

# COMPLEXITES GEOLOGIQUES D'UN KARST SOUS-COUVERTURE : ETUDE D'UN PROJET DE PONT SUR LA LOIRE

## *Geotechnical engineering of covered karst terrains : Case study of a bridge project across the Loire River*

Gildas NOURY<sup>1</sup>, Etienne BUSCARLET<sup>1</sup>, Thomas JACOB<sup>1</sup>, Jean-Michel BALTASSAT<sup>1</sup>, Pauline KESSOURI<sup>1</sup>, Nicolas COPPO<sup>1</sup>, Damien SALQUEBRE<sup>1</sup>, Soraya BOULARAS<sup>1</sup>, Fawzia ASFIRANE-HADDADJ<sup>1</sup>, Jacques DEPARIS<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, France

**RÉSUMÉ** – Le projet d'un nouveau pont sur la Loire à Jargeau, en amont d'Orléans, s'inscrit dans un contexte karstique qui non seulement présente un aléa de mouvements de terrain mais peut également interpeller quant à la préservation de la ressource en eau. Grâce à une série d'investigations, le BRGM a précisé les analyses préexistantes afin d'améliorer la gestion de ces contraintes géologiques par le maître d'ouvrage.

**ABSTRACT** – A bridge project across the Loire River, east of Orléans, is located on covered karst terrains prone to sinkholes and prone to water resource disturbance. Conducting an overview of past sinkhole collapses and various field surveys, the French Geological Survey precised the past analysis to help the project planner to improve the hazard management.

## 1. Introduction

Dans le cadre d'une convention de recherche et développement partagé, le BRGM apporte son soutien scientifique au Conseil Départemental du Loiret (CD 45) pour les études d'un nouveau pont sur la Loire, en amont d'Orléans, sur la commune de Jargeau.

Ce secteur, comme le reste du val d'Orléans (lit majeur inondable de la Loire), est marqué par des effondrements et des affaissements liés au karst du calcaire de Beauce recouvert à cet endroit par les alluvions. Il est par ailleurs connu comme une des « portes d'entrée » d'un réseau souterrain de cavités, siège de circulations d'eau qui contribuent à l'alimentation des ressources en eau de la région et à celle des sources du Loiret.

La prise en compte de ces particularités géologiques a imposé une étude allant au-delà du simple tracé du projet pour intéresser l'ensemble de sa possible « zone d'influence géotechnique ». Elle a également impliqué une analyse historique des mouvements connus pour définir l'évènement dimensionnant qui ne peut être anticipé par les seules investigations in-situ. Ses dernières ont enfin été adaptées à mesure de l'amélioration des connaissances de la zone. L'ensemble des travaux effectués permet de mettre à jour le modèle géologique préexistant (établi lors d'études antérieures) afin de mieux cadrer la conception et la construction du projet. Cet article présente quelques résultats des études menées en 2019 et les principales conclusions obtenues.

## 2. Contextes

### 2.1. Contexte géologique

Le Val d'Orléans correspond à un élargissement du *lit majeur de la Loire* sur une quarantaine de kilomètres de long et quelques kilomètres de large. À l'aval de Châteauneuf-

sur-Loire, le Val entaille le *calcaire de Pithiviers* et s'encaisse d'une vingtaine de mètres entre le coteau de Beauce au nord et le coteau solognot au sud (Lepiller, 2006).

Épaisses de 5 à 10 m, les *alluvions* du Val sont constituées à leur base par des graviers, puis par des sables plus ou moins grossiers et enfin par des limons de débordement. En-dessous, les calcaires de Beauce offrent une grande variété de faciès lithologiques : ils comportent presque tous de nombreux vides de tailles diverses. L'interconnexion de ces vides contribue à la perméabilité du calcaire qui est encore augmentée par la fracturation et la karstification. Dans le détail, on distingue le calcaire de Pithiviers séparé de celui d'Étampes par la molasse du Gâtinais. Il n'existe pas d'affleurement dans le Val, mais on peut apprécier la transition alluvions - calcaire grâce à quelques coupes dans les coteaux voisins de Beauce et de Sologne (alluvions anciennes sur altérites puis calcaire - Figure 1).



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

Le secteur d'étude est caractérisé par la nappe des calcaires de Beauce et par la nappe alluviale de la Loire, les deux présentant une surface piézométrique quasiment confondues (Perrin et al., 2016). Les écoulements d'eau souterraine, alimentés par les pertes de la Loire, sont très rapides au sein des conduits karstiques (de l'ordre de 100 à 200 m/h). Le Loiret est le fruit d'une série de *résurgences* karstiques, à l'extrémité aval du système. La ressource aquifère locale dépend ainsi en grande partie des apports d'eaux par la Loire.

## **2.2. Aléa mouvements de terrain et processus habituellement associés**

Le Val est émaillé de nombreux « *indices* » karstiques en surface (dolines, mares). Plusieurs *effondrements et affaissements* s'y produisent par ailleurs tous les ans. Tous ne sont pas rapportés aux autorités ou au BRGM mais, en temps normal, on estime de manière assez grossière, leur « taux d'occurrence » sur l'ensemble du Val entre 0.02 et 0.03 mouvements par an et par km<sup>2</sup> (Noury et al., 2018). Les diamètres de ces mouvements varient de quelques décimètres à plusieurs mètres, le plus grand connu étant celui ayant détruit un pavillon à la Chapelle-St-Mesmin en 2010 (diamètre 16 m, profondeur 7.5 m). Ce « taux d'occurrence » est très fortement *accentué en cas d'inondation*. En 2016, suite à de fortes pluies, l'inondation du quartier des Plantes à Chécy a généré une recrudescence de mouvements de terrain (Noury et al., 2018), les deux plus grands ayant atteint des diamètres de l'ordre de 12 m pour des profondeurs de 3-4 m. Même si les archives souffrent d'imprécisions à ce sujet, les anciennes grandes crues de la Loire ont semble-t-elles été également marquées par de telles recrudescences.

Les mouvements de terrain liés au karst sont le résultat de différents processus possibles (Noury et al., 2020). Dans le Val d'Orléans, celui généralement retenu est le soutirage des alluvions recouvrant le karst par les cavités présentes dans la roche, via les circulations d'eau (Alboresha, 2016). Bien que considéré comme rare, la rupture des cavités calcaires est potentiellement plus dangereuse lorsqu'elle se produit au niveau d'une grande salle ou d'un grand couloir karstique (le diamètre de l'effondrement en surface étant a priori du même ordre de grandeur). Les rares zones explorées du karst sous nappe du val d'Orléans

ont révélé des couloirs présentant par endroit des largeurs de 11 m et des hauteurs de 6 m (Poinclou et al., 2004).

### 2.3. Définitions du projet et de la zone à étudier par le BRGM

Le projet engagé par le CD 45 consiste en une déviation routière contournant les centres-bourgs de Jargeau et Darvoy (rive Sud) et Saint-Denis-de-l'Hôtel (rive Nord). En rive Sud, il inclut le franchissement de la levée de Loire servant de protection contre les inondations (hauteur # 5 m), le passage du lit majeur endigué (hauteur remblais = 7.5 m), un ouvrage de décharge de 75 m en cas d'inondation du secteur et le franchissement du lit mineur par un viaduc de 570 m. La zone à étudier par le BRGM était initialement le tracé compris entre la levée et la rive Sud de la Loire (650 m).

## 3. Analyse des mouvements de terrain récents ou supposés

### 3.1. Zone finalement étudiée

De manière à comprendre le fonctionnement de l'intégralité du secteur, une « zone d'étude homogène » a été définie : il s'agit de la terrasse alluviale inondable s'étendant entre la levée et la Loire, depuis l'actuel pont de Jargeau jusqu'au lieu-dit Le Coin Tournant, situé en aval (au niveau du changement de direction de la Loire). Ce périmètre est représenté en Figure 2. Sa surface est de 272 ha, la moitié étant marquée par de nombreuses carrières de granulats (une en activité, les autres abandonnées). Même si elle n'est inondable qu'en cas de crue exceptionnelle, la zone située directement au Sud de la levée a également prise en considération (« zone homogène étendue »).

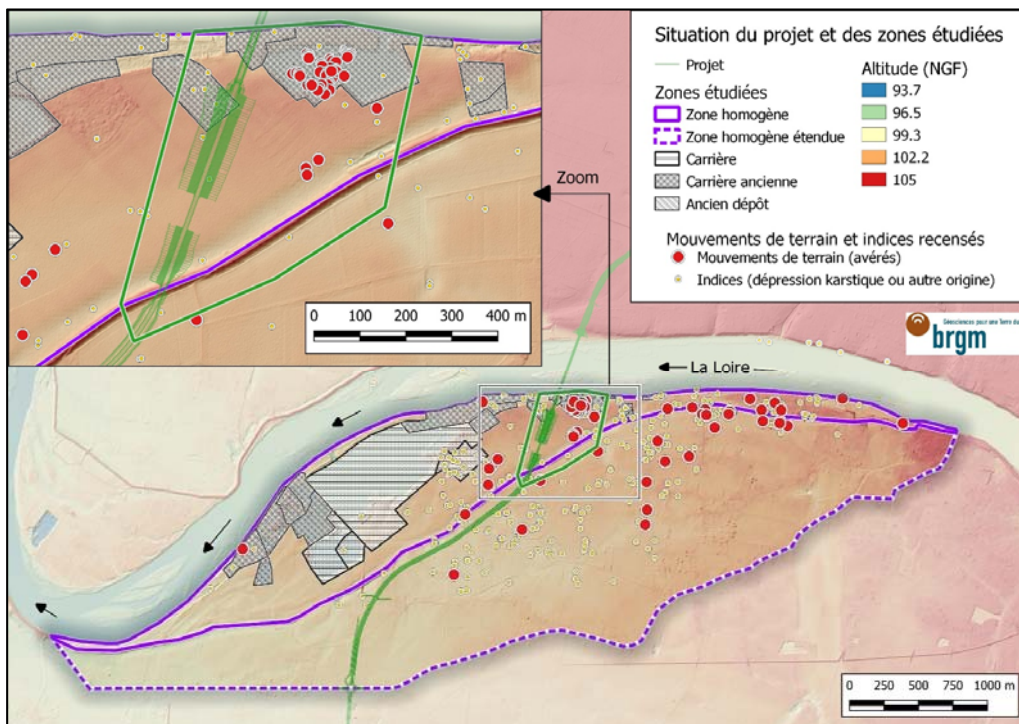


Figure 2 : Mouvements, formes karstiques et « indices » recensés sur les zones étudiées

### 3.2. Informations utilisées et analyse

Les études précédentes avaient déjà intégré la plupart des sources classiques d'information (BD Cavités et BD Mouvements de terrain disponibles sur georisques.gouv.fr,

visite de terrain, photographies aériennes d'archive). D'autres documents et témoignages ont été ici ajoutés.

Ces informations confirment la sensibilité du secteur à l'aléa mouvements de terrain : en mettant de côté une ancienne carrière présentant un comportement particulier, 19 effondrements/affaissements sont recensés sur la zone homogène, soit 12 / km<sup>2</sup> (Figure 2). Aucun n'est signalé au droit du tracé mais certains sont relativement proches et plusieurs « indices » sont présent à proximité. Le plus grand effondrement connu dans la zone d'étude homogène a par ailleurs été observé par les Ponts-et-Chaussées suite à la crue (centennale) de 1907 (diamètre 9 m, profondeur 4 m).

#### 4. Investigations in-situ réalisées en 2019 – résultats et analyses

##### 4.1. Mesures réalisées

La réalisation d'investigations complémentaires s'est faite progressivement, chaque phase permettant de mieux cadrer la suivante (Figure 3).

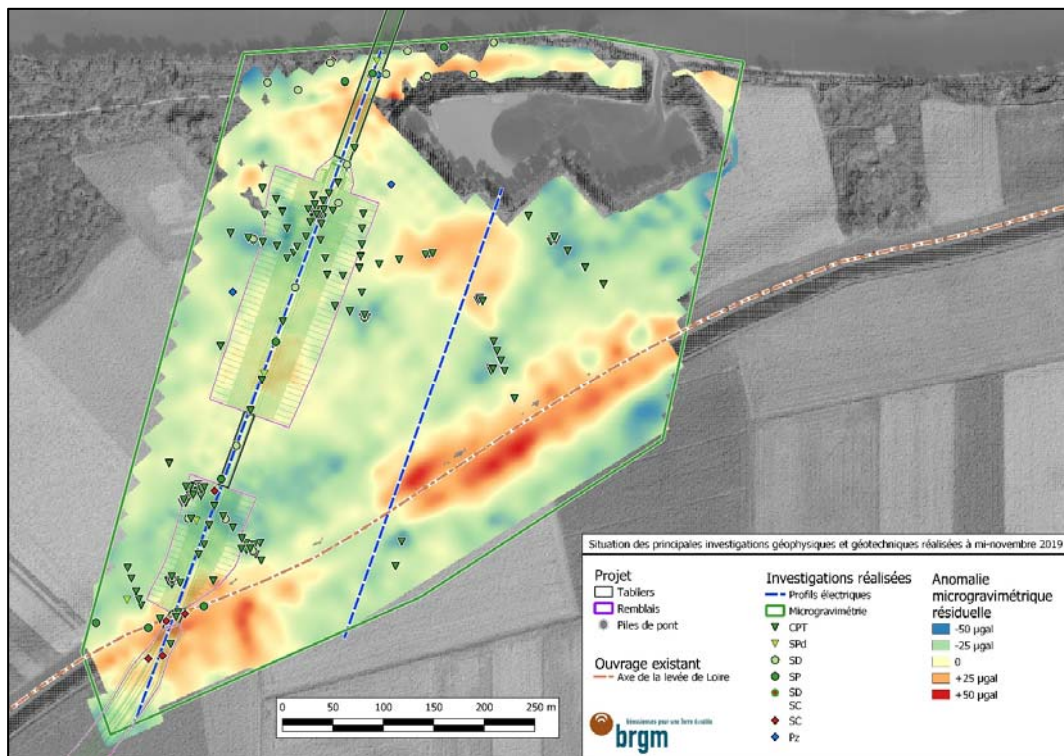


Figure 3 : Investigations réalisées de 2006 à 2019 avec, en fond, les résultats microgravimétriques

26.5 ha ont fait l'objet de 2053 points de *mesures microgravimétriques* implantées avec une maille générale de 15 x 15 m, resserrée au niveau des anomalies détectées à la maille générale et au droit du tracé (7.5 x 7.5 m). Ces mesures révèlent entre autre des anomalies négatives de direction NE/SW, similaire à celle des circulations karstiques telles que connues dans le secteur.

Deux *panneaux électriques*, l'un suivant le tracé, l'autre décalé de 175 m vers l'Est, approfondissent et densifient les mesures de ce type réalisées jusqu'alors. Ils précisent la configuration interne de la levée et de son soubassement, confirment la présence d'une anomalie superficielle au Nord, identifient le passage, en profondeur (60-65 NGF), à un corps plus conducteur et, enfin, distinguent les limons de surface au Sud de la levée (absents au Nord).



Les sondages géotechniques ont été implantés suite à l'analyse des mesures géophysiques. Ils comprennent 150 essais de pénétration statique (CPT) réalisés en trois phases et 11 sondages destructifs (SD) à 40 m de profondeur, accompagnés d'inspections en forage. L'obtention de forages permettant d'inspecter entièrement les vides supposés au toit du calcaire n'a pas été possible avec les techniques employées. Les résultats obtenus complètent toutefois la connaissance de la zone :

- Des passages « mous », voire des vides, ont été détectés à différents niveaux.
- Aucun vide de grande extension n'a été repéré au droit des sondages, y compris pour ceux faits à l'apex des anomalies géophysiques.

Pour préciser le fonctionnement hydrogéologique du secteur, en particulier l'intensité des circulations karstiques souterraines, les investigations précédentes ont été complétées par la pose de deux piézomètres, la réalisation de *diagraphies physico-chimiques*, un *traçage colorimétrique* et un *traçage salin avec suivi géophysique électrique*, ce dernier cherchant à détecter de potentiels conduits karstiques « sensibles », ceux dans lesquels les débits seraient tels que la saumure injectée peut être détectée et sa vitesse de migration mesurée.

#### 4.2. Modèle géologique obtenu et particularités observées

La synthèse des résultats obtenus (incluant des traitements statistiques comme celui fait pour les Vitesses Instantanées d'Avancement (VIA) enregistrés sur les 11 sondages destructifs (Figure 4) met à jour le modèle géologique du secteur.

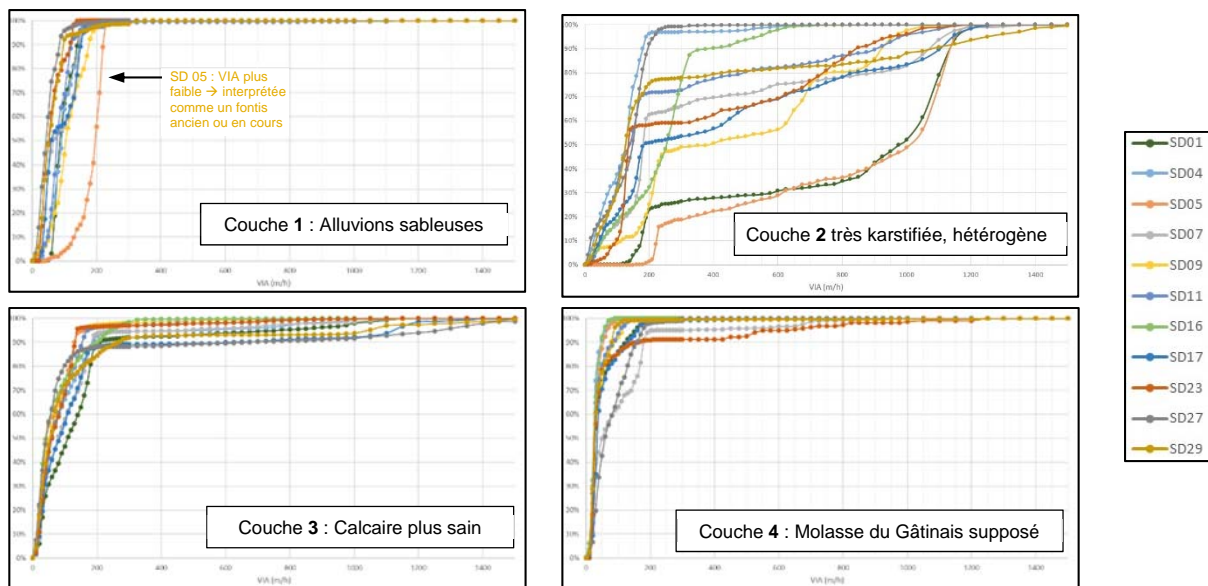


Figure 4 : Traitement statistique du paramètre VIA enregistré par les sondages destructifs

Les *alluvions sableuses* en place sont globalement denses à très denses, à l'exception notable de certaines zones :

- Deux zones « anthropisées » ont été repérées (une ancienne carrière en partie remblayée à proximité de la Loire et, en pied de levée, ce qui est interprétée comme un ancien emprunt vraisemblablement effectué pour sa construction) ;
- Des fontis d'origine karstique, anciens ou en cours, affectent les alluvions sur tout ou partie de leur épaisseur. Les Cone Penetration Test (CPT) ont permis d'en repérer la signature sur le terrain : les résistances de pointes ( $q_c$ ) y sont divisées par un facteur 5 à 10 (Figure 5). Pour six secteurs, les diamètres de ces fontis pourraient atteindre 6 m. Ils restent difficiles à évaluer pour deux autres secteurs.

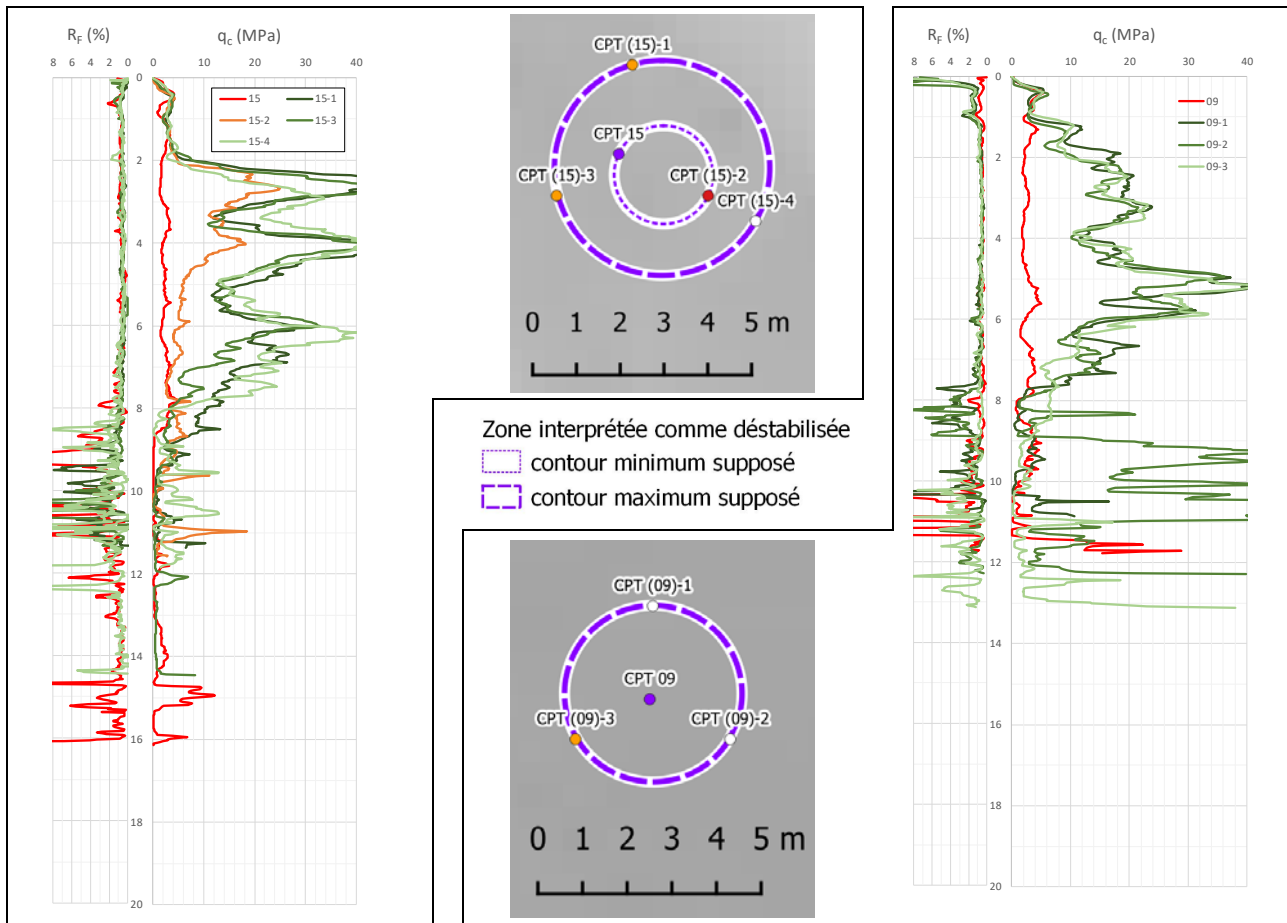


Figure 5 : Fontis karstiques, anciens ou en cours, repérés au niveau du CPT 15 et du CPT 9

La *nappe calcaire*, dont le niveau est ici généralement confondu avec celui de la nappe alluviale, s'établit à la base des alluvions denses en place (94-96 NGF).

Comme prévu, les déstabilisations observées en surface sont visiblement liées aux *terrains sous-jacents* :

- Les terrains situés sous les alluvions sont d'abord très karstifiés. Leur épaisseur est en moyenne de 7 à 8 m, avec un maximum observé de 12 m. Cette couche très karstifiée présente une résistance médiocre, voire quasi-nulle sur des passages plus ou moins épais (passages pouvant correspondre à des cavités) et inclut des passages plus résistants correspondant visiblement à des reliquats calcaires moins altérés. Elle inclut des alluvions lâches, restant parfois en lien avec ceux denses présentes en surface, mais étant d'autres fois isolés dans les altérites, ce qui correspondrait à des mises en places soit par poinçonnement des altérites, soit par soutirage karstique.
- L'absence apparente de cohérence entre résultats microgravimétriques et zones de fontis peut s'expliquer par les hétérogénéités de cette couche (épaisseur, densité) : le « bruit » de densité ainsi généré masque les « petits » défauts superficiels de masse.
- Etant donné les difficultés rencontrées en forage, les cavités supposées dans cette couche intermédiaire restent mal connues.

Les caractéristiques des terrains s'améliorent sous cette couche très karstifiée. Le *calcaire plus résistant* présente encore quelques passages très peu voire pas résistant, incluant des *cavités* – cavités vides de matériaux, ou cavités colmatées. Certaines sont le siège de *circulation d'eau* et sont connectées avec la Loire (des coquillages vivants ont été remontés lors de la foration du Pz1).

La *molasse du Gâtinais* aurait été atteinte vers 74 NGF.

De manière plus spécifique, des particularités sont notées au niveau de la levée : masse conductrice en bas et sous la levée côté Sud (éventuelle assise argileuse ?), masse moins résistante en pied de levée côté Nord (affaiblissement lié au karst ?), corps résistant (semblant correspondre au calcaire) moins profond sous la levée qu'au Nord.

### 4.3. Fonctionnement hydrogéologique

Plusieurs contraintes (voir plus haut) ont imposé de réaliser les traçages à partir du conduit karstique actif traversé par le Pz1. Ces mesures sont cohérentes avec les autres résultats. Elles confirment les circulations karstiques dans les calcaires de Pithiviers :

- Elles semblent se faire de manière *diffuse* dans une *multitude de conduits petits à moyens* plutôt que de façon concentrée dans quelques « gros » conduits.
- Elles contribuent bien à l'*alimentation du Loiret*, mais dans des *proportions similaires* à celles mesurées pour les nombreuses autres pertes présentes sur plusieurs kilomètres en Loire et à proximité.

A titre d'illustration, la Figure 6 présente une partie des résultats du suivi géophysique du traçage salin. Les variations de potentiels sont présentées en % du champ électrique mesuré à l'état 0 du système (avant l'injection de saumure). Le gros point blanc illustre le forage Pz1 et les autres points blancs les électrodes de mesure de potentiel électrique. Les traits violets matérialisent les distances au forage Pz1. La première image montre une variation nulle et représente une variation à l'état 0 du système, soit avant l'injection de saumure. L'injection de saumure est terminée à la 3<sup>e</sup> image. Le monitoring s'est prolongé ensuite pendant environ 4h. La propagation du front conducteur commence environ 100 min après l'arrêt de l'injection de la saumure. Au-delà, la dilution du sel se manifeste, sa concentration n'est plus suffisante pour maintenir une anomalie de conductivité suffisante pour être détectable, et le front de variation entame son retour vers l'état 0.

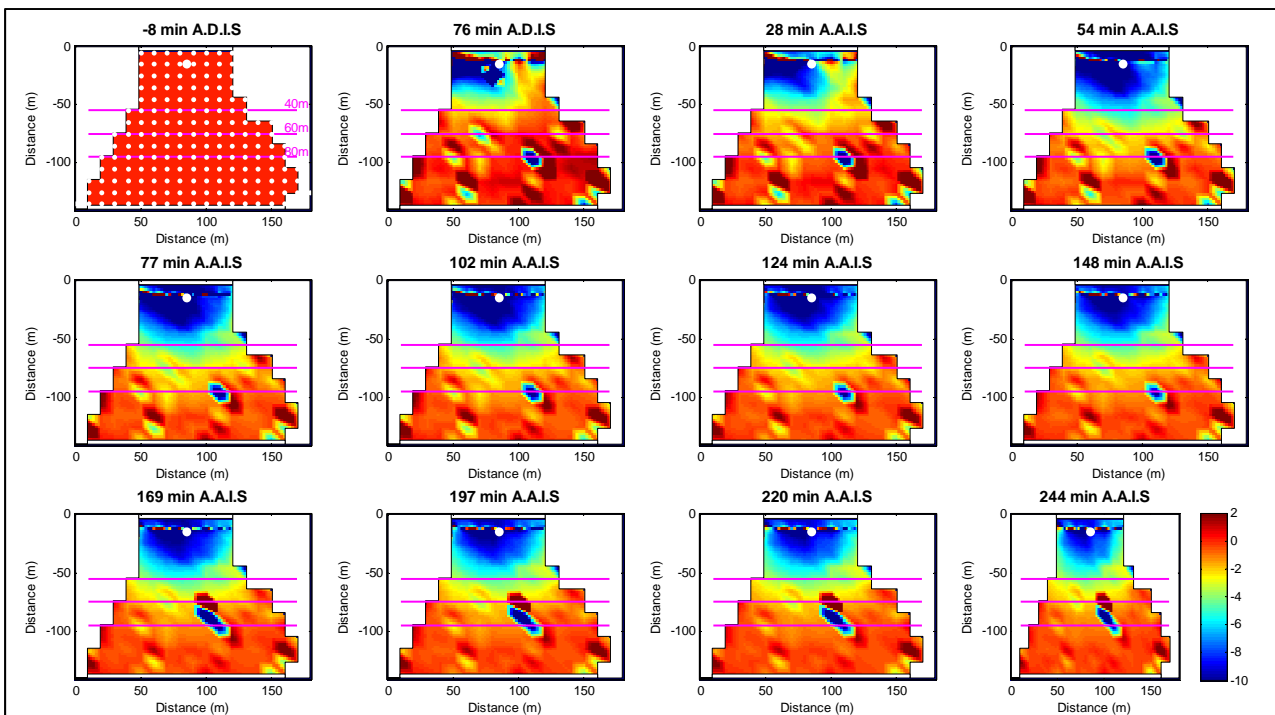


Figure 6 : Cartes de conductivité de suivi du traçage salin

Le fonctionnement hydrogéologique de la zone étudiée est ainsi caractérisé par des circulations souterraines karstiques diffuses, faisant partie intégrante du réseau ici présent et n'y contribuant visiblement pas davantage que les zones voisines.

## 5. Conclusions : évaluation des aléas et recommandations

Les investigations et analyse menées confirment et précisent les aléas géotechniques et hydrogéologiques évoqués dans les études antérieures :

- Même si des contraintes techniques en découlent, la rareté de grandes cavités et le fonctionnement hydrogéologique pressenti indiquent que l'impact potentiel du projet sur la ressource en eau paraît désormais faible.
- Comme ailleurs dans le Val d'Orléans, le secteur est sensible aux phénomènes de déstabilisation karstique. L'historique disponible aboutit à retenir un effondrement de référence en surface de 10 m de diamètre et de 4 m de profondeur (ces dimensions pourraient être plus grandes pour quelques zones localisées). Plusieurs fontis anciens ou en cours, repérés en sondages, sont cohérents avec cet historique.
- En l'état actuel des connaissances, la dégradation des terrains en place doit être considérée comme pouvant être très rapide. Une recherche systématique des zones déjà « fragiles » paraît donc hors de propos (vu l'emprise du projet, une telle recherche se heurte de toute manière à des limites techniques encore non résolues). Ces mouvements peuvent par ailleurs affecter, en tout ou partie, les alluvions, la couche karstifiée, voire le calcaire plus sain. L'aléa associé concerne donc non seulement les remblais du projet, les ouvrages plus profonds, (possibles efforts parasites : frottements négatifs, déplacements horizontaux), mais aussi les ouvrages provisoires.

## 6. Références bibliographiques

- Alboresha, R. (2016). Evaluation of the impact of a cavity upon an earth dike (analytical and numerical approaches): Application to the Val d'Orléans area (France) (Doctoral dissertation, Université de Lorraine). [tel-01752229](tel:01752229)
- Chasco E., Dudoit A., Gardet S., Clément F., Tarrieu J.-M. Viaduc de la Tardoire – Construction en milieu karstique. Bulletin du Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art, 66, mars 2011, p. 12-39
- Lorain J.M. (1972). La géologie du calcaire de Beauce. In : géologie – hydrogéologie applications en construction routière et génie civil. Compte-rendu des journées d'études des 8 et 9 juin 1972 à Blois organisées par le Laboratoire central des Ponts et Chaussées et le Laboratoire régional de Blois, pp. 14-53.
- Luu, L. H., Noury, G., Benseghier, Z., & Philippe, P. (2019). Hydro-mechanical modeling of sinkhole occurrence processes in covered karst terrains during a flood. Engineering Geology, 260, 105249. [DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105249](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105249)
- Noury G., Perrin Je., Luu L.-H., Philippe P., Gourdiér S. (2018). Role of flood on sinkholes occurrence in covered karst terrains : Case study of Orléans area (France) during the 2016 meteorological event and perspectives for other karst environments. 15th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Apr 2018, Shepherdstown, West Virginia, United States. [hal-01706613](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01706613)
- Noury G., Védie E., Clément F., Husson E., Respaud C., Azemard P., Dore L., Haussard S., Perrin Je. (2020) – Aléa mouvements de terrain liés au karst : contexte, méthode et cas type traités en vue d'un guide national. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur 2020, France.
- Salquèbre D., Baltassat JM., Gourdiér S., Perrin J. avec la collaboration de Husson E. (2017) - Projet de franchissement de la Loire à Jargeau : synthèse des études géophysiques, géotechniques et hydrogéologiques et évaluation des risques liés au contexte karstique. Rapport final. BRGM/RP- 67127-FR, 120 p., 31 ill., 4 tabl., 7 ann. dont 1 planche hors-texte.