

CARACTERISATION D'INSTABILITES KARSTIQUES PAR INVESTIGATIONS GEOTECHNIQUES ET POST-TRAITEMENT DE DONNEES DE TRAVAUX D'INJECTIONS SOLIDES

GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS AND COMPACTION GROUTING PARAMETERS TO CHARACTERIZE KARST INSTABILITIES

Alexandre PHILIPPE¹, Ludovic DORE¹, Sésil CAN¹, Lucile SAUSSAYE¹

¹ Cerema Direction Territoriale Normandie-Centre, Blois, France

RÉSUMÉ – Au mois de janvier 2022, un affaissement karstique a conduit à la déstabilisation de deux immeubles à Orléans (45). La campagne d'investigations préliminaires s'étant révélée contrainte de par les conditions de sécurité du site, le post-traitement de plots d'injections solides dans l'environnement du sinistre au préalable de la démolition a permis d'apporter des éléments essentiels à la compréhension du sinistre.

ABSTRACT – On January 2022, a karstic sinkhole damaged buildings in downtown Orleans. The preliminary investigation campaign proved to be limited by the site's safety conditions, so the post-treatment of compaction grouting works near the sinkhole before the demolition provided essential information for understanding causes of the disaster.

1. Introduction

Au cours du mois de janvier 2022, un phénomène de mouvement de terrain s'est déclaré dans le centre-ville historique de la ville d'Orléans (45). D'un diamètre de près de 20 m, l'évènement a amorcé la ruine de deux immeubles. L'affaissement s'est accompagné d'un effondrement localisé en pied d'immeubles (Figure 1).



Figure 1. Mouvement de terrain du mois de janvier 2022

Dans le cadre du protocole de démolition, il a été décidé par l'ensemble des parties de réaliser une campagne d'investigations géophysiques et géotechniques, de manière à caractériser l'origine du sinistre et définir le protocole général de sortie de crise et de démolition.

Suite à la découverte d'anomalies majeures de décompression sous le futur passage des engins de démolition, il a été fait le choix de procéder, au préalable de la démolition, à des travaux de traitement des terrains altérés et karstifiés par injections solides. Les travaux d'injections solides se sont divisés en deux phases. Deux plots d'essais ont été menés sur le passage des engins. La suite des plots d'injections solides sera réalisée postérieurement

à la démolition, cette dernière étant nécessaire à court terme pour les deux immeubles les plus sinistrés. Au regard des conditions de sécurité, la campagne d'investigations géotechniques a été largement contrainte. Le post-traitement des données d'injections solides permet ainsi d'apporter des compléments d'informations pour éclairer les conditions géotechniques dans lesquelles le sinistre est survenu.

Après une présentation du contexte géotechnique du site, les méthodes de traitement des données géotechniques et d'injections solides seront présentées. L'exploitation des résultats permet de mettre en évidence le contexte karstique de la zone d'étude et les processus à l'œuvre dans l'environnement immédiat du sinistre.

2. Contexte géomorphologique général

La ville d'Orléans s'inscrit sur une assise de calcaires lacustres d'âge Aquitaniens. Cette formation est surmontée des Marnes et Sables de l'Orléanais et d'une épaisseur de remblais anthropiques. Sur le territoire orléanais, le calcaire de Beauce a été largement exploité comme matériau de construction (Noury, 2018). Dans la plaine alluviale de la Loire, il a subi de lents processus de dissolution et a abouti à la création d'un réseau karstique souterrain. Ces phénomènes sont également rencontrés dans la partie sud du centre-ville historique (Figure 2).

De manière à identifier l'origine du phénomène, une étude des phénomènes antérieurs a été réalisée. L'étude a été menée à l'échelle de l'îlot urbain dans lequel est inscrite la zone sinistrée, soit une surface de 1,4 ha. Elle s'est basée sur l'analyse des sources classiques d'information (BD Cavités, BD Mouvements de terrains et l'analyse des fonds d'archives de la ville d'Orléans). L'étude documentaire menée (Yart, 2022) a mis en évidence 6 anciens phénomènes d'effondrement ou d'affaissement. L'origine des événements est difficilement appréciable sur la seule base de l'analyse des documents d'archives. Certains événements sont attribués à des phénomènes karstiques, à des galeries anthropiques ou à des fuites d'eau défavorables à la portance de la couche de remblais historiques de surface. Le rôle d'une forme de talweg dans l'apparition de cavités karstiques a été discuté (Yart, 2022).

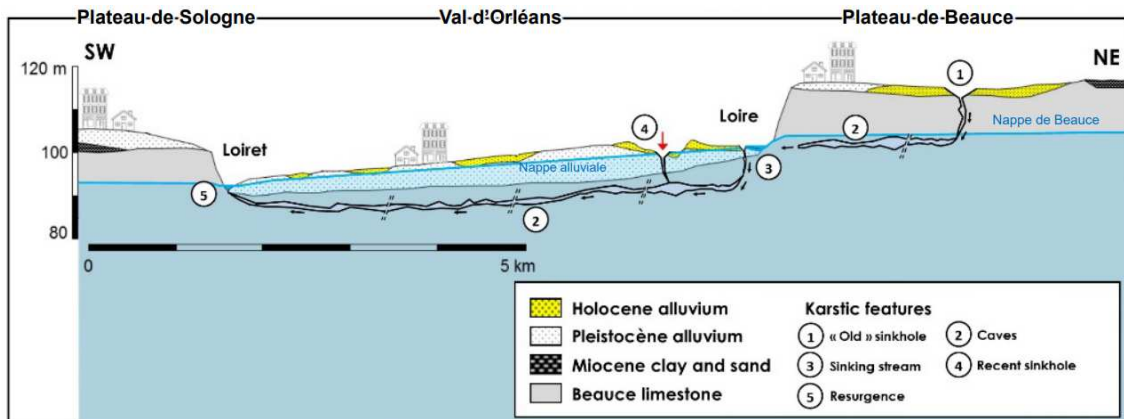


Figure 2. Coupe schématique du système karstique au droit du val d'Orléans (Noury, 2018)

3. Investigations in situ réalisées et autres données relatives au sous-sol

3.1. Définition des campagnes d'investigations au regard de leur bénéfice-risque et du caractère évolutif des immeubles sinistrés

A la suite de la déclaration du sinistre, une campagne d'investigations géotechniques a été diligentée par la ville d'Orléans. Elle a été réalisée dans le cadre d'une mission géotechnique de niveau G5 qui avait pour but d'identifier l'origine du sinistre, de caractériser la suite lithologique des terrains, d'étudier la portance de la voirie d'accès à la zone sinistrée.

Le type d'investigations qu'il a été choisi de déployer a été effectué après une analyse bénéfice-risques et en étudiant précisément les conditions de sécurité d'intervention (Philippe, 2022). Il a été fait le choix de réaliser une campagne de mesures géoradar (profils longitudinaux et transversaux à la voirie à l'aide d'une antenne Impulse RADAR 70 et 300 MHz). Ces mesures ont été suivies de 29 essais de pénétration dynamique (Figure 3), 25 sondages destructifs, 1 sondage pressiométrique et 5 sondages à la tarière accompagné d'essais de caractérisation en laboratoire. Les investigations ont été portées entre 15 et 20 m de profondeur. Elles ont intéressé un linéaire de voirie de 150 m.



Figure 3. Reconnaissance géotechnique au GEOTOOL dans l'environnement du sinistre

3.2. Données issues de campagne de renforcement par injections solides (CHS)

Suite aux investigations préliminaires effectuées dans l'environnement immédiat du sinistre et sur le futur passage des engins de démolition, et outre les anomalies de décompression constatées dans l'environnement immédiat des immeubles, deux zones d'anomalies remontantes ont été observées sur le trajet des futurs engins de démolition. Après concertation entre l'ensemble des parties, il a été décidé de traiter les deux zones d'anomalies par injections solides préalablement aux opérations de démolition (Figure 4). L'injection solide consiste à incorporer dans le sol un mortier suffisamment plastique pour former une masse homogène qui s'expande progressivement sous l'effet de la pression d'injection (Lambert, 2020). Le mortier a pour fonction de refouler le sol pour le compacter. Les forages d'injections solides ont été réalisés depuis la surface de la voirie et l'injection à partir de -4,5 m/TN soit sous l'épaisseur de remblais comprenant l'ensemble des réseaux enterrés.

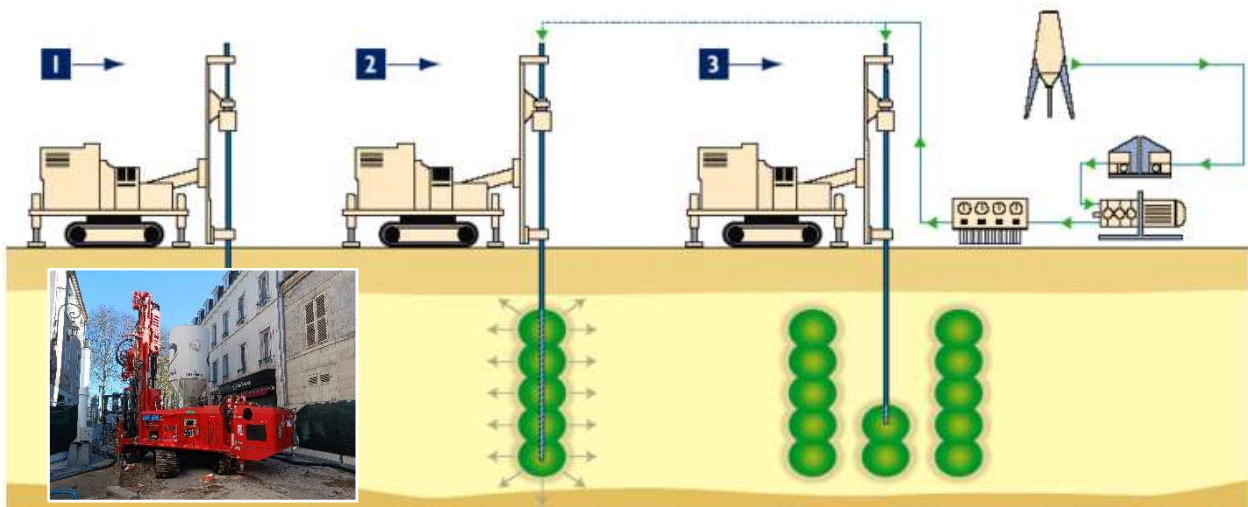


Figure 4. Illustration de l'exécution du Compactage Horizontal Statique (CHS) (Lambert, 2020)

Les forages ont été réalisés à l'aide d'une tête de forage Hi'drill développée par Solétanche Bachy. Cette technique de forage utilise les effets conjugués de rotation et de translation d'une tête traditionnelle et ceux résultant de la mise en œuvre du train de tige. Les critères d'arrêt en pression et en volume d'injection ont été définis lors du premier plot d'injection constituant la planche d'essais de démarrage au chantier. A l'issue de la planche d'essais, il a été décidé d'exécuter les forages d'injections en 120 mm de diamètre, de les porter à 21 m de profondeur et de réaliser des passes d'injection de 50 cm. Le critère d'arrêt en volume (V_{\max}) par passes a été fixé à 600 litres. Le critère d'arrêt en pression (p_{\max}) a été gradué en fonction de la profondeur pour atteindre 12 bars à 21 m de profondeur. Les colonnes d'injection solide ont été réalisées selon une maille carrée de 2 m.

Au regard des données issues des campagnes de reconnaissance géotechnique préliminaires, les plots d'injections solides permettent d'apporter des éléments complémentaires à la compréhension du modèle géotechnique et au processus de décompression s'y produisant.

4. Critères d'analyse des données

4.1. Analyse des sondages d'investigations géotechniques préalables

Les investigations géotechniques ont été interprétées classiquement par croisement des données des essais in situ et des sondages de reconnaissance. Pour chaque couche de terrain, des caractéristiques moyennes ont pu être calculées. Les anomalies de décompression ont été mises en évidence :

- par l'atteinte de valeur seuil de résistance dynamique de pointe ;
- lors des sondages destructifs par l'atteinte des caractéristiques obtenues dans un vide simulé ;
- par des affaiblissements notables des caractéristiques moyennes déterminées.

De manière à définir le plus précisément l'origine du sinistre, il a été décidé d'intégrer les analyses post-exécution des données d'injections solides.

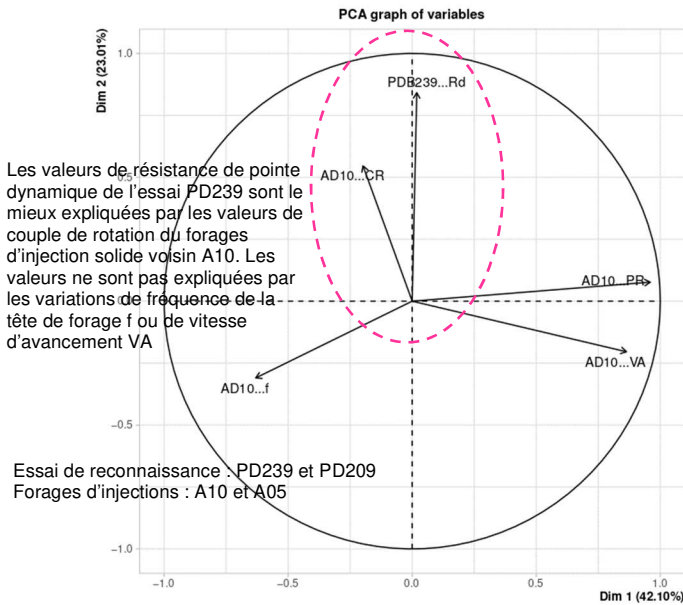
4.2. Analyse des diagaphies des forages d'injections solides exécutés en Hi'drill

Au cours du plot d'essai, des difficultés ont été observées dans l'interprétation des diagaphies de paramètres de forages d'injections solides réalisés à l'aide de la tête de forage Hi'drill équipant l'atelier type DCH170. En effet, d'importantes dichotomies ont été observées entre les diagaphies et les feuilles de passes d'injection. L'impossibilité de lire précisément les diagaphies de paramètres de forages a rendu nécessaire une analyse précise des données issues des paramètres d'injections.

En premier lieu une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée pour déterminer quels paramètres de forages paraissent le mieux corrélés à la résistance de pointe dynamique (q_d). Des ACP ont été menées sur des couples de forages d'injections solides positionnés à proximité immédiate d'essais de pénétration dynamique réalisés lors des investigations préalables. Les analyses effectuées montrent que les variations de résistance de pointe dynamique sont le mieux expliquées par les variations du couple de rotation (Cr) mesurées lors des forages d'injections solides (Figure 5).

Si un graphique $q_d = f(Cr)$, pour une cote altimétrique donnée, montre une grande dispersion du nuage de points, l'allure générale des courbes de chacune des variables, fonction de la profondeur mettent en évidence les mêmes altitudes de changement de compacité ou faciès. Ceci est également observé en comparant l'énergie spécifique des sondages destructifs E_s et le couple de rotation des forages d'injections solides. Il a ainsi été décidé d'exploiter la diagaphie de couple de rotation pour déterminer précisément les hauteurs d'anomalies dans le sous-sol et analyser leur répartition spatiale.

Exemple du Couple PD239 / A10



Exemple du Couple PD209 / A05

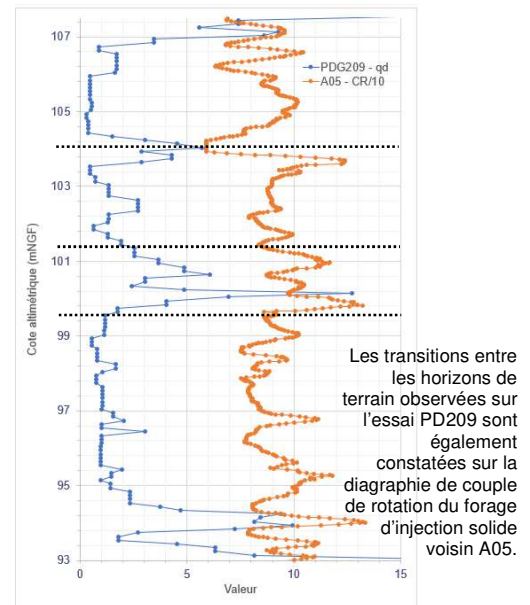


Figure 5. Analyse ACP des diagraphies des paramètres de forages Hi'drill et comparaison avec les essais de pénétration dynamique exécutés lors des reconnaissances préalables

4.3. Exploitation des feuilles de passes d'injections solides

De manière classique les feuilles de passes d'injections solides sont exploitées en déterminant le diamètre équivalent des colonnes d'injections solides ou en étudiant les volumes injectés par forages (Lambert, 2020 et Briançon, 2018). Pour faire un traitement harmonisé des feuilles de passes des forages primaires, il a été décidé d'introduire :

- Le Niveau Volumique d'Injection (NVI) correspondant au rapport du volume injecté par passe d'injection au critère d'arrêt en volume par passes V_{max} . Cet indice permet de faire ressortir les passes de forages ayant traversé des anomalies significatives de décompression de terrain ;
- L'Indice Volumique d'Injection global (IVI_G) qui correspond pour chacun des forages d'injection au volume total injecté par forage rapporté au volume médian injecté sur les forages du plot d'injections considéré ;
- L'Indice Volumique d'Injection par passe (IVI_P) qui correspond pour chaque passes de forages au volume de mortier injecté rapporté au volume médian de mortier injecté sur le plot d'injections à cette profondeur.

Les paramètres ainsi calculés peuvent être représentés sous forme d'histogramme, ou de courbes de valeurs et peuvent faire l'objet d'interpolation.

5. Résultats et synthèse géotechnique

5.1. Modèle géologique

L'ensemble des résultats disponibles aboutit à déterminer le profil géotechnique suivant pour le secteur étudié (Figure 6) :

- Sous le terrain naturel (108 mNGF), la couche de remblais anthropiques (limons argileux ou sables argileux marron type B5 au sens du GTR). Lorsqu'elle n'a pas été remaniée récemment par des phénomènes de mouvements de terrain est moyennement compacte, caractérisée par une résistance dynamique de pointe moyenne de 5,1 MPa. En moyenne la base de la couche se positionne à une altitude de 102 à 102,5 mNGF ;
- Sous la couche de remblais historiques, il existe un horizon intermédiaire d'altérites effectuant la transition vers les couches de marnes et de calcaire du substratum. Cet

horizon hétérogène, comprend une épaisseur de sables argileux puis des épaisseurs d'argiles ou de marnes plus ou moins chargées en rognons calcaires jusqu'à une cote altimétrique moyenne de 97 à 98 mNGF. Cette couche lorsqu'elle n'a pas été perturbée en profondeur, est moyennement compacte avec une résistance de pointe dynamique moyenne de 6,4 MPa. La partie supérieure de cette couche peut être le siège d'une nappe perchée se développant à la faveur des niveaux les plus sableux venant surmontés les horizons moins perméables.

- La couche d'altérites recouvre le substratum calcaire. Le substratum comprend un premier horizon de calcaire altéré et de marne compacte. Sous cet horizon rencontré régulièrement à l'échelle de l'îlot urbain, les terrains sont hétérogènes, les passages résistants alternant sans logique apparente avec des passages mous. Cette épaisseur altérée laisse place, à partir de 88,5 mNGF en moyenne, à des terrains moins altérés. Localement, cette interface, avec les terrains moins altérés, présente des approfondissements, les terrains moins altérés n'étant rencontrés qu'à partir de la cote de 86 ou 84 mNGF. Dans certains secteurs de l'îlot urbain, des niveaux compacts sont observés aux cotes altimétriques de 95 ou 93 mNGF, niveaux de 1 à 1,5 m d'épaisseur. La partie inférieure de cet horizon est baignée par la nappe qui se positionne à une altitude de 90,5 mNGF.

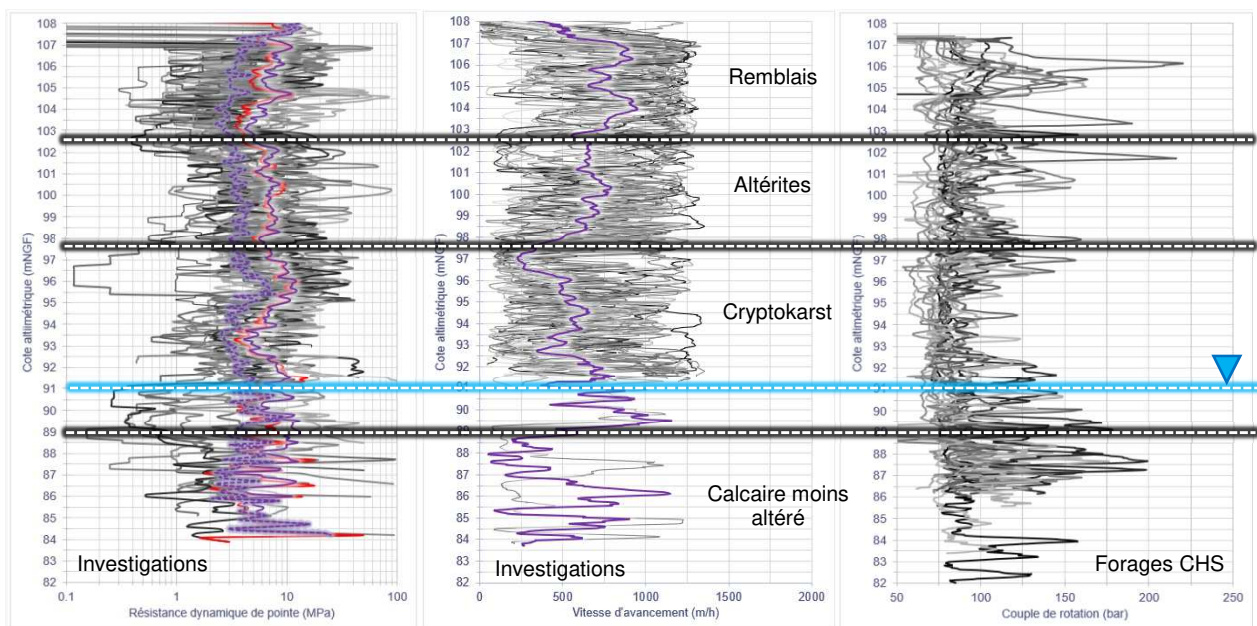


Figure 6. Coupe géotechnique synthétique du secteur étudié

5.2. Caractérisation des anomalies

L'analyse de la répartition des anomalies en fonction de la profondeur a été effectuée en compilant les résultats des investigations géotechniques et les résultats des premiers plots d'injections solides.

L'analyse effectuée montre que les anomalies de faible hauteur (inférieure à 50 cm) sont observées préférentiellement dans la couche de remblais historiques. Si des anomalies sont rencontrées en partie centrale de la couche, certaines anomalies sont observées en base de la couche et illustrent un affaiblissement en lien dans certains cas avec des processus de décompression impactant les couches d'altérites et du substratum.

Pour les anomalies de hauteur supérieure à 1 m, elles se répartissent sur l'ensemble de la hauteur du massif de terrain. Elles impactent à 43% préférentiellement la couche de cryptokarst.

La moitié des anomalies impactant la couche de cryptokarst se positionnent sous la nappe (Figure 7). Cette tendance s'accroît avec la hauteur des anomalies. Les anomalies de hauteur supérieure à 2 m prennent essentiellement naissance sous la nappe.

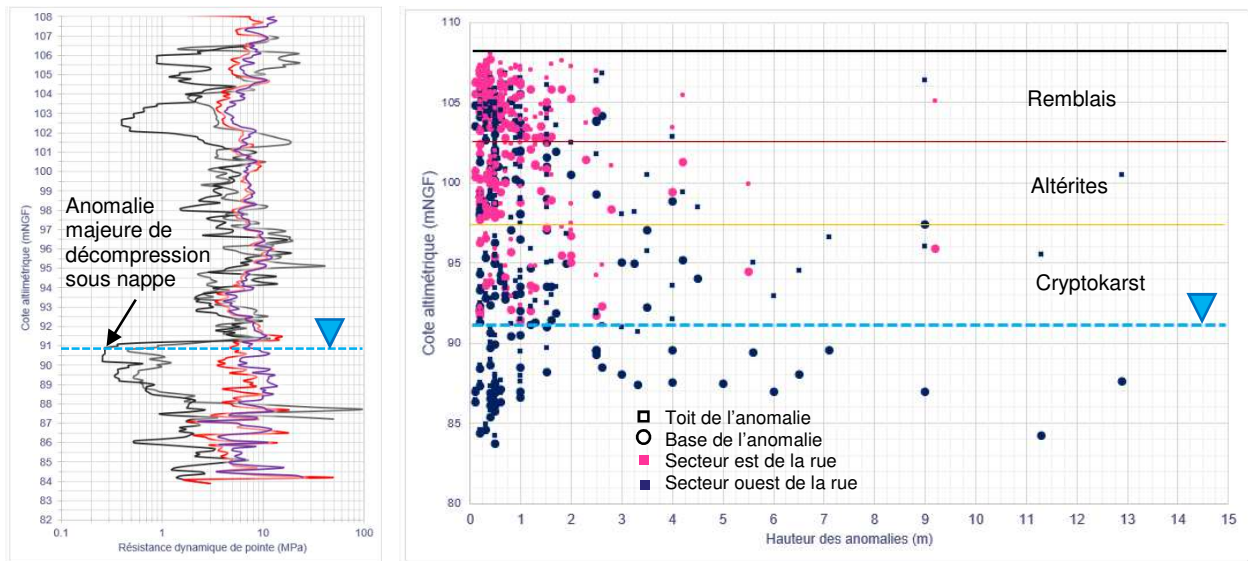


Figure 7. Anomalies karstiques observées au pénétromètre et répartition des anomalies fonctions de la profondeur

Cette morphologie illustre la prédisposition élevée du site à la présence de cavités karstiques, en particulier dans l'environnement du sinistre où les anomalies sont observées sous nappe et où le calcaire sain, favorable à des creusements pour l'exploitation en matériau de construction, se positionne au-delà de 86 mNGF, également sous la nappe. A l'échelle de l'îlot urbain, bien qu'aucun vide franc n'ait été détecté, des creusements anthropiques ne peuvent être exclus entre les altitudes de 92 à 95 mNGF.

L'interprétation des données a posteriori des plots d'injections solides permet de mieux caractériser le massif de terrain. Pour ces plots d'injections, le maillage de forages y est resserré et régulier a contrario des investigations géotechniques préalables. L'analyse de l'interpolation 3D de l'indice NVI conduit à illustrer des processus de décompression des terrains prenant naissance dans un horizon du cryptokarst concentrant des anomalies baignées par la nappe (Figure 8). Cette analyse montre ainsi clairement que dans l'environnement du sinistre, les cavités karstiques sont susceptibles de perturber les terrains de surface.

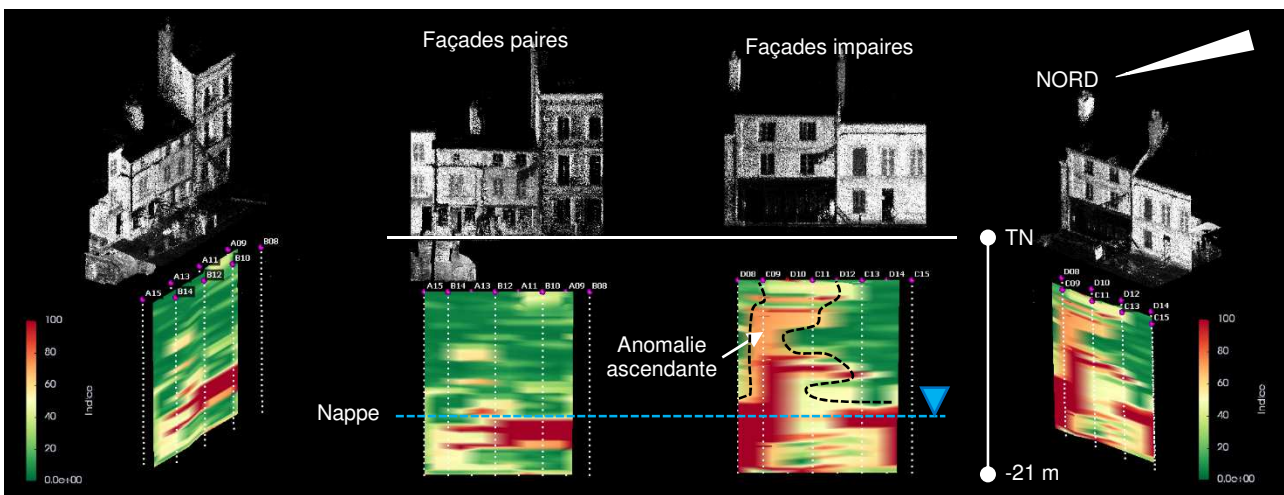


Figure 8. Interpolation de l'indice NVI – plot d'injection réalisé au droit du passage des engins

L'analyse de la répartition géographique des anomalies pour chacune des différentes couches du massif de terrain montre un axe probable de drainage karstique venant se positionner dans l'environnement immédiat des façades des immeubles sinistrés (Figure 9). Cet axe de drainage conduit à un approfondissement de la cote à laquelle est rencontrée le calcaire compact. L'axe de drainage en profondeur semble bien aligné avec des axes d'anomalies rencontrés dans les couches d'altérites et de remblais. Pour la couche de remblais, la répartition géographique des anomalies présentent un désaxement par rapport à l'axe principal observé dans le cryptokarst. Ceci peut être dû à une perte de capacité portante généralisée de la couche de remblais à la suite d'arrivées d'eau massives induites par une fuite de la canalisation AEP postérieurement au déclenchement du sinistre.

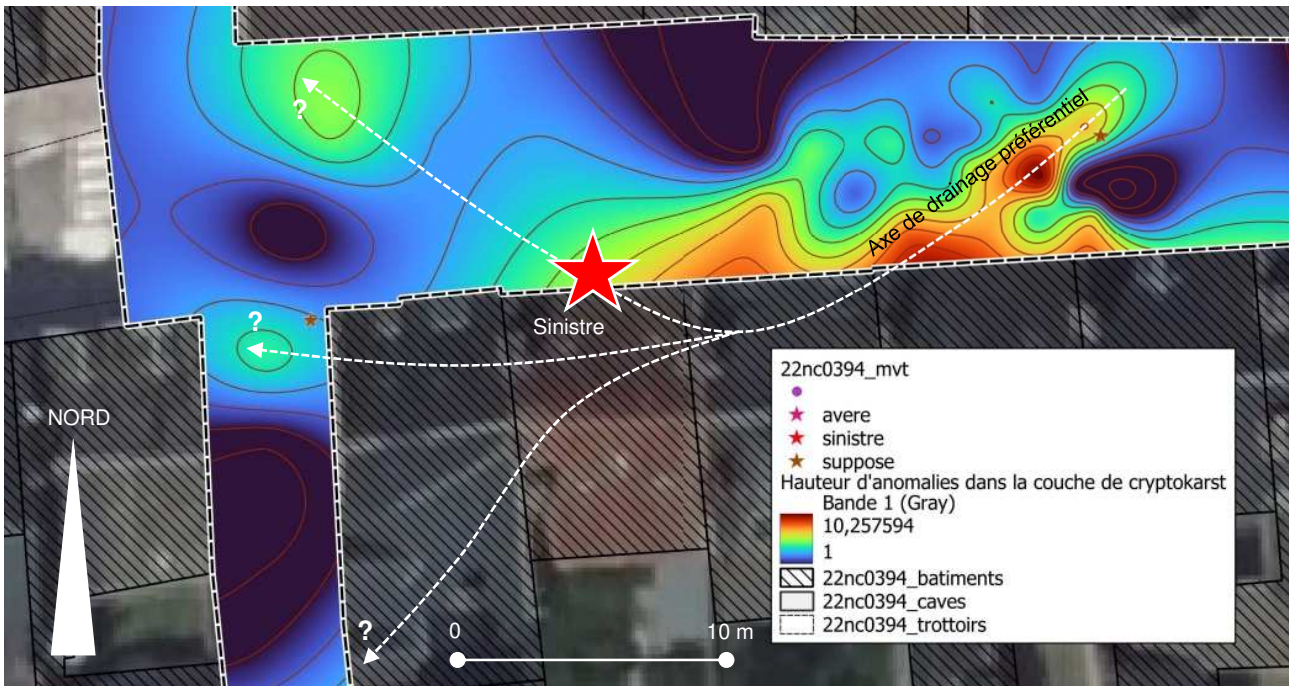


Figure 9. Répartition géographique des hauteurs d'anomalies dans le cryptokarst

6. Conclusions

A la suite de la déclaration du sinistre et au regard d'une campagne d'investigations géotechniques préalable rendue restreinte par les conditions de sécurité, le post-traitement des données d'injections solides apporte des données essentielles à la compréhension du sinistre. Ceci permet de mieux appréhender l'aléa mouvement de terrain dans cette partie du centre-ville historique d'Orléans en lien avec des phénomènes karstiques.

7. Références bibliographiques

- Briançon L., Liausu P., Plumelle C., Simon B. (2018). Amélioration et renforcement des sols. Tome 2. 620 pages.
- Lambert S. (2020). Compactage Horizontal Statique : retours d'expérience. Revue Française de Géotechnique. 2020.162.3. 9 pages.
- Noury G., Ksibi I., Froidevaux M. (2018). Apport de la collaboration entre le Brgm et le service Prévention des Risques d'Orléans-Métropole : Intégration de la géologie et évaluation des risques d'effondrement via un nouvel outil de cartographie souterraine en 3D. Acte du colloque « caves et celliers du Moyen Age à l'époque moderne ».
- Philippe A., Litou G., Dore L., Noury G., Atallah M. (2022). Bénéfice-risque de reconnaissances géotechniques sur bâtiment sinistré par l'effondrement de cavités. 11èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Lyon 2022.
- Yart S. (2022). Avis sur un mouvement de terrain survenu à Orléans en janvier 2022. Rapport d'expertise BRGM/RP-71585-FR. 69 p. 34 ill. 3 ann.