

Essai de modélisation 3D d'un système karstique actif en contexte urbain dense : retour d'expérience sur le mouvement de terrain de la rue de Bourgogne à Orléans

An attempt at 3D modelling of an active karst system in a dense urban environment: lessons learned from the ground movement at rue de Bourgogne, Orléans

Alexandre PHILIPPE^{1*}, Ludovic DORE¹, Sésil CAN¹, Lucile SAUSSAYE^{1,2}

1 Cerema, Direction Territoriale Normandie-Centre, Agence de Blois, Blois, France

2 Cerema, Equipe de projet recherche ENDSUM, Blois, France

**alexandre.philippe@cerema.fr*

RESUME : En janvier 2022, un mouvement de terrain dans le centre-ville d'Orléans a provoqué l'effondrement partiel de deux immeubles, révélant la sensibilité du substratum calcaire à des phénomènes de karstification. Plusieurs campagnes d'investigations ont été réalisées dans le cadre de la mise en place du protocole de démolition. Suite à l'effondrement volontaire des deux immeubles, une dernière campagne de reconnaissance géotechnique a été réalisée au printemps 2025. À l'issue de cette dernière campagne, une synthèse de l'ensemble des données géotechniques disponibles a été réalisée en vue de permettre l'évaluation des aléas résiduels. De manière à parfaire la compréhension des phénomènes de soutirage en cours, un modèle 3D des anomalies a été réalisé. En considérant les faibles dimensions du périmètre d'étude et la forte densité de point de sondages, une interpolation par Thin Plate Spline a été retenue. Le modèle 3D a été construit à partir de 10 grilles raster interpolées du pourcentage de hauteur d'anomalies pour des tranches altimétriques données de 3 m. Pour éviter d'imposer une structure verticale continue susceptible de générer des artefacts interprétatifs, une interpolation de visualisation a été privilégiée de manière à restituer fidèlement les résultats de sondages. Ce modèle a révélé des anomalies interconnectées, suggérant des zones de soutirage probables préférentielles et communicantes avec des drains karstiques en profondeur. L'interprétation des résultats souligne l'efficacité de cette méthodologie pour comprendre les mécanismes karstiques, tout en évitant les biais de certaines interpolations 3D classiques. Ils offrent une base pour évaluer l'aléa résiduel et guider d'éventuels renforcements de terrain.

ABSTRACT: In January 2022, a ground movement in the city center of Orléans caused the partial collapse of two buildings, highlighting the sensitivity of the limestone substratum to karstification phenomena. Several investigation campaigns were conducted as part of the demolition protocol. Following the controlled collapse of the two buildings, a final geotechnical investigation campaign was carried out in the spring of 2025. The Cerema was tasked with synthesizing all available geotechnical data and assessing residual hazards. To enhance the understanding of ongoing subsidence phenomena, it was proposed to create a 3D model of the anomalies. After evaluating several interpolation methods, a reasoned approach was adopted. Given the small dimensions of the study area and the high density of borehole data points, Thin Plate Spline interpolation was selected. The 3D model was constructed using 10 interpolated raster grids representing the percentage of anomaly height for specific 3-meter elevation slices. To avoid imposing a continuous vertical structure that could generate interpretive artifacts, a visualization interpolation was preferred to faithfully represent the borehole results. This model revealed interconnected anomalies, suggesting likely preferential subsidence zones that communicate with deep karstic drains. The interpretation of the results reveals the effectiveness of this methodology in understanding karst mechanisms while avoiding the biases of some classical 3D interpolation methods. The findings provide a basis for assessing residual hazards and guiding potential ground reinforcement efforts.

Mots-clés : karst ; soutirage ; mouvement de terrain ; modélisation 3D, aléa.

1 INTRODUCTION

Au cours du mois de janvier 2022, un phénomène de mouvement de terrain s'est déclaré dans le centre-ville d'Orléans (45). D'un diamètre de près de 20 m,

l'évènement a amorcé la ruine de deux immeubles (Figure 1). Au regard du niveau de risques résiduels, le protocole de démolition des immeubles fragilisés a nécessité la réalisation d'investigations géotechniques.



Figure 1. Vue générale du mouvement de terrain

Plusieurs phases d'injections et de renforcement par compactage horizontal statique (CHS) ont été réalisées pour sécuriser les plateformes de travail des engins de démolition. Ces campagnes d'investigations et de travaux spéciaux ont mis en évidence la sensibilité du substratum calcaire à des phénomènes de karstification et le rôle des remblais anthropiques de recouvrement dans l'amplification du phénomène de mouvement de terrain amorcé (Philippe *et al.*, 2024).

À l'issue de la démolition (Figure 2), qui a eu lieu à l'été 2024, une nouvelle campagne d'investigations a été diligentée au droit des immeubles démolis et dans leur environnement proche de manière à vérifier les hypothèses sur l'origine du mouvement de terrain émises à l'issue des campagnes d'investigations préliminaires, à caractériser les aléas de mouvements de terrain résiduels, et à définir la nécessité de procéder à des phases de renforcement de terrain complémentaires.



Figure 2. Mesures préalables à la démolition

Dans ce cadre, la ville d'Orléans a confié au Cerema une mission de synthèse de l'ensemble des données géotechniques disponibles, dont celles issues de la campagne d'investigations finales du printemps

2025. De manière à comprendre la répartition spatiale des anomalies de décompression dans le massif de terrain lors des campagnes d'investigations et des phases d'injections, il a été proposé de construire un modèle 3D.

2 CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE LOCAL

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 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 3).

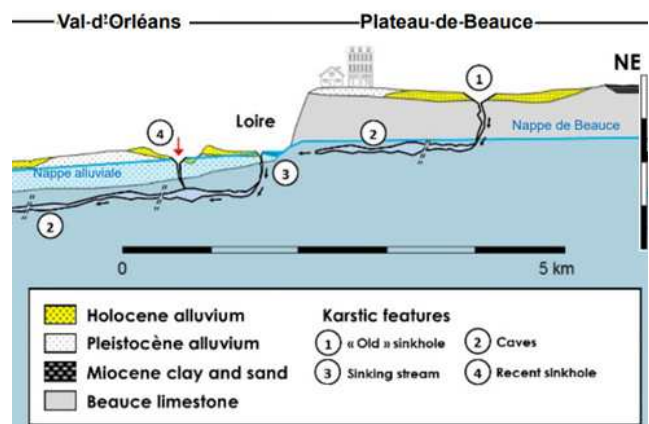


Figure 3. Coupe schématique du système karstique au droit du val d'Orléans (Noury, 2018)

De manière concomitante aux phases d'investigations, une étude de la sensibilité du quartier aux phénomènes de mouvement de terrain a été réalisée sur un périmètre élargi englobant le sinistre de janvier 2022. Au cours de cette étude, une phase de recensement des phénomènes antérieurs a été réalisée. 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). Près de 88 événements ont été recensés sur un périmètre de 25 ha (Philippe *et al.*, 2024). L'évènement de référence (caractérisé par l'intensité la plus forte) correspond à un affaissement de terrain de 30 m de diamètre survenu en 1881. L'analyse fréquentielle des événements montre qu'un évènement majeur se produit dans le quartier en moyenne tous les 25 ans avec un niveau de dommage élevé sur des immeubles environnants pouvant conduire à leur

démolition. Ces évènements sont mis en lien avec la nature hétérogène de la couche de remblai de surface, le massif calcaire, qui présente des anomalies karstiques, et l'existence de développements souterrains anthropiques. Le rôle des infiltrations d'eau est également mis en évidence.

Dans l'environnement proche du sinistre de 2022, trois autres mouvements de terrain sont avérés ou suspectés. Ainsi, cette phase de recensement illustre la sensibilité du périmètre d'étude aux phénomènes de mouvement de terrain.

3 PERIMETRE D'ETUDE, INVESTIGATIONS IN SITU ET AUTRES DONNEES DISPONIBLES RELATIVES AU SOUS-SOL

3.1 Périmètre d'étude et données disponibles

Le périmètre d'étude (Figure 5) correspond à une surface de l'ordre de 1500 m² centré sur l'épicentre du mouvement de terrain. Il recoupe les voies publiques mais également des parcelles privées.

Sur l'ensemble des campagnes d'investigations et d'injections réalisées au droit du périmètre d'étude, les données suivantes sont disponibles :

- 40 sondages destructifs avec enregistrement des paramètres de forage ;
- 30 essais de pénétration dynamique à énergie constante ;
- 5 sondages pressiométriques ;
- 2 sondages carottés ;
- 16 forages d'injections solides primaires (les forages secondaires ne sont pas exploités dans la mesure où ils sont susceptibles d'être perturbés par l'action des forages primaires).

Pour les campagnes d'investigations antérieures à 2025, les sondages et forages d'injections ont été portés à des profondeurs de 10 à 21 m. Lors de la campagne d'investigations de 2025, les investigations ont été portées à 30 m de profondeur de manière à qualifier précisément l'interface entre le substratum karstifié et le substratum sain.

Au total, 93 sondages, forages et essais sont disponibles sur le périmètre d'étude soit une densité de 1 point tous les 16 m², ce qui correspond à une maille moyenne de forages de 4x4 m, soit une maille relativement resserrée.

3.2 Critère d'analyse des données

Les investigations géotechniques ont été interprétées classiquement par croisement des essais et des sondages de reconnaissance. Pour chaque couche de

terrain identifiée, les caractéristiques moyennes ont pu être calculées. Les anomalies de décompression ont été mises en évidence :

- par l'atteinte de valeur seuil de résistance de pointe dynamique q_d ;
- lors des sondages destructifs par l'atteinte des caractéristiques obtenues lors des essais de chute ;
- par des affaiblissements notables des caractéristiques moyennes déterminées ;
- pour les forages d'injections solides, par l'interprétation des diagraphies de paramètres de forages et l'interprétation des feuilles de passes d'injections (Philippe et al., 2024).

Les données ainsi obtenues ont permis d'élaborer un modèle géotechnique fiabilisé du périmètre d'étude (Figure 4) et d'alimenter un tableur recensant les caractéristiques de chacune des anomalies de décompression recensées.

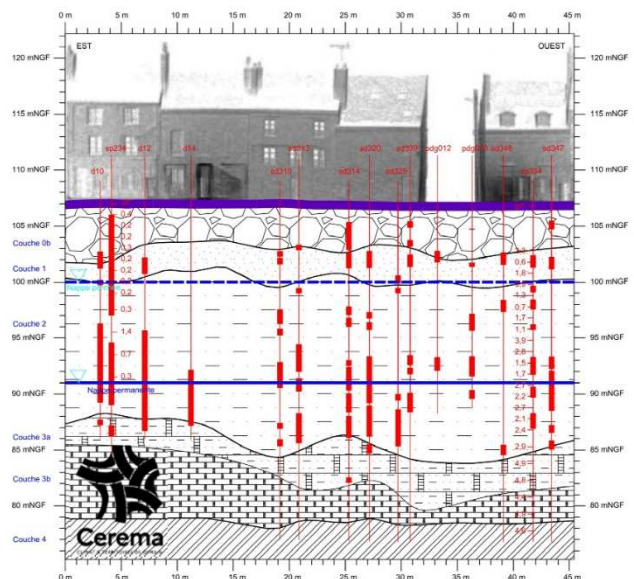


Figure 4. Profil géotechnique de synthèse

3.3 Modèle géotechnique

L'ensemble des résultats disponibles a permis d'établir un profil géotechnique détaillé du site (Philippe et al., 2024). Il faut noter :

- une couche de remblais anthropiques de 108 à 102,5 mNGF (couche 0b) ;
- un horizon intermédiaire de Marnes et Sables de l'Orléanais jusqu'à 98 mNGF (couche 1) ;
- le substratum en Marnes de Blâmont et Calcaire de Pithiviers karstifiés jusqu'à des altitudes de 89 à 83 mNGF (couche 2) et sain au-delà (couche 3).

Plusieurs profils géotechniques ont été établis.

3.4 Caractéristiques des anomalies

1 184 anomalies ont été recensées au cours de la phase d'investigations géotechniques. Elles présentent en moyenne une hauteur de 71 cm et se positionnent essentiellement dans la couche 2 (substratum karstifié), sous la nappe, rendant l'hypothèse de la présence d'anciennes zones de carrières souterraines en profondeur peu probable.

L'analyse montre que les intervalles altimétriques présentant le pourcentage de hauteur d'anomalie sont situés entre 85 et 92 mNGF, soient les horizons qui se positionnent dans la zone de battement de la nappe des calcaires ou en-dessous.

4 PRINCIPE DE REALISATION DE CARTES INTERPOLEES DE DONNEES

4.1 Existence de différentes méthodes d'interpolation

L'un des objectifs de l'étude étant de procéder à une modélisation des données géologiques issues de l'exploitation des sondages de reconnaissance et autres données géotechniques, en particulier les données relatives aux anomalies de décompression, il est indispensable de s'interroger sur la méthode d'interpolation la plus appropriée. L'interpolation spatiale est utilisée dans de nombreux domaines, en géologie bien sûr, mais également dans des domaines tels que la météorologie ou la télédétection par exemple (Rakotonirina et *al.*, 2023). Les applications des méthodes d'interpolation spatiale peuvent présenter des contraintes notamment quant à la qualité et la quantité des données qui peuvent être souvent incomplètes, inexactes ou manquantes.

Un certain nombre de méthodes d'interpolation spatiales ont été développées. Plus de 38 méthodes ont été recensées (Li, 2014). Ces méthodes d'interpolation se divisent usuellement en deux groupes (Bossier, 2012) à savoir les méthodes déterministes, qui reposent sur des propriétés purement mathématiques sans tenir compte du phénomène physique, et les méthodes stochastiques, qui font appel à des modèles probabilistes et découlent de l'analyse statistique des données considérées. Ces dernières méthodes constituent des méthodes géostatistiques. Dans la mesure où ces méthodes peuvent être combinées, les méthodes d'interpolation peuvent être regroupées en trois catégories : géostatistiques, non géostatistiques et hybrides (Rakotonirina et *al.*, 2023).

Certaines méthodes ont tendance à être utilisées dans le domaine des géosciences (Li, 2008) :

- Nearest Neighbour (NN) ;
- Inverse Distance Weighting (IDW) ;
- Triangular Irregular Network (TIN) ;
- Thin Plate Spline (TPS) ;
- Krigeage...

Les avantages et inconvénients des différentes techniques sont connues (Li, 2014).

4.2 Choix d'une méthode d'interpolation

Parmi l'ensemble des méthodes existantes, plusieurs d'entre elles ont été écartées du fait de leur logique inappropriée au contexte. D'autres ont été évaluées après production de cartographie interpolée à l'aide des logiciels QGis et SAGA Gis. Cette évaluation a été réalisée au regard du réseau de forages extrêmement dense (maille de 4x4 m voire parfois inférieure) sur un domaine d'étude de dimensions réduites (périmètre d'étude de 40 m de côté environ).

La méthode NN a été écartée en raison du caractère fortement discontinu des cartographies produites, incompatibles avec la nature continue de la variable étudiée. La méthode IDW a tendance à générer d'importants artefacts de type « bull's eye » traduisant une surpondération locale des points de données et une absence de modélisation explicite de la structure spatiale. La méthode TIN conduit à des surfaces anguleuses, non lisses, fortement dépendantes de la géométrie du maillage et difficilement interprétables dans un contexte de géologie simple et relativement tabulaire.

Le krigeage ordinaire a été testé. Toutefois, les faibles dimensions du périmètre d'étude associées à une très forte densité d'échantillonnage (forte densité de forages) ne permettent pas l'estimation d'un variogramme robuste. Le résultat du krigeage dans cette configuration conduit à un phénomène de lissage trop important et à une mauvaise prédiction locale des variables considérées.

A l'inverse, l'interpolation par Thin Plate Spline ne reposant pas sur la définition d'un modèle de variogramme, elle s'est révélée plus performante en phase de validation. En outre, elle permet de restituer des variations locales cohérentes tout en produisant des surfaces lisses et physiquement interprétables. En conséquence, la méthode de Thin Plate Spline a été retenue comme la plus appropriée au regard des contraintes géométriques du périmètre d'étude et de la volonté d'utiliser un interpolateur local fidèle pour rendre compte des observations exactes effectuées en sondage.

4.3 Points de vigilance sur l'interprétation des cartographies interpolées obtenues par Thin Plate Spline

Les phases de validation croisées des cartographies produites par la méthode Thin Plate Spline mettent en évidence des effets de bord significatifs ce qui n'est pas étonnant. Outre ces effets de bords, il convient de souligner plusieurs points de vigilance dans l'interprétation des cartes obtenues par interpolation Thin Plate Spline. Cette méthode tend à produire des surfaces particulièrement lisses susceptibles d'atténuer certaines variations locales de forte amplitude (Bossier, 2012). A l'inverse, la méthodologie peut conduire à un sur-ajustement des données et à introduire des oscillations artificielles entre les points d'échantillonnage (forage).

Enfin, la méthode repose sur une continuité mathématique de la surface et ne permet pas de représenter explicitement des discontinuités abruptes ou des ruptures de comportement.

L'interprétation des cartes produites doit donc rester strictement conditionnée à la densité de l'échantillonnage et être confrontée en permanence aux données de forages et aux observations de terrain. Dans ce cas précis, au regard du niveau de densité de l'échantillonnage, des dimensions réduites du périmètre d'étude et du centrage du périmètre d'étude sur l'épicentre du mouvement de terrain, hormis les effets de bords, les biais d'interprétation ont été jugés limités.

4.4 Réalisation de carte de données interpolées

Pour chacune des couches de terrain identifiées sur le périmètre d'étude, les cartes suivantes (cartes qui ne seront pas présentées) ont été élaborées à l'aide du logiciel SAGA Gis, en employant la méthodologie d'interpolation Thin Plate Spline :

- une carte interpolée de l'altitude de la base de l'horizon ;
- une carte interpolée de l'épaisseur de la couche ;
- une carte interpolée du pourcentage de hauteur d'anomalies impactant l'horizon de terrain considéré.

La Figure 5 présente une carte interpolée du pourcentage de hauteur d'anomalies rencontrée en sondages, tout horizon confondu.

4.5 Analyse des cartes de données interpolées

L'analyse de la carte de la base de la couche 2, Figure 6, met en évidence une forme de crypto-doline enfouie au sein du substratum.

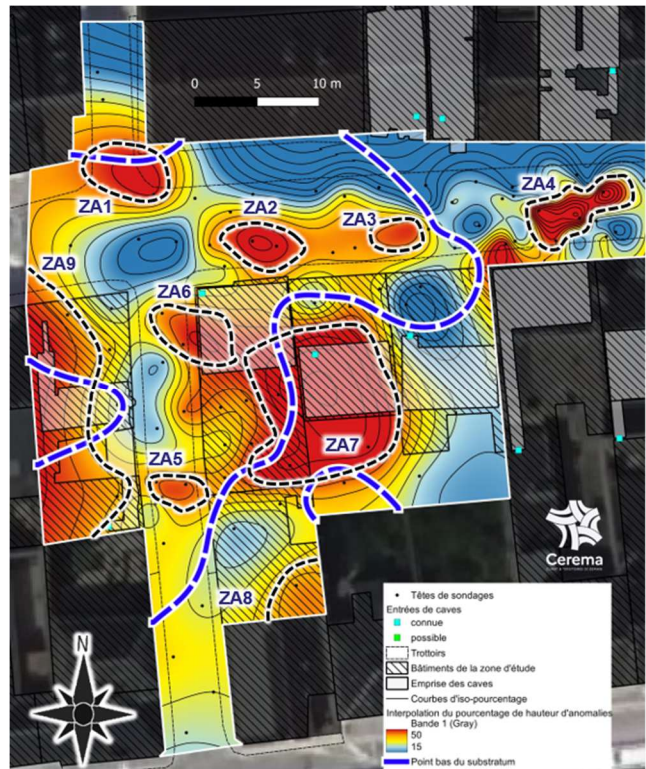


Figure 5. Carte interpolée du pourcentage de hauteur d'anomalies rencontrées en sondages

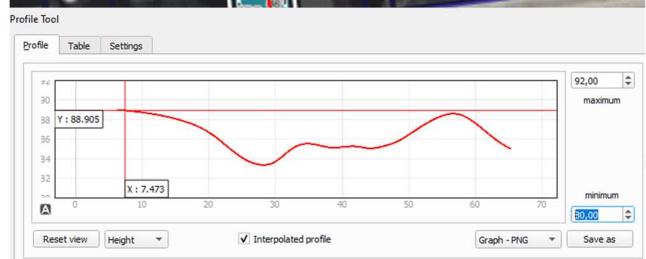
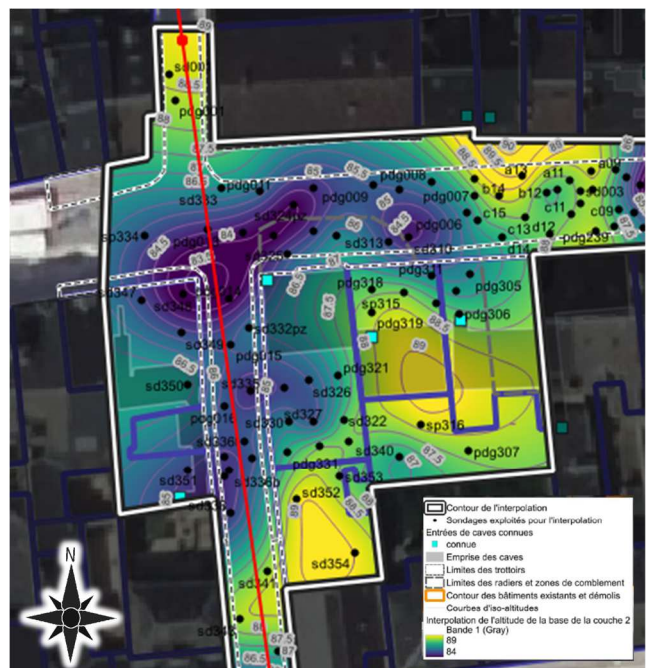


Figure 6. Mise en évidence de l'approfondissement du toit du calcaire sain (contact entre les couches 2 et 3)

En effet, si en moyenne l'altitude de la base de la couche 2 se positionne à 86,5 mNGF, le contact entre les couches 2 et 3 est marqué par d'importantes ondulations et approfondissement.

Une forme de cuvette d'une largeur de 35 m environ est constatée au droit du périmètre d'étude. Au centre de cet élément géologique, la base de la couche 2 se situe à 83 mNGF soit 6 m plus bas que sur les bords de la crypto-doline (89 mNGF).

La carte de la Figure 5 met en évidence 9 zones d'anomalies principales qui se positionnent dans l'environnement immédiat de la forme de crypto-doline. Les zones d'anomalies ZA2, ZA3, ZA6 et ZA7 qui se positionnent en partie centrale du périmètre d'étude sont désaxées par rapport à la zone épiscopale du sinistre. Ceci peut s'expliquer par le lissage introduit sur la hauteur des sondages. Pour mieux comprendre la répartition des anomalies dans l'épicentre du sinistre, il a été décidé de procéder à un modèle 3D des anomalies de décompression.

5 CONSTITUTION D'UN MODELE 3D D'ANOMALIES DU TERRAIN

5.1 Construction de cartes interpolées 2D du pourcentage de hauteur d'anomalie par tranche altimétrique

Pour apprécier le développement et la progression des anomalies de décompression dans le massif de terrain, il a été choisi de découper le massif de terrain de 30 m d'épaisseur en tranches altimétriques de 3 m. Pour chacun de ces intervalles, une grille raster interpolée du pourcentage de hauteur d'anomalies rencontrées en sondages a été réalisée par la méthode de Thin Plate Spline. Ainsi, 10 grilles raster ont été obtenues (Figure 7). Le choix de l'épaisseur unitaire de l'intervalle altimétrique a été dicté d'une part par la densité d'échantillonnage pour éviter un phénomène de bruit et d'autre part pour des questions de temps inhérents au traitement des données.

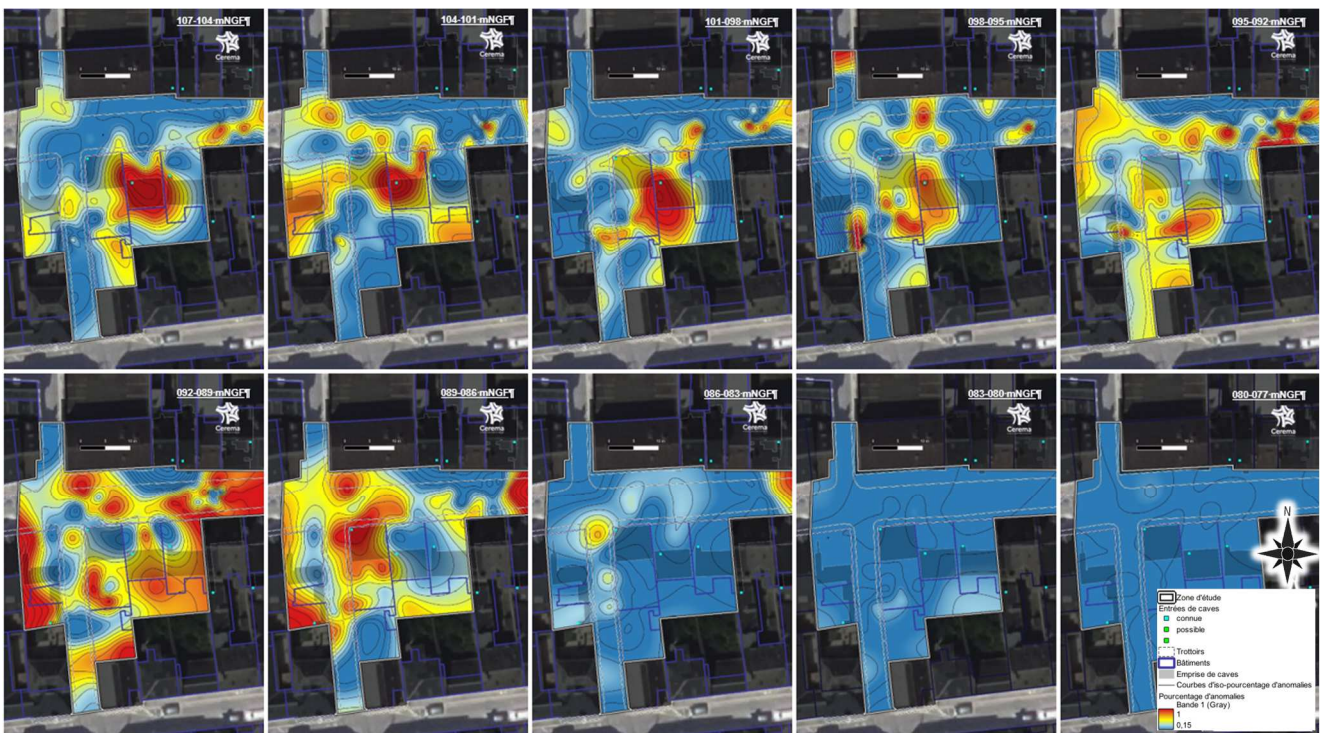


Figure 7. Cartes interpolées du pourcentage d'anomalies par sondages et par intervalle altimétrique

5.2 Construction du modèle 3D des zones de soutirage

Pour permettre la construction du modèle 3D, les 10 grilles raster par intervalle altimétrique ont été regroupées dans une collection de grilles raster à l'aide de la fonction « Grid Collection » du logiciel SAGA Gis.

Cet outil permet de regrouper plusieurs grilles raster de même emprise, de résolution identique et de même coordonnées dans un objet unique. Elles sont

organisées dans cet objet en fonction de leur altitude. Cette architecture permet une analyse cohérente de la variable considérée selon l'altitude tout en conservant l'indépendance statistique de chaque interpolation plane. L'outil Grid Collection Viewer a été utilisé pour visualiser un modèle 3D des anomalies de décompression. L'outil ne calcule pas une interpolation verticale « statistique ». Il effectue une interpolation de visualisation entre les grilles en

appliquant une interpolation linéaire implicite entre grilles.

Le choix de ne pas recourir à une interpolation verticale explicite ou à un modèle tridimensionnel s'explique par la nature même du phénomène étudié et par les contraintes du jeu de données. Les anomalies de décompression observées traversent les unités lithologiques de manière irrégulière et non stratiforme, sans continuité verticale clairement identifiable ni loi de corrélation selon l'axe vertical. Dans ce contexte, une interpolation 3D explicite pourrait imposer artificiellement une structure verticale continue, difficilement justifiable d'un point de vue géologique et susceptible de générer des artefacts interprétatifs. L'approche par tranches altimétriques indépendantes permet au contraire de restituer fidèlement les variations locales observées.

Deux modèles ont ainsi été réalisés :

- un modèle du pourcentage de hauteur d'anomalies rencontré en sondages (Figure 8) ;
- un modèle de la valeur du rapport entre le pourcentage mesuré rapporté au pourcentage médiant évalué à l'échelle du périmètre d'étude.

Ce deuxième modèle a été établi de manière à mettre en exergue les secteurs anomaliques les plus significatifs.

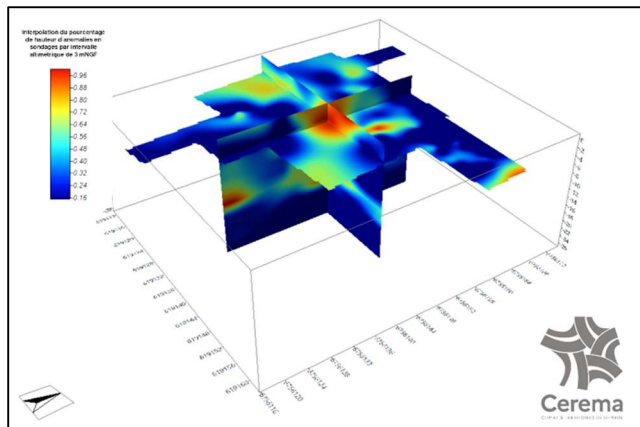


Figure 8. Modèle du pourcentage de hauteur d'anomalies en sondage - logiciel SAGA Gis

6 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

6.1 Exploitation des modèles constitués

Les modèles 3D constitués ont été exploités en réalisant (Figure 9 et Figure 10) :

- des coupes verticales du modèle pour apprécier la répartition des anomalies suivant la profondeur ;
- une analyse détaillée de la zone épiscopale.

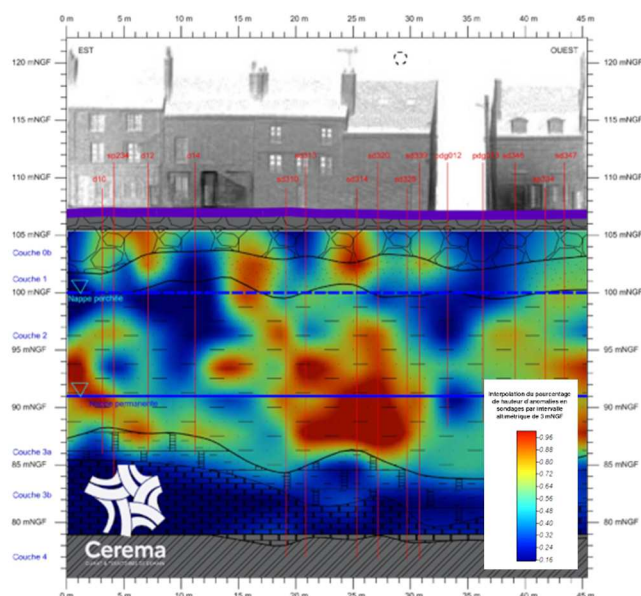


Figure 9. Exemple de profil en coupe du modèle 3D

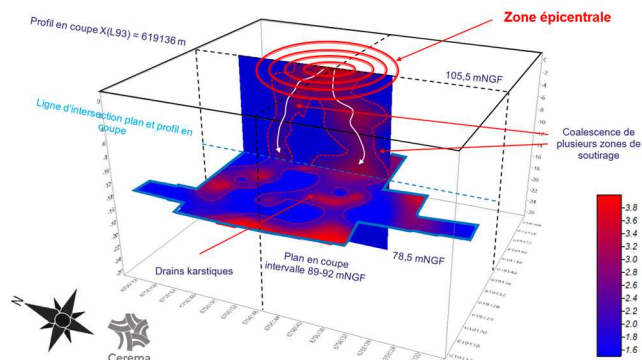


Figure 10. Vue en coupe au droit de l'épicentre issue du modèle 3D du rapport à la médiane du pourcentage de hauteur d'anomalies par intervalle altimétrique

6.2 Interprétations

L'analyse du modèle 3D et des coupes verticales qui en ont été extraites confirme l'existence d'anomalies interconnectées suivant des schémas tortueux progressant en direction de la surface. Ces éléments tendent à illustrer des phénomènes de soutirage ou de suffosion des matériaux le long d'anomalies géologiques probables (fracture, laminoir, conduit). L'importance des anomalies découvertes sous la nappe met dans tous les cas en évidence, et ceci de manière très claire un système karstique.

Outre la répartition spatiale des anomalies, il est possible d'étudier la configuration des anomalies au regard de la crypto-doline mise en évidence sur le site. Pour chaque intervalle altimétrique de 3 m, les pôles d'anomalies (caractérisées par une valeur supérieure à 1,5 fois le pourcentage médian mesuré sur le périmètre d'étude) ont été reportés sur une cartographie de synthèse avec repérage des limites de la crypto-doline enfouie. L'analyse met en évidence qu'une large partie

des anomalies s'inscrit au sein de la crypto-doline ou à son aplomb direct. Quelques pôles d'anomalies de l'intervalle 95-98 mNGF semblent déportés vers l'ouest par rapport à l'emprise de la crypto-doline. Ceci peut être dû :

- à la progression tortueuse des anomalies en direction de la surface ;
- à l'influence d'autres anomalies karstiques en profondeur, en dehors de la zone d'étude et non reconnues à ce stade.

L'analyse du modèle 3D de la valeur du rapport du pourcentage d'anomalie à sa médiane (Figure 10) met en évidence la communication de la zone d'affaissement avec plusieurs zones d'anomalies descendantes et communicantes avec des drains karstiques mis en évidence en base de la crypto-doline. Le mouvement de terrain est mis en relation directe avec l'existence de cet élément géologique bien que d'autres facteurs de prédisposition puissent être impliqués.

6.3 Intérêt de la constitution des modèles 3D

Les modèles ainsi constitués ont permis d'exploiter pleinement l'information disponible tout en évitant des hypothèses fortes propres aux interpolations tridimensionnelles. Les représentations ainsi constituées ont permis une interprétation géologique intégrée multi-échelle en rendant plus lisibles les relations spatiales entre anomalies au sein du volume de terrain étudié. Ces modèles se révèlent précieux dans la compréhension des mécanismes et des facteurs de prédisposition ayant conduit à la survenue du sinistre de janvier 2022. Enfin, les modèles peuvent être utilisés pour caractériser l'aléa mouvement de terrain résiduel suivant la méthodologie du guide karst par exemple (Brgm, Cerema, 2023).

7 CONCLUSIONS

Cet essai de modélisation met en évidence les limites des approches de l'interpolation tridimensionnelle classiques lorsqu'elles sont appliquées à des systèmes karstiques actifs, peu structurés verticalement et caractérisés par des données hétérogènes collectées avec un maillage dense. L'approche retenue, fondée sur des interpolations planes indépendantes par Thin Plate Spline et leur organisation sous forme de modèle 2.5D/3D (pseudo-3D raisonnée), peut constituer un compromis méthodologique pertinent entre fidélité aux observations, lisibilité spatiale et prudence interprétative. L'utilisation d'outils de visualisation volumique permet d'explorer les continuités apparentes sans imposer artificiellement une structure verticale. Ce retour d'expérience souligne

l'importance d'adapter les choix de modélisation aux caractéristiques du phénomène étudié et rappelle que, dans certains contextes, la robustesse interprétative prime sur la sophistication apparente des modèles. Cet essai de modélisation se révèle un outil précieux dans la compréhension du développement des phénomènes karstiques. La méthodologie développée peut être réemployée dans des contextes similaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bosser P. (2012). Interpolation spatiale. Ecole Nationale des Sciences Géographiques. Département Positionnement Terrestre et Spatial. 55 pages ;
- Brgm, Cerema. (2023). Guide méthodologique Aléa mouvements de terrain d'origine karstique en contexte carbonaté. Evaluation et cartographie. ISBN 978-2-37180-898-9. Editions Cerema. 116 pages ;
- Li J., Heap A. (2008). A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. Geoscience Australia. Record 2008/23. 137 pages ;
- Li J., Heap A. (2014). Spatial Interpolation methods applied in the environmental science : a review. Environmental Modelling & Software 53 (2014) 173-189. 17 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., Dore L., Can S., Saussaye L. (2024). Caractérisation d'instabilités karstiques par investigations géotechniques et post-traitement de données de travaux d'injections solides. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Poitiers 2024. 8 pages ;
- Philippe A., Dore L., Can S., Saussaye L. (2026). Utilisation de l'analyse en composantes principales pour corrélérer les zones de concentration d'effondrements de terrain à des critères prédéfinis. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Grenoble 2026. 8 pages ;
- Rakotonirina H., Honeine P., Atteia O., Van Exem A. (2023). Interpolation spatiale avec un réseau de neurones génératif comme alternative au krigeage. Actes du 29-ème colloque GRETSI sur le traitement du signal et des images. Aug. 2023, Grenoble. 4 pages.