# DETECTION ET CARACTERISATION D'INSTABILITES KARSTIQUES : CAS D'ETUDE DE LA DEVIATION DE JARGEAU (45)

## *DETECTION AND CHARACTERISATION OF KARST COLLAPSE HAZARDS : CASE STUDY OF A ROAD PROJECT NEAR JARGEAU (45 – FRANCE)*

Gildas NOURY[1], Thomas JACOB[1], Jean-Michel BALTASSAT[1], Adnand BITRI[1]
*[1] Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, France*

**RÉSUMÉ –** Dans le cadre de la construction de la déviation routière dite de Jargeau, le BRGM a étudié le secteur a priori le plus sensible aux aléas géologiques liés au karst du calcaire de Beauce. Une communication précédente a recensé et évalué les aléas en question (mouvements de terrain et atteinte de la ressource en eau). Le présent article précise la configuration du sous-sol et les méthodes mises en œuvre pour y parvenir.

**ABSTRACT –** For the construction of the so-called Jargeau road deviation, the French Geological Survey studied the area a priori the most sensitive to geological hazards related to the karst of Beauce limestone. A previous communication identified and assessed the hazards involved (ground collapses and water resource reach). This article specifies the subsurface configuration and the methods used to achieve it.

## 1. Introduction

Après une première communication aux JNGG 2020 (Noury et al., 2020), le présent article développe les investigations mises en œuvre et les résultats obtenus pour l'étude amont du franchissement de la Loire à Jargeau (45). Cette étude a été menée par le BRGM dans le cadre d'une convention de recherche et développement partagé cofinancée par le Conseil Départemental du Loiret (CD 45). Le CD 45 est le maitre d'ouvrage de ce projet routier de 14 kms qui vise à relier les coteaux de Beauce et de Sologne en contournant les centres-villes des communes de Jargeau et Saint-Denis de l'Hôtel notamment.

## 2. Contextes

### *2.1. Contexte géologique*

Le projet routier se situe principalement dans le Val d'Orléans, zone géographique qui correspond à l'incision par la Loire du calcaire dit de Beauce, avec une différence d'altitude à cet endroit d'une vingtaine de mètres (Noury et al., 2020**b**). A cet endroit, le calcaire de Beauce est recouvert par des alluvions surtout sableuses sur une épaisseur de 5 à 10 m. Ce calcaire présente des faciès lithologiques variés. L'ensemble a été karstifié comme en témoignent non seulement les figures présentes à l'interface alluvions / calcaires, mais aussi les altérations et les vides dans le calcaire : ces manifestations sont visibles à la faveur de terrassements faits dans les coteaux proches (Figure 1). Les vides s'organisent naturellement sous formes de réseaux de cavités souterraines : la résurgence du Loiret au parc floral de la Source en est le plus connu ; les explorations y indiquent des cavités de 11 m de large et 6 m de haut à une quinzaine de mètres de profondeur. Cette configuration fait du calcaire de Beauce une importante ressource hydrogéologique pour la région.

La configuration au droit du projet est donc celle d'un karst noyé sous couverture alluviale (encore appelé crypto-karst noyé).

Figure 1 : Calcaire de Beauce sous couverture alluviale (hors zone d'étude - P. Isambert)

### *2.2. Les mouvements de terrain associés au calcaire de Beauce*

Un karst sous couverture est naturellement affecté par des processus de déstabilisation aboutissant à termes à des mouvements de terrain en surface. Trois processus sont habituellement retenus : la rupture des cavités calcaires, le débourrage de poches (d'altération ou de remplissage) et le soutirage de la couverture dans ces cavités calcaires (Noury et al., 2020[a]). Ces mouvements perturbent les caractéristiques géotechniques des terrains concernés : le substratum et la couverture voient leur résistance diminuée voire totalement annulée lorsque le vide atteint la surface. Il se forme alors un effondrement.

Dans le Val d'Orléans (170 km²), quelques évènements sont recensés par an. Des recrudescences marquent les inondations, comme cela s'est ponctuellement produit en 2016 suite à un évènement météorologique exceptionnel. Les dimensions moyennes des effondrements en surface sont de l'ordre de 2 m mais ils atteignent parfois plus de 10 m de diamètre : le plus grand actuellement connu est celui ayant abouti en 2010 à la ruine immédiate d'un pavillon à Saint-Pryvé-Saint-Mesmin (45) : il faisait 16 m de diamètre et 7.5 m de profondeur.

### *2.3. Secteur étudié par le BRGM*

Dans le cadre de ce projet, le BRGM a particulièrement étudié un secteur de 26.5 ha concentrant les ouvrages les plus importants du projet de route. Ils se situent en rive droite de la Loire et concernent un linéaire de 650 m environ. Il s'agit : au nord, de la partie sud de l'ouvrage d'art franchissant la Loire ; au sud, du franchissement de la levée de Loire ; et entre les deux, des remblais (hauteur de 7.5 m) et d'un ouvrage d'art intermédiaires. Ce secteur est inondable par une crue centennale de la Loire.

### *2.4. Eléments déjà présentés*

Lors d'une communication précédente (Noury et al., 2020[b]), les éléments suivants ont déjà été présentés :

- La synthèse des études précédentes définit un modèle géologique préliminaire.
- A l'issue d'une série de mesures, l'aléa hydrogéologique que pourrait constituer le projet vis-à-vis des ressources en eau est considéré comme très faible.
- Des faiblesses géotechniques a priori non liées au karst mais à des actions anthropiques (anciens prélèvements importants des sables de surface) sont repérées.
- Une enquête historique, un recueil de témoignages et une inspection du terrain indiquent une densité de 12 effondrements karstiques connus par km².

## 3. Repérage et caractérisation des anomalies

Les reconnaissances menées par le BRGM se sont faites par étapes avec une optique d'amélioration progressive des connaissances et de diminution des incertitudes. Seuls les

principaux résultats intéressant la configuration karstique sont exposés ici. Les autres investigations et leurs résultats sont évoqués dans la communication précédente.

### *3.1. Reconnaissances géophysiques*

Le secteur de 26.5 ha a tout d'abord été intégralement couvert par près de 2050 points de mesure microgravimétrique avec une maille carrée de 15 m, resserrée à 7.5 m au droit du tracé et au niveau des anomalies repérées à la première maille. En identifiant les défauts souterrains de masse (anomalie résiduelle microgravimétrique négative), cette technique avait ici pour objectif principal d'identifier d'éventuels grands conduits karstiques. Parmi les résultats (Figure 2), on notera : 1) que les anomalies résiduelles négatives atteignent les valeurs remarquables de 40 à 50 µgals ; 2) que certaines valeurs négatives dessinent une bande allant d'une ancienne gravière (proche du projet et connue pour ces nombreux effondrements) jusqu'au tracé du projet au sud de la zone étudiée ; cette configuration fait en première approche penser à un possible réseau karstique souterrain. Il convient toutefois d'être prudent sur cette interprétation car la méthode gravimétrique n'offre pas une mesure univoque : celle-ci est le résultat d'une intégrale partant de la surface du sol et allant très en profondeur, avec une sensibilité décroissant avec la profondeur. Autrement dit et en simplifiant, une anomalie négative donnée peut correspondre à une petite cavité superficielle, à une grande cavité profonde, ou encore à d'autres configurations.

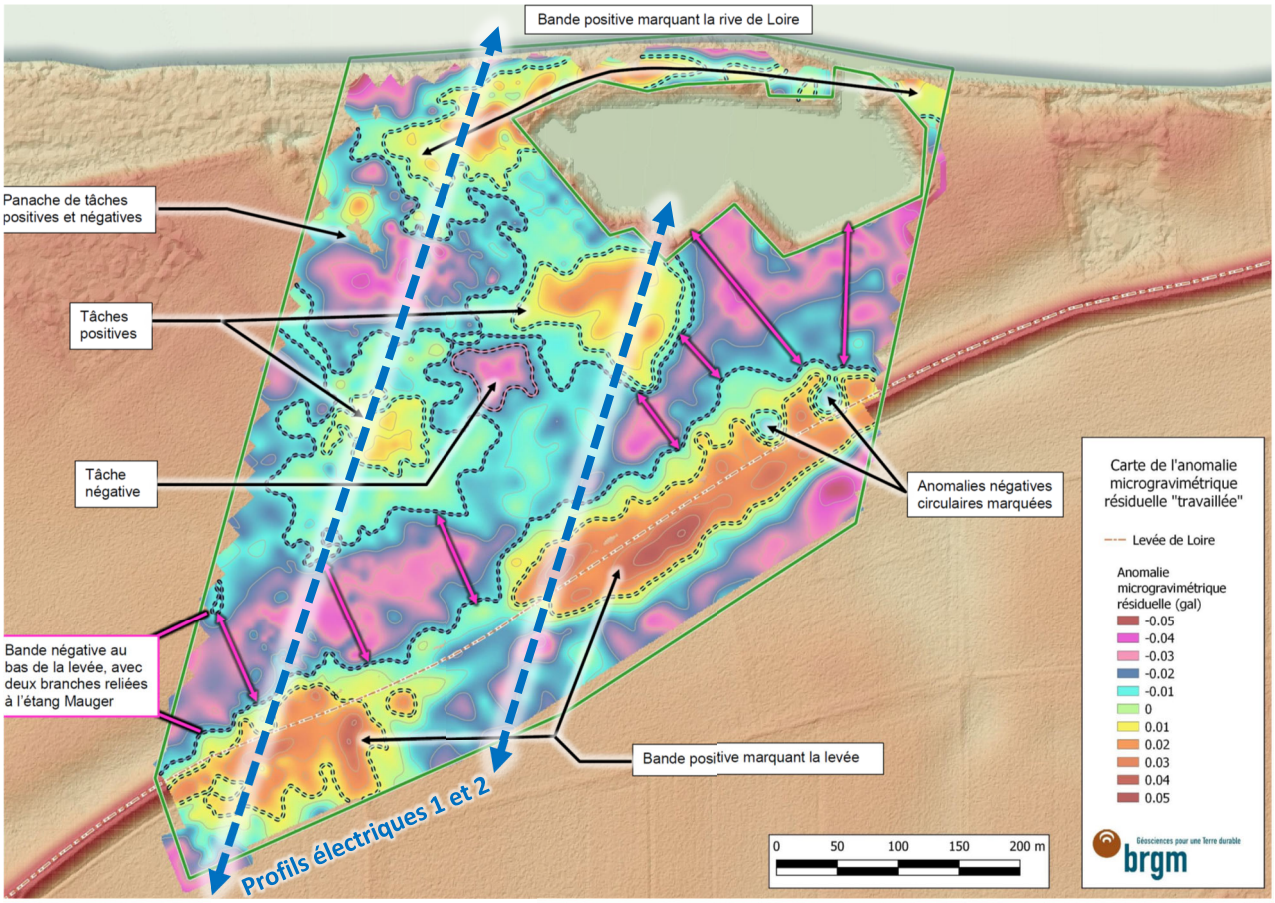



Figure 2 : Carte d'anomalie microgravimétrique résiduelle avec éléments d'interprétation

Deux panneaux de tomographies de résistivité électrique ont également été effectués (localisation en Figure 2). Les électrodes étaient espacées tous les 5 m de manière à assurer à la fois une résolution acceptable des terrains de surface et une profondeur d'investigation dépassant 40 m. L'acquisition s'est faite suivant un dispositif Wenner-Schlumberger réciproque qui permet notamment de réduire les temps d'acquisition. Le premier profil suit le tracé du projet et, pour mieux comprendre les résultats

microgravimétriques, le second a été implanté parallèlement au premier sur un secteur comprenant notamment des anomalies gravimétriques positives et négatives. Le profil 1 est présenté en Figure 3. Parmi les résultats on notera 1) qu'entre la surface et 10 m de profondeur, plusieurs tranches moins résistantes coïncident avec des secteurs d'anomalies gravimétriques négatives, ce qui fait penser à de possibles perturbations dans les alluvions ; 2) dans la partie sud, entre 10 et 20 m de profondeur : a) une zone résistante « pointant » à l'aplomb de la levée coïncide avec un secteur microgravimétrique « positif », ce qui laisse penser en première approche à une particularité au niveau du toit du calcaire de Beauce ; et b) une zone assez conductrice située immédiatement au nord de la levée coïncide avec la bande gravimétrique négative évoquée plus haut, ce qui renforce a priori la suspicion de conduit karstique à cet endroit.

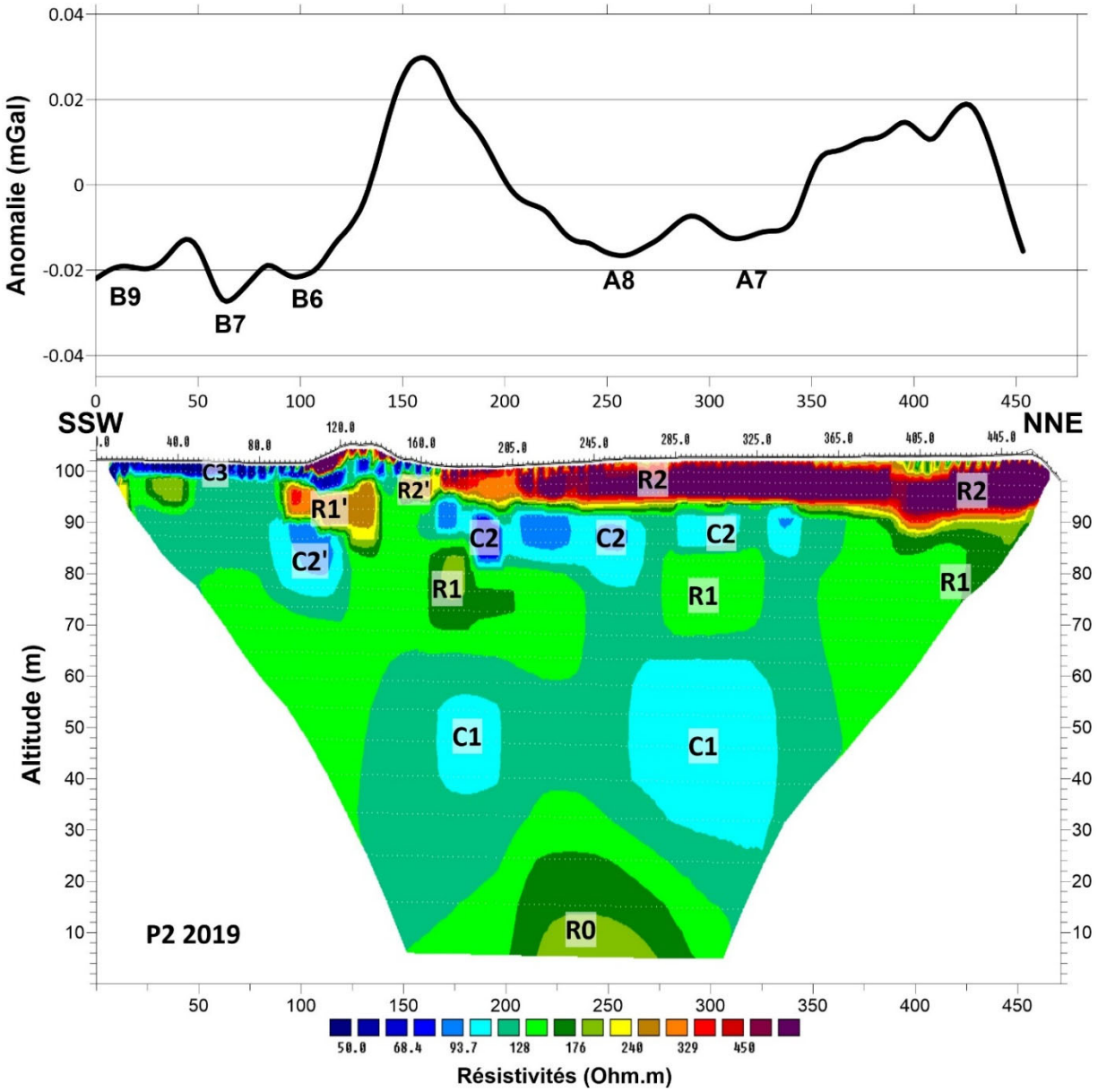



Figure 3 : Profil électrique 1 (bas) avec, en regard, profil microgravimétrique interpolé (haut)

Suivant les règles de l'art, les observations issues des mesures géophysiques ont été précisés par des sondages géotechniques, comme détaillé ensuite.

### *3.2. Reconnaissances géotechniques*

Le programme de sondages géotechniques a été en grande partie élaboré à la lumière des résultats géophysiques. Les anomalies repérées sur la carte microgravimétrique et sur les

profils électriques ont fait l'objet d'une attention particulière, avec une densité plus forte de sondages. La bande microgravimétrique négative faisant en première approche penser à un possible réseau karstique a ainsi été analysée via plusieurs « transects ».

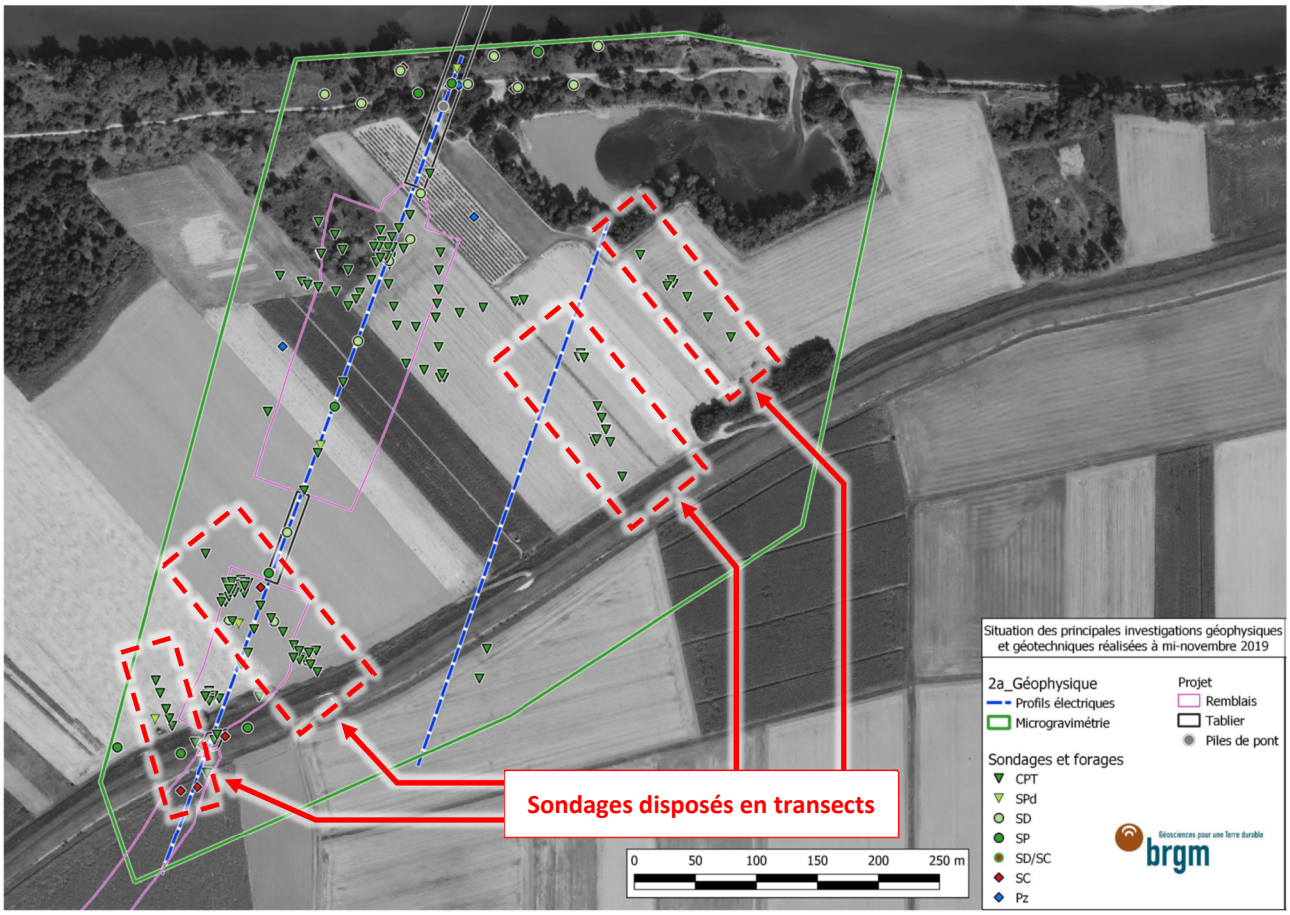



Figure 4 : Plan d'implantation des mesures géophysiques et géotechniques utilisées pour l'étude

Ces reconnaissances ont consisté dans un premier temps en une série de Cone Penetration Test (CPT), essai de pénétration statique en français. Cette technique de sondage est peu utilisée dans l'orléanais. Le fonçage d'un cône instrumenté permet de mesurer la résistance de pointe $q_c$ (en lien avec la portance du terrain) et le rapport de frottement RF (en lien avec sa granulométrie). L'objectif était de mesurer les perturbations dans les alluvions, de manière à mieux comprendre leur influence sur les mesures géophysiques précédemment exposées. Finalement, les CPT ont très souvent dépassé leur objectif de profondeur en descendant jusqu'à 15 à 20 m dans le toit calcaire. Devant l'intérêt des premiers résultats, d'autres CPT ont été programmés : 150 ont été au total réalisés.

De fortes anomalies ponctuelles ont été détectées sur quelques CPT lors de la première série d'essais (Figure 5) : sans qu'aucun changement lithologique ne soit détecté sur la lecture du rapport de frottement, les alluvions y présentaient sur parfois toute leur hauteur une diminution de la résistance de pointe (parfois inférieure à 0.5 MPa) allant jusqu'à un facteur 10 par rapport à la normale observée dans le secteur (20 à 30 MPa), ce qui laissait penser soit à de possibles effondrements, soit à une anomalie lors du dépôt alluvial. Ces particularités ont été précisées dans un second temps, en cherchant à optimiser le nombre de sondages. Pour cela, le diamètre moyen de 2 m observé pour les fontis du Val d'Orléans a été considéré et trois CPT complémentaires ont d'abord encadré chaque CPT anomalique. En fonction des résultats de ces 3 CPT, d'autres CPT ont pu être ajoutés pour circonscrire l'anomalie. En fin de campagne, la découverte fortuite d'un trou sous la surface du sol a conforté le raisonnement retenu et la méthode mise en œuvre : la zone en question, considérée comme une instabilité en cours de remontée vers la surface, a été testée avec

4 CPT (un CPT au droit du trou et 3 CPT autour) : seul le CPT central présentait une anomalie jusqu'à la base des alluvions. Ces observations ont ainsi permis de repérer 9 secteurs déstabilisés dans les alluvions, dont 5 au droit du tracé du projet, avec des emprises en surface estimées entre 2 et 6 m de diamètre mais pouvant atteindre 10 m ou plus pour deux d'entre elles.

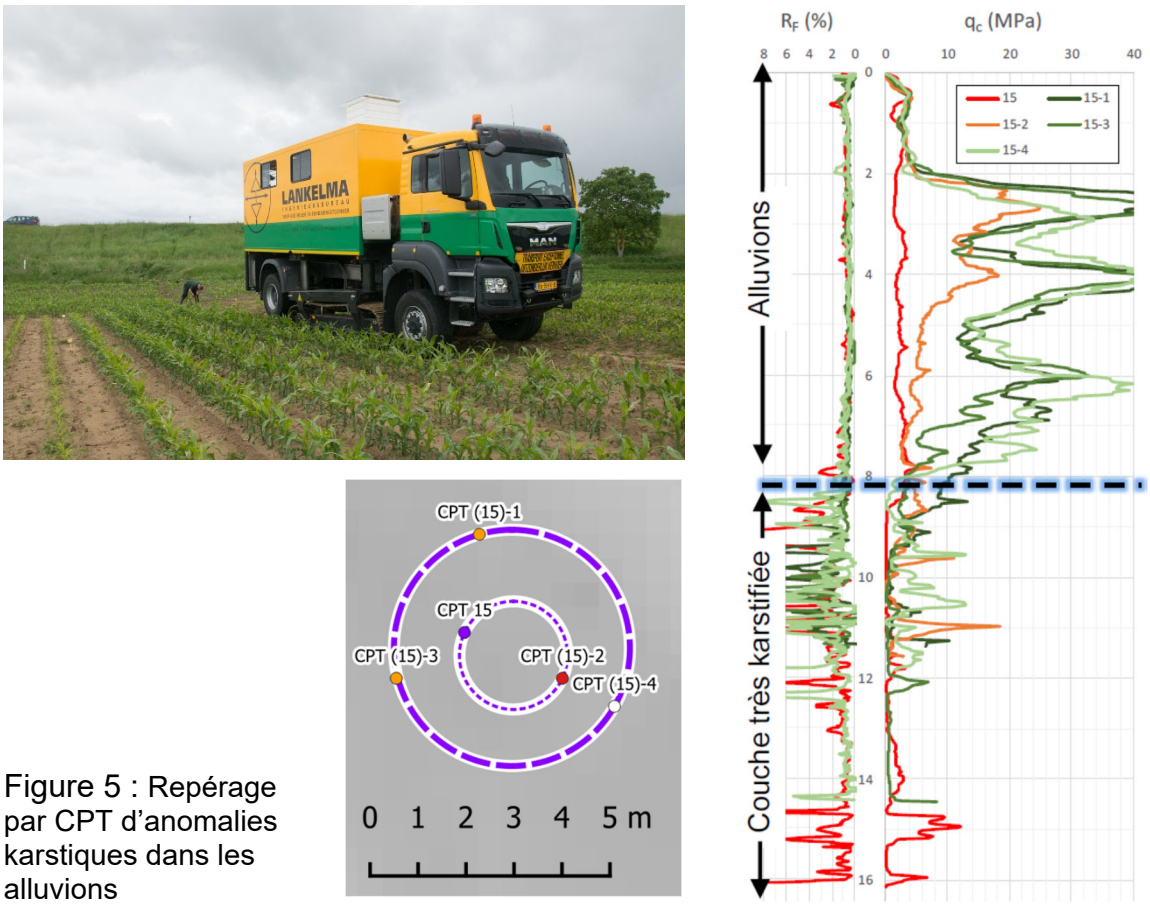
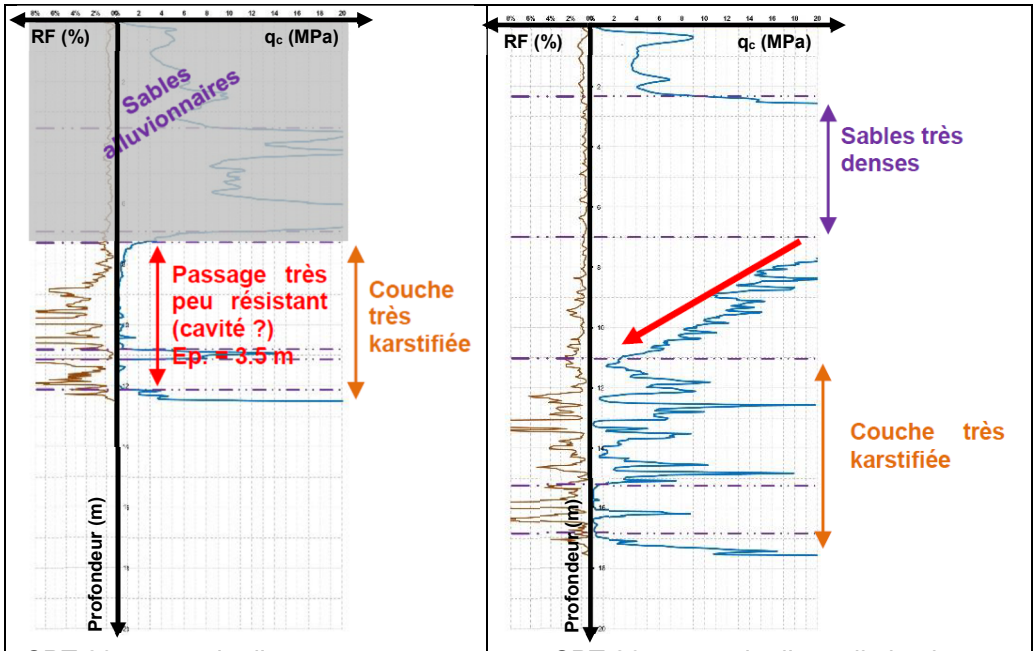



Figure 5 : Repérage par CPT d'anomalies karstiques dans les alluvions

Ces nombreux CPT ont également permis de caractériser d'une manière inédite à notre connaissance les particularités géologiques et géotechniques du toit d'un crypto-karst sous nappe. La quantité de mesures effectuées, leurs résolutions (une mesure tous les 2 cm en profondeur) et l'analyse qui en a été faite semblent en effet être une première, au moins pour la région orléanaise. Le toit de ce crypto-karst est particulièrement hétérogène, à tous les sens du terme (Figure 6) :

- Les valeurs de résistance varient fortement. Elles sont parfois presque nulles, ce qui est interprété comme une cavité. Cette configuration rend d'ailleurs complexe la réalisation des sondages. Plusieurs pointes CPT ont été cassées suite à la déviation soudaine et brutale du train de tige à la fin de ces passages très peu résistants. Les éboulements affectant quasi systématiquement les sondages destructifs (voir plus bas) semblent aussi liés à la fragilité de ces passages.
- Le toit de cette couche est presque toujours marqué par des niveaux de sables plus ou moins épais dont la résistance de pointe diminue rapidement avec la profondeur, parfois à mesure d'une augmentation de la teneur en fines. Cela est interprété comme la signature du soutirage des alluvions dans des cavités ou comme le poinçonnement de zones tellement karstifiées qu'elles sont devenues sans résistance.
- Les valeurs mesurées sur des CPT très proches (un à deux mètres) sont souvent complètement différentes pour une même profondeur.

Au final, ces observations ont motivé le choix de distinguer une couche très karstifiée sur l'ensemble du secteur étudié. Elle constitue une interface entre les alluvions denses en place et le calcaire de Beauce moins altéré. Son épaisseur a été évaluée grâce aux sondages autres que les CPT (ceux-ci refusant a priori de la traverser, en butant sur des blocs ou sur des bancs résiduels) : cette couche est épaisse de 3 à 12 m.




CPT 20 : exemple d'un passage sans résistance

CPT 26 : exemple d'une diminution progressive de la densité des sables

Figure 6 : Repérage par CPT d'anomalies karstiques dans le crypto-karst

Onze sondages destructifs (SD) avec calage au vide et enregistrant les paramètres de foration et deux piézomètres, descendus respectivement à 40 et 30 m de profondeur, ont permis de chercher des cavités karstiques dans le calcaire moins altéré. Ils ont été implantés à la lumière des mesures géophysiques préexistantes et des premiers CPT. Lorsque des cavités étaient détectées, les trous des sondages destructifs étaient équipés pour approfondir l'inspection (vidéo, diagraphie gamma-ray et mesure sonar). Les éboulements de la couche très karstifiée ont empêché ces inspections en deçà de 20 m de profondeur pour 10 sondages. Parmi les résultats, on notera :

- L'hétérogénéité de la couche très karstifiée constituant le toit du crypto-karst est similaire à celle mesurée par les CPT.
- Aucun grand vide dans le calcaire moins altéré n'a été détecté mais de nombreux conduits plus petits existent : ils atteignent 1 m de hauteur et sont traversés par d'important flux d'eau. De nombreux coquillages vivants ont été vu à 20 m sous la surface du sol, ce qui indique une alimentation active de ces conduits par la Loire (qui se trouve à quelques centaines de mètres).

### *3.2. Synthèse géotechnique*

L'ensemble des résultats disponibles aboutit à déterminer le profil géotechnique suivant pour le secteur étudié (Figure 7) :

- Sous le terrain naturel (100 NGF), les alluvions sableuses, lorsqu'elles sont en place, sont généralement denses avec des valeurs de $q_c$ de 10 à 20 MPa en moyenne et des RF de 0.5 à 1.5 %. La base de cette couche se trouve vers 95 NGF et coïncide globalement avec la position de la nappe alluviale. Ces alluvions sont émaillées de zones instables liées au karst sous-jacent.

- La couche très karstifiée située en dessous est très hétérogène : des passages résistants alternent sans logique apparente avec des passages mous et des cavités. Cette frange altérée laisse place, à partir de 86 NGF, à des terrains moins altérés.
- Ces derniers sont constitués, tout d'abord du calcaire de Beauce qui contient toujours des cavités karstiques dans lesquelles des flux d'eau importants circulent, puis des couches géologiques attendues : mollasse du Gâtinais, etc.

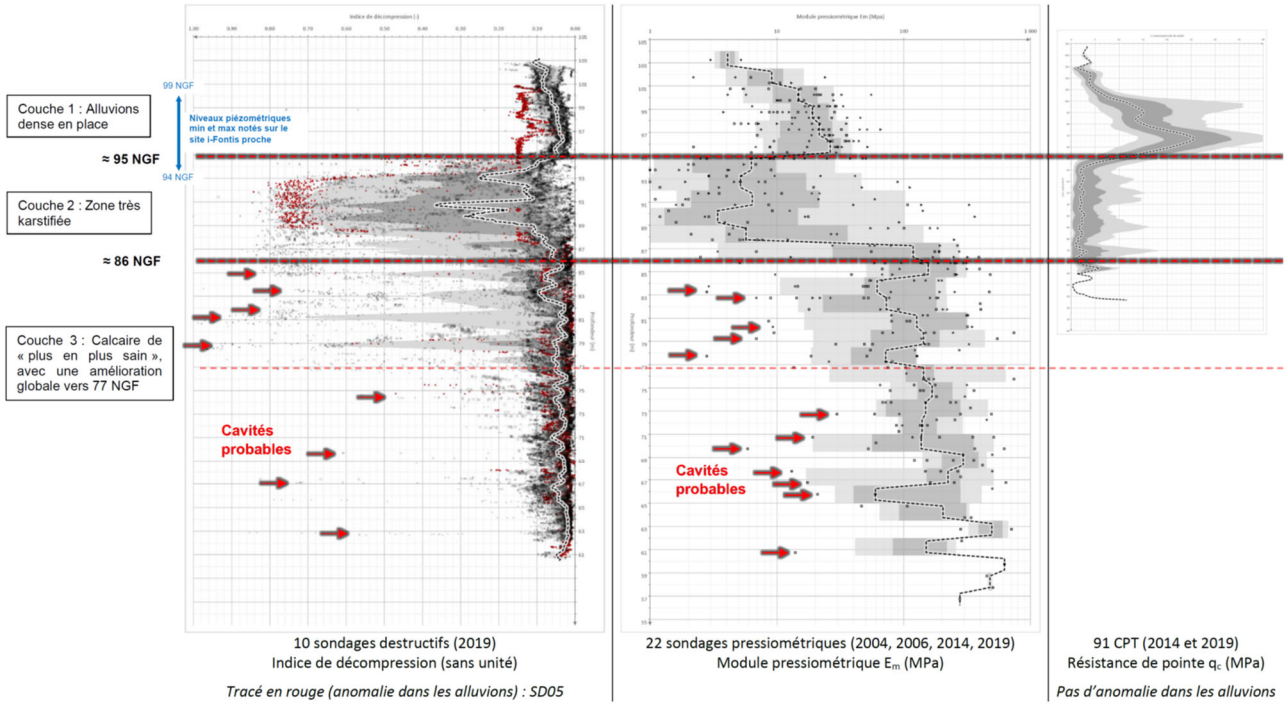



Figure 7 : Coupe géotechnique synthétique du secteur étudié

## 4. Conclusions

Après avoir évalué les aléas géologiques liés au karst (Noury et al., 2020[b]), le BRGM a précisé la configuration des terrains concernant le projet de franchissement de la Loire à Jargeau. Les investigations multi-mesures effectuées serviront à concevoir les ouvrages géotechniques en garantissant la prise en compte des particularités profondes. Les résultats acquis lors de cette étude viennent par ailleurs enrichir la connaissance géologique régionale et la compréhension des phénomènes karstiques.

## 5. Références bibliographiques

Noury G., Vedie E., Clement F., Husson E., Respaud C., Azemard P., Dore L., Haussard S., Perrin Je. (2020). Aléa mouvements de terrain lies au karst : contextes, méthode et cas type traites en vue d'un guide. Proceedings, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur 2020[a], Lyon, France. ⟨hal-02944842⟩

Noury G., Buscarlet E., Jacob T., Baltassat J.-M., Kessouri P., Coppo N., Salquebre D., Boularas S., Asfirane-Haddadj F., Deparis J. Complexités géologiques d'un karst sous-couverture : étude d'un projet de pont sur la Loire. Proceedings, Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur 2020[b], Lyon, France. ⟨hal-02946764⟩.