

Evaluation multi-méthodes du risque de mouvement de terrain lié à d'anciennes carrières sur un ancien site militaire à Châlons-en-Champagne (51)

Multi-method evaluation of old quarries-induced ground collapse hazard on a former military site in Châlons-en-Champagne (51)

Marion SZCZYGLOWSKI*¹, Gildas NOURY², Thomas JACOB²

1 Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Direction régionale déléguée de Reims – 1 rue Maurice Hollande 51100 Reims, France

2 Bureau de Recherches Géologiques Minières (BRGM) – 3 Avenue Claude Guillemin BP 36009 45000 Orléans-la-Source, France

**m.szczyglowski@brgm.fr*

RESUME : La présence possible de grandes cavités souterraines (crayères de plusieurs milliers de mètres cubes) au droit d'un projet de réhabilitation urbaine à Châlons-en-Champagne a motivé la Communauté d'Agglomération à confier une étude approfondie au BRGM. Un état des connaissances et des investigations géophysiques par microgravimétrie (4377 stations sur une surface de 65 ha) ont été suivis de levés topographiques (cavités accessibles) et d'investigations géotechniques avec l'objectif de vérifier la présence de vides souterrains, de comprendre l'origine des anomalies gravimétriques et d'évaluer les risques résiduels. L'étude s'est concentrée sur deux sites, jugés représentatifs de deux anomalies gravimétriques négatives notables. Chacun des sites a fait l'objet d'un profil de sondages qui recoupe les zones sans anomalies et les anomalies les plus marquées (site nord : 14 sondages sur un profil de 110 m ; site sud : 30 sondages sur 134 m). Trois techniques de sondages ont été mises en œuvre pour interpréter de manière optimale la configuration géotechnique des sites (sondages destructifs pour rechercher des vides, carottés pour visualiser directement les terrains, CPT pour mesurer finement les transitions entre matériaux). Aucun vide franc n'a été identifié en sondage. Pour l'anomalie sud, 13 sondages sur 23 présentent toutefois de faibles résistances jusqu'à 18-23 m de profondeur avec une forte coïncidence avec la localisation de l'anomalie gravimétrique. Ces résultats révèlent la présence d'une ancienne carrière à ciel ouvert remblayée : configuration totalement inédite à cet endroit car n'apparaissant jamais dans les nombreux documents d'archives consultés. Pour l'anomalie nord, les résultats des sondages, notamment CPT : 1) coïncident quasi parfaitement avec l'anomalie gravimétrique ; 2) écartent les risques géotechniques liés à d'anciennes exploitations ; 3) renforcent l'hypothèse d'une anomalie purement géologique. Les analyses effectuées ouvrent la possibilité d'un aménagement simplifié et permettent d'envisager un protocole précis de mesures pour poursuivre l'analyse de ce secteur.

ABSTRACT: The possible presence of large underground cavities (measuring several thousand cubic metres) at the site of an urban regeneration project in Châlons-en-Champagne prompted the urban community to commission a detailed study from BRGM. A review of existing knowledge and geophysical investigations using microgravimetry (4,377 stations covering an area of 65 ha) were followed by topographical surveys (accessible cavities) and geotechnical investigations with the aim of verifying the presence of underground voids, understanding the origin of gravimetric anomalies and assessing residual risks. The study focused on two sites, considered representative of two notable negative gravimetric anomalies. Each site was surveyed using a profile of surveys covering the areas without anomalies and the most pronounced anomalies (northern site: 14 boreholes over a 110 m profile; southern site: 30 boreholes over 134 m). Three drilling techniques were used to optimally interpret the geotechnical configuration of the sites (destructive surveys to search for voids, core sampling to directly visualise the ground, CPT to finely measure transitions between materials). No clear voids were identified during drilling. However, for the southern anomaly, 13 out of 23 boreholes show low resistance up to a depth of 18-23 m, which closely coincides with the location of the gravimetric anomaly. These results reveal the presence of an old backfilled open-pit quarry: a completely new configuration in this location, as it never appears in the numerous archive documents consulted. For the northern anomaly, the results of the surveys, particularly CPT: 1) coincide almost perfectly with the gravimetric anomaly; 2) rule out geotechnical risks associated with former mining operations; 3) reinforce the hypothesis of a purely geological anomaly. The analyses carried out open up the possibility of simplified development and allow for the consideration of a precise measurement protocol to continue the analysis of this sector.

Mots-clés : microgravimétrie ; sondages destructifs ; sondages carottés ; CPT ; cavité souterraine

1 INTRODUCTION

Le BRGM accompagne depuis de nombreuses années la Communauté d'Agglomération de Châlons-en-Champagne (CAC) pour évaluer les risques de mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines sur son territoire. Un projet de réhabilitation urbaine au nord-est de Châlons-en-Champagne a motivé la réalisation d'investigations géotechniques. Cet article décrit les méthodes déployées, les résultats obtenus et détaille l'évaluation des risques pour deux sites particulièrement concernés.

2 ANALYSES PRELIMINAIRES

2.1 Présentation du site

Suite à la fermeture de la base militaire au nord-est de Châlons-en-Champagne, les terrains de l'ancien quartier Corbineau ont été identifiés comme espaces de développement possible dans le plan de redynamisation de la CAC. A cet endroit, les terrains attendus sont constitués d'une faible épaisseur de colluvions et formations périglaciaires quaternaires (graveluches) reposant sur un substratum carbonaté, la craie de Châlons (Coniacien et Santonien, Crétacé supérieur). Sur le secteur, le toit de la nappe se situe à plus de 15 m de profondeur dans la craie. Aucune cavité souterraine n'est connue à cet endroit. Les caractéristiques géologique, géomorphologique et hydrogéologique sont en revanche favorables à la présence de grandes cavités de type crayère (cavités pyramidales de plusieurs milliers de mètres cubes). Elles ont longtemps été exploitées pour la pierre de construction, dont certaines sont connues à proximité.

Les risques liés à la présence possible de ce type de cavités ont été pris en compte dans le Plan de Prévention des Risques (PPR) cavités, établi sur la commune (approuvé en 2019), et traduit par un aléa moyen affaissement – effondrement.

2.2 Inventaire des mouvements de terrain et des indices de cavités

De nombreux indices de présence de cavités sont répertoriés à proximité du secteur d'étude (affaissements, effondrements, cavités connues et cartographiées) (Figure 1).

Il existe également la présence de carrières dont la nature (souterraine et/ou à ciel ouvert) ne peut être précisée sur les seules informations disponibles (cadastre napoléonien, photos aériennes historiques, témoignages).

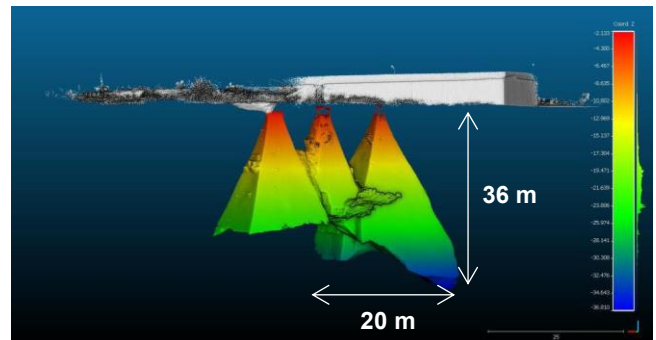


Figure 1 . Exemple de réseau de crayères scanné en 2018 au nord-est de la RN 44.

2.3 Mesures géophysiques et géotechniques

En 2017, des mesures géophysiques ont tout d'abord été effectuées sur l'ensemble des anciens sites militaires de ce secteur (un complément fut ensuite apporté en 2019 afin de mieux contraindre les anomalies décelées). Avec 4 377 stations, la microgravimétrie a couvert une surface de 65 ha : elle cartographie les excès et les défauts de masse, ces derniers pouvant être liés à des vides souterrains. Huit anomalies négatives d'amplitude différente ont été décelées, dont certaines ayant une signature typique de crayères en grappes (Figure 2).

Les investigations complémentaires réalisés ensuite se sont concentrés sur les secteurs présentant les anomalies géophysiques les plus importantes. Ainsi, trois réseaux de crayères (dont un remblayé) ont été découverts au nord-est de la RN44 au droit des anomalies géophysiques B et C et ont fait l'objet de levés topographiques et d'un diagnostic de stabilité en 2018 (Figure 1). Au sud-ouest de la RN44, plusieurs campagnes ont été menées en 2019 et 2021 sur l'anomalie géophysique D, avec huit fouilles à la pelle mécanique et vingt-neuf sondages destructifs (SD) calibrés pour la recherche de vide (chute d'outil) (Figure 2). Les paramètres des SD sont enregistrés. Ici, c'est surtout la Vitesse d'Avancement Instantanée (VIA) qui a été analysée.

Aucun vide notable n'a été détecté sur les SD. D'importantes zones de faiblesse descendant parfois jusque 15-20 m de profondeur ont toutefois été mises en évidence. A ce stade, sur l'anomalie D, les anomalies géotechniques les plus importantes ont été interprétées comme le signe de cavités anthropiques de grande taille, remblayées et vraisemblablement organisées en groupe.

Les références de ces travaux sont données dans le rapport d'évaluation des risques qui intègre l'analyse géotechnique approfondie décrite ci-après (Szczyglowski, 2025).

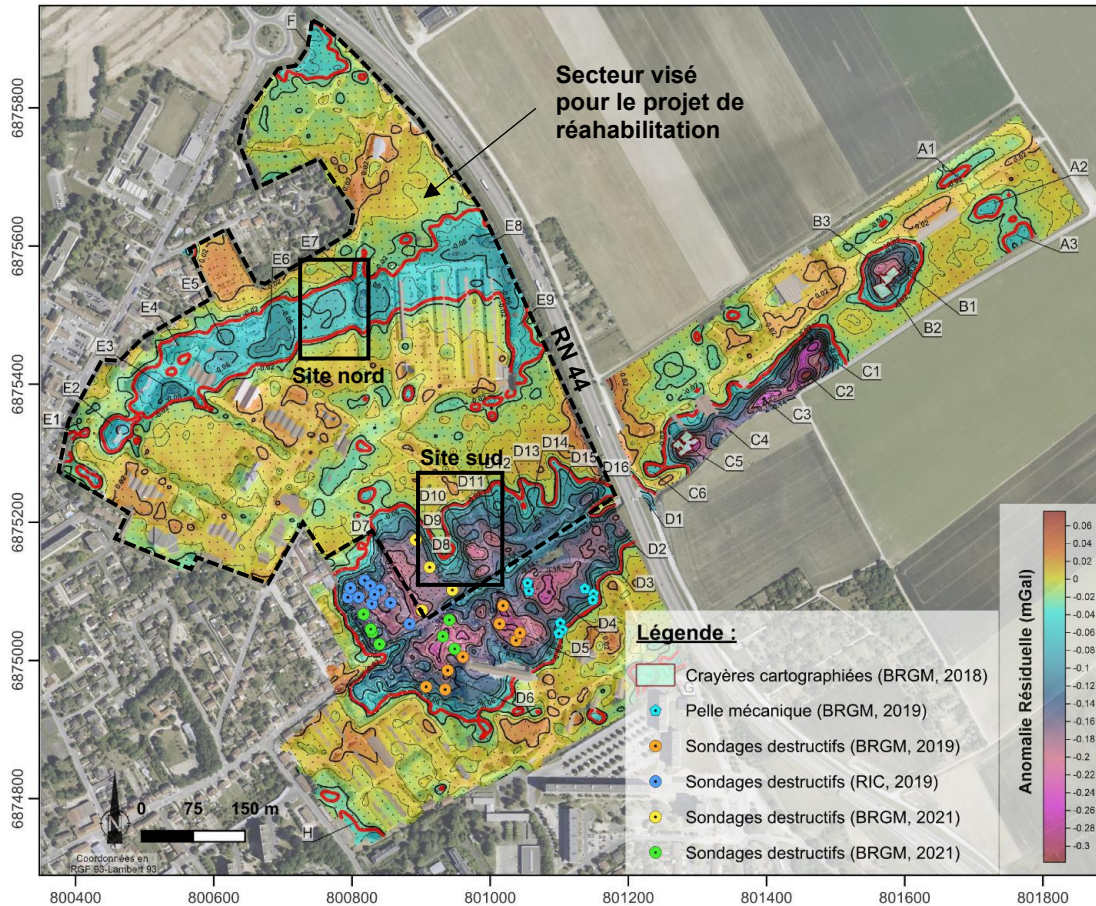


Figure 2. Investigations complémentaires (géotechniques, inspections en souterrain) réalisés sur et à proximité du secteur de la présente étude entre 2017 et 2021, reportées sur l'anomalie résiduelle mesurée en microgravimétrie. Les deux sites de la présente étude sont encadrés en noir.

3 ANALYSE GEOTECHNIQUE APPROFONDIE

3.1 Moyens mis en œuvre et méthodologie d'analyse employée

Des investigations géotechniques complémentaires ont été menées afin de préciser l'origine des 2 anomalies géophysiques négatives décelées sur le secteur visé par le projet de réhabilitation et d'en préciser les risques résiduels. Une origine différente est supposée tenant compte de la signature microgravimétrique de chacune d'entre elle : l'origine de l'anomalie D au sud était alors encore mal contrainte malgré les mesures géotechniques déjà réalisées, tandis que l'anomalie E au nord n'avait à ce stade fait l'objet d'aucune reconnaissance géotechnique.

Les sondages complémentaires se sont concentrés sur 2 sites, jugés représentatifs de ces 2 anomalies gravimétriques (Figure 2). Chacun des 2 sites a fait l'objet d'un profil de sondages recoupant les zones sans anomalies et les anomalies les plus marquées afin de calibrer au mieux les observations. Ainsi, 30

sondages ont été réalisés sur un profil de 134 m sur le site sud et 14 sondages sur un profil de 110 m sur le site nord.

Trois techniques de sondages ont été mises en œuvre pour interpréter de manière optimale la configuration géotechnique des 2 sites : 23 SD pour rechercher des vides, 6 sondages carottés (SC) afin de visualiser directement les terrains et lever les incertitudes persistantes sur la nature des terrains et 15 Cone Penetration Test (CPT) pour relever de manière très fine les faiblesses géotechniques des terrains traversés ainsi que les transitions entre matériaux. Ces derniers sondages mesurent la résistance des terrains à la pénétration d'une pointe (q_c) et fournissent une valeur représentative du comportement granulométrique des matériaux traversés (rapport de frottement R_f). Des essais en laboratoire ont également été réalisés sur 5 échantillons afin d'analyser le comportement hydrique des terrains.

La mise en œuvre et l'analyse des SD et CPT de manière indépendante ne permet pas de distinguer la nature des terrains, en particulier une craie en place très altérée / fracturée et des terrains remaniés (assimilés à des remblais). Afin de proposer une

interprétation plus juste de la géométrie des terrains le long des 2 profils, l'ensemble des résultats de sondages a été analysé et comparé entre eux sur la base des observations des carottes. Des valeurs encadrantes sont ainsi proposées pour l'interprétation des SD et des CPT à partir des paramètres enregistrés (Figure 3).

Cette comparaison permet notamment la caractérisation de l'altération au toit de la craie sur le site nord, avec une progression des valeurs de q_c vers des valeurs plus fortes. Ces informations sont ensuite utilisables sur d'autres sites, notamment pour préciser si les observations correspondent davantage à de la craie altérée ou de la craie remaniée.

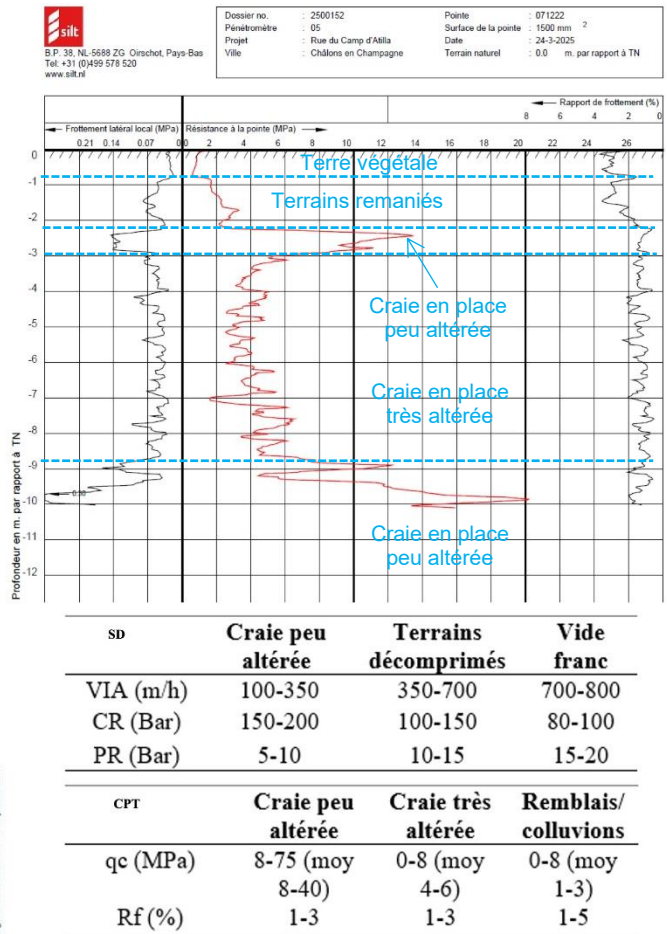
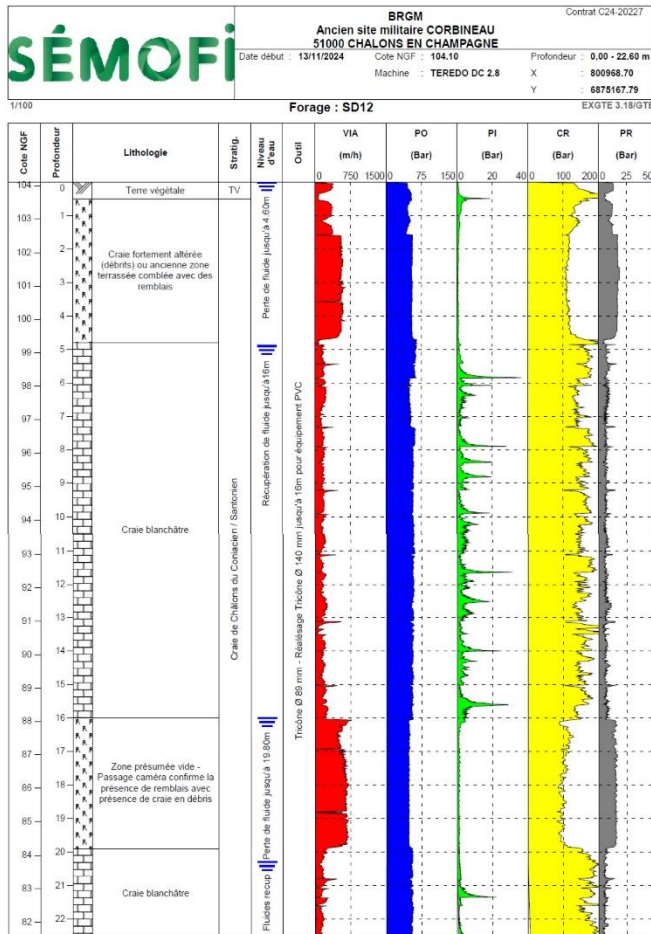


Figure 3. Exemples de résultats de sondages illustrant les faiblesses géotechniques au travers des SD sur le site sud (à gauche) et des CPT sur le site nord (à droite) et valeurs encadrantes définies pour l'interprétation des SD et des CPT.

3.2 Synthèse des résultats et discussion

Suite à cette analyse, une interprétation en coupe des terrains traversés au cours des différents sondages est proposée pour chacun des 2 sites.

L'ensemble des investigations géotechniques réalisées ne met tout d'abord en évidence aucun vide notable.

Les 23 SD, 3 CPT et 4 SC réalisés sur le site sud permettent de distinguer 4 zones le long du profil (du NW au SE) : 1) une zone avec de la craie peu altérée en place en dehors de l'anomalie géophysique avec des valeurs de VIA faibles et de q_c fortes, 2) une zone de terrains considérés comme remblais, présentant de faibles résistances jusqu'à 18 à 23 m de profondeur, et ceux depuis la surface, 3) une zone représentant des résultats particulièrement hétérogènes et 4) une

dernière zone ayant une configuration similaire à la zone 2. Ces résultats sont interprétés comme la présence d'une ancienne carrière à ciel ouvert remblayée (de SD4 à SD20) avec des galeries en fond de fouille remblayées (zone 3, de SD12 à SD15). Les remblais utilisés sont essentiellement composés de blocs de craie, ce qui rend l'interprétation complexe sans une analyse approfondie. Cette interprétation est cohérente avec un système d'exploitation a priori répandu dans la région de Châlons-en-Champagne. Cette configuration est toutefois totalement inédite à cet endroit car n'apparaissant jamais dans les nombreux documents d'archives consultés.

Les résultats des sondages réalisés sur le site nord sont bien plus homogènes que ceux du site sud. Les 12 CPT réalisés sur le site nord identifient la présence de

matériaux de faibles résistances sur des épaisseurs plus importantes vers le centre du profil. Cette observation est renforcée par la nature des matériaux observés dans les 2 SC, avec la présence de remblais sur les premiers mètres et une craie davantage altérée et fracturée vers le centre du profil. L'hypothèse d'une cavité souterraine de grande ampleur (type crayère) peut être

exclue sur ce site. Les résultats des sondages renforcent l'hypothèse d'une anomalie purement géologique, probablement liée à une zone de failles et/ou un ancien vallon présentant des matériaux moins compactés et davantage altérés en son centre (remblais sur les premiers mètres et graveluches enrichies par une phase limoneuse plus en profondeur).

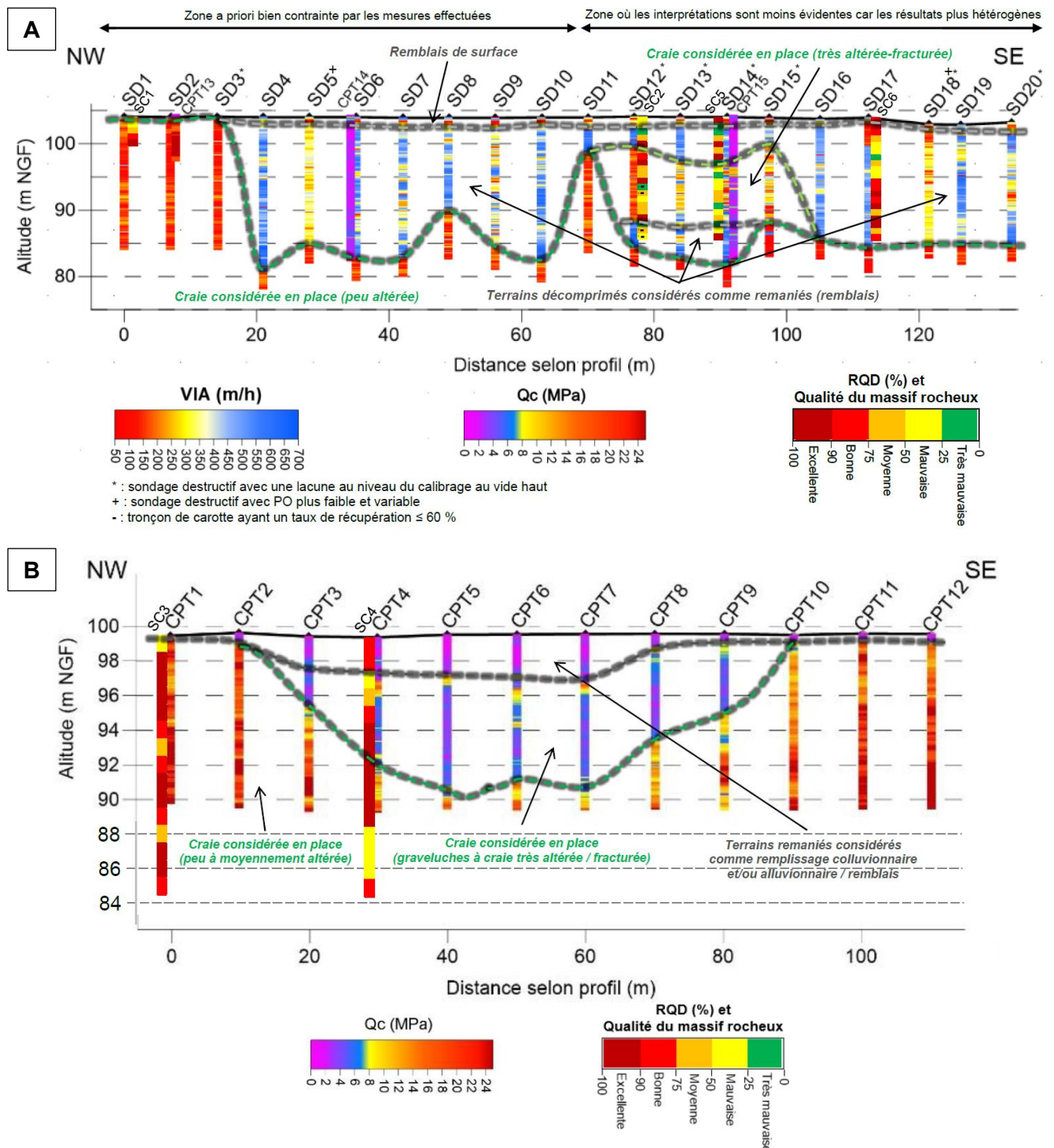


Figure 4. Synthèse des résultats des investigations géotechniques menées sur les sites sud (A) et nord (B) et de leur analyse. Pour rappel, la VIA est un paramètre enregistré lors de la réalisation des SD, le Qc est une valeur mesurée lors des CPT et le RQD (Rock Quality Designation index) est calculé sur la base de l'observation des carottes prélevées.

L'interprétation des résultats des sondages a été enrichie et comparée aux résultats des investigations précédentes (géophysiques et géotechniques) et aux résultats des fouilles archéologiques menées parallèlement par l'INRAP dans le cadre du projet de réhabilitation du secteur.

L'épaisseur des terrains « décomprimés », présentant de fortes VIA et/ou de faibles q_c coïncident

avec les anomalies microgravimétriques négatives (Figure 5) : 1) une très bonne corrélation sur le site nord, ce qui en renforce l'interprétation et 2) une légère dispersion sur le site sud en lien avec la forte variabilité de l'épaisseur et des caractéristiques des terrains de faibles résistances.

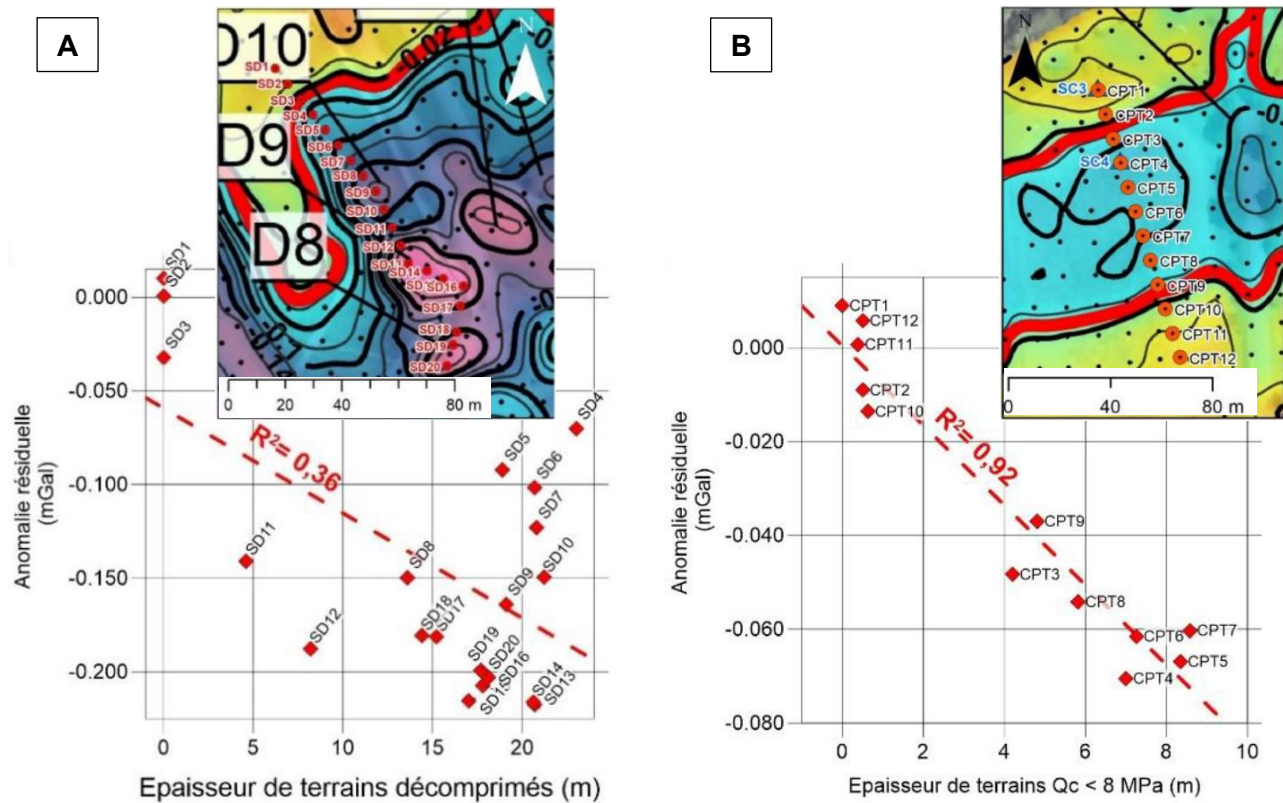


Figure 5 . Comparaison des valeurs de l'anomalie géophysique résiduelle en fonction de l'épaisseur totale de terrains décomprimés de chaque sondage sur le site sud (A) et de faibles résistances ($q_c < 8$ MPa) sur le site nord (B), avec les courbes de tendance affinées et leur coefficient de détermination.

Les résultats des différentes campagnes géotechniques menées sur l'anomalie géophysique D sont cohérentes avec l'hypothèse d'une carrière à ciel ouvert remblayée de blocs de craie. Des inspections vidéos avaient notamment été réalisés en 2019 mettant en évidence des blocs de craie anguleux de taille variable et de petits vides résiduels.

Enfin, les observations réalisées lors des fouilles archéologiques sur l'ensemble du secteur visé par la réhabilitation enrichissent l'analyse sur un plus large périmètre, sur des secteurs non investigués en géotechnique. Les zones de remblaiement identifiées et indices de présence de cavités sont cohérents avec l'interprétation faite de l'anomalie géophysique D. Elles permettent par ailleurs d'appuyer l'hypothèse complémentaire d'extensions sous-cavées de type crayère vers l'extrémité est de l'anomalie gravimétrique.

3.3 Evaluation des risques et recommandations

Tenant compte des résultats des investigations menées et de la configuration retenue sur le site sud, les phénomènes de mouvements de terrains suivants peuvent être attendus : 1) essentiellement des tassements de terrain liés à la faiblesse géotechnique des remblais qui induisent des capacités de portance réduites, 2) les affaissement et effondrements localisés, liés à des vides résiduels, ne peuvent toutefois pas être exclus à ce stade.

Les risques géotechniques liés à d'anciennes exploitations sont écartés sur le site nord. Des tassements de terrain localisés restent toutefois possibles, tenant compte des faibles résistances des terrains au centre de l'anomalie E.

Les analyses effectuées ouvrent la possibilité d'un aménagement simplifié et permettent d'envisager un

protocole précis de mesures pour poursuivre l'analyse de ce secteur. A ce stade, aucune restriction sur les projets de construction ne peut être émise (type d'aménagement, nombre d'étages ou de niveaux de sous-sol). La réalisation d'études géotechniques complémentaires est nécessaire pour adapter le mode de fondation et les ouvrages de soutènement éventuels aux contraintes exprimées.

4 CONCLUSIONS

L'ensemble des études menées sur les anciens sites militaires au nord-est de Châlons-en-Champagne présente une méthode innovante de caractérisation du sous-sol dans le cadre d'une recherche de cavités

souterraines, au travers de protocoles et de types d'investigations divers et complémentaires (approche croisée géophysique par microgravimétrie, géotechnique par SD, SC, CPT et fouilles à la pelle mécanique, topographique par modélisation 3D des cavités connues, et également archéologique par fouilles à la pelle mécanique). Une synthèse des éléments connus et origines proposées pour les anomalies géophysiques décelées sur l'ensemble des secteurs est présentée à la Figure 6.

Des incertitudes persistent toutefois encore sur certains secteurs. Les pistes de recherches complémentaires suivantes sont proposées : 1) sur la RN 44, 2) sur les secteurs sud (anomalie gravimétrique D) et nord-est (anomalies gravimétriques B et C).

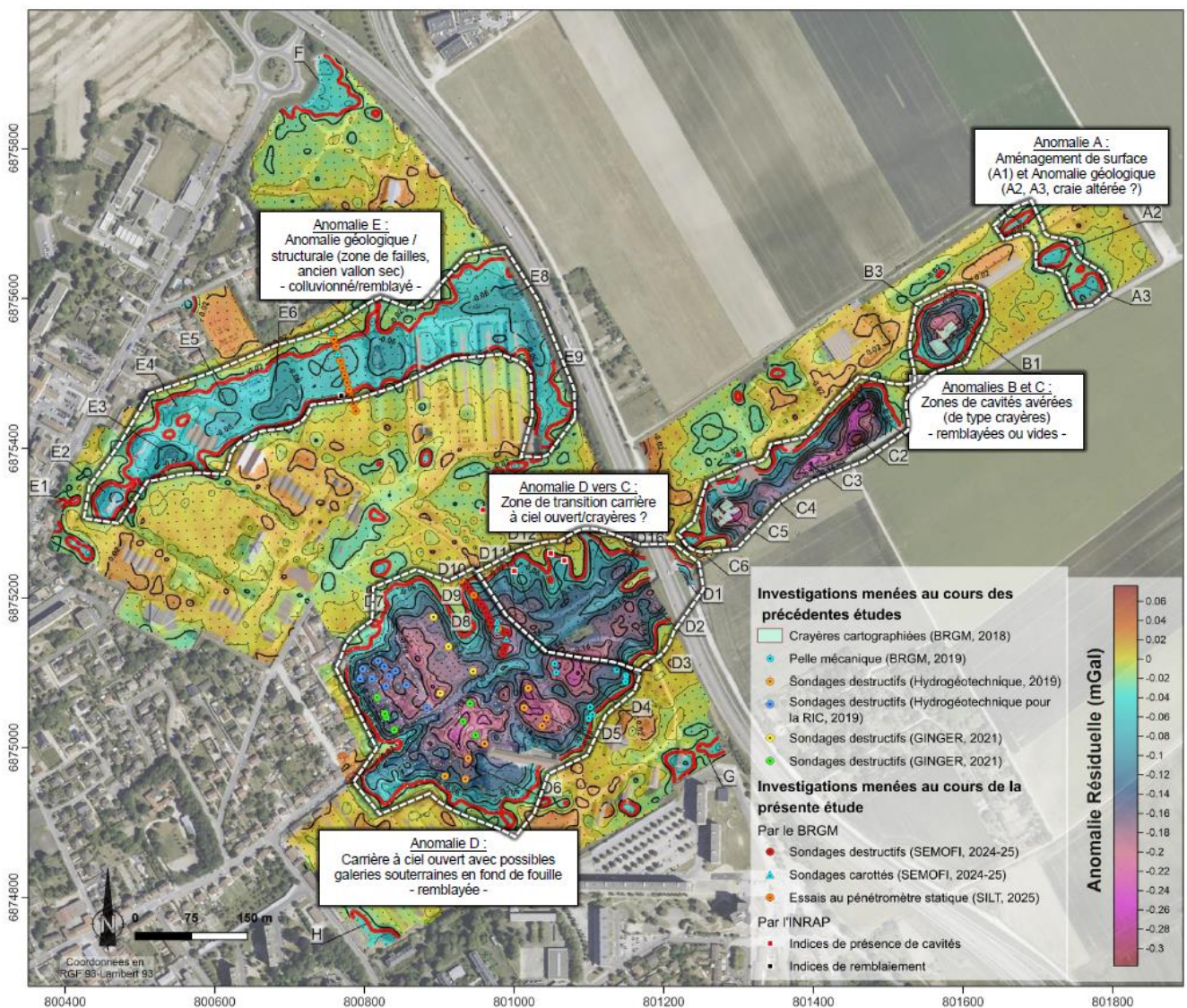


Figure 6 . Synthèse des éléments connus et origines des anomalies microgravimétriques décelées sur l'ensemble des anciens sites militaires présents au nord-est de Châlons-en-Champagne

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'organisme de financement la CAC pour son soutien financier. Le projet présenté dans cet article est soutenu par le BRGM.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DDT 51 (2019). PPR cavités – Châlons-en-Champagne – dossier approuvé, Disponible à l'adresse : <https://www.marne.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Risques-cybermalveillance-securite-et-protection-de-la-population/Protection-civile-et-gestion-des-risques/Prevention-des-risques-naturels/Risque-affaissement-effondrement-de-cavites/PPR-cavites-Chalons-en-Champagne-dossier-approuve>, consulté le : 01/09/2025
- Hannion, Y., Jacob, T. (2018). Recherche de cavités souterraines et diagnostic de stabilité sur plusieurs sites de la zone militaire de Châlons-en-Champagne (51), BRGM, Reims, France, Rep. BRGM/RP-67980-FR.
- Jacob, T. (2017). Détection de cavités souterraines par microgravimétrie sur plusieurs sites de la zone militaire de Châlons-en-Champagne (51), BRGM, Orléans, France, Rep. BRGM/RP-67277-FR.
- Jacob, T., Grandemange, A., Hannion, Y. (2019). Compléments d'acquisition microgravimétrique pour la détection de cavités à Châlons-en-Champagne (51), BRGM, Orléans, France, Rep. BRGM/RP-68644-FR.
- Szczyglowski, M., Caruel, L., Grandemange, A. (2022). Recherche de cavités souterraines par sondages de contrôle d'anomalies microgravimétriques au Nord-Est de Châlons-en-Champagne (51), BRGM, Reims, France, Rep. BRGM/RP-72032-FR.
- Szczyglowski, M., Jacob, T., Noury, G., Grandemange, A., Caruel, L., Gamax, G. (2025). Analyse des risques de mouvements de terrain sur l'ancien site militaire Corbineau à Châlons-en-Champagne (51), BRGM, Reims, France, Rep. BRGM/RP-74721-FR.