



Investigations par microgravimétrie et géoradar sur la route de Bischwiller à Schiltigheim (67), suite à la survenue d'un effondrement sous le trottoir

Rapport final

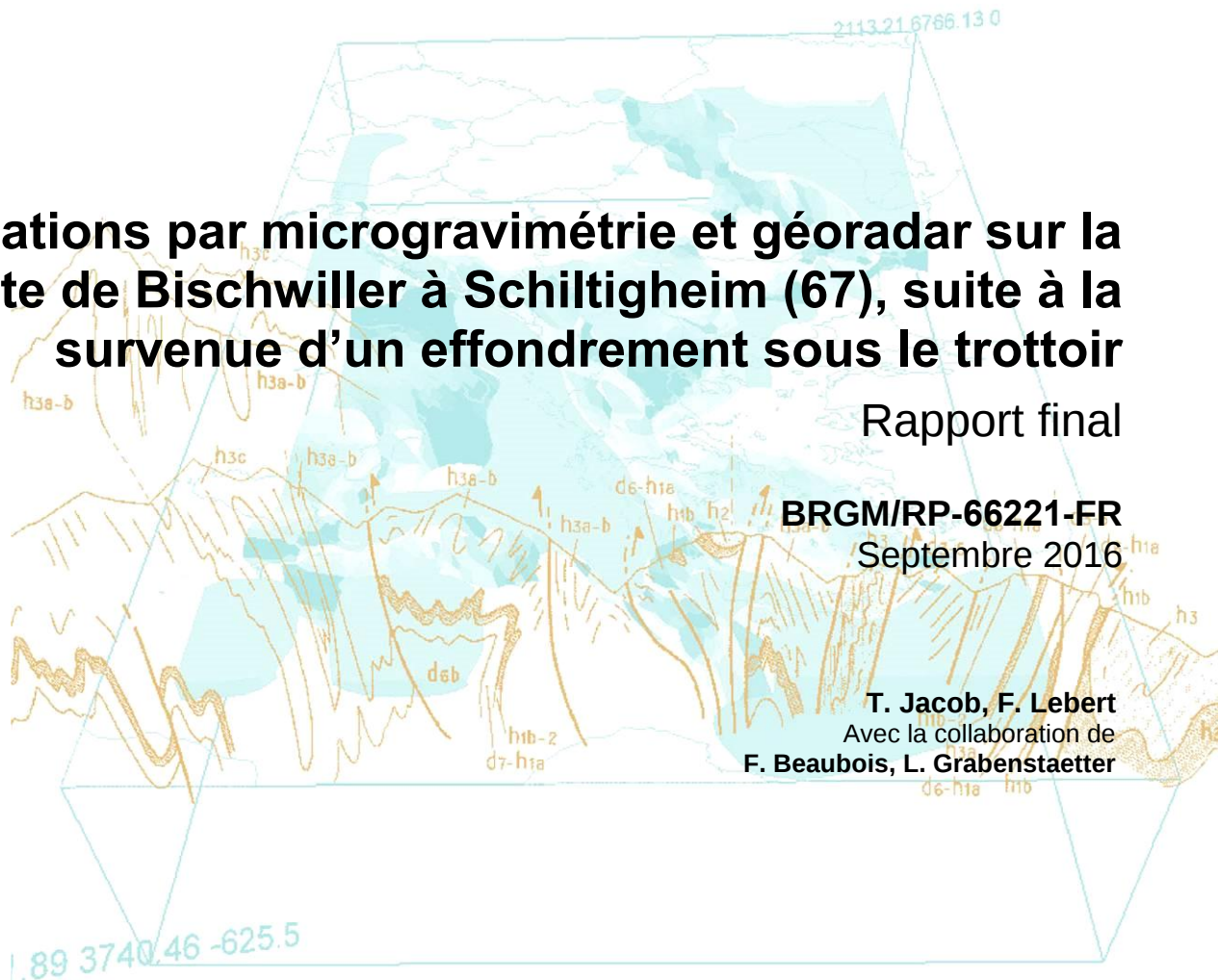
BRGM/RP-66221-FR

Septembre 2016

T. Jacob, F. Lebert

Avec la collaboration de

F. Beaubois, L. Grabenstaetter



Investigations par microgravimétrie et géoradar sur la route de Bischwiller à Schiltigheim (67), suite à la survenue d'un effondrement sous le trottoir

Rapport final

BRGM/RP-66221-FR
Septembre 2016

T. Jacob, F. Lebert
Avec la collaboration de
F. Beaubois, L. Grabenstaetter

Vérificateur :

Nom : Francis Mathieu
Fonction : Géophysicien
Date : 29/09/2016

Signature :



Approbateur :

Nom : K. Samyn
Fonction : délégué régional
Date : 05/10/2016

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, géoradar, vide, Schiltigheim.

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

T. Jacob, F. Lebert Avec la collaboration de F. Beaubois, L. Grabenstaetter (2016) – Investigations par microgravimétrie et géoradar sur la route de Bischwiller à Schiltigheim (67), suite à la survenue d'un effondrement sous le trottoir - Rapport BRGM/RP- 66221-FR, 38 p., 12 ill., 3 tabl., 1 ann.

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

Synthèse

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

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

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

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

Six anomalies radar ont été décelées, dont au moins 3 ne correspondent pas à des réseaux connus.

Sur la base de ces résultats, le BRGM préconise d'effectuer 10 forages jusqu'à une profondeur d'environ 5 à 7 m (mur des loess), pour lever les ambiguïtés d'interprétation.

Sommaire

1. Problématique et objet de l'étude	9
2. Microgravimétrie	11
2.1. MESURES, MOYENS MIS EN ŒUVRE ET TRAITEMENTS	11
2.1.1. Implantation.....	11
2.1.2. Matériel et mode opératoire.....	11
2.1.3. Réduction des données vers l'anomalie de Bouguer	14
2.2. PRECISION DE L'ANOMALIE DE BOUGUER	16
2.3. RESULTATS	20
2.3.1. Anomalie de Bouguer et anomalie régionale	20
2.3.2. Anomalie résiduelle	23
3. Géoradar	27
3.1. IMPLANTATION	27
3.2. MATERIEL ET MODE OPERATOIRE	28
3.3. TRAITEMENT DES DONNEES GEORADAR.....	28
3.4. RESULTATS	28
3.4.1. Vitesse de propagation.....	28
3.4.2. Anomalies radar	29
4. Recommandations	35
5. Conclusion.....	39

Liste des illustrations

Illustration 1 : Topographie de la zone d'étude (m) montrant les stations gravimétriques (points blancs). Les bâtiments sont marqués par de polygones bleus (Cadastre Eurométropole), les caves par des polygones gris (BD Cavités EMS / BRGM).	13
Illustration 2 : Corrections (mGal) liées à l'effet des murs et planchers des bâtiments (polygones bleus) et des caves (polygones gris), à apporter aux valeurs de l'anomalie de Bouguer. Les valeurs sont notées au dessus de chaque station.	16
Illustration 3 : Histogramme des valeurs absolues des écarts de reprises et pourcentage cumulé	17
Illustration 4 : Carte du seuil de signification de l'étude. Pour être retenues, les anomalies doivent en théorie avoir une amplitude supérieure au seuil de signification.	19

Illustration 5 : Anomalie de Bouguer (mGal) pour une densité de 2. Les courbes d'isovaleur sont tous les 0,005 mGal	21
Illustration 6 : Anomalie régionale (mGal)	22
Illustration 7 : Anomalie résiduelle (mGal). Les anomalies négatives significatives sont entourées par un trait discontinu. Les anomalies décelées sont numérotées de G1 à G6.	24
Illustration 8 : Carte d'anomalie résiduelle avec les réseaux d'eaux d'assainissement (traits marron), d'eau potable (traits bleus) et du réseau de l'ancienne Brasserie (trait rouge).....	25
Illustration 9 : Localisation des profils radars	27
Illustration 10 : Segment du profil P13 à proximité du vide signalé	30
Illustration 11 : Localisation des anomalies radars décelées, avec plan des réseaux.....	33
Illustration 12 : Implantation de forages préconisés sur l'anomalie résiduelle et les anomalies radar.	37

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des anomalies négatives décelées	23
Tableau 2 : Eléments descriptifs des anomalies radar constatées	31
Tableau 3 : Préconisations de sondages.	35

Liste des annexes

Annexe 1 Radargrammes	41
-----------------------------	----

1. Problématique et objet de l'étude

Suite à la découverte d'un vide sous le trottoir de la route de Bischwiller à Schiltigheim (67) le 29 août 2016, l'EMS a sollicité le BRGM, dans le cadre de la convention d'évolution des outils de gestion et à la prévention du risque lié à la présence de cavités souterraines, pour mettre en œuvre une méthode non intrusive permettant de caractériser les vides. Ce programme est financé par l'Eurométropole de Strasbourg, la Subvention pour Charge de Service Public du BRGM et bénéficie des Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (Fonds Barnier).

En réponse, le BRGM a proposé de mener une campagne de microgravimétrie, couplée à une campagne de géoradar, afin de détecter la présence d'éventuelles anomalies liées à des cavités.

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

L'origine des cavités recherchées est anthropique : le vide a été relié à la présence de canalisation mobilisant le remblai et le loess sous-jacent. Si des dépôts ont été constatés dans d'anciennes caves en immédiate proximité du fontis, une grande partie du volume de loess déplacé, estimé à $\sim 40 \text{ m}^3$, n'a pas été retrouvé dans les caves adjacentes. Il est à noter qu'un effondrement similaire est survenu en septembre 2014 à quelques mètres du vide apparu en août 2016.

Une campagne de microgravimétrie sur la voirie en proximité immédiate du désordre, comprenant 148 stations, ainsi qu'une campagne de géoradar, comprenant 16 profils espacés de 1 m à 2,5 m, ont été menées 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 matériaux peu denses.

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

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

2. Microgravimétrie

2.1. MESURES, MOYENS MIS EN ŒUVRE ET TRAITEMENTS

2.1.1. Implantation

148 stations gravimétriques ont été implantées, nivelées et mesurées en gravimétrie sur la zone d'étude (Illustration 1) à la maille de 2,5 x 2,5 m. La voirie concernée correspond à la route de Bischwiller au niveau de l'ancienne brasserie Fischer, et à ses trottoirs et pistes cyclables.

L'implantation des stations et les mesures gravimétriques et géoradar entre le 6 et le 8 septembre 2016 ont été réalisées par un technicien en géophysique et un ingénieur risque. Un complément d'acquisition gravimétrique a été mené par un ingénieur gravimétricien, les 15 et 16 septembre 2016. Il a en effet été jugé que l'acquisition gravimétrique entre le 6 et le 8 septembre n'était pas satisfaisante, car elle présentait une précision de mesure de l'ordre de 0,015 mGal. Des compléments de mesures ont été réalisés les 15 et 16 septembre de manière à obtenir une précision acceptable en regard des objectifs de détection. Dans la suite du rapport, seule les mesures gravimétriques du 15-16 septembre seront présentées et analysées.

Une station totale Trimble S7 a été utilisée pour déterminer l'altimétrie et le positionnement relatif des points, et un GPS différentiel Trimble Geo7X 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 1 cm, de deux stations de base topographique (utilisées pour la mise en station de la station totale) par des mesures d'au moins 30 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.

2.1.2. Matériel et mode opératoire

Un gravimètre Scintrex CG-5 a été utilisé entre le 15 et 16 septembre. 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 0,210 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 10 programmes dont la durée de chacun d'entre eux n'a pas excédée 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 50 s à la base
- 1 mesure de 50 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.

39 stations gravimétriques ont été reprises au moins une fois, totalisant 26 % 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 mGal m⁻¹.

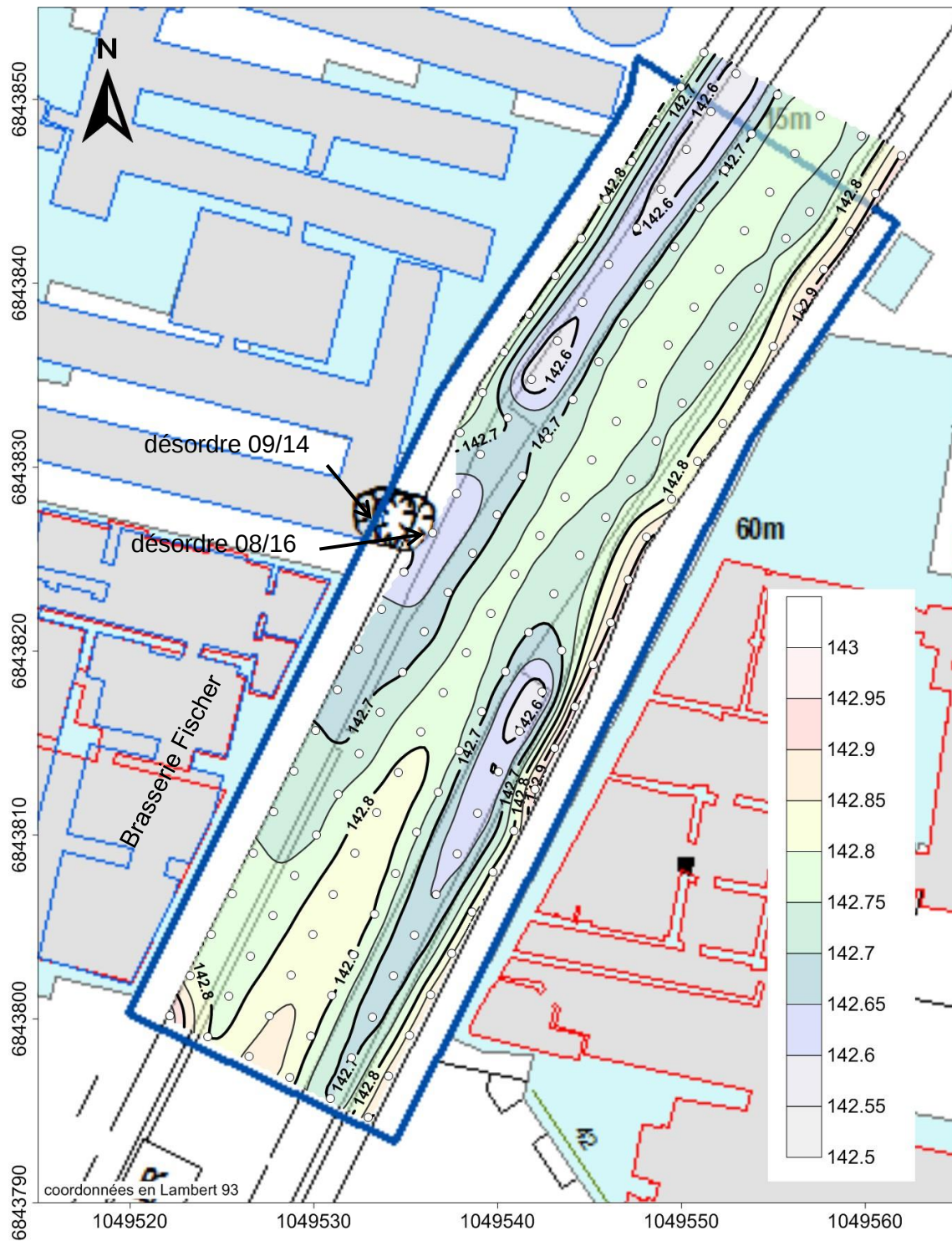


Illustration 1 : Topographie de la zone d'étude (m) montrant les stations gravimétriques (points blancs). Les bâtiments sont marqués par de polygones bleus (Cadastre Eurométropole), les caves par des polygones gris (BD Cavités EMS / BRGM).

2.1.3. Réduction des données vers l'anomalie de Bouguer

L'ensemble du traitement des données a été réalisé par un ingénieur gravimétricien, 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. 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 et planchers 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 '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.

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 est inférieure à 0,5 m sur l'ensemble de la zone.

Les corrections de bâtiments ont été effectuées à partir de l'emprise des bâtiments (polygones bleus sur les figures), donnée par le cadastre. La hauteur et l'épaisseur des

murs ont été relevées sur le terrain. La densité des murs a été prise à 1,8, densité typique de la brique.

Les hauteurs de caves (polygones gris) ont été relevées, et leur effet corrigé. Le plancher des trois premiers étages des bâtiments ont été inclus dans la correction.

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. L'effet des murs sur un périmètre de 30 m autour de chaque station est calculé.

Les caves et les planchers ont été modélisés par la méthode de calcul d'un prisme plat à section polygonale.

La somme des corrections liées aux murs des bâtiments, à leurs planchers et aux structures souterraines est illustrée dans la figure suivante. Celle-ci varie de 0,024 à 0,177 mGal, les plus fortes valeurs correspondant aux mesures à proximité de l'ancienne Brasserie Fischer, bâtiment de 29 m de hauteur et présentant deux niveaux de caves (Illustration 2).

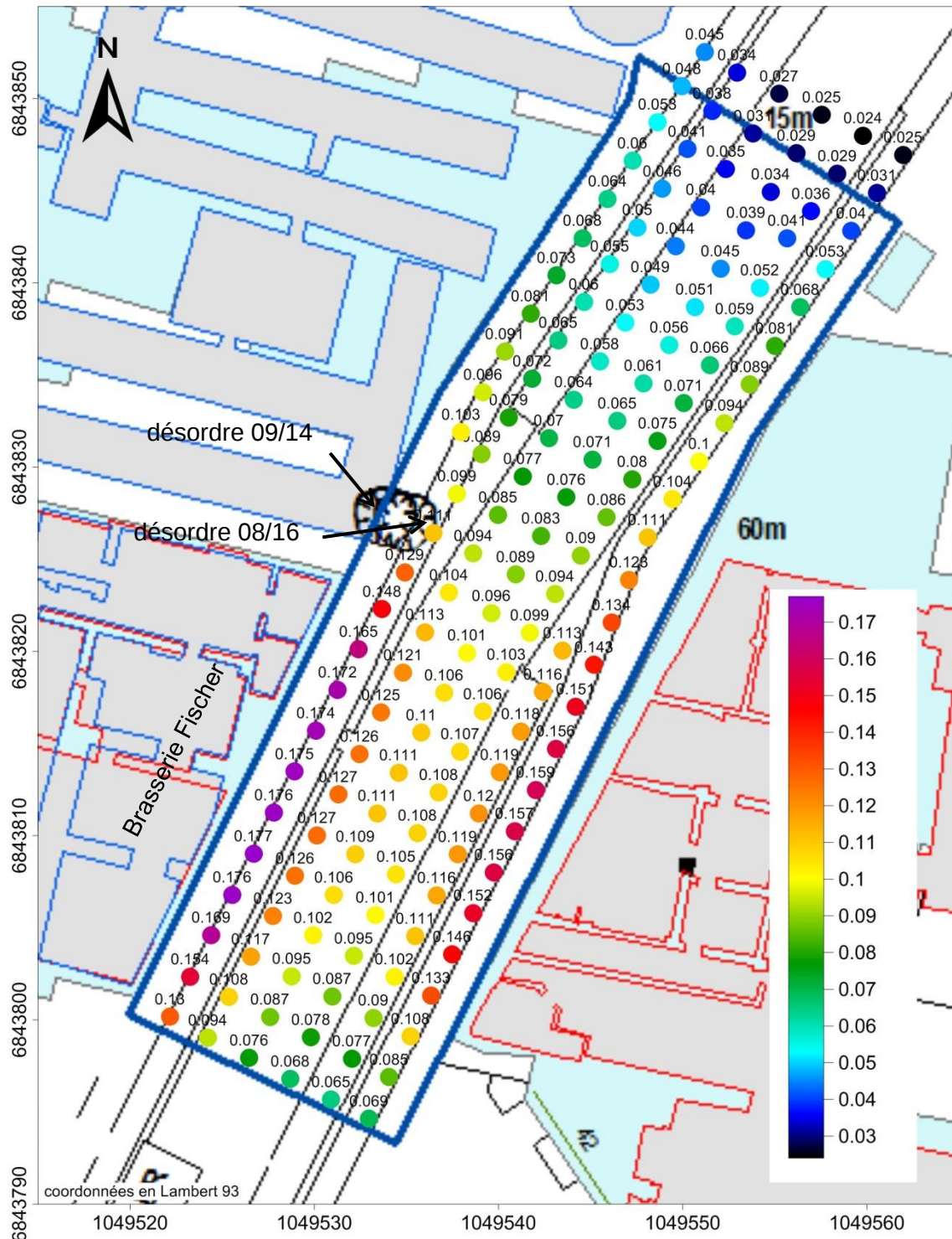


Illustration 2 : Corrections (mGal) liées à l'effet des murs et planchers des bâtiments (polygones bleus) et des caves (polygones gris), à apporter aux valeurs de l'anomalie de Bouguer. Les valeurs sont notées au dessus de chaque station.

2.2. 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, 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 sont aléatoires, pour obtenir la précision d'un levé, ou ciblées, pour vérifier une anomalie décelée, une mesure douteuse, ou une mauvaise reprise. 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.

38 stations ont été reprises une fois, et 1 station a été reprise deux fois. Le pourcentage de stations reprises est de 26%.

L'erreur associée à la mesure de g est estimée à 0,004 mGal (Illustration 3), selon la méthode décrite précédemment.

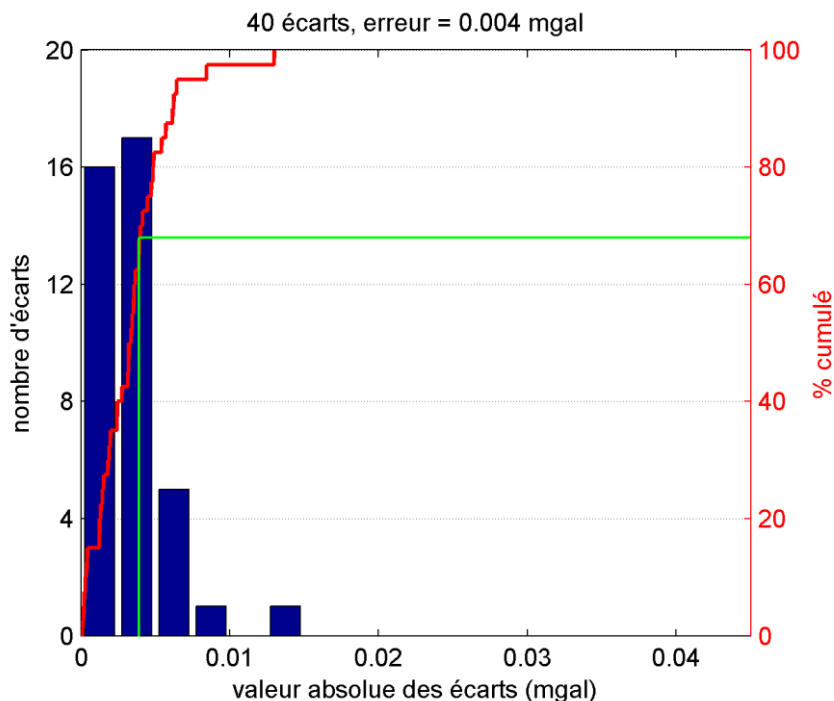


Illustration 3 : Histogramme des valeurs absolues des écarts de reprises et pourcentage cumulé

• **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 et densité 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 0,030 mGal pour les stations présentant les plus fortes corrections, en proximité immédiate de l'ancienne brasserie Fischer.

• **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 0,008 mGal à 0,060 mGal, les zones de forte erreur sont situées en proximité immédiate des bâtiments.

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.

Le seuil de signification étant supérieur à 0,04 mGal en proximité des bâtiments (illustration 4) et des caves, il est plausible que les anomalies décelées n'aient pas une amplitude supérieure à ce seuil dans ces zones. Les éventuelles anomalies y siégeant pourront être retenues, mais avec un niveau de confiance moindre.

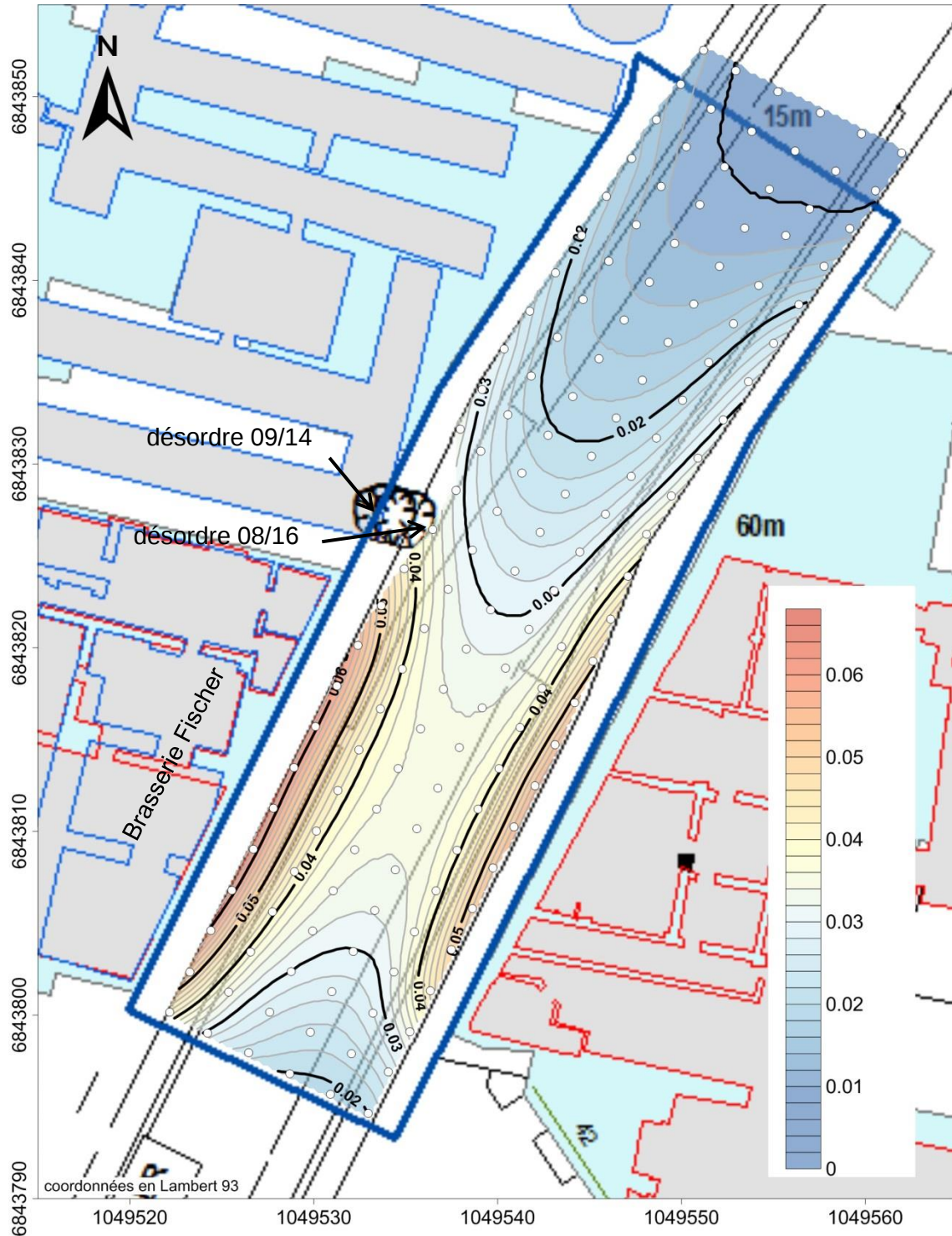


Illustration 4 : Carte du seuil de signification de l'étude. Pour être retenues, les anomalies doivent en théorie avoir une amplitude supérieure au seuil de signification.

2.3. RESULTATS

2.3.1. Anomalie de Bouguer et anomalie régionale

L'anomalie de Bouguer est fonction de l'ensemble des variations de densité sous la surface topographique. Ces variations peuvent être localisées superficiellement ou en profondeur. Les valeurs élevées de l'anomalie de Bouguer sont caractéristiques de matériaux 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 0,060 mGal comprenant des valeurs élevées au centre de la voirie (teintes rouges), et des valeurs plus faibles (teintes bleues) sur les bordures de voirie.

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 plan à l'anomalie de Bouguer.

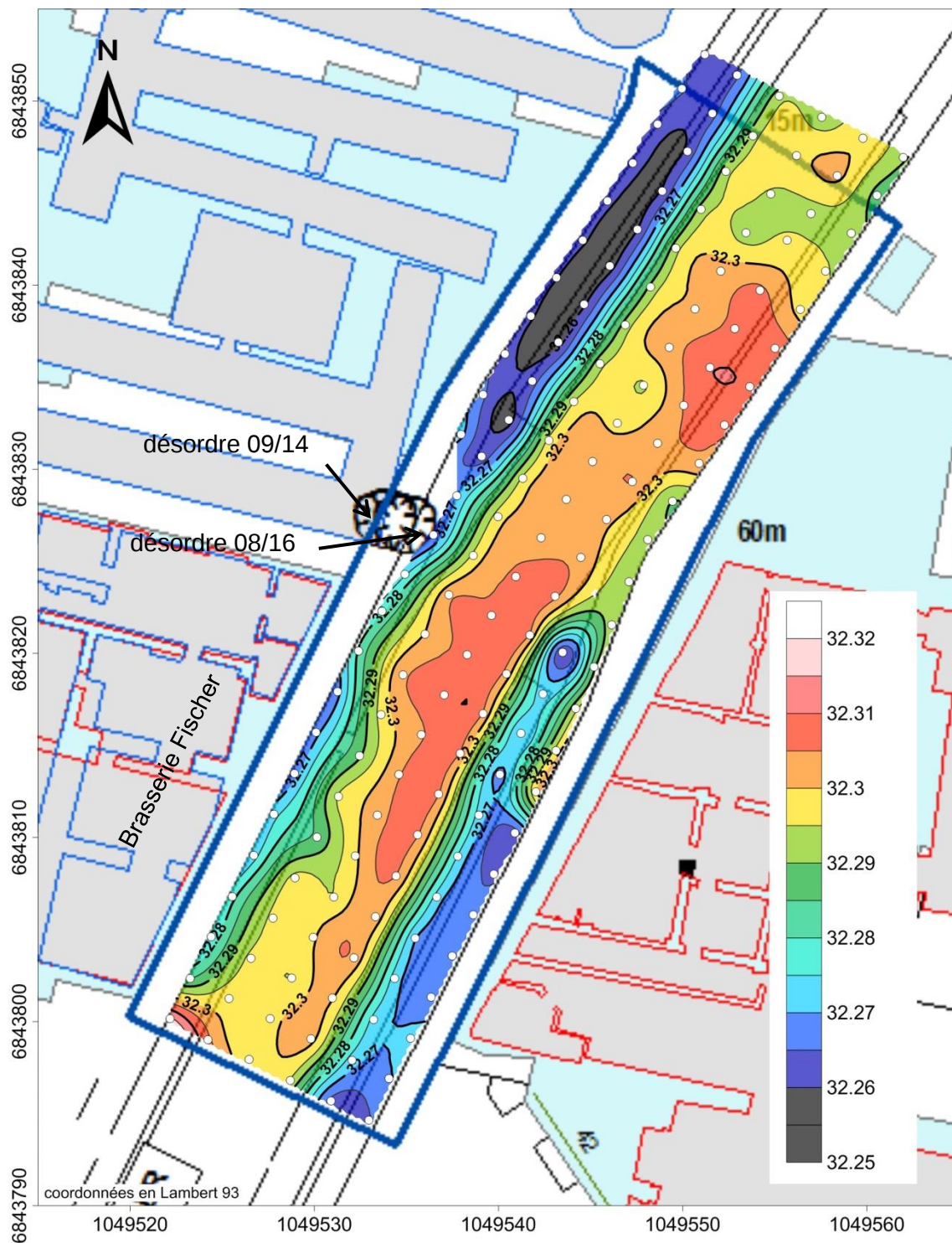


Illustration 5 : Anomalie de Bouguer (mGal) pour une densité de 2. Les courbes d'isovaleur sont tous les 0,005 mGal

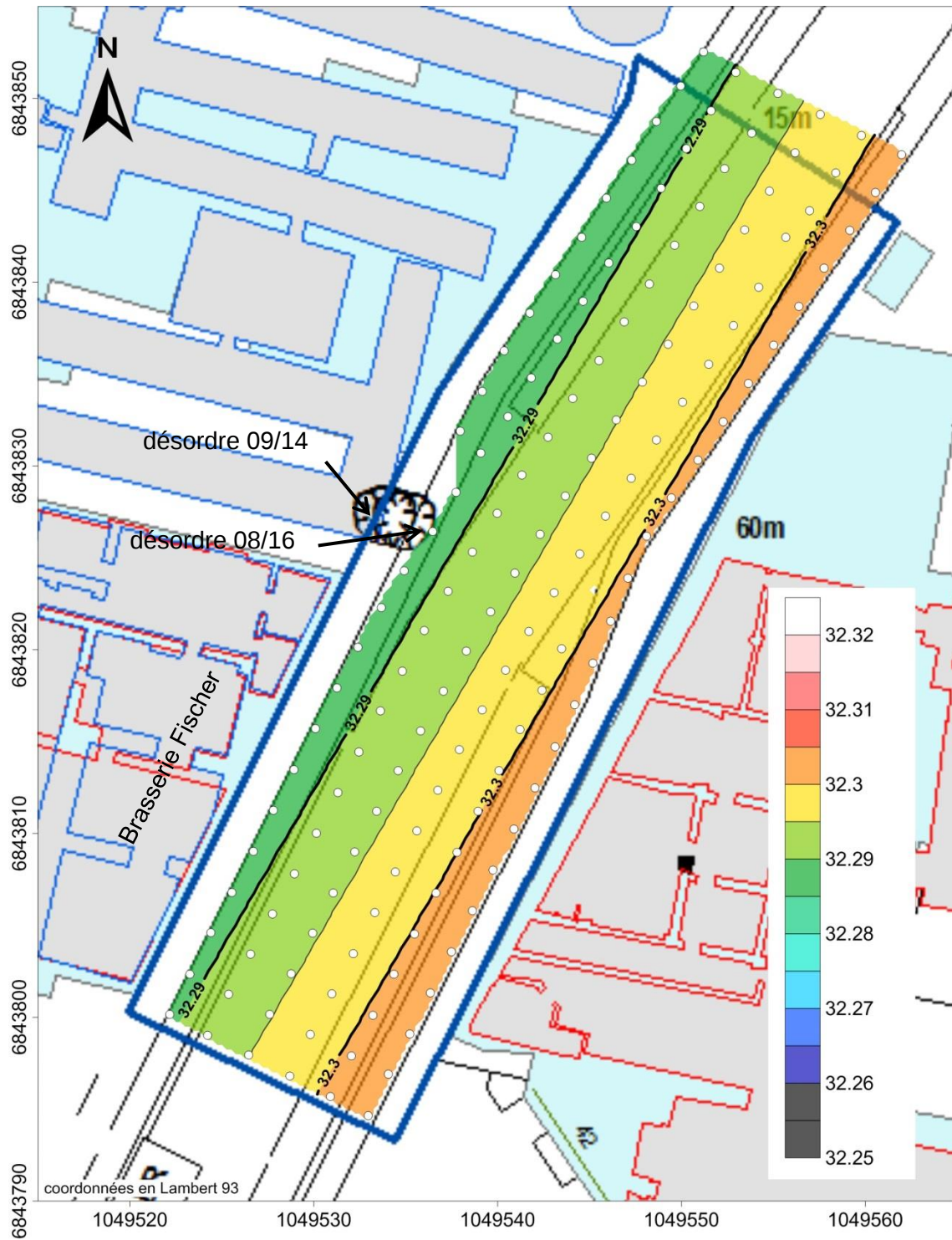


Illustration 6 : Anomalie régionale (mGal)

2.3.2. Anomalie résiduelle

L'anomalie résiduelle est obtenue en soustrayant l'anomalie régionale à l'anomalie de Bouguer, et fait ressortir les variations de gravité en lien avec les variations de densité de la subsurface, objet de cette étude. Elle est présentée à l'illustration 7

L'anomalie résiduelle a une dynamique de 0,07 mgal, variant de -0,04 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 (voir Illustration 4), affectant au moins 2 stations contiguës, numérotées de G1 à G4 (Illustration 7 et Tableau 1). L'anomalie G3 est retenue bien que n'incluant qu'une seule station dont l'amplitude est supérieure au seuil de signification.

Nous retenons les anomalies G5 et G6, 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 0,015 mGal. Le seuil de signification est particulièrement élevé là où sont présentes ces anomalies, à cause des fortes corrections de bâtiments et de caves. Les anomalies G3, G4 et G5 sont jointives, et pourraient ne constituer qu'une seule anomalie, si le seuil de signification y était plus faible. Un niveau de confiance moindre est à accorder aux anomalies retenues non significatives.

Anomalies	Nombre de stations affectées	Amplitude maximale (mGal)	Description / commentaires
G1	18	0.031	Forte amplitude, forte extension, non-circonsrite. *
G2	2	0.013	Faible amplitude, faible extension, non-circonsrite.
G3	1	0.037	Forte amplitude, faible extension, circonsrite – jointive avec G5 et G4
G4	5	0.039	Forte amplitude, faible extension, non-circonsrite. jointive avec G3 et G5
G5	13	0.040	Forte amplitude, forte extension, non-circonsrite.
G6	3	0.020	moyenne amplitude, faible extension, non-circonsrite.

Tableau 1 : Récapitulatif des anomalies négatives décelées

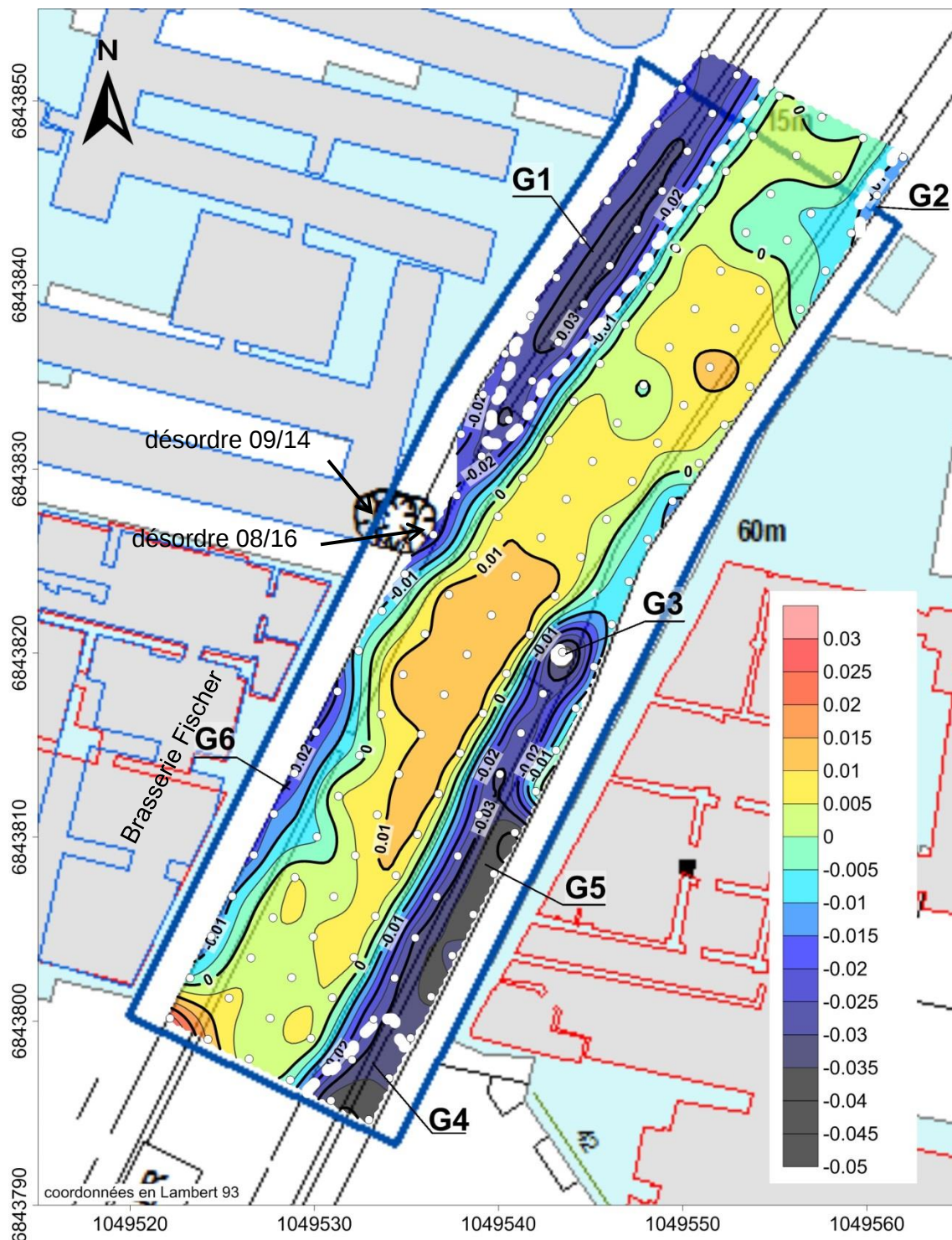


Illustration 7 : Anomalie résiduelle (mGal). Les anomalies négatives significatives sont entourées par un trait discontinu. Les anomalies détectées sont numérotées de G1 à G6.

Les anomalies G1, et le complexe G3, G4 et G5 présentent une forme allongée, parallèle à la route. La carte d'anomalie résiduelle est surimposée aux réseaux d'eaux sur l'illustration 8. L'attraction directe des réseaux n'est pas prise en compte du fait du faible effet gravifique que ceux-ci induisent. En effet, un réseau de 0,4 m de diamètre à

1 m de profondeur induit une attraction inférieure à 0,005 mgal au droit de celui-ci, en prenant un contraste de densité de 2. A deux mètre du réseau en déport, son effet gravifique est inférieur à 0,001 mGal. Les anomalies gravimétriques décelées ne peuvent donc pas être induite par l'attraction newtonienne directe des réseaux, qui ont un effet négligeable. Il convient de sonder les anomalies pour en vérifier la nature (voir section 4).



3. Géoradar

3.1. IMPLANTATION

16 profils géoradars ont été réalisés sur la zone d'étude (Illustration 9) avec une antenne de 500 Mz, avec un espacement variant de 1 à 2,5 m, agencés selon et entre les lignes gravimétriques, en fonction des obstacles rencontrés sur la voirie.

Un technicien en géophysique, a réalisé l'ensemble des mesures le 13 septembre 2016.



Illustration 9 : Localisation des profils radars

3.2. MATERIEL ET MODE OPERATOIRE

Un radar ProEx de Mala Geoscience a été utilisé pour effectuer les mesures géoradar. L'antenne utilisée est blindée, de fréquence 500 MHz.

Les paramètres d'acquisition pour l'antenne 500 MHz sont les suivants :

- Fréquence d'échantillonnage : 4824 MHz
- Temps d'écoute : 75 ns
- Nombre de stacks : 32
- Distance entre deux traces : 2,5 cm
- Longueur d'onde de 20 cm pour une vitesse de 10 cm/ns, la résolution est de l'ordre de 5 cm.

3.3. TRAITEMENT DES DONNEES GEORADAR

L'ensemble du traitement des données a été réalisé avec le logiciel RadExplorer (DECO-Geophysical Ltd), par un ingénieur géophysicien.

Le traitement des données géoradar vise à vérifier la qualité des enregistrements et, si nécessaire et si possible, améliorer cette qualité :

- Atténuation des effets parasites qu'il peut y avoir dans le signal (perturbations basse et haute fréquence),
- Amplification des arrivées des ondes réfléchies,
- Evaluation des profondeurs.

La chaîne de traitement réalisée est la suivante :

- Correction de zéro (calage de l'origine des temps) ;
- Amélioration de la résolution en profondeur par filtre vertical passe bande adapté à la fréquence de l'antenne (le terme vertical fait référence au fait que l'axe des ordonnées des sections radar est le temps d'enregistrement des ondes) ;
- Correction d'amplitude visant à amplifier les arrivées réfléchies de type « Automatic Gain Control » (AGC),
- Atténuation des échos systématiques et stables le long du profil au profit des échos fluctuant réfléchis par les structures du sol par un filtre horizontal « Background removal » (le terme horizontal fait référence au fait que l'axe des abscisses des sections radar est la position de l'antenne le long du profil)
- Evaluation de la vitesse de propagation des ondes radar sur les hyperboles de réflexion relevées sur les sections radar.

3.4. RESULTATS

3.4.1. Vitesse de propagation

La vitesse de propagation (V_p) des ondes radar évaluée sur différentes sections est pratiquement constante et égale à 10 cm/ns ; c'est une vitesse tout à fait normale pour les matériaux auscultés. Dans ces conditions, la correspondance entre les temps d'enregistrement (temps double) et la profondeur est :

$$P_{(en\ cm)} = t_{(en\ ns)} \cdot Vp_{(en\ cm/ns)} / 2 = 5. t$$

La notion de temps double est relative au phénomène d'écho enregistré, où l'onde parcourt deux fois la distance entre l'antenne radar et la structure du sol impliquée : une fois à l'aller et une fois au retour. Dans ces conditions, le temps de 20 ns correspond à une profondeur de 1 m.

3.4.2. Anomalies radar

Nous avons relevés et décrits les différentes anomalies perturbant les enregistrements radar ; ce sont généralement des hyperboles, signatures typiques d'objet bien délimité et de petite taille ; présentant un fort contraste par rapport au milieu encaissant. Dans un milieu urbanisé comme celui de la présente prospection, ce sont souvent des réseaux ; tuyaux, conduites ou câbles, interagissant avec les ondes radar soit en raison de leur matière (métal), soit en raison du vide qu'ils délimitent (intérieur d'une conduite). Ces éléments sont parfois accompagnés de figures caractéristiques d'éléments associés :

- Hétérogénéité d'un remblai,
- Rugosité des bords d'une tranchée,
- Vide d'un espace de réservation, ...

Sans renseignement supplémentaires, les interprétations proposées sur la base des figures observées et des corrélations spatiales ne relèvent cependant que de l'hypothèse nécessitant vérification par tous moyens (archives, tranchées, sondage, ...).

Les anomalies relevées sont décrites dans le Tableau 2 où leur association et numérotation indiquent une vraisemblable similarité d'origine, sur la base de leur ressemblance et de leur corrélation spatiale.

L'anomalie associée au vide constaté est décrite dans le Tableau 2 et représentée sur l'illustration 10.

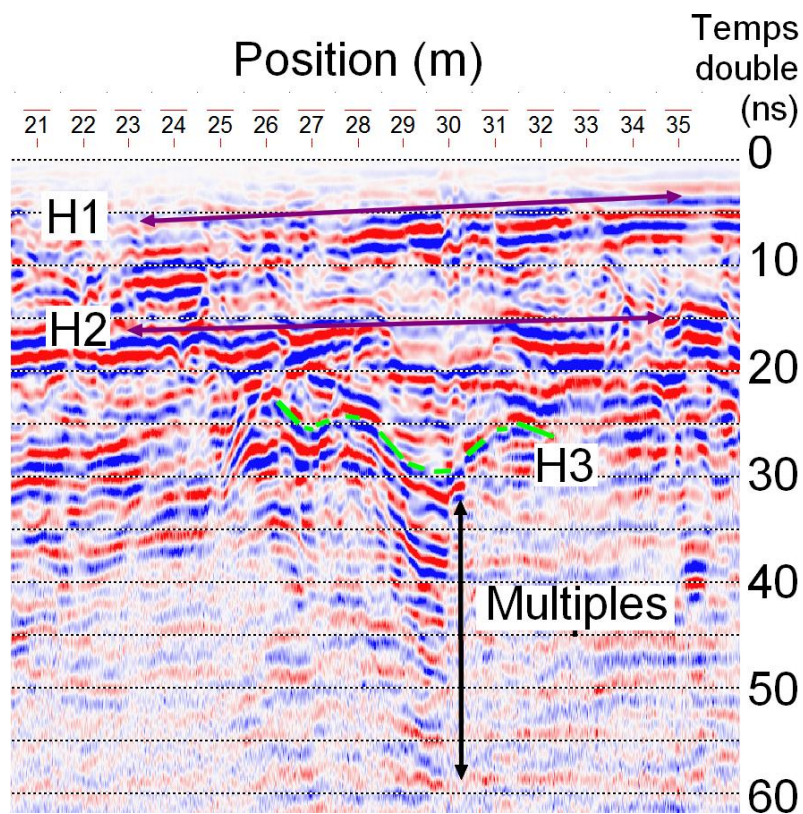


Illustration 10 : Segment du profil P13 à proximité du vide signalé

Profil	Anomalie	Début	Fin	Profondeur	Commentaire
1	A1	2.90	4.70	1.65	Alignement d'anomalies multiples en corrélations de position et de profondeur sur les profils 1, 2, 3, 4, 5 & 7 ; Ces anomalies semblent placées entre une bouche signalée à proximité du profil P5 et le trottoir est de la voie.
2	A1	3.30	5.60	1.45	
3	A1	3.15	4.95	1.32	
4	A1	3.10	5.10	1.65	
5	A1	3.50	5.00	1.45	
7	A1	3.70	6.20	1.25	Origine : réseau, branchement d'eau
13	A0	-	4.22	0.40	Nombreuses diffractions masquant l'horizon visible sur les profils 8, 9, 10, 11 & 13. Origine possible : excavation remblayée
13	A4	32.90	37.70	0.90	Alignement d'anomalies multiples, quasiment en travers de toute la voie. Sur le profil 13, nombreuses diffractions masquant l'horizon visible sur les profils 8, 9, 10, 11 & 13 (origine possible : excavation remblayée). Sur les profils 10 & 11, les anomalies sont particulièrement intenses et concentrées et pourraient correspondre à des signatures de vides. Toutefois, au fur et à mesure que les profils s'éloignent vers l'est, les anomalies se séparent et semblent correspondre à des éléments bien individualisés dont certains montrent un alignement quasi parfait (A6b sur les profils 8, 9, 10 et 11). Origine possible : réseaux disposés en faisceaux dans une maçonnerie couverte côté ouest et dispersés en tranchées individuelles remblayées coté est. Hypothèse avérée après inspection des plans de réseaux : réseau électrique hors-service
14	A4	35.00		0.50	
15	A4	-	36.60	0.50	
17	A4	-	35.90	0.40	
2	A4a	32.50	34.30	1.06	
3	A4a	32.50	34.50	0.85	
7	A4a	33.00	35.00	0.50	
8	A4a	32.70	35.00	0.50	
9	A4a	33.10	35.10	0.60	
10	A4a	32.80	35.30	0.50	
11	A4a	32.80	35.70	0.50	
2	A4b	36.60	38.30	0.90	
3	A4b	35.70	38.30	1.12	
7	A4b	36.20	37.00	1.10	
8	A4b	36.60		1.05	
9	A4b	36.60		1.04	
10	A4b	36.80		0.80	
11	A4b	36.70		1.45	
8	A5a	40.00	41.40	0.75	Système d'anomalies multiples en corrélations de position et de profondeur sur les profils 8, 9, 10, 11, 12, 13 & 15 (mais pas sur le P14). Ces anomalies ne semblent pas corrélées à des bouches signalées, mais certaines d'entre elles peuvent correspondre à des objets individualisés dans un remblai, alors que d'autre ne montre que des diffractions aléatoires. Origine possible : tranchées remblayées, avec ou sans réseau(x). Deux réseaux d'eau traversent l'anomalie A5
9	A5ab	41.00	44.60	0.80	
10	A5ab	42.90	45.40	0.80	
11	A5ab	44.10	46.80	0.75	
12	A5ab	46.20	48.80	0.50	
13	A5ab	46.40	48.00	0.20	
8	A5b	42.40	43.40	0.90	
8	A5c	48.20	49.40	0.75	
9	A5c	48.40	48.90	0.85	
10	A5c	47.00	50.50	0.70	
11	A5c	46.80	51.00	0.65	
12	A5c	50.60	51.80	0.50	
13	A5c	49.50	52.30	0.20	
15	A5c	48.80	50.70	0.95	
11	A6	56.00	-	0.40	Système d'anomalies multiples en corrélations de position et de profondeur sur les profils 9, 10, 11, 12, 13, 14 & 15. Ces anomalies sont à proximité de deux bouches signalées et certaines d'entre elles peuvent correspondre à des objets individualisés alignés vers l'une d'entre elle (A6b, profils 13, 14 et 15). Origine possible : réseau(x) et tranchées remblayées.
10	A6a	54.60	56.90	0.55	
12	A6a	56.70	57.40	0.70	
13	A6a	56.00		1.00	
13	A6b	58.50		0.55	
14	A6b	57.10		0.56	
15	A6b	56.50		0.70	
9	A6c	58.19	-	0.90	
10	A6c	58.50	-	0.55	
12	A6c	59.00	-	0.80	
13	A6c	59.40	-	0.70	
13	A3	24.70	32.00	VIDE	A proximité de l'effondrement et du vide signalé, on peut décrire une anomalie complexe sur le profil 13, entre ~25 et 32 m : - Interface continue H1 à 5 ns (~0.25 m) ; - Deuxième interface H2 à 15 ns (~0.75 m) ; H2 est discontinue de ~29 à 31 m ; - H1 et H2 montrent une pente due à la topographie locale mais sont vraisemblablement horizontales ; - Sous l'interface H2, une interface H3 se dessine et ondule, accompagnée d'un système de multiples (soulignée en vert sur la Illustration 10 ; H3 peut correspondre au plancher du vide ; en son point le plus bas, l'écart avec l'interface H1 est de ~25 ns, soit ~3.75 m (vitesse des ondes dans le vides : 30 cm/ns), ce qui porterait sa profondeur à ~4 m, compatibles avec la description du vide constaté. Si ces éléments sont corrects, le vide ne semble pas atteindre le profil P11, qui (lui et les suivant : 10, 9 et 8) ne montre pas de discontinuité de l'interface H2 à 15 ns, ni de quelconque signature de vide devant l'emprise considérée. Il convient toutefois de vérifier la non connexion du vide signalé avec le système d'anomalie A4 qui en est quand même très proche.

Tableau 2 : Eléments descriptifs des anomalies radar constatées

Les anomalies décrites sont reportées sur le plan de synthèse de l'illustration 11 indiquant le bâti et les réseaux connus.

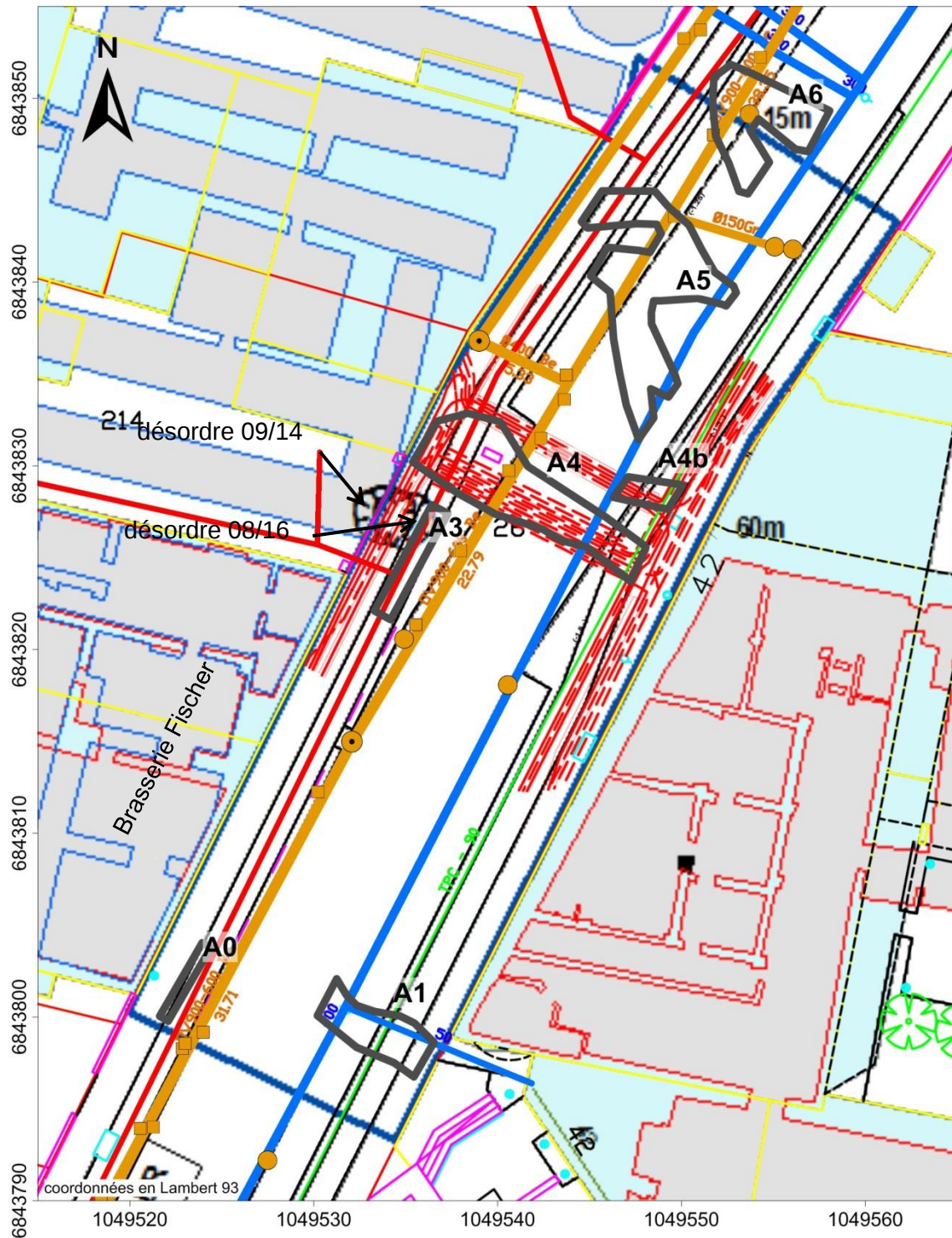


Illustration 11 : Localisation des anomalies radars décelées, avec plan des réseaux

4. Recommandations

Les anomalies gravimétriques 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 jusqu'à une profondeur atteignant 7 m, permettant ainsi de traverser la couche de loess:

- au niveau des zones caractérisées par des anomalies négatives en gravimétrie,
- au sein des anomalies radar non-expliquées par des réseaux

Un total de 10 sondages est préconisé (Tableau 3 et Illustration 12), dont 6 sont classés en priorité 1, et 2 en priorité 2, et 2 en priorité 3.

sondage	priorité	justification	XL93	YL93
F1	P1	bordure de l'Anomalie G2, axe négatif	1049556.1	6843843.7
F2	P1	anomalie radar A5 et anomalie G1	1049545.9	6843841.2
F3	P1	Anomalie positive : étalonnage	1049538.3	6843821.5
F4	P1	anomalie G6	1049530.3	6843817.0
F5	P1	anomalie G5	1049538.1	6843805.9
F6	P1	Anomalie G6, axe négatif	1049530.2	6843810.0
F7	P2	anomalie radar A5 et anomalie G1	1049547.6	6843844.3
F8	P2	anomalie radar A5 et inflexion gravi	1049547.8	6843834.6
F9	P3	anomalie radar A6 et anomalie G1	1049552.5	6843850.5
F10	P3	anomalie gravi G3	1049543.5	6843820.1

Tableau 3 : Préconisations de sondages.

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.

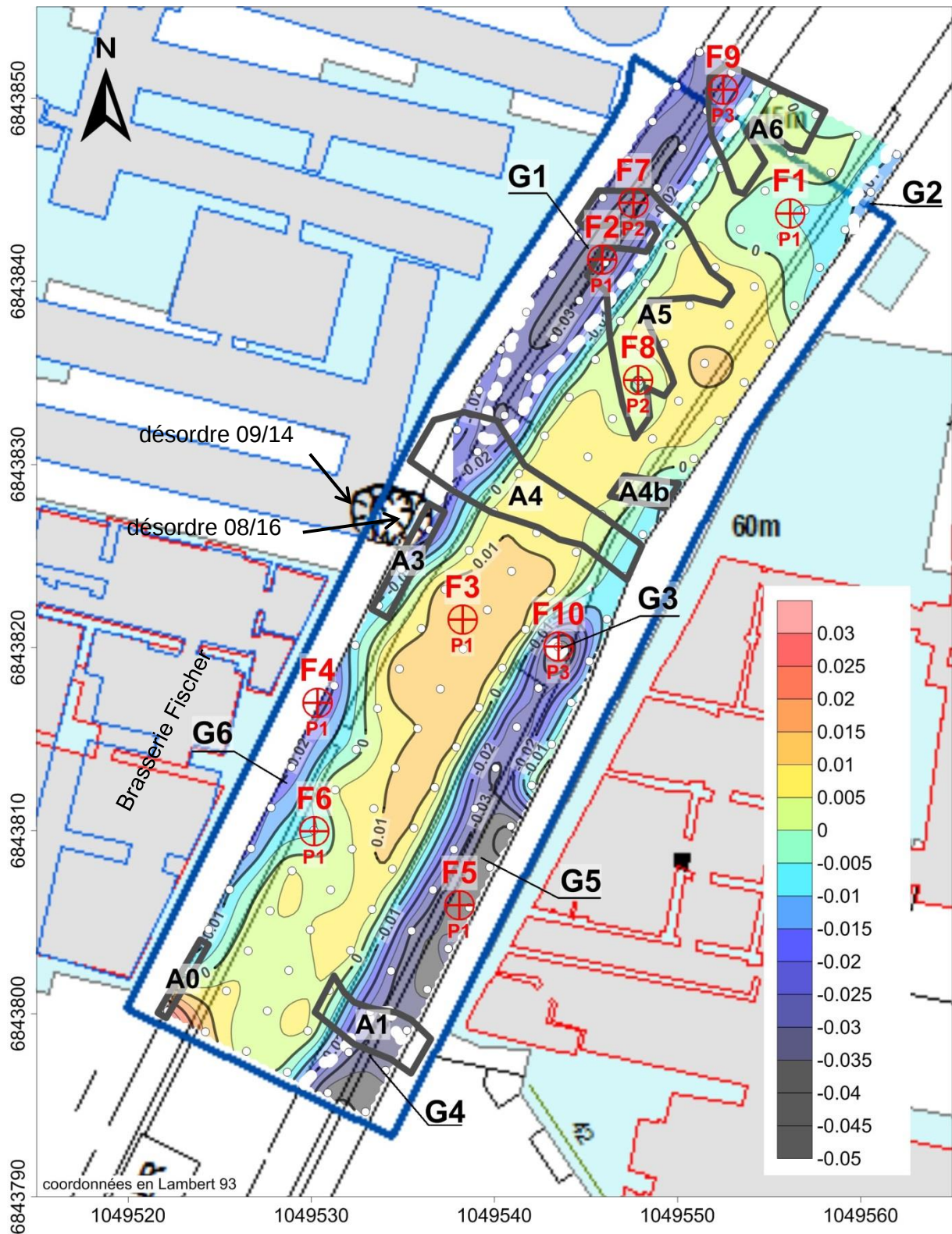


Illustration 12 : Implantation de forages préconisés sur l'anomalie résiduelle et les anomalies radar.

5. Conclusion

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

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

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

Six anomalies radar ont été décelées, dont au moins 3 ne correspondent pas à des réseaux connus.

Sur la base de ces résultats, le BRGM préconise d'effectuer 10 forages jusqu'à une profondeur de 5 à 7 m (mur des loëss), pour lever les ambiguïtés d'interprétation.

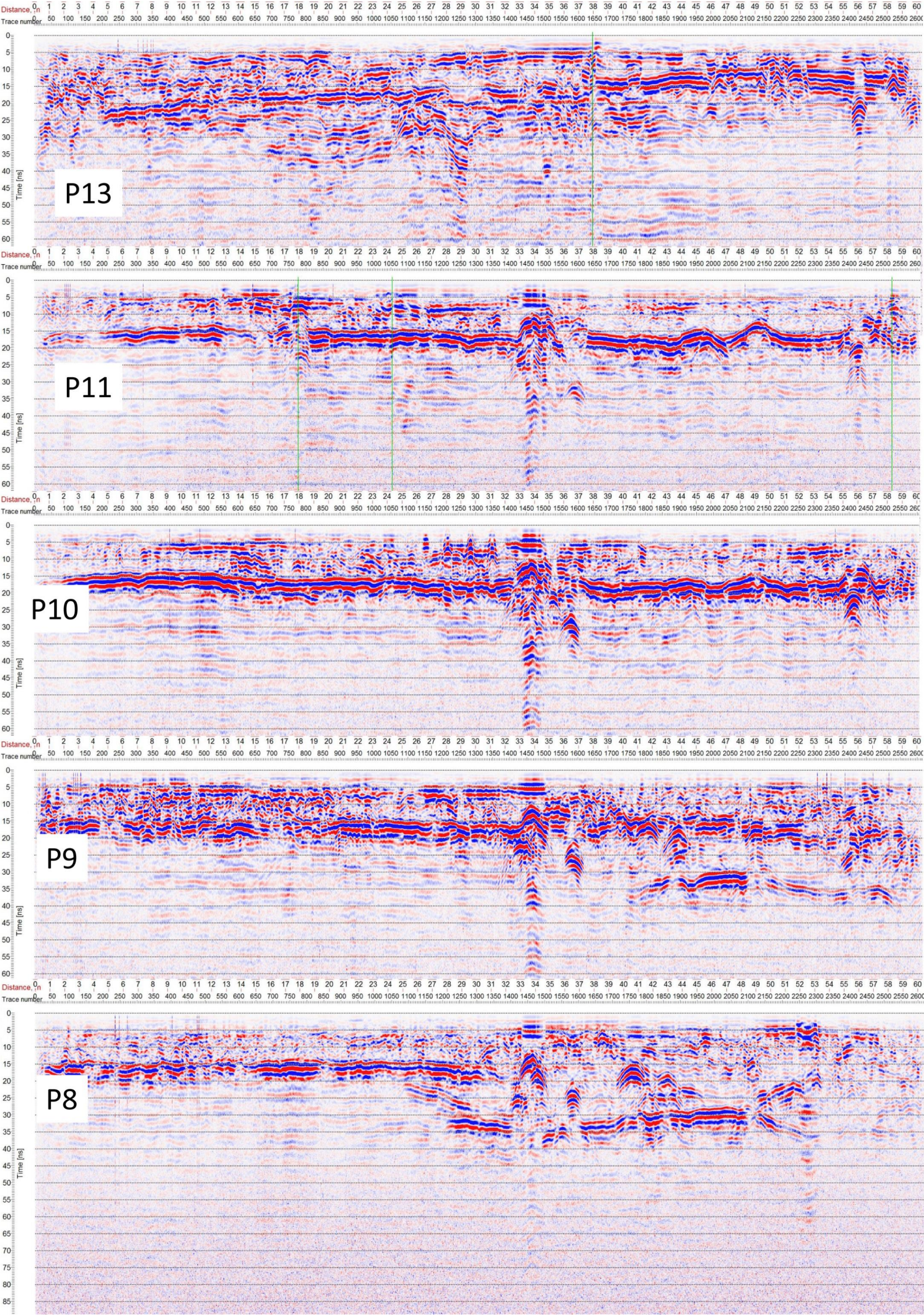
Annexe 1

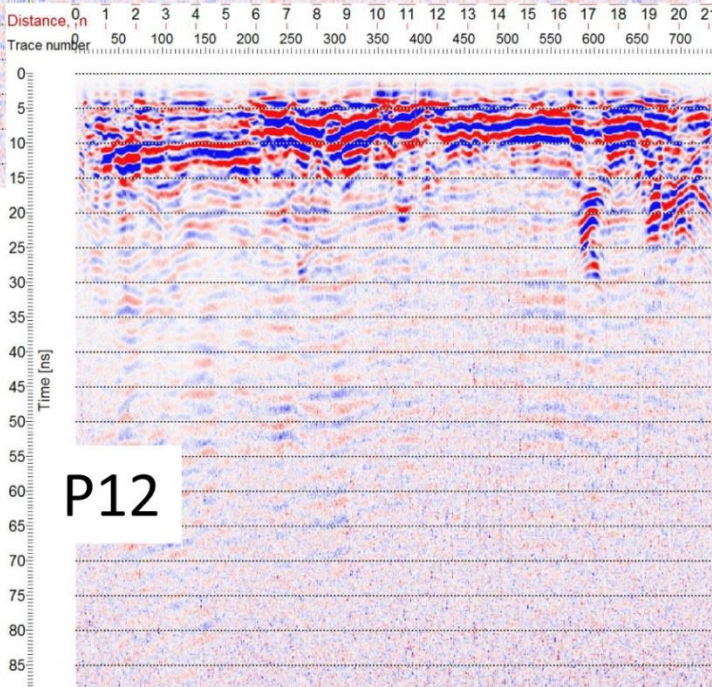
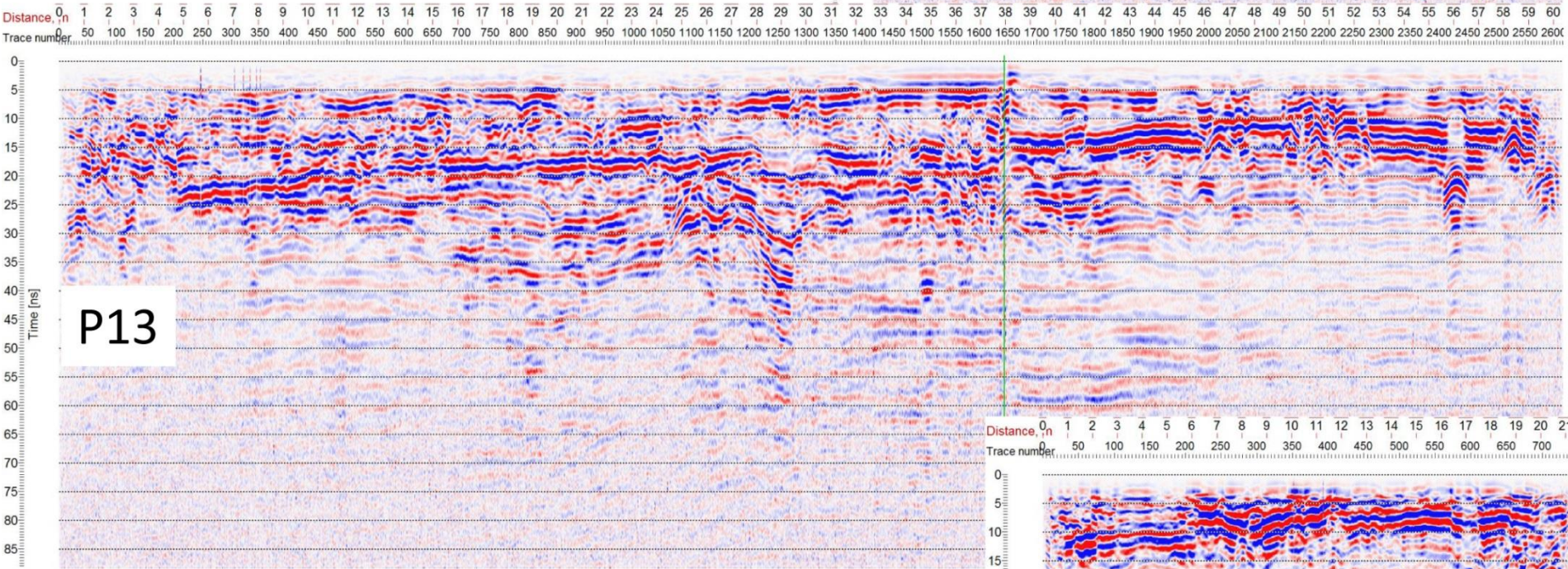
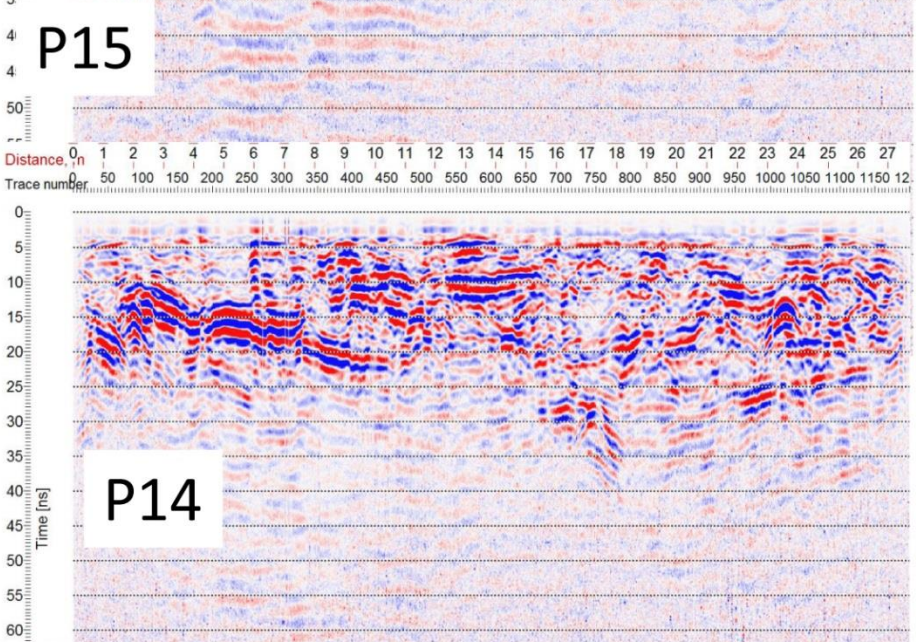
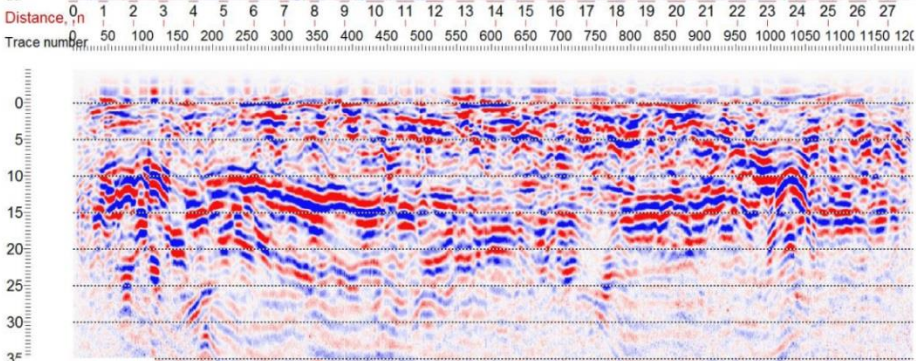
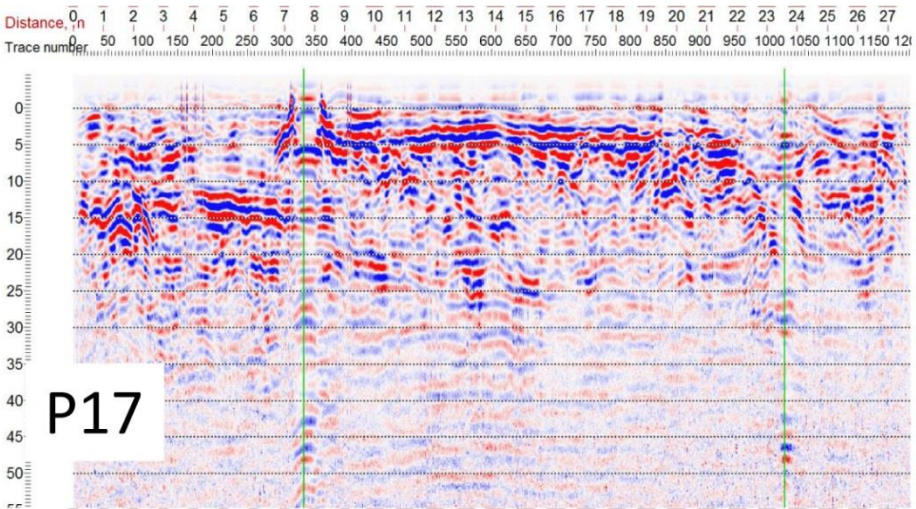
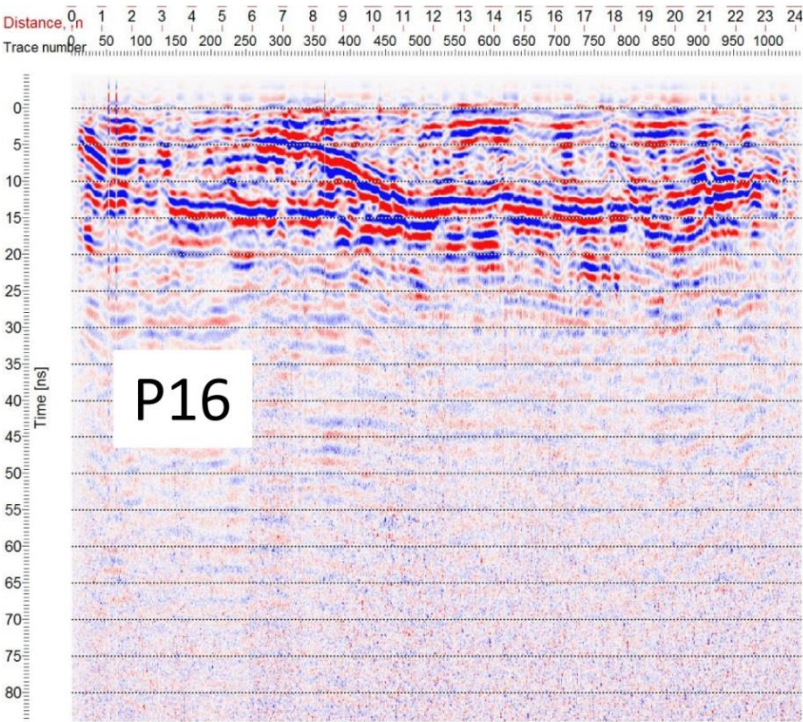
Radargrammes

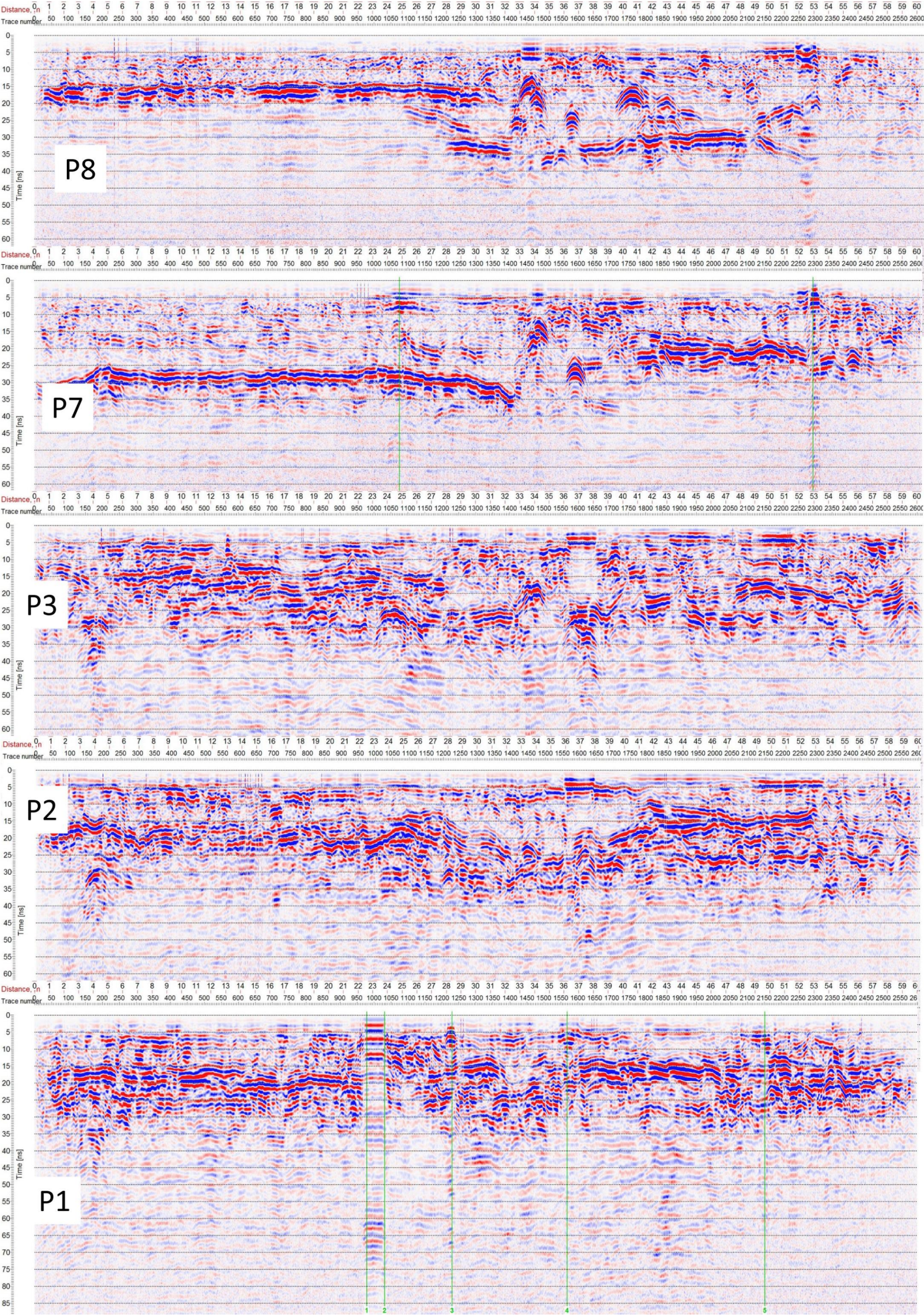
Les profils sont placés en fonction de leurs relations de voisinage :

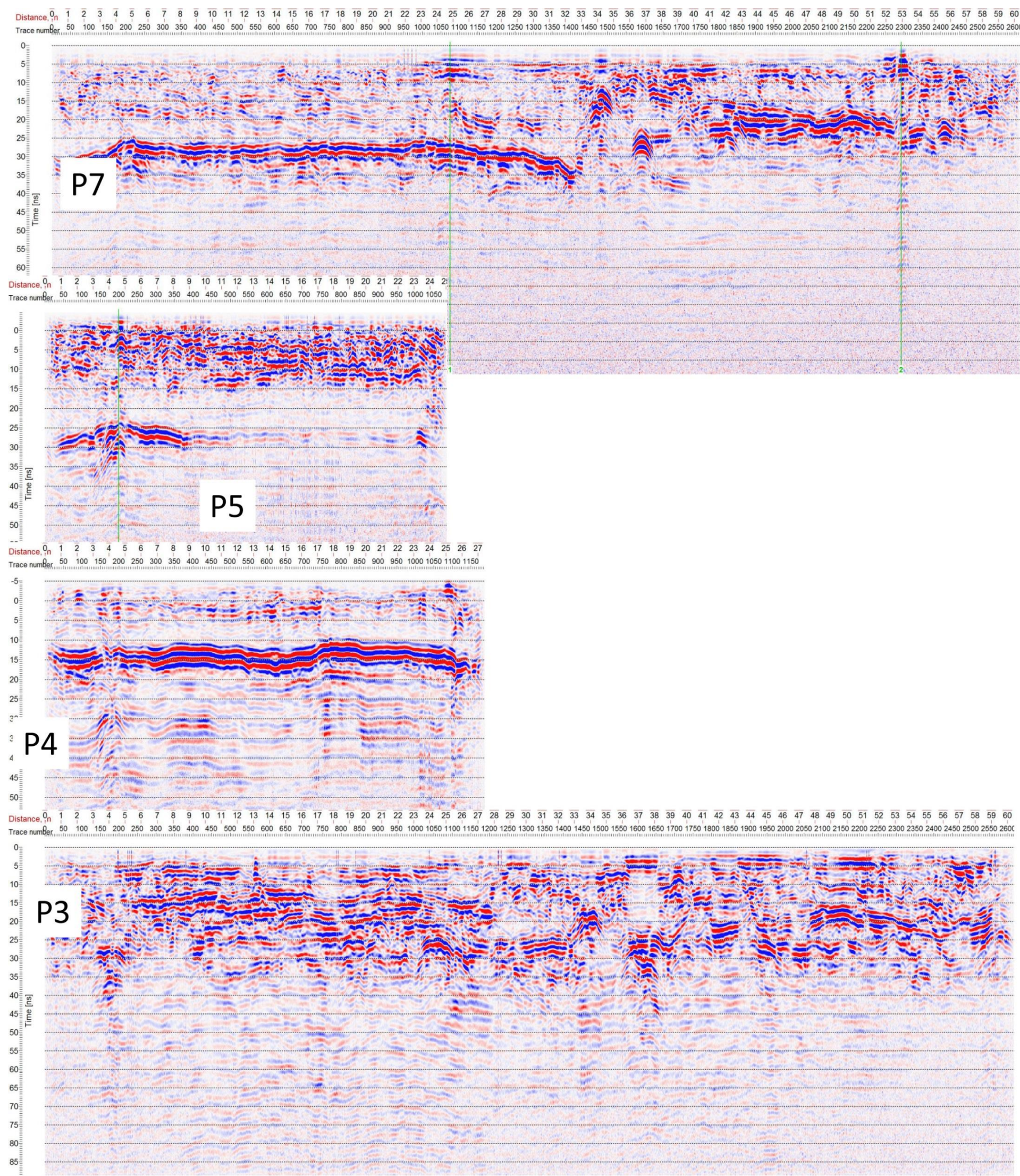
- Page 43, profils complets : 13, 11, 10, 9, 8.
- Page 4445, profils partiels : 16, 17, 15, 14, 13.
- Page 45, profils complets : 8, 7, 3, 2, 1.
- Page 46, profils partiels : 7, 5, 4, 3.

Liste des anomalies et commentaires : voir dans le texte le Tableau 1











Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Délégation Régionale Alsace
Parc d'Activité Porte Sud
Rue Pont du Péage – Bât H1
67118 – Geispolsheim - France
Tél. : 03.88.77.48.90