



COUPLAGE MICROGRAVIMÉTRIE – SCAN 3D POUR LA DÉTECTION DE CAVITÉS EN MILIEU URBAIN

Application à la recherche de crayères à Châlons-en-Champagne (51)

Ysoline HANNION, Silvain YART, Thomas JACOB, Pierre PANNET, Anne GRANDEMANGE

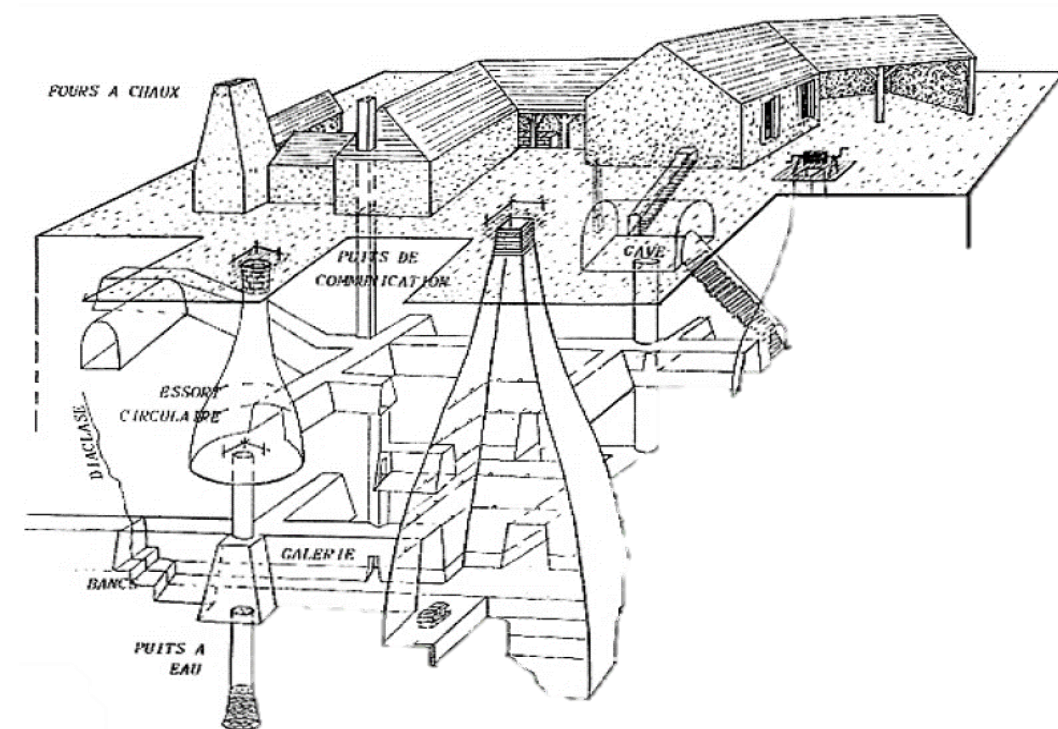
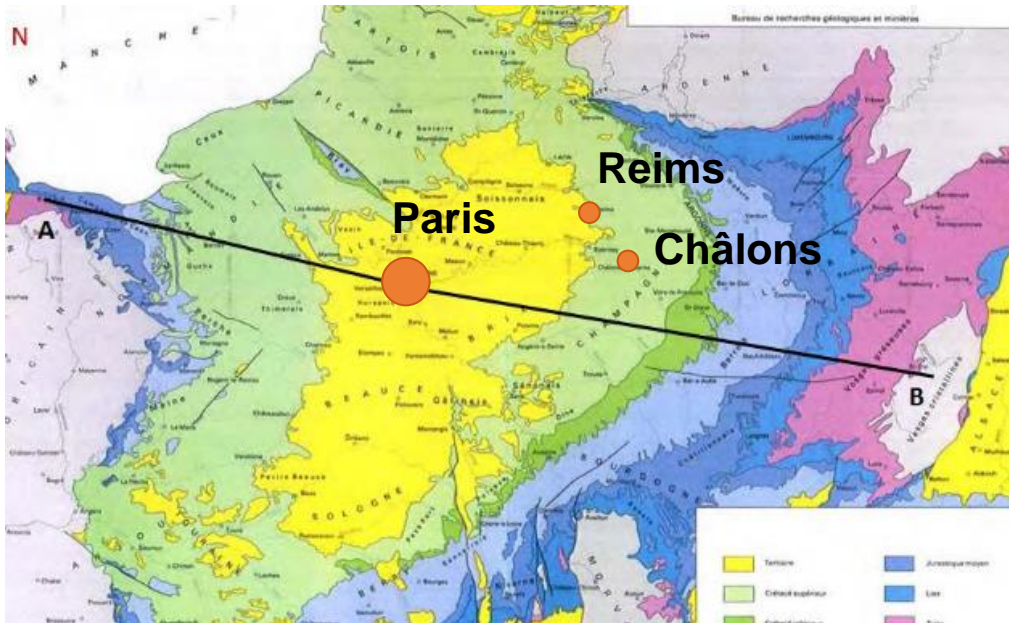
3^{ème} rencontre nationale sur la prévention des risques cavités souterraines
Paris, 26 septembre 2019

CONTEXTE

Les cavités en Champagne

De nombreuses cavités en lien avec un riche passé historique : occupation gallo-romaine, médiévale, guerre 14-18, révolution industrielle, extraction de craie, occupation par les maisons de champagne.

- **Géologie** : exploitation souterraine de la craie.
- **Histoire et économie** :
 - **Carrefour commercial** depuis l'époque gallo-romaine → besoin d'espaces de stockage de denrées.
 - **Influence des guerres** → nombreux ouvrages militaires souterrains.





CONTEXTE

Les cavités en Champagne

Les crayères

Caractéristiques :

- Exploitations souterraines de **forme pyramidale**
- Profondeur : **10 à 35 m**
- Volumes : **500 à plus de 1 500 m³**
- **Souvent regroupées** en « grappes » (jusqu'à 26 000 m³)

Problématique :

Beaucoup de **puits d'accès (essors) bouchés et oubliés**.
D'autres crayères sont **réexploitées en caves**.
Cavités de grandes dimensions → **Intensité d'aléa forte**.



Nécessité de retrouver ces cavités et évaluer leur stabilité

CONTEXTE

Cadre de l'étude

Reconnaissance de cavités sur trois anciens sites militaires cédés à la ville de Châlons-en-Champagne

Etat des lieux :

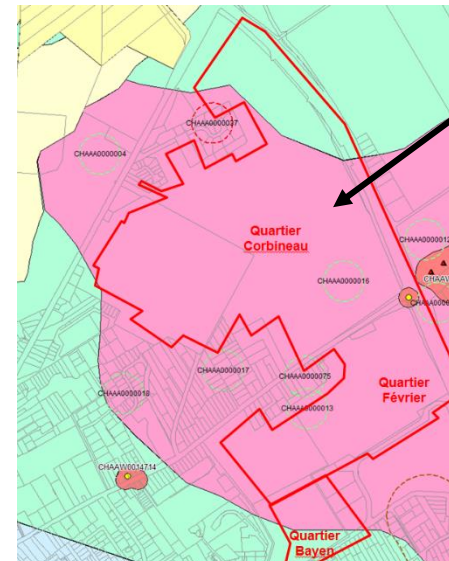
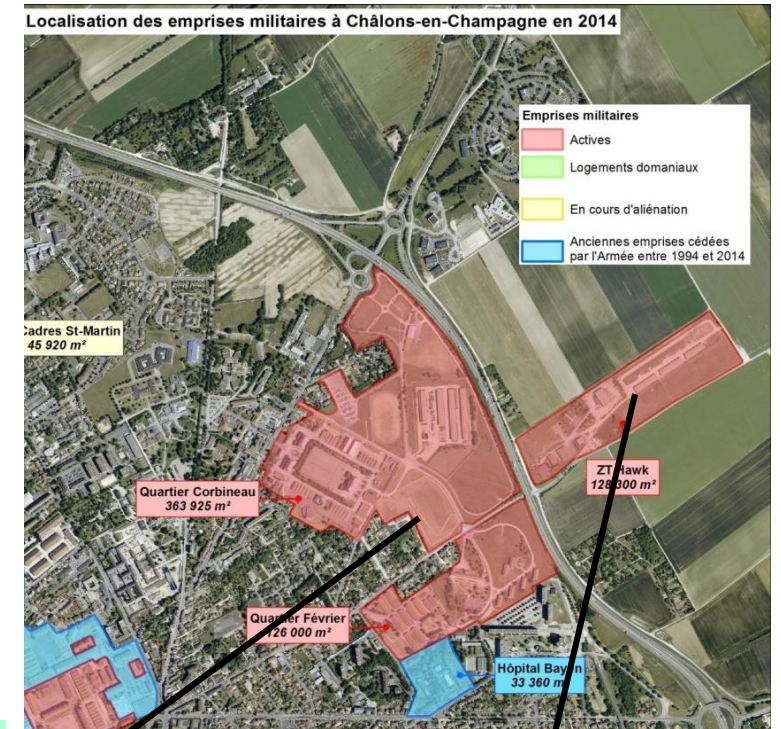
- PPRn cavité en cours de réalisation.
- Zone de **susceptibilité de présence de cavités forte à très forte**.
- Zone d'**aléa effondrement-tassement fort**.
- Zone potentielle d'**urbanisation future**.

Objectifs :

- Diagnostic de **stabilité des cavités connues**.
- **Recherche d'autres cavités** par microgravimétrie.
- **Réouverture des puits** découverts et **diagnostic de stabilité**.
- Elaboration de la **carte d'aléa et recommandations associées**.

Cadre contractuel :

- Convention R&D avec la DDT 51.
- Partenariat DDT 51, BRGM, Ville de Châlons, Armée.





CONTEXTE

Phasage des opérations

2017 :

- **Recherche de cavités** par microgravimétrie.
- Localisation et **ouverture des essors.**
- **Scan 3D** des cavités découvertes.
- **Diagnostic de stabilité** des cavités déjà connues et nouvellement découvertes.
- **Post-traitement des données 3D** et microgravimétriques.

2018 :

- **Complément d'acquisition** microgravimétrique.

CAMPAGNE MICROGRAVIMÉTRIQUE

Principe de la microgravimétrie

Principe :

- Mesure des **variations spatiales du champ de pesanteur** terrestre à petite échelle
- Champ de **gravité influencé par les variations de densité du sous-sol** (a fortiori par la présence de vides).

→ **Méthode adaptée à la détection de cavités.**

Résultats :

- **Carte d'anomalies** gravimétriques.

Anomalie négative = Zone de moindre densité = Présence de cavité possible



- Positionnement des **forages de contrôle** au droit des anomalies négatives.
- **Optimisation** du nombre de forages.





CAMPAGNE MICROGRAVIMÉTRIQUE

Mise en œuvre

2017 :

- **4008 stations.**
Maille 12,5 x 12,5 m et
resserrements locaux.
- **35 jours** de terrain.
- **2 à 3 gravimètres.**
- **2 opérateurs GPS.**

2018 :

- **376 stations supplémentaires.**
Maille 10 x 10 m.

4 384
stations

64 ha
investigués



CAMPAGNE MICROGRAVIMÉTRIQUE

Post-traitement des données

- Correction de l'influence de tous les facteurs indésirables liés à la mesure ou à l'environnement.
- Soustraction de la valeur de la gravité théorique → mesure d'anomalie.
- Interpolation des mesures ponctuelles → carte de l'anomalie de Bouguer.
- Retrait de l'anomalie régionale (variations de la gravité à grande longueur d'onde) → carte de l'anomalie résiduelle.

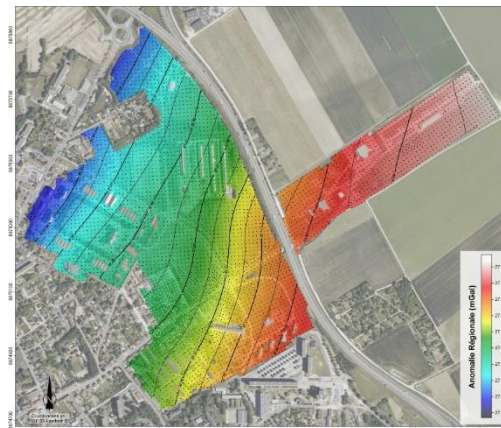
Anomalie résiduelle varie de -0,310 mGal à 0,080 mGal.

Seuil de signification : 0,012 mGal à 0,040 mGal.

Anomalie de Bouguer



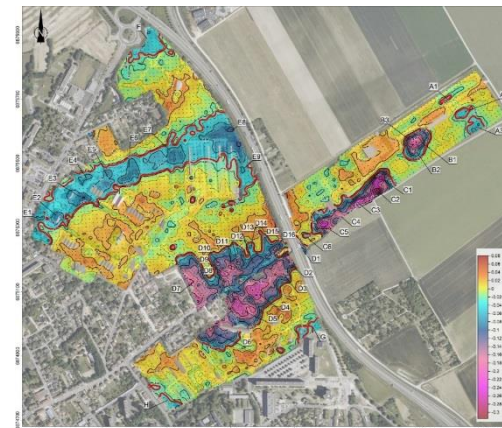
Anomalie régionale

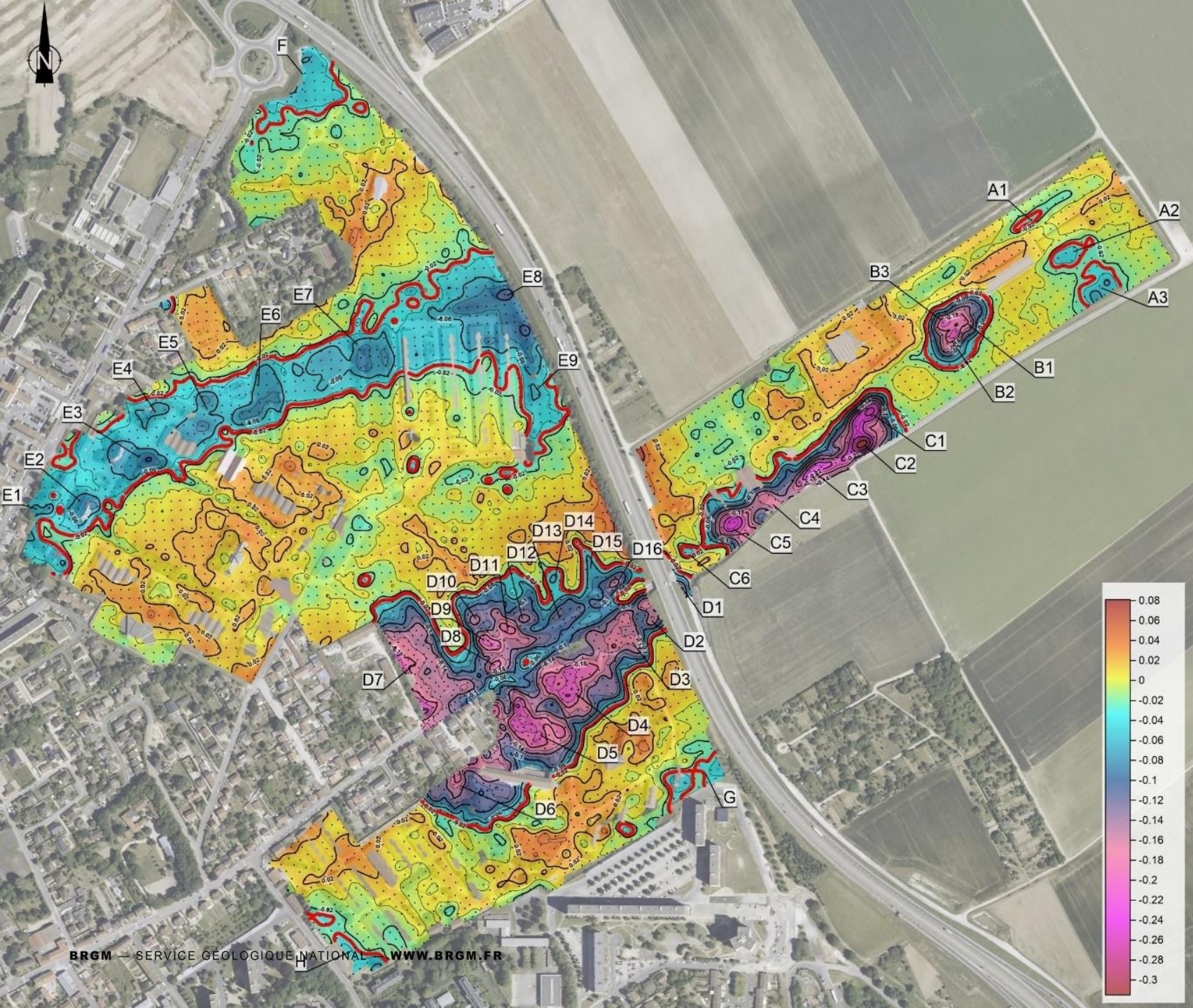


-

=

Anomalie de résiduelle

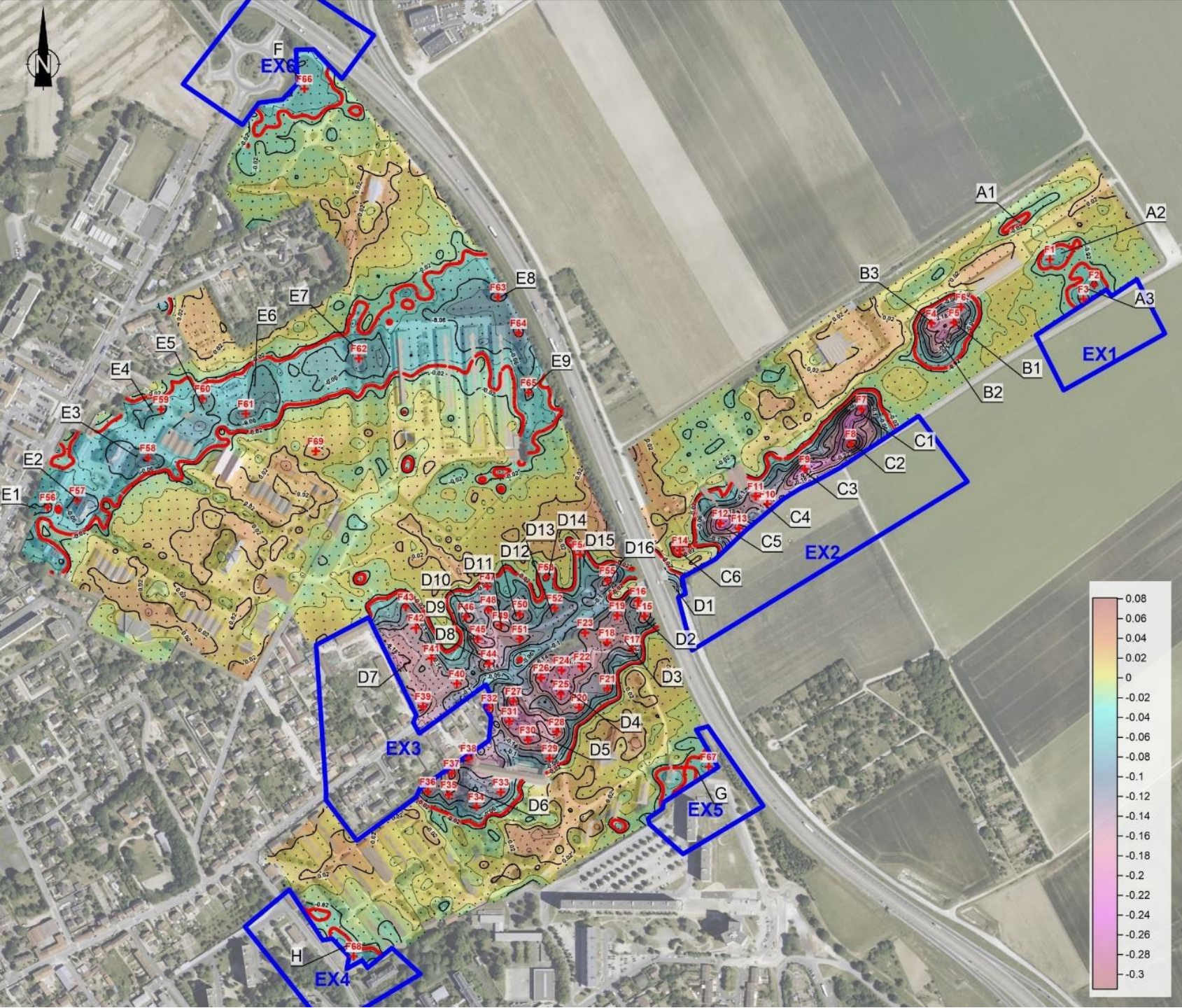




CAMPAGNE MICROGRAVIMÉTRIQUE

Anomalie résiduelle

- **Vastes secteurs d'anomalies négatives** (teintes bleues-magenta).
- Amplitudes importantes : **-0,2 à -0,3 mGal**
- Anomalies **jointives** et possiblement **coalescentes**.
- Anomalies **non circonscrites au droit des enjeux**.

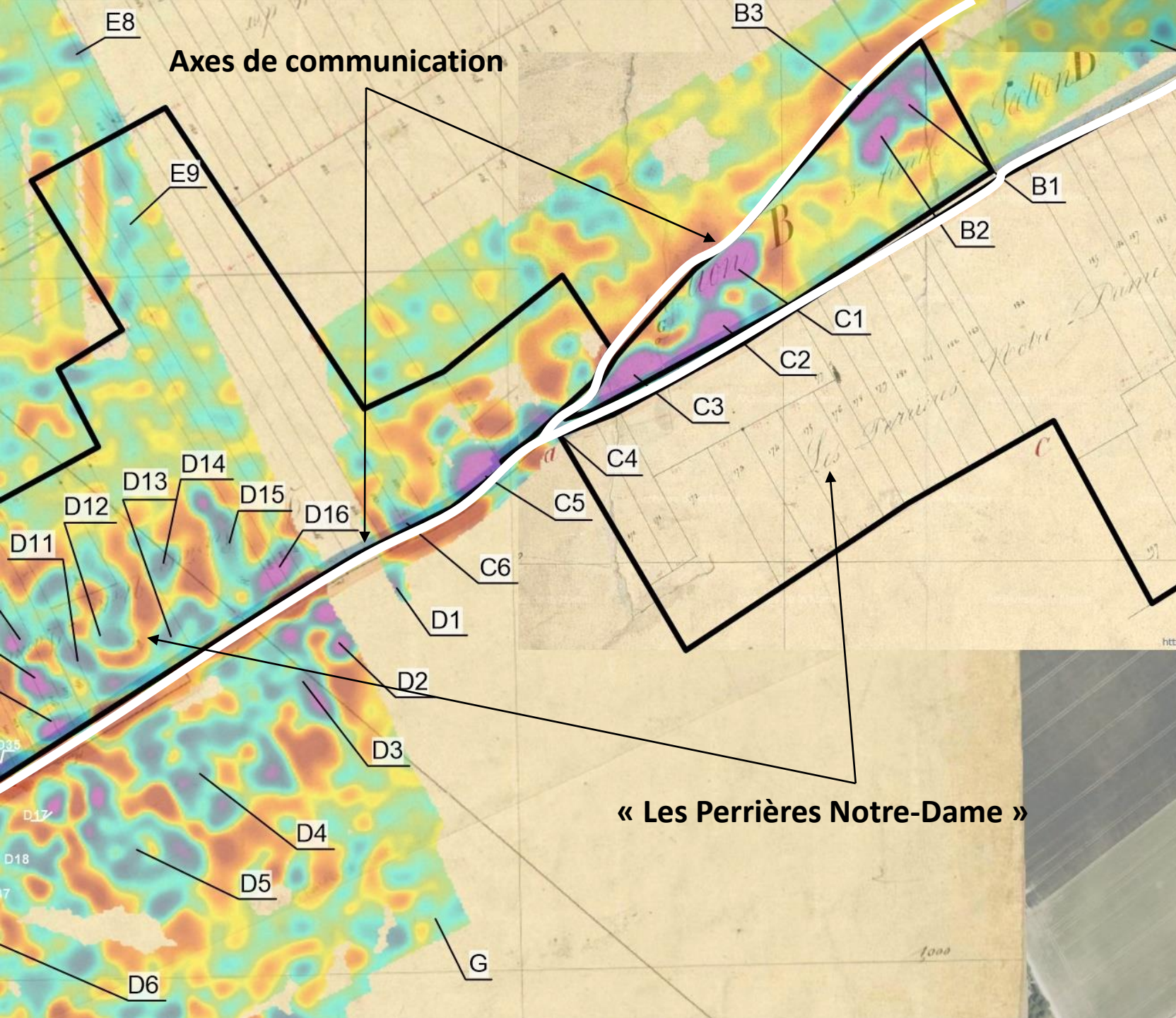


CAMPAGNE MICROGRAVIMÉTRIQUE

Sondages et investigations complémentaires

Recommandations :

- **69 sondages** ciblés sur les apex d'anomalies.
- **6 zones d'extension des investigations** microgravimétriques pour circonscrire les anomalies.



CAMPAGNE MICROGRAVIMÉTRIQUE

Analyse de la toponymie

- Géoréférencement du **cadastre napoléonien** (1828).
- Lieu-dit « **Les Perrières (= carrières)** Notre-Dame ».
- Anomalies de part et d'autre des **voies de communication** et **parallèles au parcellaire** du XIX^{ème} siècle.



**Renforce l'hypothèse
cavité anthropique.**



SCAN 3D DES CAVITÉS DÉCOUVERTES

Principe de fonctionnement du scanner laser mobile ZEB-REVO

43 200
Points par
seconde

30 m
de portée

SLAM

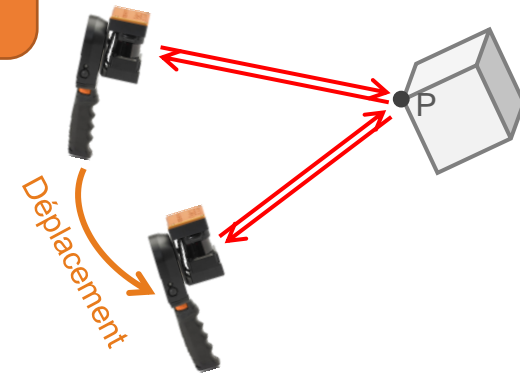
Simultaneous Localization And Mapping

Détection de points
singuliers scannés
depuis différentes
positions

Données centrale
inertielle

Calcul de la trajectoire

Construction du nuage de
points 3D

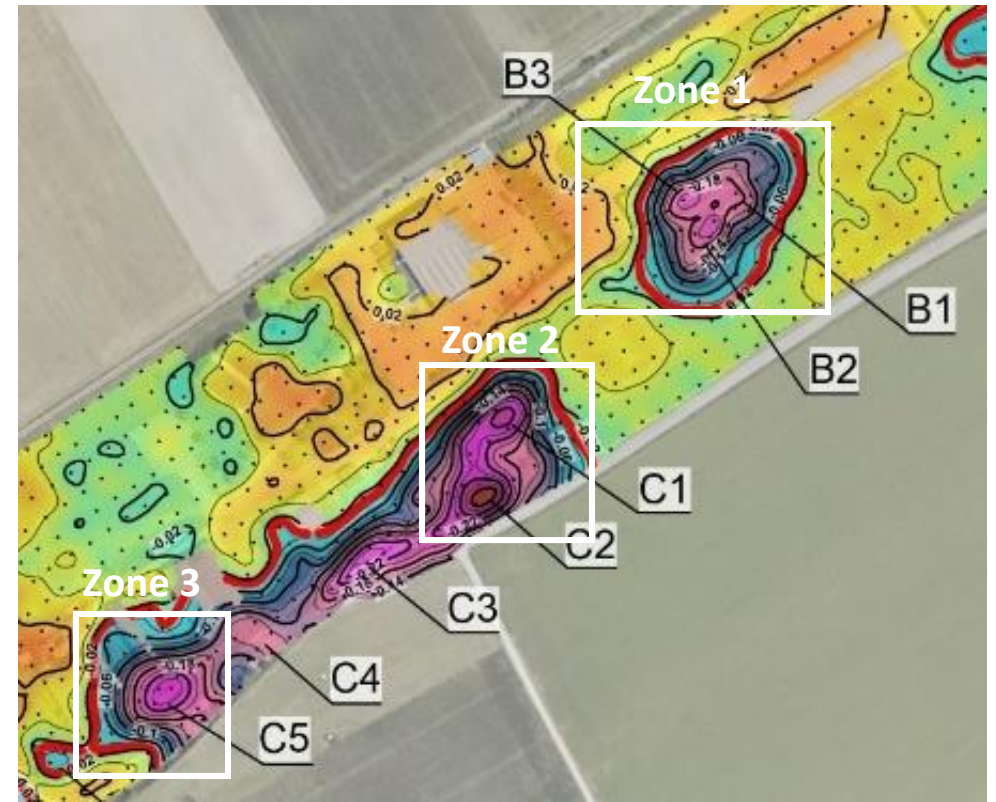


SCAN 3D DES CAVITÉS DÉCOUVERTES

Mise en œuvre

Réouverture à la pelle mécanique et cartographie 3D des vides souterrains découverts au droit de trois zones d'anomalie microgravimétrique négatives.

- **Zone 1 - Anomalies B1-2-3** : 3 crayères interconnectées.
- **Zone 2 - Anomalies C1-2** : 3 essors de crayères partiellement comblées.
- **Zone 3 - Anomalie C5** : 5 crayères interconnectées

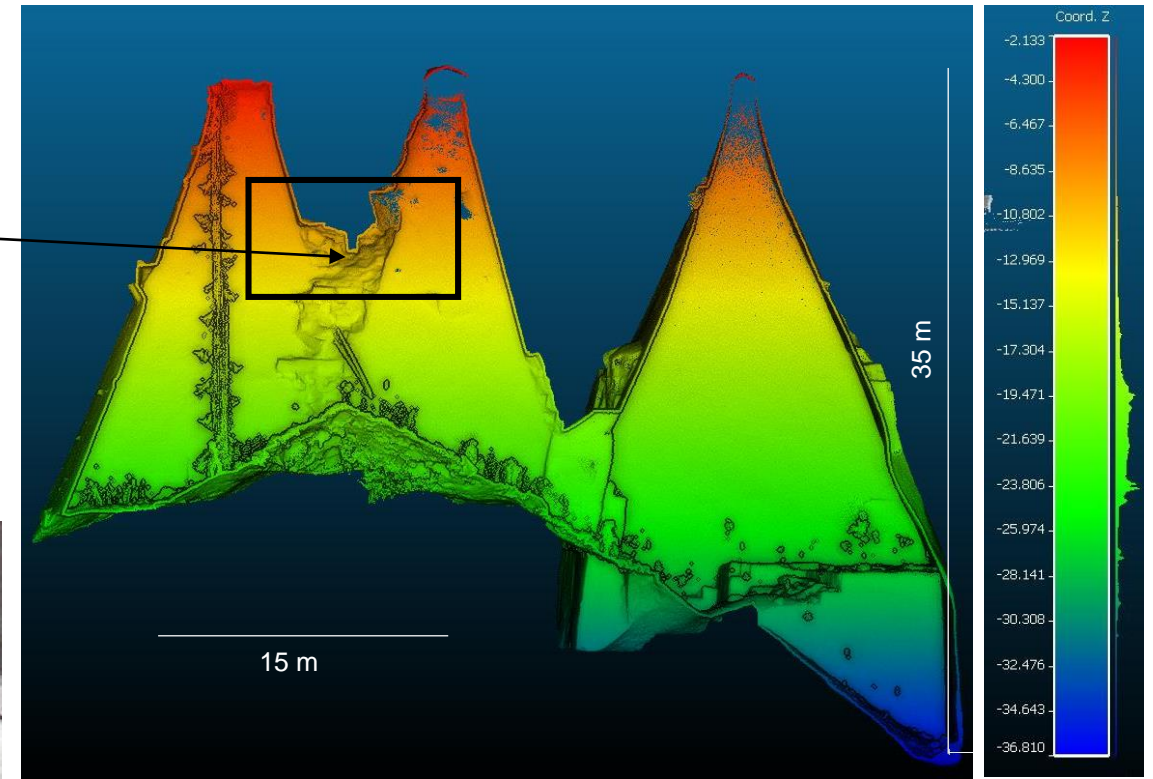
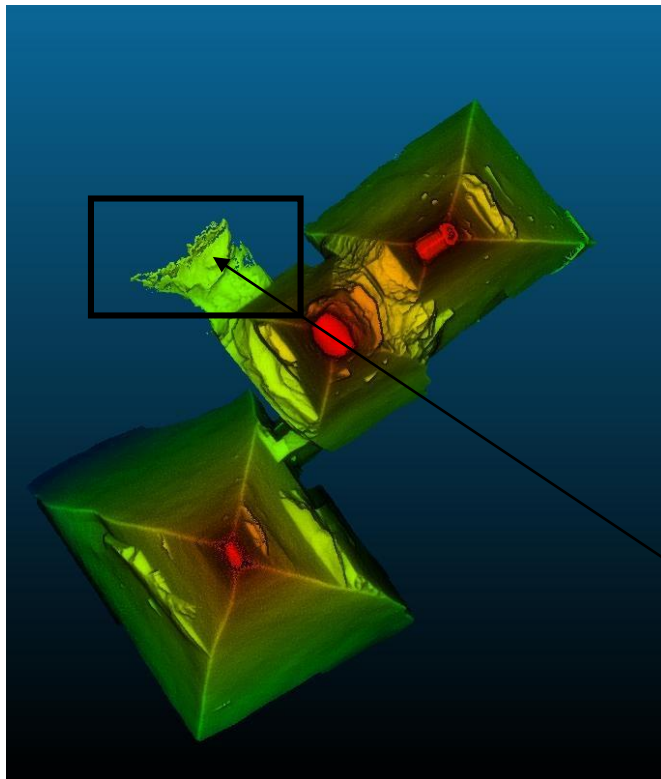
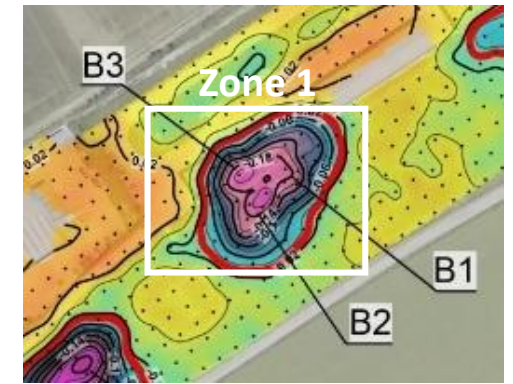


COUPLAGE SCAN 3D - MICROGRAVIMÉTRIE

Zone 1

Résultat du scan 3D

Groupe de 3 crayères + 1 crayère supposées (effondrée) au Nord.

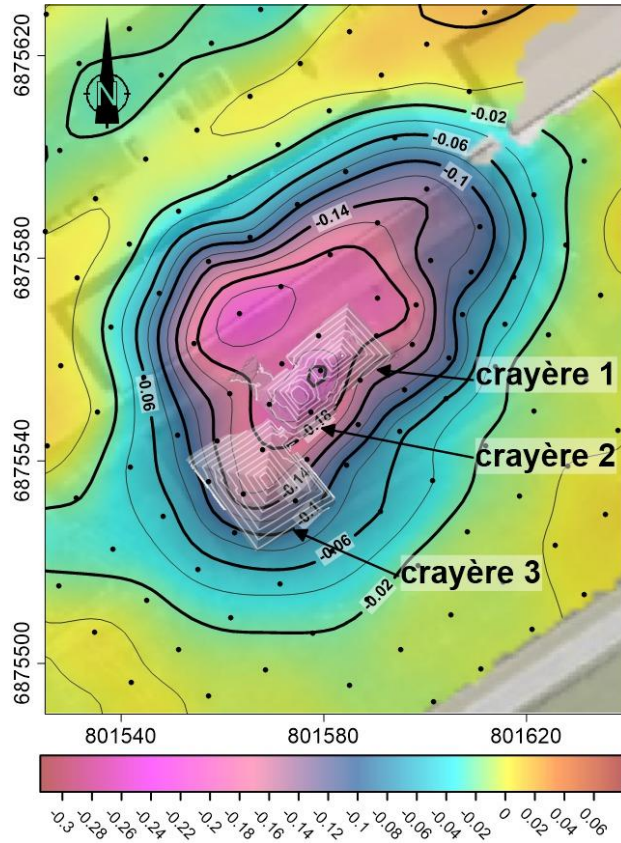


COUPLAGE SCAN 3D - MICROGRAVIMÉTRIE

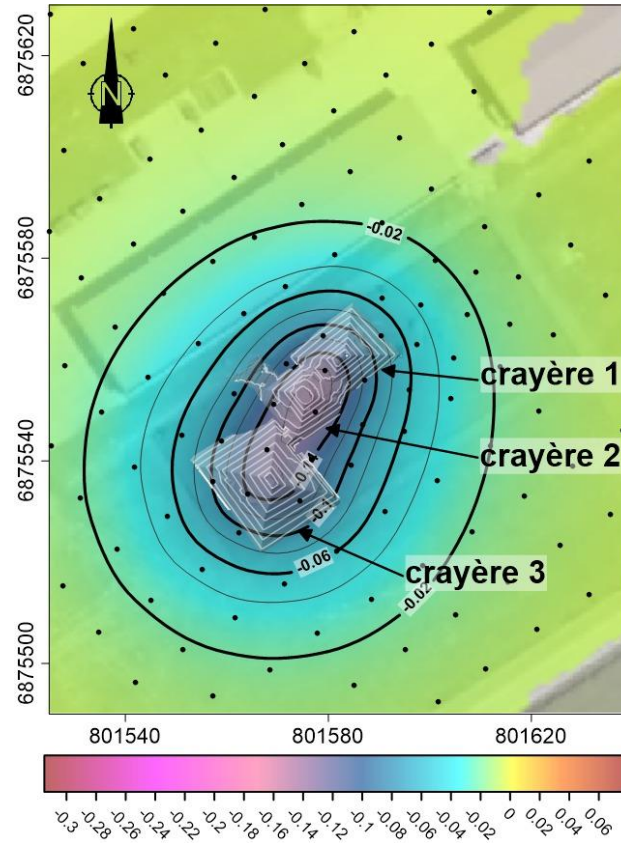
Zone 1

Etape 1 : Correction de l'anomalie par l'effet des crayères connues

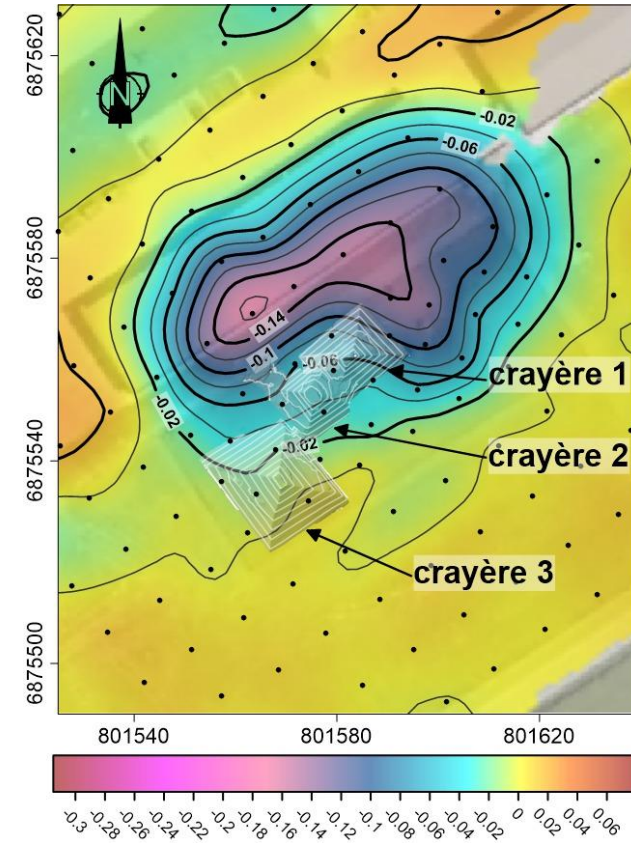
Anomalie mesurée



- Anomalie modélisée



= Anomalie persistante

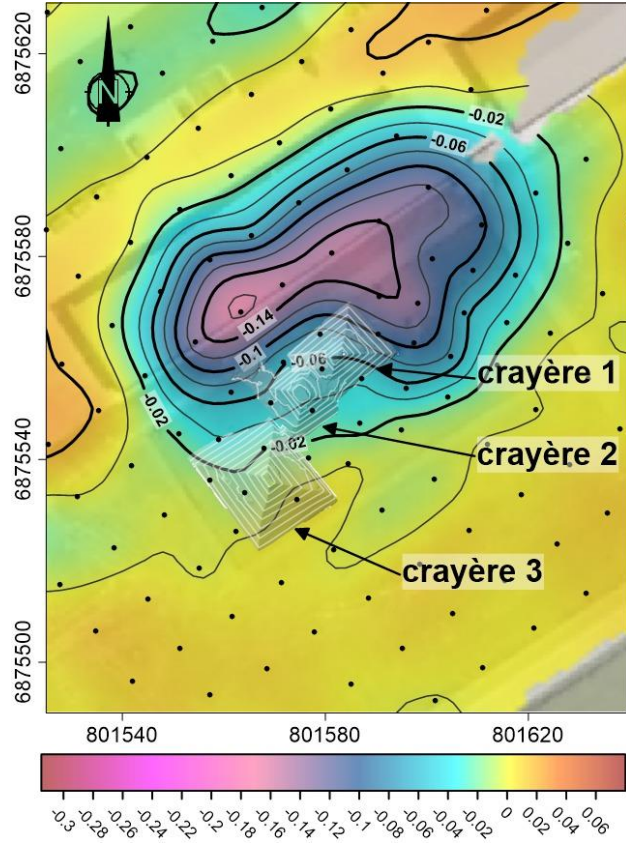


COUPLAGE SCAN 3D - MICROGRAVIMÉTRIE

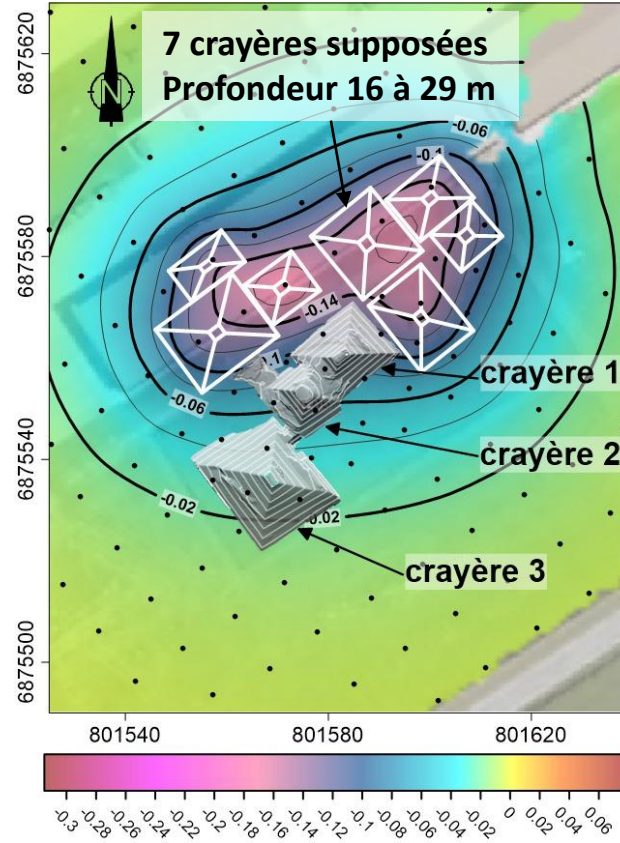
Zone 1

Etape 2 : Correction de l'anomalie par l'effet des crayères inconnues

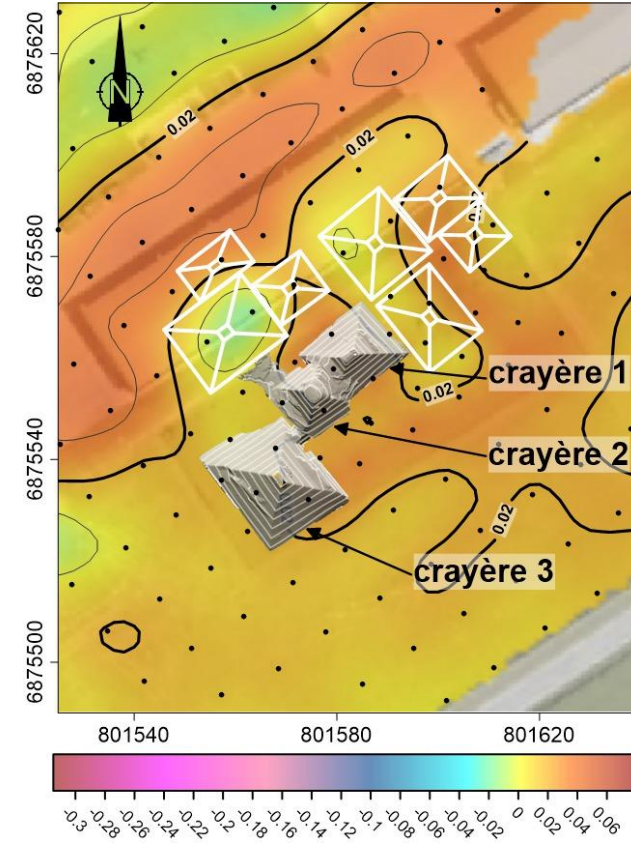
Anomalie persistante Etape 1



- Anomalie modélisée



= Anomalie persistante Etape 2

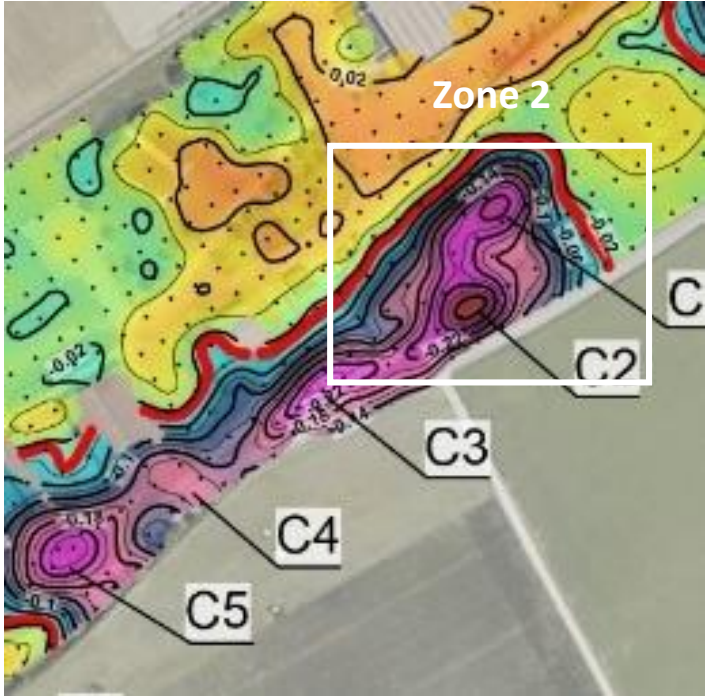
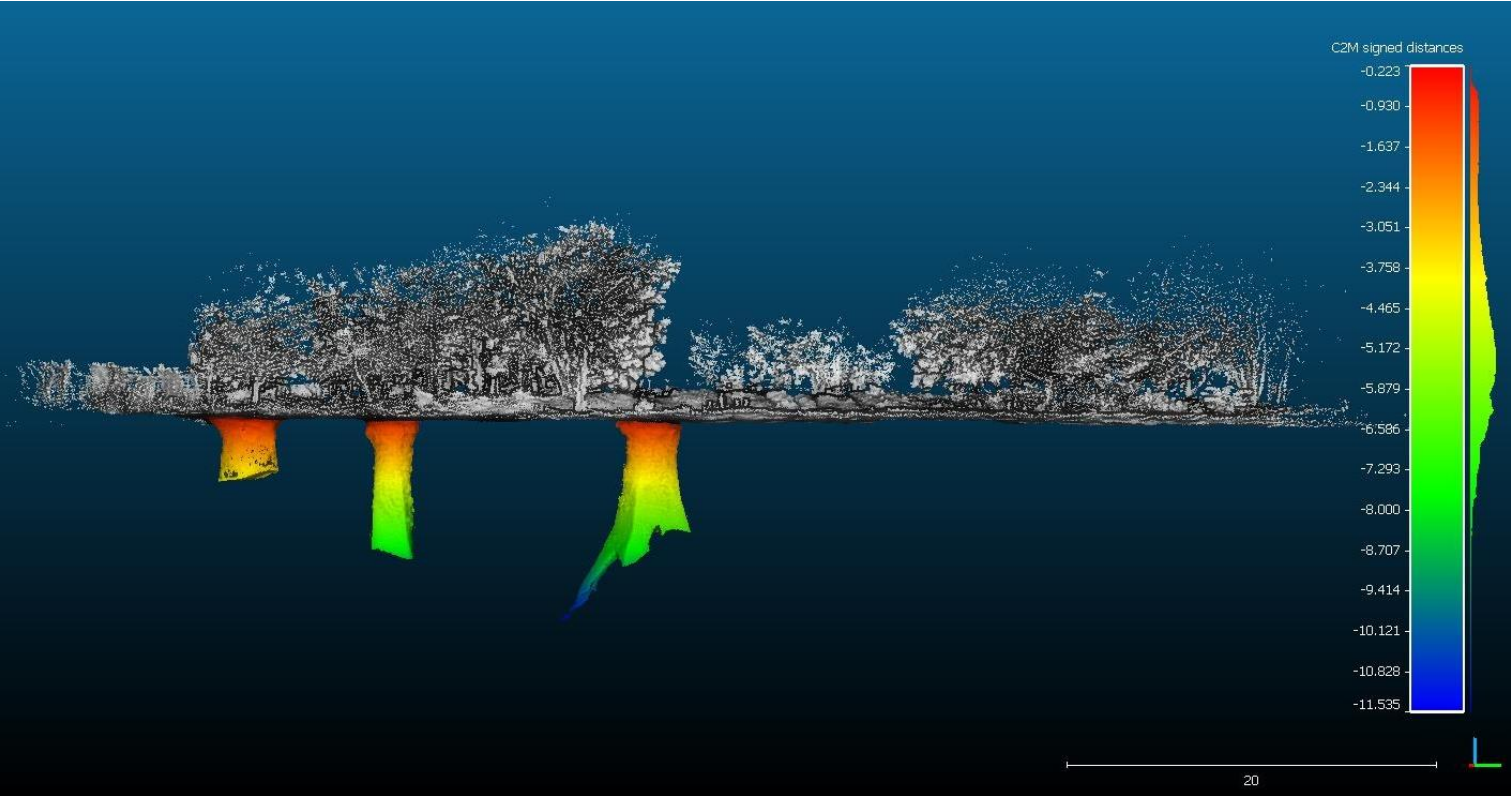


COUPLAGE SCAN 3D - MICROGRAVIMÉTRIE

Zone 2

Résultat du scan 3D

- 3 têtes de puits remblayées.
 - Forte anomalie négative (-0,3 mGal)
- Existence de vides résiduels associés à d'autres crayères non retrouvées

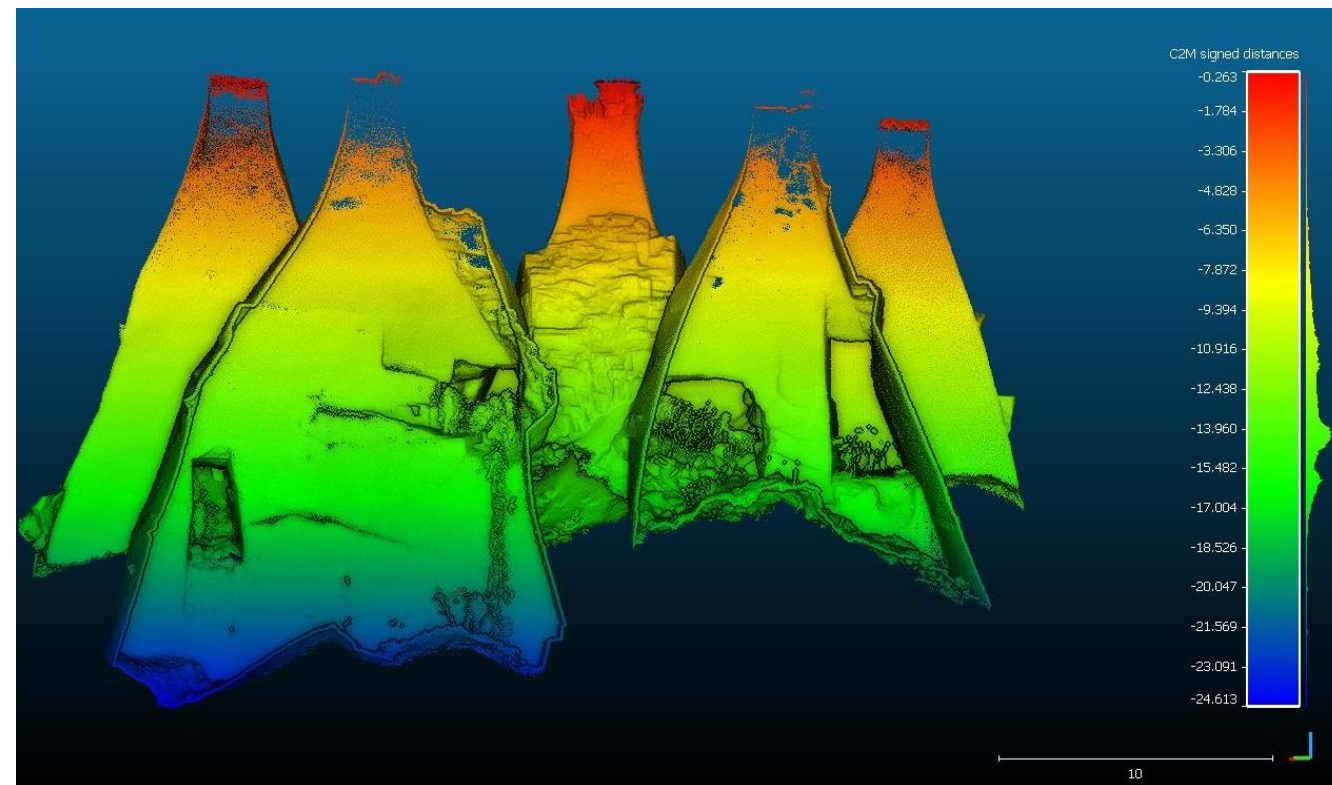
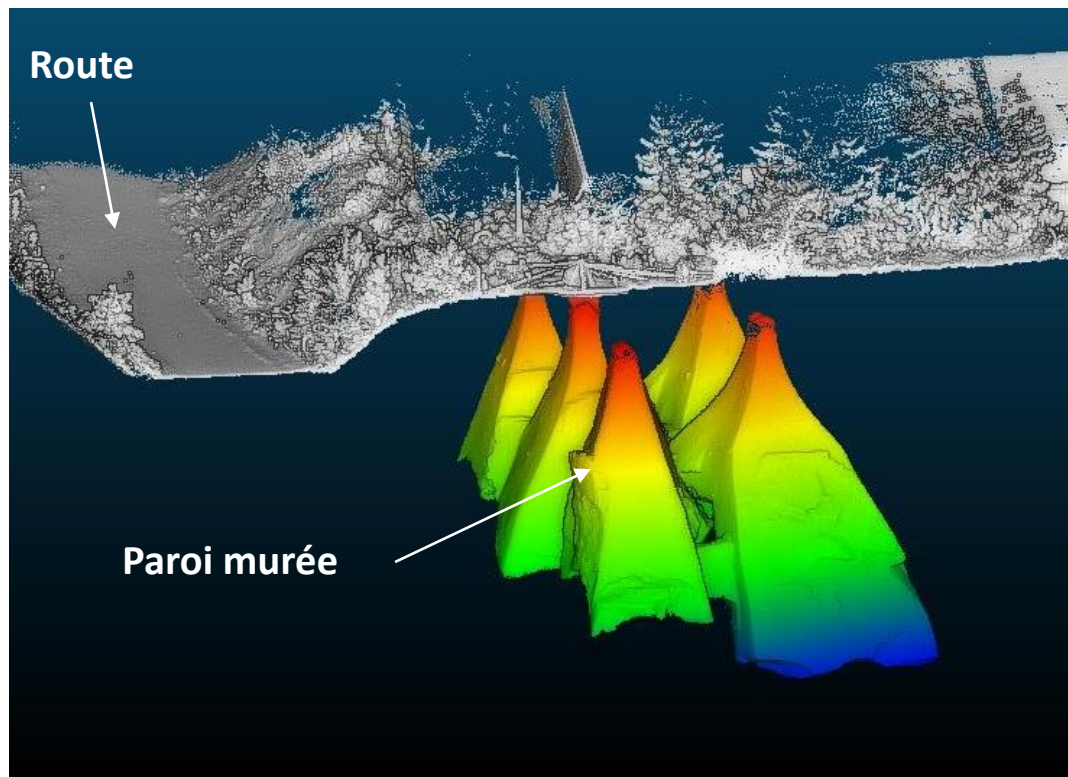
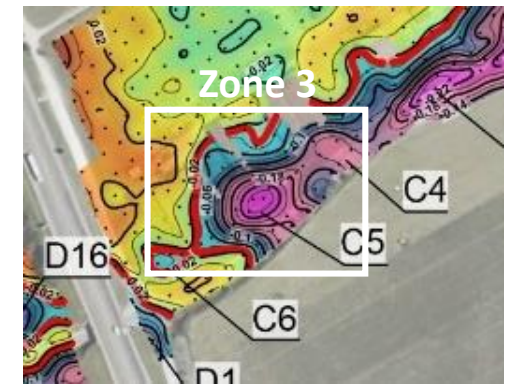


COUPLAGE SCAN 3D - MICROGRAVIMÉTRIE

Zone 3

Résultat du scan 3D

Groupe de 5 crayères. 25 m de profondeur max.



COUPLAGE SCAN 3D - MICROGRAVIMÉTRIE

Zone 3

Correction de l'anomalie par l'effet des crayères

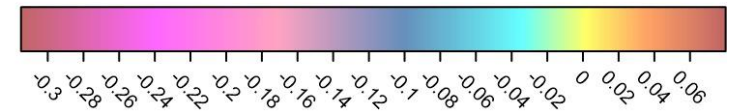
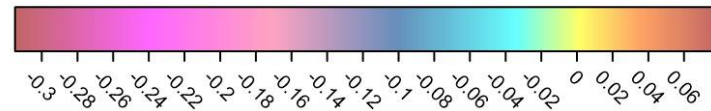
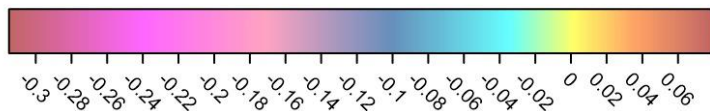
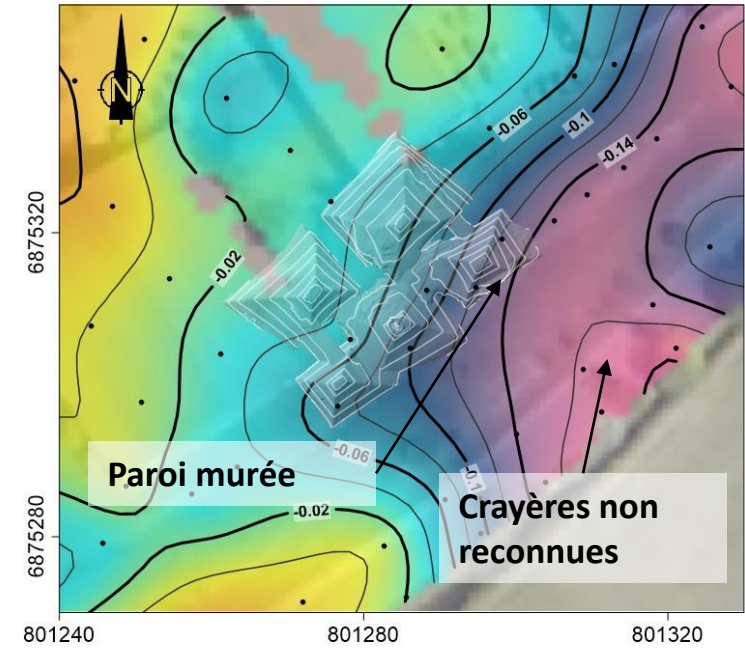
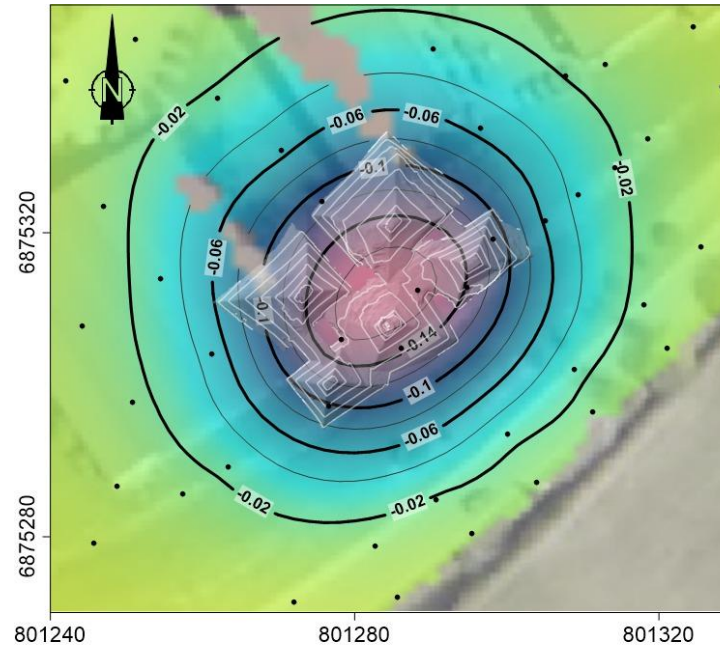
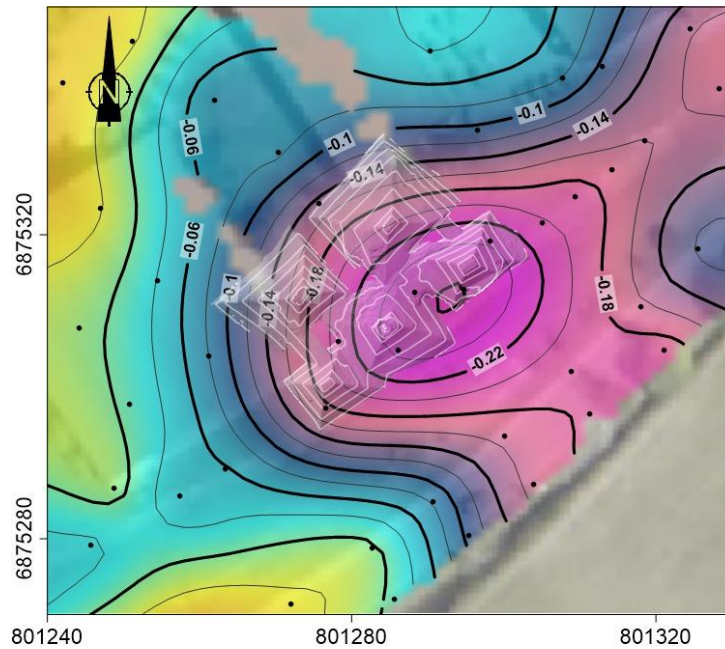
Anomalie mesurée

-

Anomalie modélisée

=

Anomalie persistante



CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Approche optimisée pour la reconnaissance exhaustive des cavités

- Approche itérative permettant une **optimisation significative de la détection de cavités** par microgravimétrie.
- Nécessite de pouvoir accéder en sécurité aux cavités.

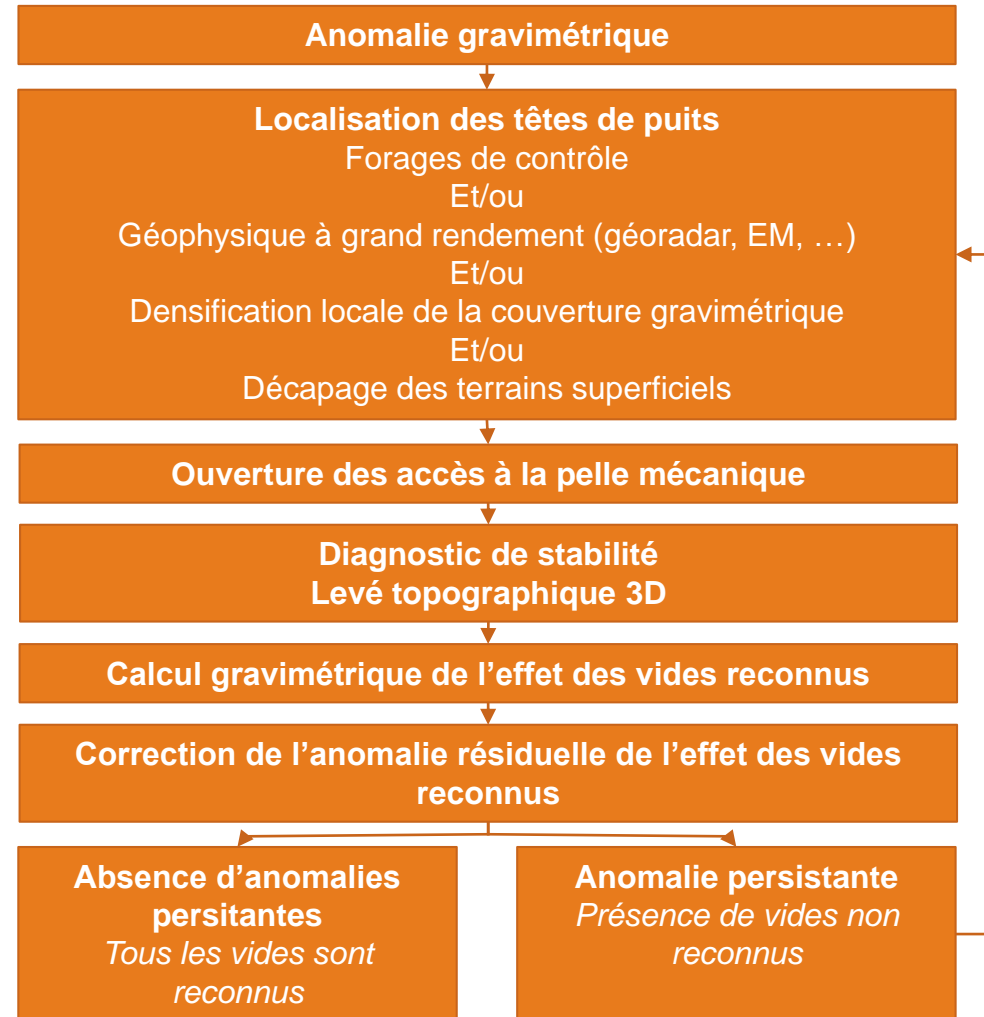
Références :

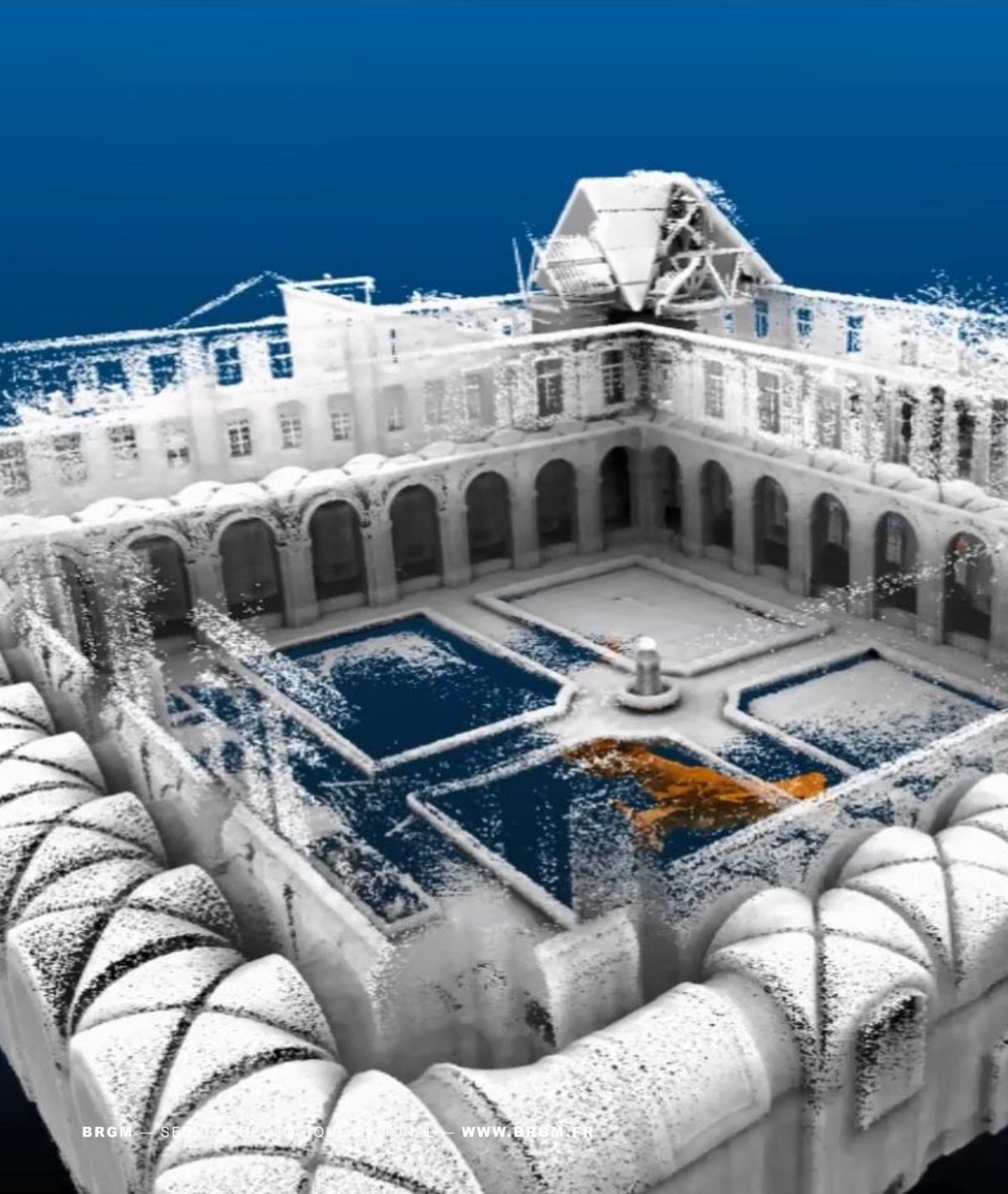
Rapports BRGM :

RP-67277-FR

RP-67980-FR

RP-68644-FR





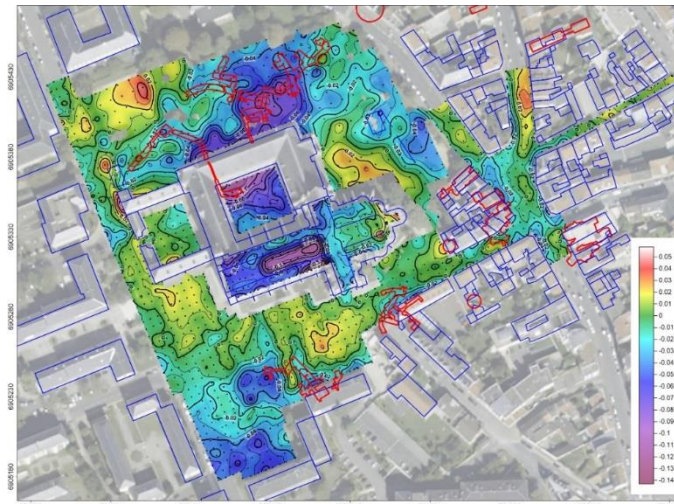
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Développements en cours

Utilisation du scan 3D pour la correction de l'influence des bâtiments sur l'anomalie résiduelle.

- Amélioration de la **prise en compte des géométries de bâtiments complexes** dans la correction de l'anomalie gravimétrique.
- Objectif : affiner la détection de cavités par microgravimétrie dans les **centres urbains historiques denses**.

→ **Gestion du risque optimale dans les zones à forts enjeux.**



CONTACTS :

Ysoline HANNION

Direction des actions territoriales
Délégation régionale de Reims

y.hannion@brgm.fr

Thomas JACOB

Direction Risques et Prévention
*Imagerie géophysique et
télédétection*

t.jacob@brgm.fr

Silvain YART

Direction Risques et Prévention
*Risques instabilités gravitaires et
érosion des versants et des sols*

s.yart@brgm.fr