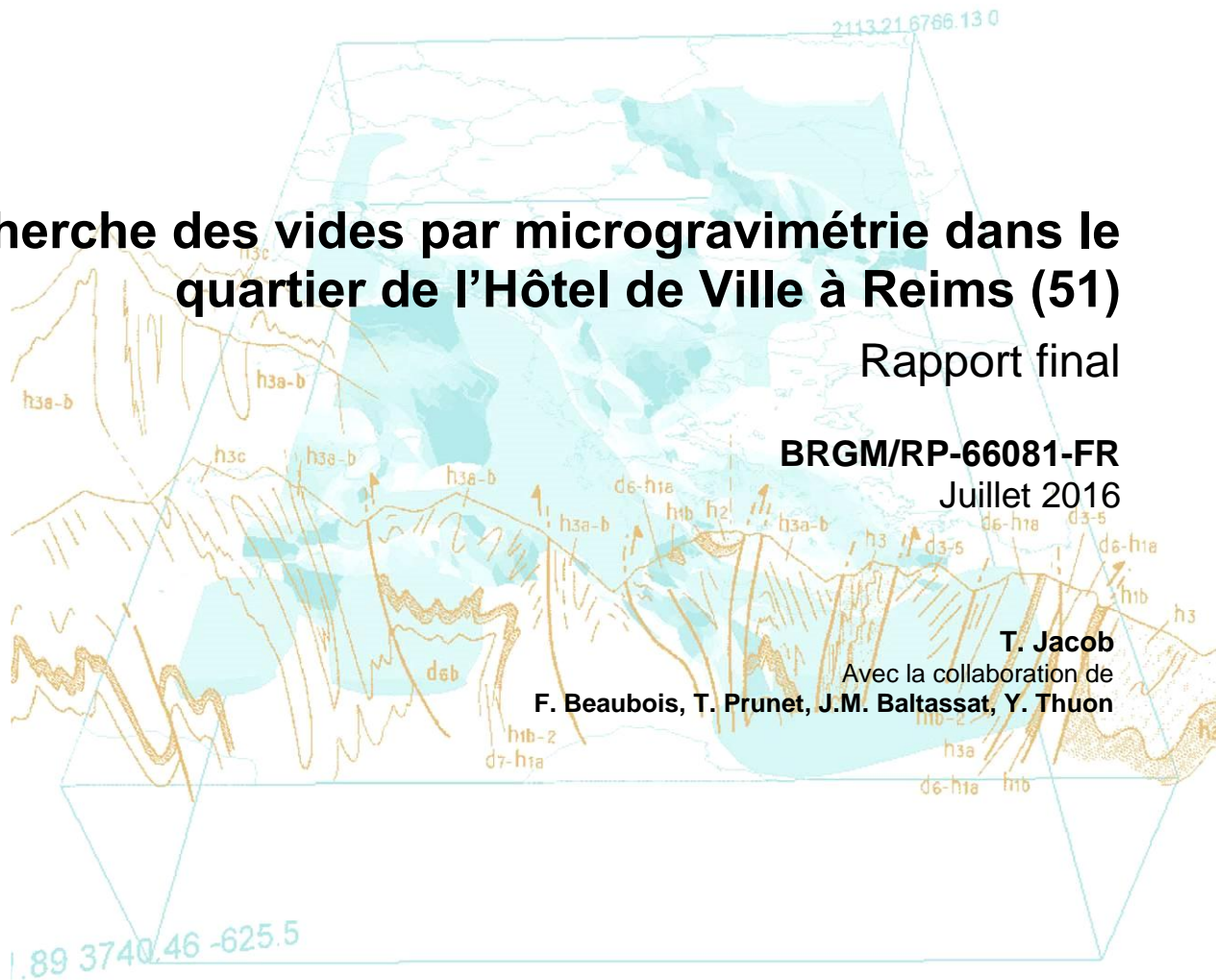
BRGM/RP-66081-FR

Juillet 2016

T. Jacob

Avec la collaboration de

F. Beaubois, T. Prunet, J.M. Baltassat, Y. Thuon



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Recherche des vides par microgravimétrie dans le quartier de l'Hôtel de Ville à Reims (51)

Rapport final

BRGM/RP-66081-FR
Juillet 2016

T. Jacob

Avec la collaboration de
F. Beaubois, T. Prunet, J.M. Baltassat, Y. Thuon


Vérificateur :

Nom : F. Lebert

Fonction : Géophysicien

Date : 27/07/2016

Signature :



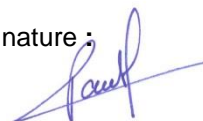
Approbateur :

Nom : P. Pannet

Fonction : directeur régional

Date : 28/07/2016

Signature :



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

Mots clés : microgravimétrie, cavité, Reims.

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

Jacob T. (2016) – Recherche des vides par microgravimétrie dans le quartier de l'Hôtel de Ville à Reims - Rapport BRGM/RC- 66081-FR, 25 p., 8 ill., 2 tabl.

© BRGM, 2016 ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

A la suite d'affaissements survenus en juin 2016 près de la Place de l'Hôtel de Ville de Reims (51), dans la rue du Docteur Jacquin, le BRGM a été sollicité par la Mairie de Reims pour déceler la présence d'éventuelles cavités sur l'emprise de la voirie dans les environs de la dite place.

Une campagne de microgravimétrie, comprenant 257 stations, a été menée sur la voirie proche de l'Hôtel de Ville à Reims (51), afin de détecter la présence d'éventuelles anomalies liées à des cavités.

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

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

Sur la base de ces résultats, le BRGM préconise d'effectuer 9 forages jusqu'à une profondeur de 15 m, pour lever les ambiguïtés d'interprétation.

Sommaire

1. Problématique et objet de l'étude	6
2. Mesures, moyens mis en œuvre et traitements	6
2.1. IMPLANTATION.....	6
2.2. MATERIEL ET MODE OPERATOIRE	7
2.3. REDUCTION DES DONNEES VERS L'ANOMALIE DE BOUGUER	9
2.4. PRECISION DE L'ANOMALIE DE BOUGUER.....	12
3. Résultats.....	16
3.1. ANOMALIE DE BOUGUER ET ANOMALIE REGIONALE.....	16
3.2. ANOMALIE RESIDUELLE.....	19
4. Recommandations et limites de la méthode	22
5. Conclusion.....	24

Liste des illustrations

Illustration 1 : Topographie de la zone d'étude (m) montrant les stations gravimétriques (points blancs). L'affaissement est marqué par un carré jaune.....	8
Illustration 2 corrections (mGal) liées à l'effet des murs des bâtiments (polygones bleues) et des caves (polygones verts), à apporter aux valeurs de l'anomalie de Bouguer. Les valeurs sont notées au dessus de chaque station.	11
Illustration 3 :Histogramme des valeurs absolues des écarts de reprises et pourcentage cumulé	13
Illustration 4 : carte du seuil de signification de l'étude.....	15
Illustration 5 : Anomalie de Bouguer pour une densité de 2. Les courbes d'isovaleur sont tous les 0.010 mGal.....	17
Illustration 6 : Anomalie régionale (mGal).....	18
Illustration 7 : Anomalie résiduelle. Les anomalies négatives significatives sont entourées par un trait discontinu. Les anomalies décelées sont numérotées de A1 à A8.....	21
Illustration 8 : Implantation de forages préconisés sur l'anomalie résiduelle.	23

1. Problématique et objet de l'étude

A la suite d'affaissements survenus en juin 2016 près de la Place de l'Hôtel de Ville de Reims (51), dans la rue du Docteur Jacquin, le BRGM a été sollicité par la Mairie de Reims pour déceler la présence d'éventuelles cavités sur l'emprise de la voirie dans les environs de la dite place.

Le contexte géologique est le suivant, de la surface vers la profondeur:

- Remblais sur une épaisseur variable inférieure à 10 m
- Craie de Reims du Campanien inférieur

L'origine des cavités recherchées est anthropique : les affaissements ont été reliés à la présence d'anciennes caves.

Une campagne de microgravimétrie sur la voirie en proximité immédiate des désordres, comprenant 257 stations, a été menée afin de détecter la présence d'éventuelles anomalies liées à des cavités.

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

Le présent rapport présente la mise en œuvre, le traitement et les résultats de la microgravimétrie, et une préconisation d'implantation de sondages.

2. Mesures, moyens mis en œuvre et traitements

2.1. IMPLANTATION

257 stations gravimétriques ont été implantées, nivelées et mesurées en gravimétrie sur la zone d'étude (Illustration 1) à la maille de 5 x 5 m. La voirie concernée correspond aux rues suivantes :

- rue du Docteur Jacquin
- rue de l'Arbalète
- place de l'Hôtel de Ville
- rue de Pouilly
- rue Salin
- place du Forum

Florent Beaubois et Thomas Prunet, techniciens en géophysique, ont réalisé l'ensemble des mesures entre le 28 juin et le 2 juillet 2016. Ils ont été assistés par J.M. Baltassat, ingénieur géophysicien, en début d'opération.

Une station totale Trimble S7 a été utilisée pour déterminer l'altimétrie et le positionnement relatif des points, et un GPS différentiel Trimble GeoXH6000 a été utilisé pour le recalage de l'étude dans le référentiel Lambert 93. Ce recalage a été effectué par l'obtention de coordonnées, précises à 10 cm, de deux stations de base topographique (utilisées pour la mise en station de la station totale) par des mesures

d'au moins 20 minutes au GPS différentiel sur chaque station. Le positionnement des stations et la topographie de la zone d'étude sont présentés à l'illustration 1.

2.2. MATERIEL ET MODE OPERATOIRE

Un gravimètre relatif de terrain Scintrex CG-3 a été utilisé pour effectuer les mesures gravimétriques. Le coefficient de calibration du gravimètre a été pris à 1.00000, au regard de la faible amplitude de variation de la valeur de g sur la zone, de l'ordre de 0.270 mGal, due aux faibles dénivelés sur le site.

Une base gravimétrique unique a été utilisée pour l'ensemble du levé.

L'ensemble des mesures gravimétriques a été effectué en 21 programmes dont la durée de chacun d'entre eux n'a pas excédé 1h00. Un programme de mesures, pendant lequel 15 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 avec le temps.

Le mode d'acquisition du gravimètre utilisé a été le suivant :

- 3 à 5 mesures de 60 s à la base
- 1 mesure de 60 s à chaque station

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 été systématiquement réalisée. De même, si l'inclinaison de l'instrument dépassait +/- 10 arcs sur la composante X ou Y, une nouvelle mesure a été systématiquement réalisée, avec des inclinaisons réajustées inférieures à +/- 10 arcs.

71 stations gravimétriques ont été reprises au moins une fois, totalisant 28 % de stations reprises.

La hauteur du gravimètre a été systématiquement mesurée avec un mètre ruban, et cette hauteur a été utilisée pour projeter au sol les valeurs de g en utilisant un gradient vertical usuel de $0.3086 \text{ mGal m}^{-1}$.

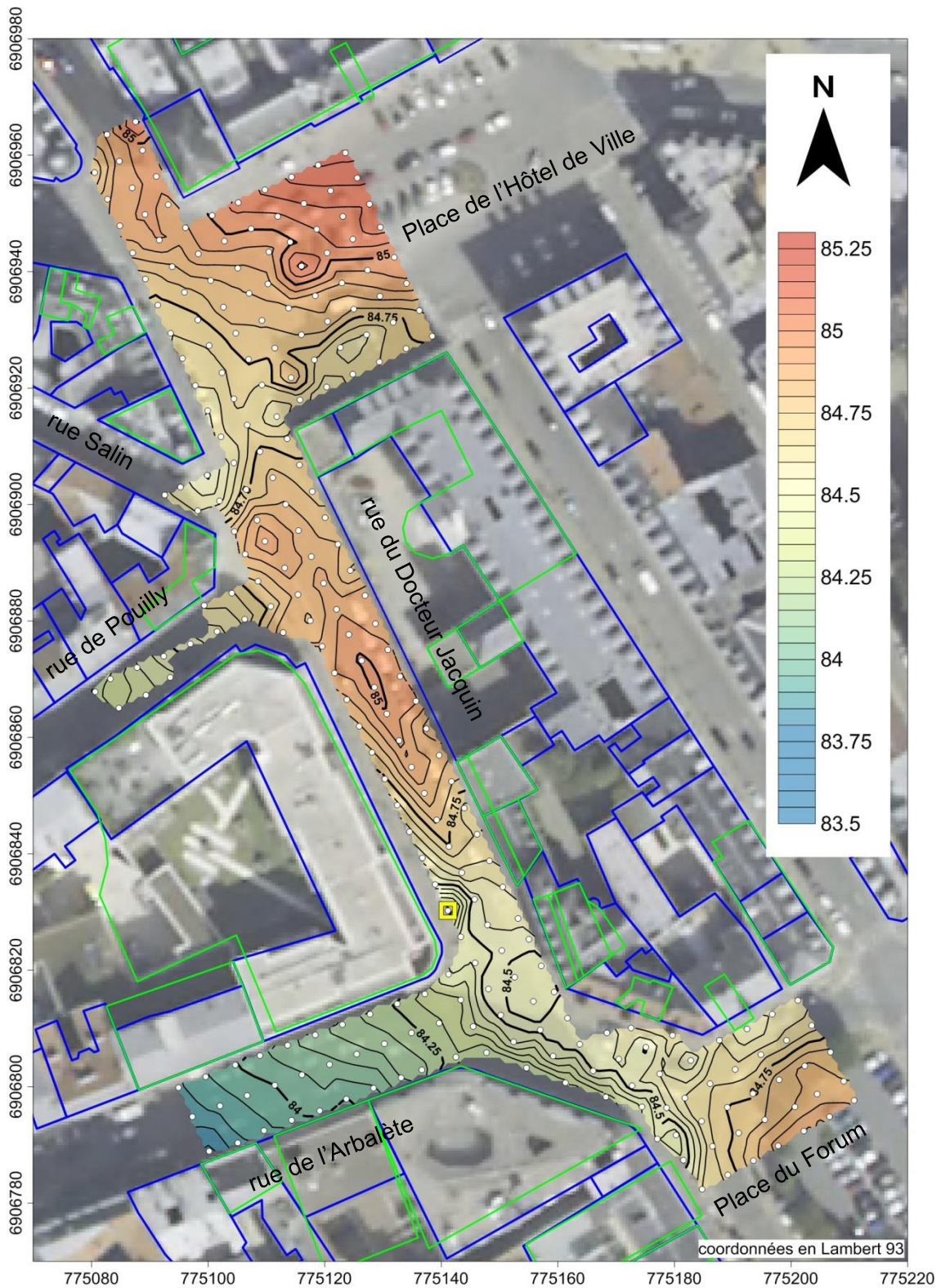


Illustration 1 : Topographie de la zone d'étude (m) montrant les stations gravimétriques (points blancs). L'effondrement est marqué par un carré jaune.

2.3. REDUCTION DES DONNEES VERS L'ANOMALIE DE BOUGUER

L'ensemble du traitement des données a été réalisé par Thomas Jacob, 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 relative à la structure du sous-sol. L'anomalie de Bouguer est une anomalie gravimétrique rendant compte de l'ensemble des variations de densité sous la surface topographique.

Les réductions de données suivantes sont à réaliser pour obtenir l'anomalie de Bouguer:

- 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,
- retrait du g théorique (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,
- corrections de relief (correction de plateau + corrections de terrain), pour compenser l'effet des reliefs à proximité des points de mesures,
- corrections des effets des structures anthropiques (murs des bâtiments et caves).

L'anomalie de Bouguer A_B s'exprime ainsi:

$$A_B = g_{mes} - g_{th} + (dg/dz) h - 2\pi G\rho_b h + \rho_b T + T_A \quad (\text{eq. 1})$$

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 '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.

La densité de réduction de l'anomalie de Bouguer a été prise égale à 2. Cette valeur est typique de celle des sables et remblais présents dans les premiers mètres.

Aucune correction de terrain n'a été effectuée, du fait de la nature plane du terrain : l'amplitude du dénivelé n'est que de ~1.3 m sur l'ensemble de la zone.

Les corrections de bâtiments ont été effectuées à partir de l'emprise des bâtiments (traits bleus sur les figures), donnée par le cadastre. La hauteur et l'épaisseur des murs ont été estimées sur le terrain. La densité des murs a été prise à 1.8. Les caves

des habitations et autres structures anthropiques de type parking souterrain (traits verts sur les figures) ont été relevés, et leur effet corrigé.

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, celles-ci sont discrétisées en lignes de masses équivalentes à un pas de 0.1 m, et leur effet calculé sur les stations. Les caves et parkings souterrains ont été modélisés par la méthode de calcul d'un prisme plat à section polygonale.

La somme des corrections liées aux murs des bâtiments et aux structures souterraines est illustrée dans la figure suivante. Celle-ci varie de 0.005 à 0.214 mGal, les plus fortes valeurs correspondant aux mesures autour d'un parking souterrain d'une profondeur de 12 m (Illustration 2), situé rue du Docteur Jacquin entre les rues de Pouilly et de l'Arbalète.

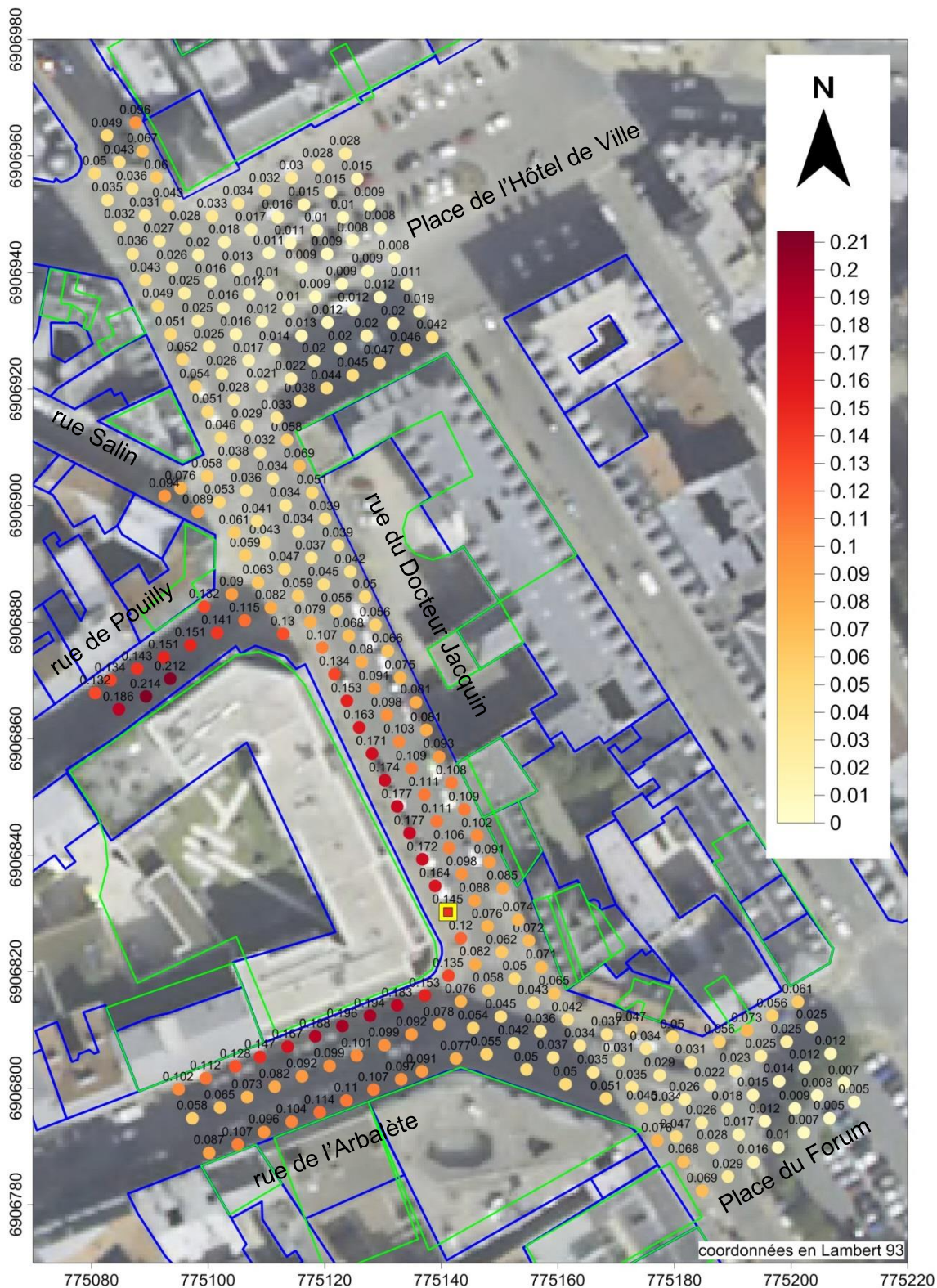


Illustration 2 corrections (mGal) liées à l'effet des murs des bâtiments (polygones bleus) et des caves (polygones verts), à apporter aux valeurs de l'anomalie de Bouguer. Les valeurs sont notées au dessus de chaque station.

2.4. 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, 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 l'étude.

Les reprises peuvent être aléatoires, pour obtenir la précision d'un levé, ou ciblées, pour vérifier une anomalie décelée, ou une mesure douteuse. L'histogramme des valeurs absolues de ces écarts (Illustration 3) 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.

71 stations ont été reprises une fois, et 15 stations ont été reprises deux fois. Le pourcentage de stations reprises est de 28%. Les 15 stations reprises deux fois concernent des reprises ciblées : ces stations présentaient des écarts supérieurs 0.020 mGal – la deuxième reprise a permis d'éliminer la mesure aberrante, et ces valeurs ne figurent pas dans l'histogramme des reprises.

L'erreur associée à la mesure de g est estimée à 0.011 mGal (Illustration 3), selon la méthode décrite précédemment.

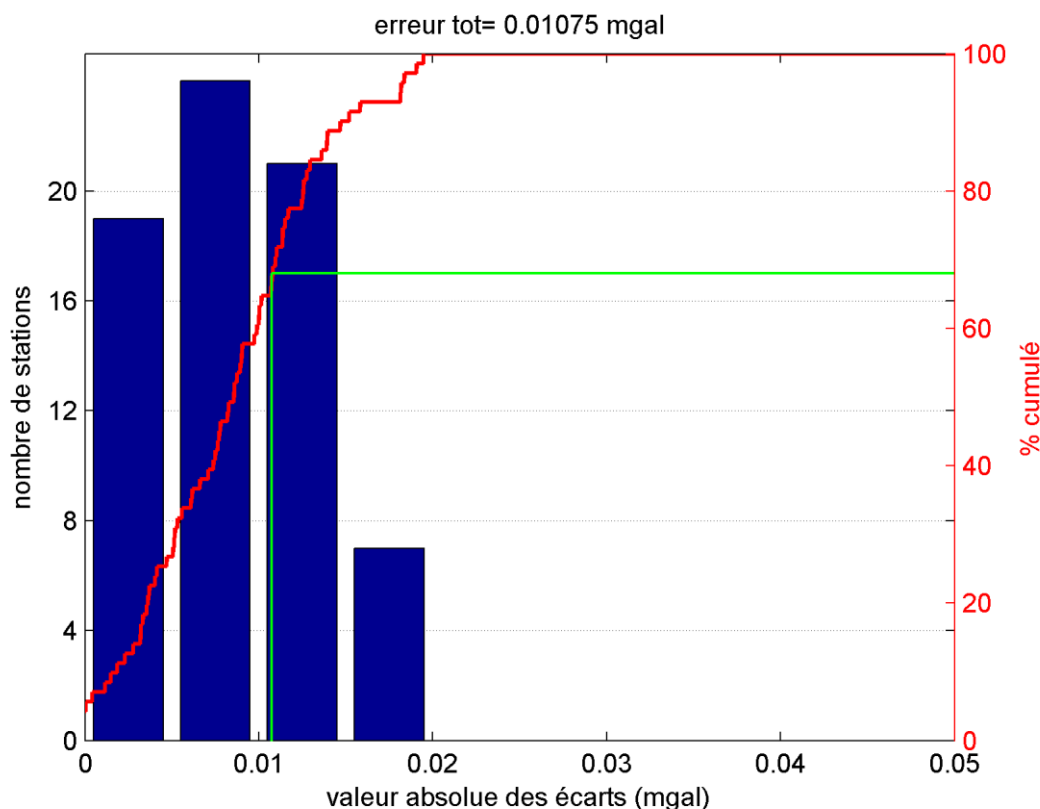


Illustration 3 : Histogramme des valeurs absolues des écarts de reprises et pourcentage cumulé

• **Erreur sur l'altitude (ϵ_z)**

On estime à 1 cm 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.

• **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 et des caves (ϵ_{CT_TA})**

De manière empirique, l'erreur sur l'effet des bâtiments et des caves 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 des murs, hauteurs des murs et des caves, positionnement des murs et des caves.

Cette erreur varie spatialement : les stations présentant des fortes corrections, typiquement celles proches des bâtiments et des caves, auront une erreur supérieure à celles situées loin des bâtiments et des caves. Dans le cas présent, cette erreur peut atteindre 0.040 mGal pour les stations présentant les plus fortes corrections, autour du parking souterrain rue du Docteur Jacquin.

- 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 des caves, qui présente une contribution dominante dans le bilan d'erreur. L'allure de cette erreur est donnée à l'illustration 4 (les valeurs sont à un facteur 2 près, voir section suivante).

- Seuil de signification

On définit le seuil de signification de l'étude comme étant deux fois l'erreur totale sur l'anomalie de Bouguer de l'étude, ce seuil de signification varie spatialement et est présenté à l'illustration 4. Le seuil de signification varie de 0.022 mGal à 0.089 mGal, les zones de forte erreur sont situées autour du parking souterrain rue du Docteur Jacquin.

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

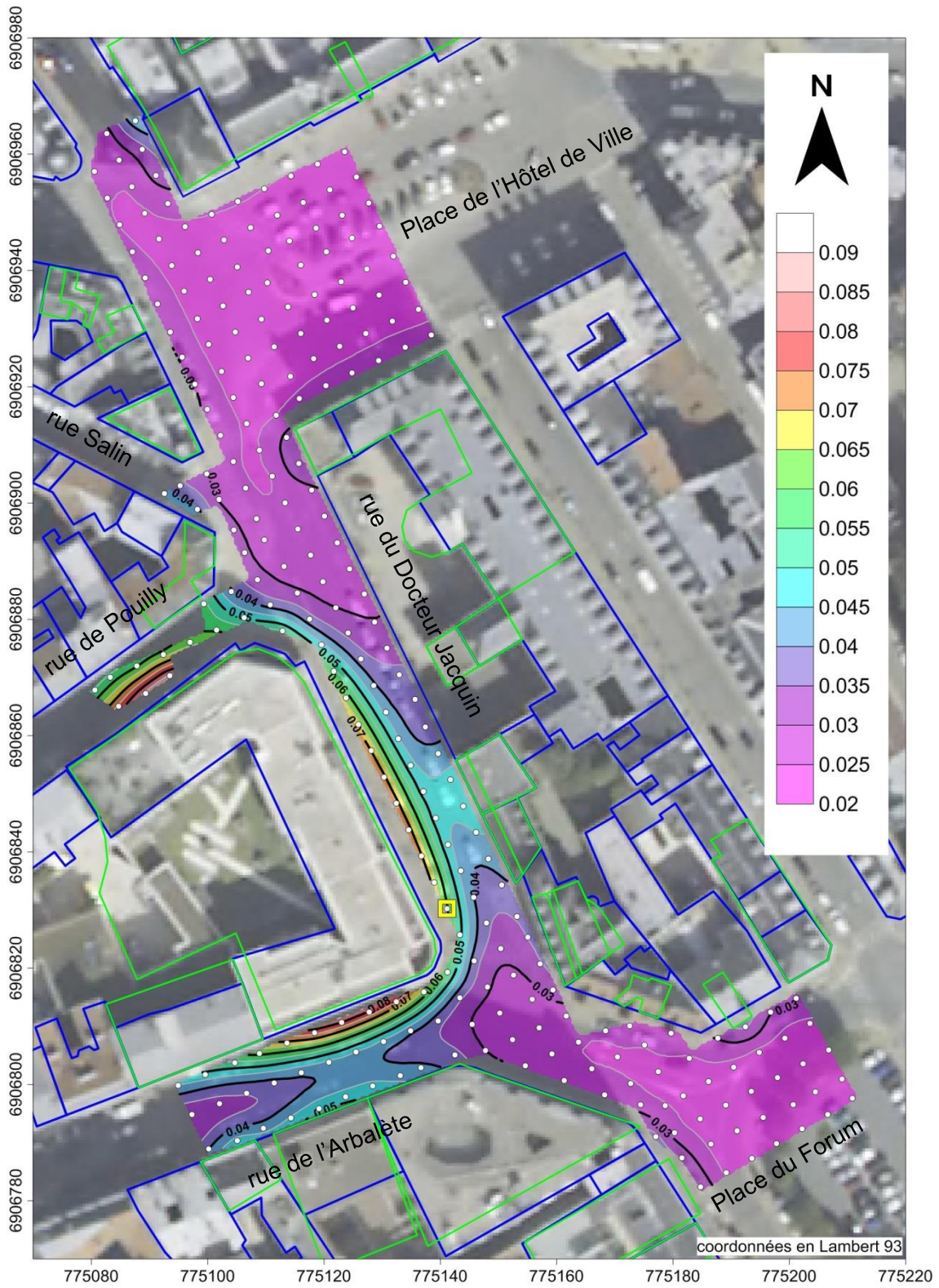


Illustration 4 : carte du seuil de signification de l'étude.

3. Résultats

3.1. 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 à l'illustration 5. La carte présente une dynamique de 0.110 mGal comprenant des valeurs élevées au Nord-Ouest (teintes rouges), diminuant vers le Sud-Est pour atteindre des valeurs plus faibles (teintes bleues). Une anomalie négative est dès lors visible sur la place de l'hôtel de ville.

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 6, est obtenue par ajustement d'un polynôme de bas degré à l'anomalie de Bouguer, sa caractéristique dominante étant le gradient NW-SE.

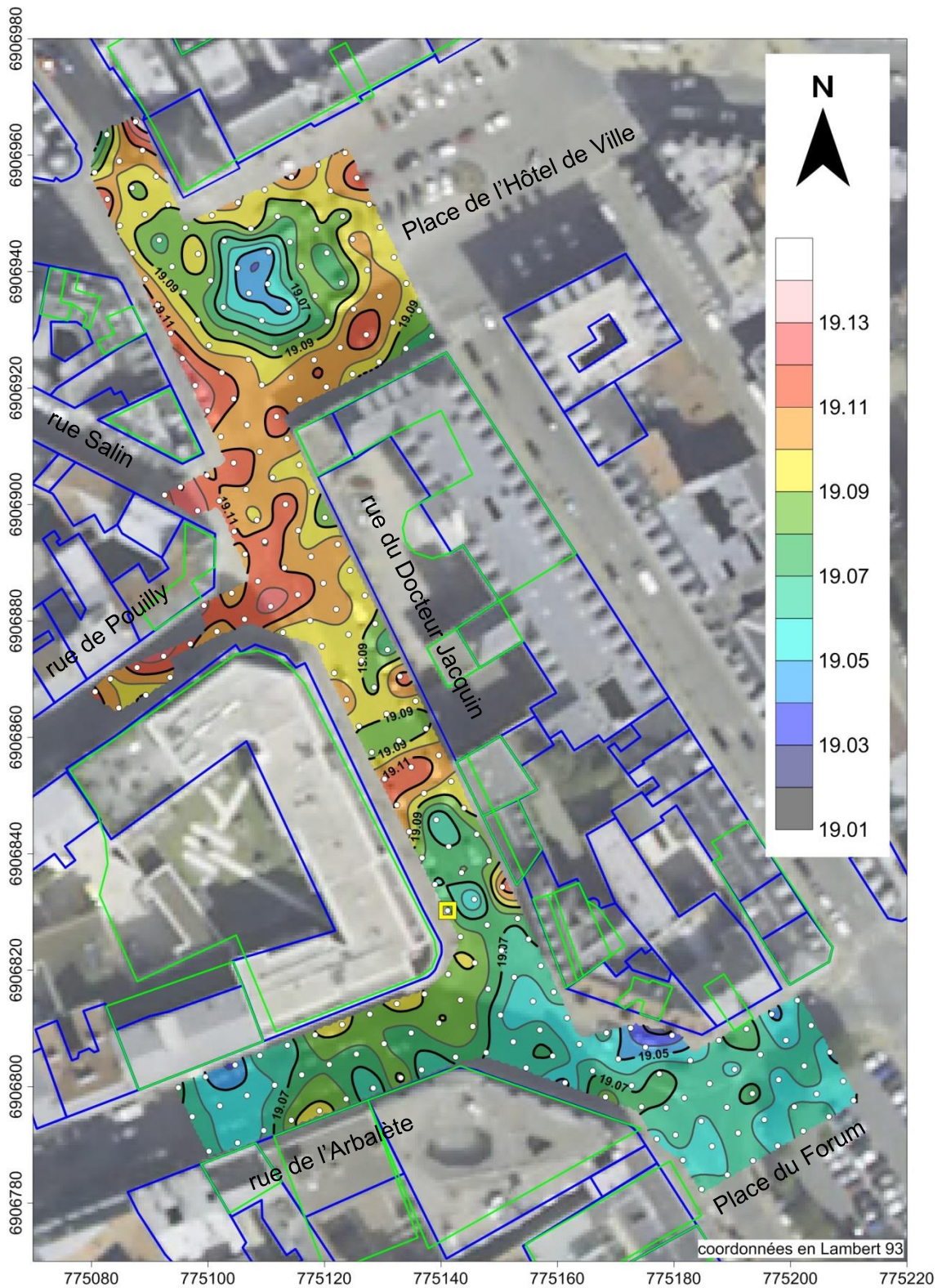


Illustration 5 : Anomalie de Bouguer pour une densité de 2. Les courbes d'isovaleur sont tous les 0.010 mGal

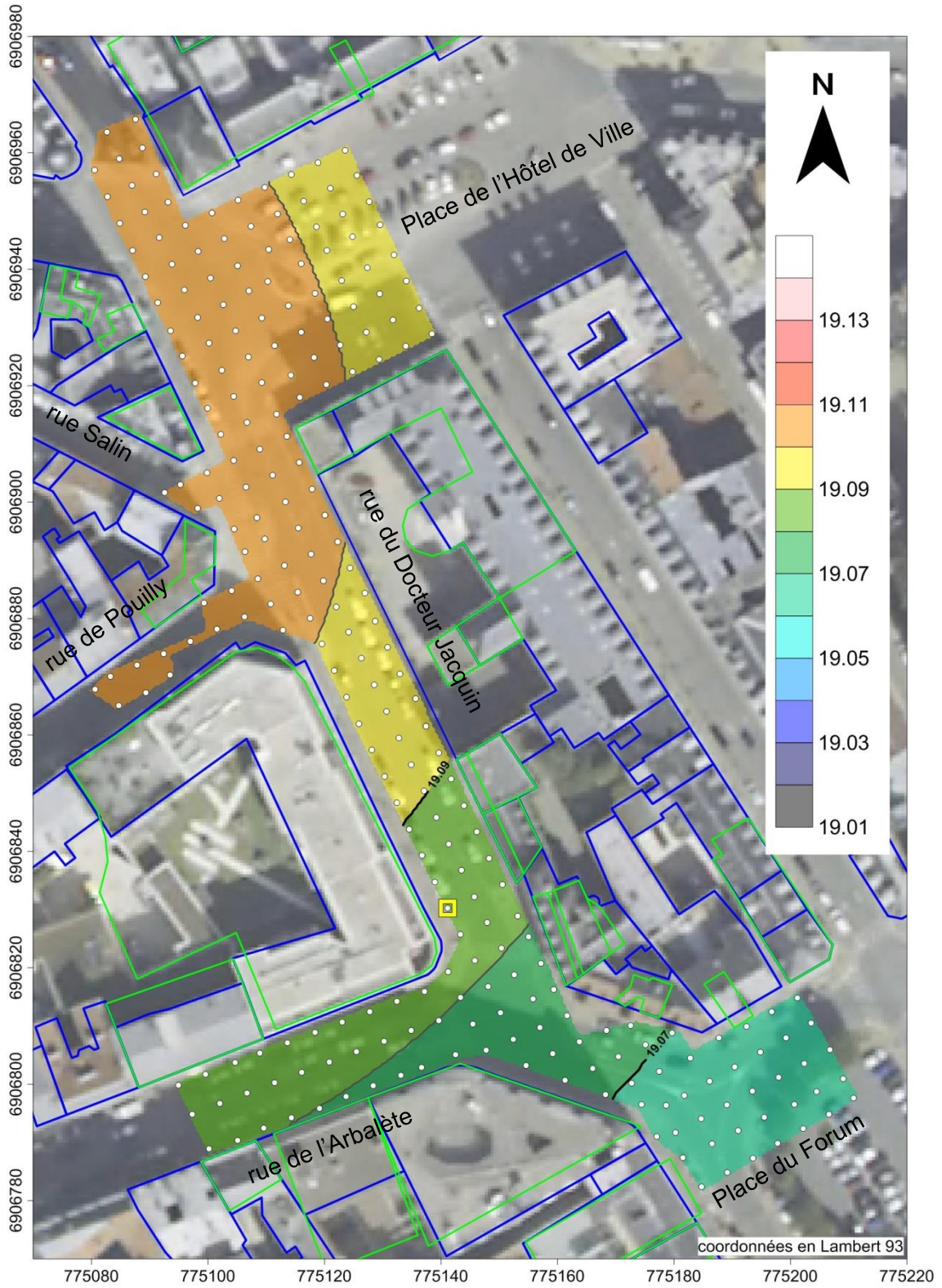


Illustration 6 : Anomalie régionale (mGal)

3.2. ANOMALIE RESIDUELLE

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 7

L'anomalie résiduelle a une dynamique de 0.09 mgal, variant de -0.06 mgal à 0.030 mGal.

Les anomalies positives ne feront pas l'objet d'une analyse détaillée, car elles marquent les excès de masse, qui ne sont pas l'objet de cette étude.

On dénombre quatre anomalies négatives dont l'amplitude est supérieure au seuil de signification, affectant au moins 2 stations contiguës, numérotées de A1 à A4 (Illustration 7 et Tableau 1). L'anomalie A1 est retenue bien que n'incluant qu'une seule station dont l'amplitude est supérieure au seuil de signification.

Nous retenons les anomalies A5 à A8, dont l'amplitude est inférieure au seuil de signification, du fait de leur proximité immédiate à l'effondrement et du fait que leur amplitude est supérieure à 0.020 mGal. Le seuil de signification est particulièrement élevé là où sont présentes les anomalies A5, A6 et A8 ; à cause des fortes corrections liées au parking souterrain.

Anomalies	Nombre de stations affectées	Amplitude maximale (mGal)	Description / commentaires
A1	7	0.061	Forte amplitude, forte extension, circonscrite. *
A2	1	0.026	Faible amplitude, faible extension, circonscrite.
A3	2	0.025	Faible amplitude, faible extension, circonscrite.
A4	3	0.040	moyenne amplitude, moyenne extension, non-circonscrite.
A5	1	0.026	Faible amplitude, faible extension, quasi-circonscrite.
A6	1	0.032	Faible amplitude, faible extension, quasi-circonscrite.
A7	1	0.025	faible amplitude, moyenne extension, quasi-circonscrite.

A8	6	0.044	moyenne amplitude, forte extension, non-circonscrite.
----	---	-------	---

Tableau 1 : récapitulatif des anomalies négatives décelées

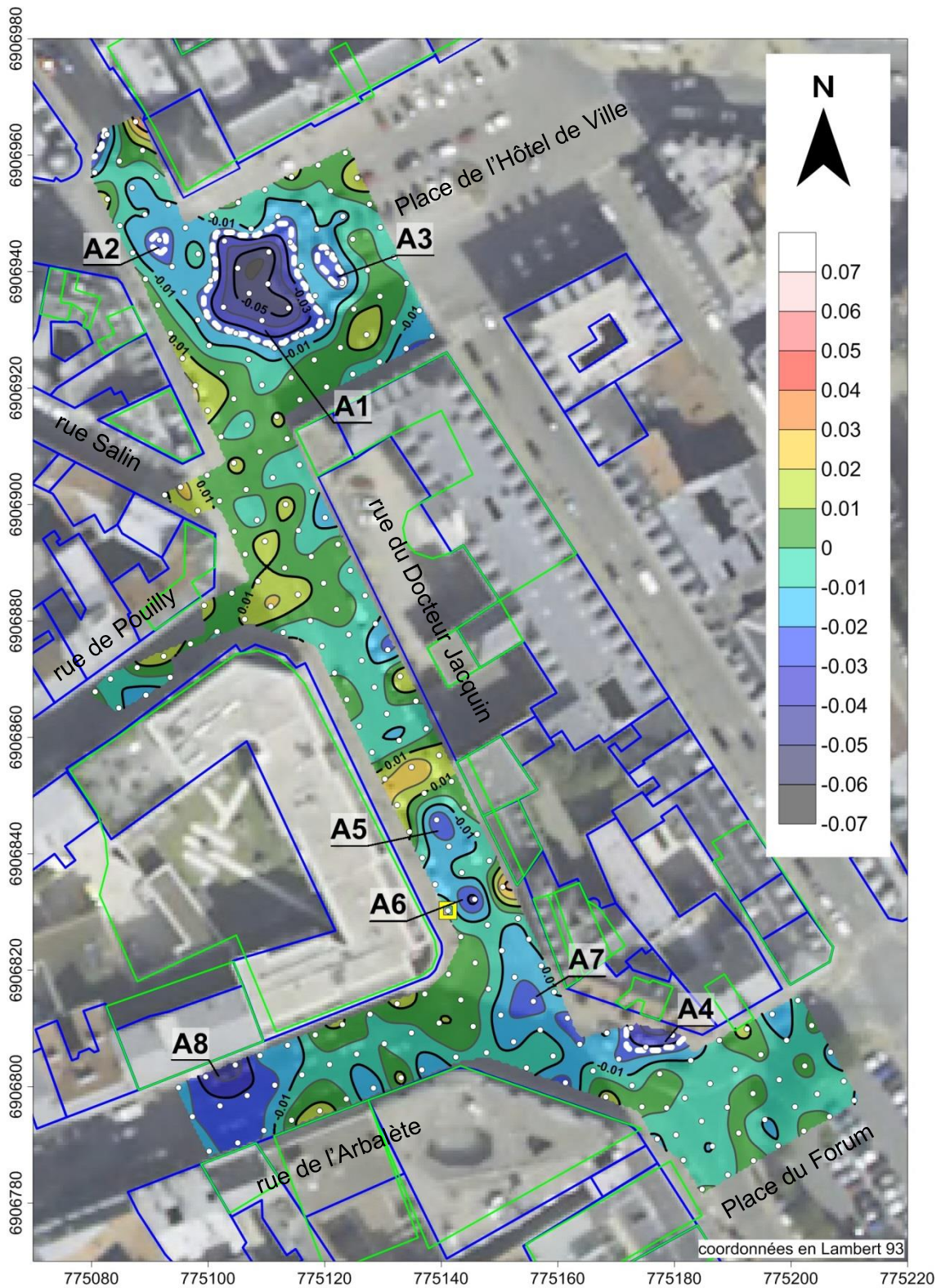


Illustration 7 : Anomalie résiduelle. Les anomalies négatives significatives sont entourées par un trait discontinu. Les anomalies décelées sont numérotées de A1 à A8.

4. Recommandations et limites de la méthode

Les anomalies négatives décelées ne peuvent être interprétées de manière univoque, sans informations complémentaires fournies par d'autres méthodes géophysiques et/ou des données de sondages mécaniques. Elles peuvent correspondre:

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

Pour lever les ambiguïtés d'interprétation, il est préconisé d'effectuer des sondages de contrôle au niveau des zones caractérisées par des anomalies négatives significatives décelées, jusqu'à une profondeur atteignant 15 m.

Un total de 9 sondages est préconisé (Tableau 2 et Illustration 8), dont 7 sont classés en priorité 1, et 2 en priorité 2.

sondage	X L93	Y L93	justification	priorité
F1	775107.5	6906940.7	anomalie A1	P1
F2	775111.7	6906934.0	anomalie A1	P1
F3	775120.9	6906940.9	anomalie A3	P1
F4	775091.5	6906944.7	anomalie A2	P1
F5	775139.9	6906844.9	anomalie A5	P1
F6	775145.0	6906832.0	anomalie A6	P1
F7	775155.5	6906814.4	anomalie A7	P1
F8	775175.7	6906808.9	anomalie A4	P2
F9	775104.4	6906801.0	anomalie A8	P2

Tableau 2 : Préconisations de sondages.

Il est plausible que les anomalies A4 et A8, du fait de leur situation en proximité immédiate de bâtiments, soient liées à des corrections incomplètes de leurs effets et de l'effet des caves. Ainsi, les sondages F8 et F9 en leur sein sont classés en priorité 2, et sont à effectuer si les sondages à proximité F5, F6 et F7 ont recoupés des vides francs.

Nous préconisons des sondages destructifs, avec enregistrement numérique des paramètres de sondage (*a minima* vitesse d'avancement, pression sur l'outil, pression du fluide d'injection) et analyse des cuttings. Si des vides sont détectés, il conviendra d'en déterminer leurs dimensions et leur état par inspection caméra.

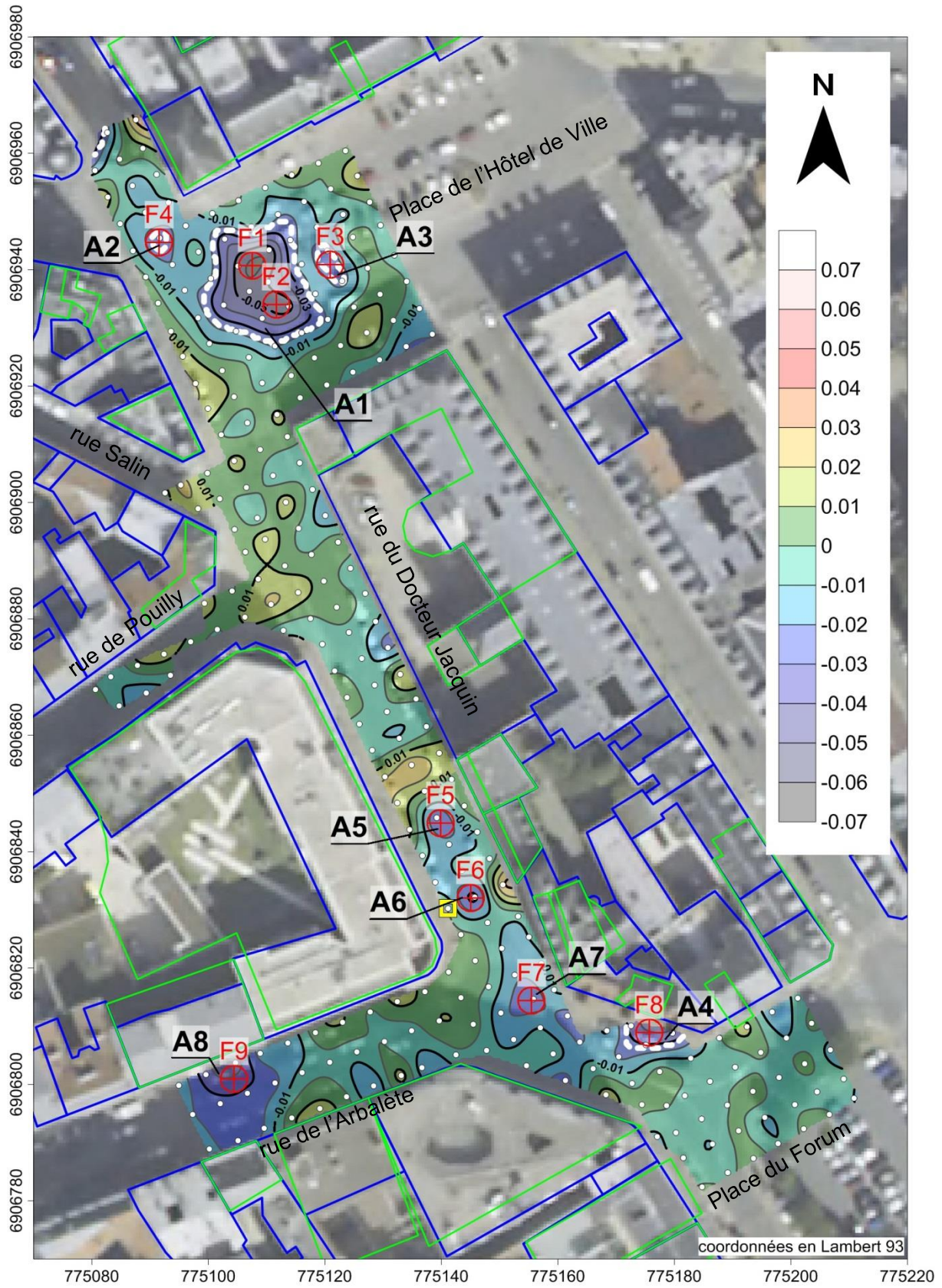


Illustration 8 : Implantation de forages préconisés sur l'anomalie résiduelle.

5. Conclusion

Une campagne de microgravimétrie, comprenant 257 stations, a été menée sur la voirie proche de l'hôtel de ville à Reims (51), afin de détecter la présence d'éventuelles anomalies liées à des cavités.

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

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

Sur la base de ces résultats, le BRGM préconise d'effectuer 9 forages jusqu'à une profondeur de 15 m, pour lever les ambiguïtés d'interprétation.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**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