

Utilisation de l'analyse en composantes principales pour corrélérer les zones de concentration d'effondrements de terrain à des critères prédéfinis

Use of principal components analysis to study correlations between sinkhole concentration zones and established criteria

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

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

2 Cerema, Equipe de recherche ENDSUM, Blois, France

**alexandre.philippe@cerema.fr*

RESUME : Dans le cadre d'un projet de requalification urbaine à Orléans, la municipalité a mandaté le Cerema pour analyser la sensibilité du secteur aux effondrements de terrain. L'étude s'articule autour de quatre axes : analyse du contexte général, collecte et traitement des données disponibles, hiérarchisation de la sensibilité aux phénomènes et formulation de préconisations. Deux méthodes principales ont été mobilisées : la carte de chaleur pour représenter spatialement les données et l'Analyse en Composantes Principales (ACP) afin d'explorer les corrélations entre variables. Les résultats montrent qu'aucune corrélation claire n'a pu être établie entre les phénomènes recensés et les facteurs géomorphologiques attendus (comme le sous-cavage). En revanche, un lien significatif (corrélation spatiale mais non temporelle) a été identifiée avec les fuites des réseaux d'assainissement et d'eau potable. Ce constat soulève une question d'interdépendance : les fuites provoquent-elles les mouvements de terrain ou en sont-elles la conséquence ? Le retour d'expérience sur des cas localisés (ex. rue de Bourgogne) confirme que les désordres et fuites tendent à se concentrer dans certains secteurs, notamment là où le sous-sol a été modifié sans diagnostic géotechnique approfondi. Ces terrains remaniés restent instables, favorisant de nouveaux événements. Faute de données géotechniques spatialisées suffisantes, une carte de densité pondérée des événements a été privilégiée pour représenter la sensibilité, malgré son biais empirique. Elle a servi de base à l'élaboration d'un programme opérationnel de préconisations, appuyé sur des cartes de criticité croisant densité d'événements et vulnérabilité des infrastructures publiques. Un programme d'actions concret a été proposé, avec une priorisation pour les tronçons de voirie les plus critiques. Des mesures plus globales, telles que l'amélioration de la capitalisation des données et la production future de cartes d'aléa détaillées, visent à renforcer durablement la prévention des risques et à guider l'action des services municipaux.

ABSTRACT: As part of a city development project, the city of Orléans asked the Cerema to assess the sinkhole sensitivity of a given area. The study has four main goals : analyzing the general context, collecting and processing available data, assessing sinkhole sensitivity and giving recommendations. Two main tools were used: heatmaps to spatially represent collected data and principal components analysis to study correlations between variables. Results show that no correlation was found between sinkhole onset and geomorphological data. However, a clear link was found between sinkholes concentration and water pipes leakage concentration. This link raises a question: are leaks the causes or the consequences of sinkholes? Feedback from well-studied cases shows that leaks and sinkholes tend to concentrate in some areas, particularly where the subsoil underwent modifications without geotechnical diagnosis. Such areas stay vulnerable, which leads to new sinkholes over time. Without any reliable and precise geotechnical data, sinkhole sensitivity was assessed based on sinkhole concentration, even though sinkhole data necessarily has a collection bias. Recommendations were given based on sinkhole sensitivity and infrastructure vulnerability. Areas were classified based on their criticality level. More general recommendations about sinkhole management were also given, such as advises on data collection.

Mots-clés: analyse en composantes principales, carte de chaleur, carte de densité, mouvements de terrain, karst

1 INTRODUCTION

Dans le cadre d'un projet de requalification d'un quartier d'Orléans, la municipalité a confié au Cerema une étude visant à analyser la sensibilité du secteur aux

effondrements de terrain. En effet, ce secteur est connu pour être sujet à ce type d'évènements : son substratum est un calcaire comportant aussi bien des cavités anthropiques que des cavités naturelles issues d'un

processus de karstification. La Figure 1 présente une coupe générale du secteur. Elle montre que le substratum de calcaire de Beauce est surmonté d'une couche de sables et argiles d'âge Burdigalien et d'une couche de remblais historiques pouvant atteindre une épaisseur supérieure à 10 m.

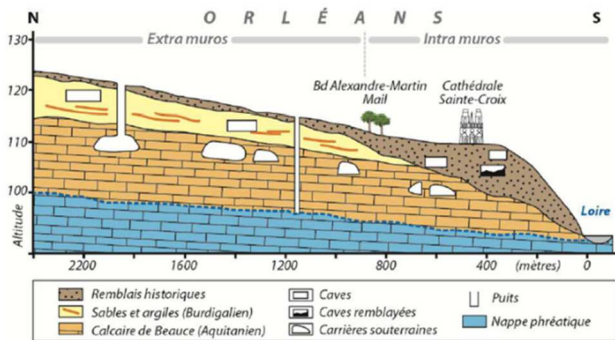


Figure 1. Coupe générale du contexte géologique orléanais (Noury, 2018)

Les effondrements peuvent se produire lorsque les terrains meubles de surface (remblais et/ou sables et argiles) sont emportés dans le sous-sol. Cette mobilisation des matériaux peut survenir selon trois modes d'action :

- la ruine du toit d'une cavité anthropique ou naturelle ;
- le déboufrage d'un puits comblé ou d'une cheminée karstique ;
- le soutirage vers des vides en profondeur (Figure 2).

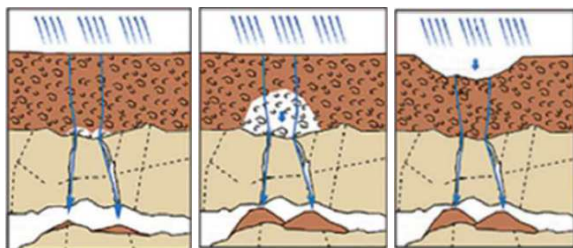


Figure 2. Schéma de principe du soutirage (Clément et al., 2023)

Alors qu'aucune carrière souterraine d'ampleur n'est connue sur le périmètre d'étude de 25 ha, le nombre d'évènements y étant recensés a priori est bien plus élevé que dans d'autres secteurs du centre-ville qui pourtant présentent un sous-minage bien plus intense. Il est ainsi indispensable de mieux comprendre l'origine des mouvements de terrain observés.

Pour se faire, l'étude s'est articulée classiquement autour de quatre axes : analyse du contexte général, collecte et traitement des données disponibles, hiérarchisation de la sensibilité aux phénomènes et

formulation de préconisations. Devant le caractère souvent lacunaire des données collectées, il a été décidé de mettre en place une méthodologie spécifique pour comprendre l'origine des phénomènes de mouvements de terrain recensés en vue de caractériser de manière pertinente la sensibilité du périmètre d'étude aux phénomènes de mouvements de terrain.

2 METHODOLOGIE EMPLOYEE

2.1 Collecte des données

La première étape a consisté à rassembler le maximum de données sur le contexte de la zone étudiée. Les bases de données du Bureau de Recherches Géologique et Minières (BRGM) ont été consultées pour caractériser le contexte géologique général. Les services de la ville et les bureaux d'études auxquels elle a fait appel par le passé ont été sollicités afin d'obtenir des données sur les forages connus sur le secteur, le contexte historique, la localisation et la nature des réseaux enterrés, l'emplacement des cavités connues, etc.

2.2 Cartes de chaleur

Les données obtenues sont traitées afin d'obtenir un SIG récapitulant les éléments recueillis. Afin de permettre des comparaisons entre données de natures différentes, des cartes de chaleur ont été réalisées à partir des données ponctuelles. Ce type de carte permet d'observer les zones de concentration à partir d'un semis de points donné et de s'affranchir en partie de l'incertitude sur la position des points du semis. Le principe est d'attribuer à chaque emplacement de la carte une valeur de densité dépendant de la proximité des points du semis.

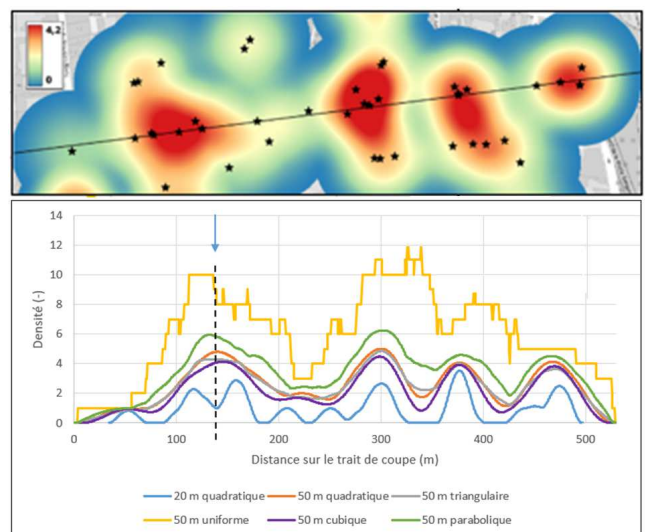


Figure 3. Exemple de carte de chaleur et coupe associée

Deux paramètres entrent en ligne de compte : le rayon d'action, qui détermine la distance à partir de laquelle un point n'a plus d'influence sur la densité, et la forme de la courbe, qui détermine la manière dont diminue la densité au fur et à mesure que la distance avec un point du semis augmente. La Figure 3 montre un exemple de carte de densité avec les profils de densité obtenus pour plusieurs paramètres différents.

Elle montre que le paramètre de forme de la courbe joue peu sur l'allure générale. En revanche, un changement de rayon d'action peut transformer un pic en creux (voir la ligne en pointillé en Figure 3). Le but de ces cartes de chaleur étant d'observer des corrélations, il est important de garder les mêmes paramètres quelque soit la donnée ponctuelle étudiée.

2.3 Analyses en Composantes Principales (ACP)

Afin d'observer des corrélations spatiales entre les diverses données recueillies, des ACP ont été effectuées. Un maillage de 2x2 m recouvrant la zone d'étude a été créé, et, pour chaque point du maillage, la valeur des critères étudiés est récupérée. Dans le cas d'un critère ponctuel, la valeur correspond à celle de la carte de chaleur à cet emplacement. Les individus de l'ACP correspondent aux points du maillage et les variables aux différents critères étudiés. Cette méthode permet de vérifier si les zones de forte concentration d'un critère donné sont les mêmes que celles d'un ou plusieurs autres critères. Les ACP ont été réalisées à l'aide du plugin FactoMineR du logiciel R (Husson *et al.*, 2025).

2.4 Criticité composite des infrastructures

L'objectif est de caractériser la criticité des infrastructures en se basant sur leur vulnérabilité face aux effondrements et sur la propension du terrain les environnant à en générer. La manière de prendre en compte ces deux critères est expliquée ci-après.

2.4.1 Densité pondérée des événements

A l'origine, la sensibilité du terrain aux effondrements devait être estimée sur la base de critères géologiques, géotechniques, morphologiques et hydrogéologiques, conformément aux recommandations du guide d'évaluation de l'aléa karstique publié conjointement par le Cerema et le BRGM (Clément *et al.*, 2023). La logique de ce type d'évaluation est de réaliser une carte prédictive des zones les plus propices à la survenue d'effondrements à partir de critères reposant sur une explication scientifique des phénomènes en jeu. Cependant, il s'est avéré que les données recueillies ne permettent pas une différenciation précise des critères pertinents à l'échelle de la zone d'étude. Cette

méthode aurait donc conduit à utiliser un seul niveau de sensibilité pour l'ensemble de la zone d'étude. Il a donc été choisi de se baser sur la densité des événements recensés pour délimiter des zones de sensibilités différentes. Cette méthode empirique a été choisie parce qu'elle permet une meilleure différenciation de la sensibilité à l'échelle de la zone d'étude et parce qu'un grand nombre de données concernant les effondrements a pu être recueilli. Le principal défaut de ce type d'approche est qu'elle est très dépendante de l'exhaustivité des données : une zone sensible mais sans événement connu ne sera pas identifiée comme telle. La méthode employée a consisté à prendre la densité des événements connus (cf. cartes de chaleur) pondérée par leur intensité.

2.4.2 Vulnérabilité des infrastructures

5 types d'infrastructures ont été prises en compte en particulier les réseaux susceptibles de transporter de l'eau ou des effluents pour leur rôle dans la survenue d'emballements géotechniques. Dans le détail : les collecteurs de réseaux d'assainissements, les collecteurs de réseaux d'Alimentation en Eau Potable (AEP), les branchements des réseaux d'assainissement, les branchements des réseaux AEP et les voiries. Pour les conduites AEP et les réseaux d'assainissements, la vulnérabilité a été estimée à partir de matrice de croisement prenant en compte la nature du matériau du collecteur et sa vétusté (Figure 4). La vétusté correspond au temps écoulé depuis la mise en service du réseau.

Niveau de vulnérabilité du réseau		Classe de vétusté		
		Peu Vétuste	Vétuste	Très Vétuste
Classe de matériau	Peu Sensible	Faible	Faible	Moyen
	Sensible	Faible	Moyen	Fort
	Très Sensible	Moyen	Fort	Fort

Figure 4. Matrice de vulnérabilité pour les collecteurs

Pour les branchements AEP et assainissement, les données disponibles sont moins exhaustives. La vulnérabilité a été estimée en tenant compte uniquement de la nature du matériau du branchement. Pour la voirie, la vulnérabilité est basée sur la seule donnée adéquate connue de manière relativement homogène sur l'ensemble de la zone d'étude, à savoir l'état de la couche de roulement.

2.4.3 Croisement des critères

Les critères de densité pondérée d'événements et de vulnérabilité des infrastructures sont croisés à l'aide de la matrice de la Figure 5.

Niveau de criticité de l'infrastructure		Densité spatiale d'évènements pondérée			
		0 à 1	1 à 2	2 à 3	> 3
Vulnérabilité de l'infrastructure considérée	Très Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
	Faible	Faible	Faible	Moyen	Moyen
	Moyen	Faible	Moyen	Moyen	Fort
	Fort	Moyen	Moyen	Fort	Très fort

Figure 5. Matrice de croisement - criticité des infrastructures

Cette matrice permet d'obtenir un niveau de criticité composite pour chacune des infrastructures considérées. Ce niveau de criticité est ensuite représenté cartographiquement par tronçons de voiries de la zone d'étude et sert de base à l'établissement de préconisations.

3 RESULTATS

3.1 Collecte des données sur les évènements

La collecte des données a permis d'identifier 88 évènements sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 6). La qualité des informations est variable : parfois les évènements sont décrits de manière très succincte au sein d'une base de données, parfois de nombreux documents détaillés sont disponibles.

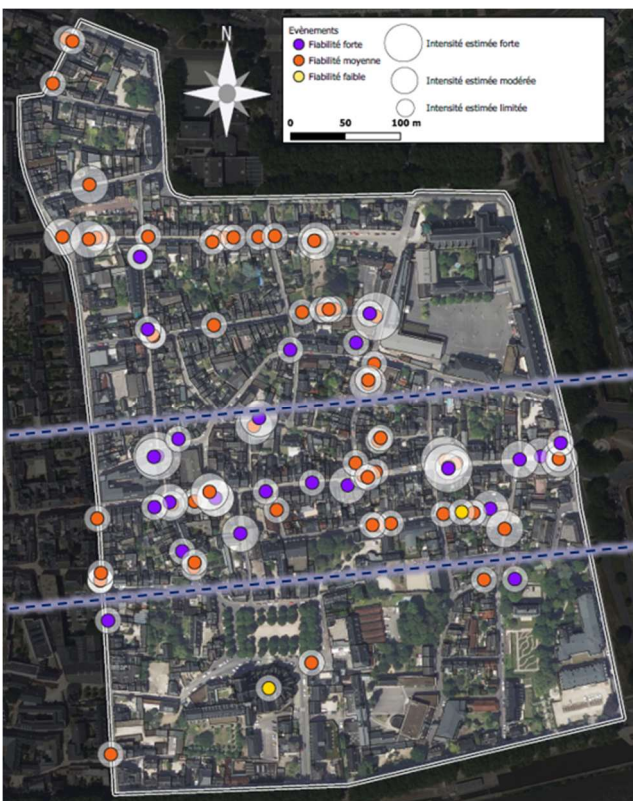


Figure 6. Carte d'exposition historique aux phénomènes de mouvements de terrain

Une estimation de la fiabilité et de l'intensité de chaque évènement a été effectuée. Il apparaît que 2% des évènements ont une fiabilité estimée faible, 71% une fiabilité moyenne et 27% une fiabilité bonne. Concernant l'intensité, les niveaux « limitée », « modérée » et « forte » représentent respectivement 74, 22 et 4% du total des évènements. Ces niveaux correspondent aux classes de diamètre données par le guide aléa cavité souterraine (MEDDE, 2012), à savoir 0 à 3 m, 3 à 10 m et plus de 10 m (Figure 7). Parfois, les caractéristiques géométriques des évènements ne sont pas répertoriées. L'intensité est alors estimée sur la base de la gravité des dommages engendré.



Figure 7. Exemple d'un évènement d'intensité forte survenu en 1967

La Figure 8 présente la répartition des évènements selon leur année de survenue. Elle montre que l'échantillonnage n'est pas homogène : entre 1881 et 1945, un seul évènement est répertorié. Ceci est probablement lié à la destruction d'une grande partie des archives de la commune pendant la seconde guerre mondiale. Entre 1945 et le début des années 2000, les données proviennent essentiellement des archives municipales. Ensuite, les différents services se dotent progressivement de bases de données permettant de répertorier ce type d'évènements, ce qui permet d'améliorer le recensement.

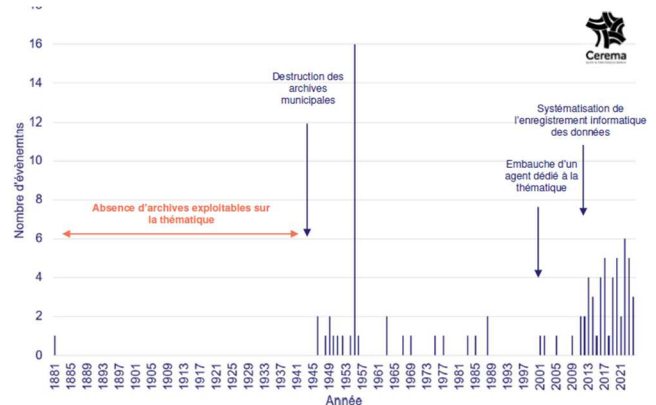


Figure 8. Année de survenue des évènements

3.2 Autres données

La phase de recherche a permis de cartographier 8 critères de caractérisation :

- les zones de thalwegs ;
- les emplacements de cavités anthropiques ;
- les zones de remaniement anthropique ;
- l'épaisseur de remblai ;
- les emplacements de fuites connues sur réseaux humides ;
- l'état de dégradation des voiries ;
- l'état de dégradation des façades des bâtiments ;
- l'importance du trafic routier.

Lorsque les données récoltées sont ponctuelles, des cartes de chaleur ont été réalisées. La Figure 9 montre un extrait de la carte de chaleur des évènements, en haut, et un extrait de celle des fuites, en bas.



Figure 9. Extrait de cartes de chaleur

Des informations sur la nature et l'âge des réseaux AEP et assainissement ont également été obtenues. Dans le cas des fuites sur le réseau AEP, une différenciation est faite entre les fuites sur les conduites principales et les fuites sur les branchements individuels. Il apparaît que la plupart des fuites

concernent ces derniers. De plus, les branchements plomb semblent plus sensibles : ils représentent environ 17% des branchements totaux du secteur, mais 34% des branchements ayant subi une fuite. Ces informations ont permis d'affiner les matrices de croisements de vulnérabilité des infrastructures.

3.3 ACP

Plusieurs phases d'ACP ont été réalisées dans le cadre de l'étude de manière à étudier de possibles corrélations entre les évènements et les facteurs de prédisposition étudiés. Les Figure 10 et Figure 11 donnent les résultats obtenus.

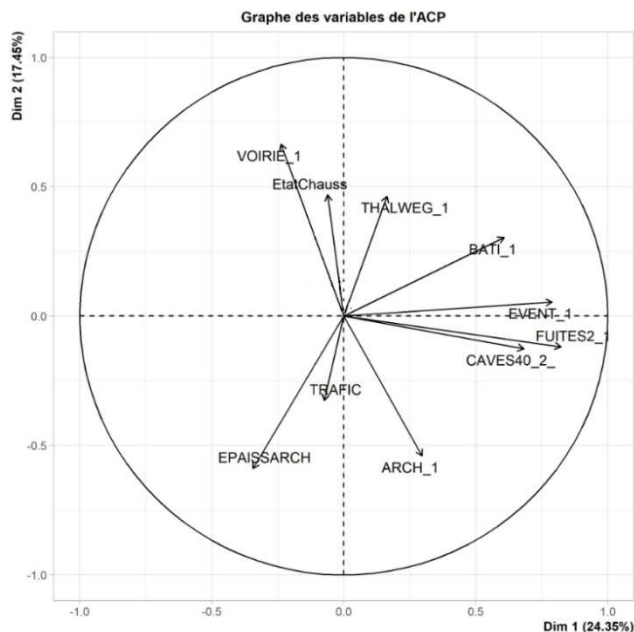


Figure 10 : ACP sur l'ensemble des critères

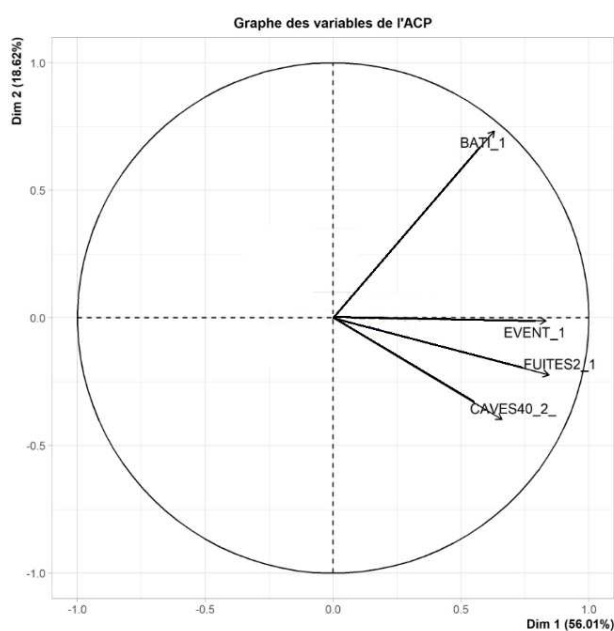


Figure 11. ACP sur 4 critères sélectionnés

Une première phase a été réalisée en prenant en compte l'ensemble des critères cartographiés. Le cercle des corrélations obtenu est présenté sur la Figure 10. Il apparaît que les données d'entrées sont assez peu corrélées. Les deux composantes principales représentent des proportions assez faibles de la variance (24 et 17% environ) et les flèches des variables sont assez courtes. Quelques critères semblent en revanche un peu mieux corrélés aux densités d'évènements : les densités de fuites, de cavités anthropiques et de désordres en façades de bâtiments.

Une seconde ACP a donc été réalisée sur ces 4 critères uniquement. Le cercle des corrélations obtenu est présenté sur la Figure 11. Cette fois-ci les variables sont mieux représentées et une corrélation nette apparaît entre les densités d'évènements et les densités de fuites.

Les désordres en façades ne semblent en revanche pas liés aux autres variables. La densité de caves anthropiques semble peu corrélée aux autres variables.

3.4 Cartes de criticité composite

La Figure 12 donne la carte de densité d'évènements pondérée qui sert de base à l'élaboration des cartes de criticité composite. Ces dernières ont été établies pour chaque type d'infrastructure et pour tous les tronçons de la zone d'étude. L'analyse de la répartition des niveaux de criticité obtenus par surface de tronçon montre que les niveaux de criticité « Forte » et « Très forte » représentent 1 à 15% de la surface de la zone étudiée selon les infrastructures. L'infrastructure considérée la plus vulnérable correspond aux branchements assainissement. En effet la criticité est toujours de niveau au moins « Moyenne ».

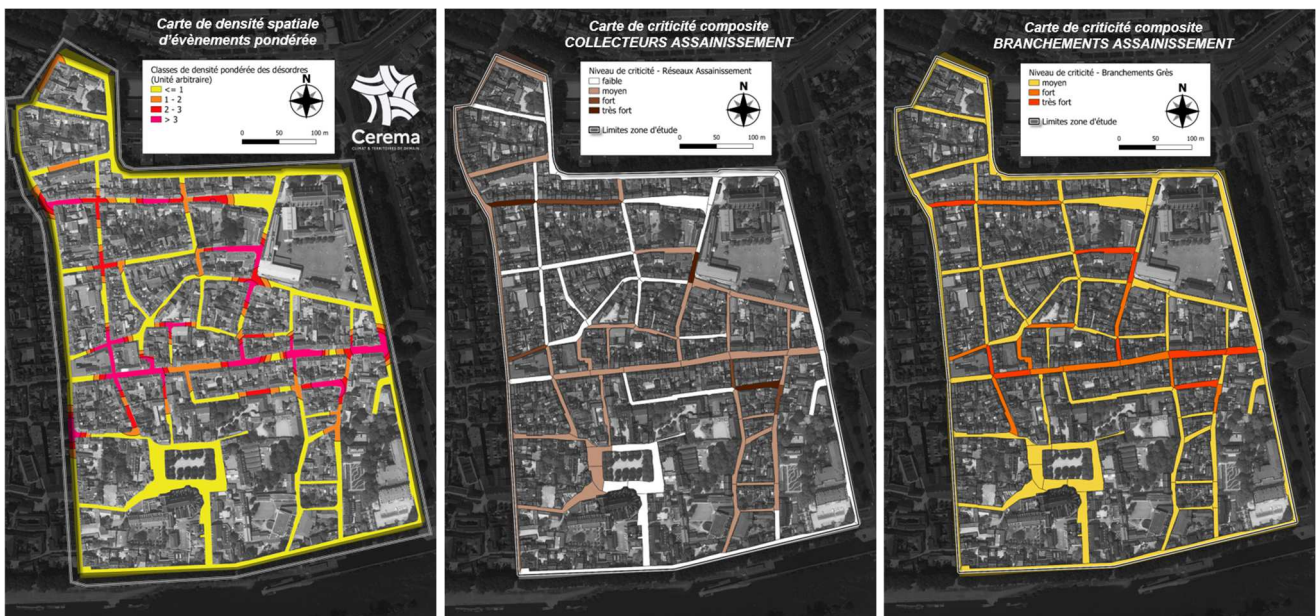


Figure 12. Carte de densité spatiale d'évènements pondérée (à gauche) et exemples de cartes de criticité composite pour deux infrastructures (collecteurs d'assainissement, au milieu, et branchements d'assainissement, à droite)

4 DISCUSSIONS

Les ACP sont utilisées dans le cadre de cette étude comme outil exploratoire visant à identifier des tendances ou corrélations spatiales entre critères. Elles ne sont pas réalisées dans le but d'établir un modèle statistique strict notamment en raison des biais d'échantillonnage et des incertitudes sur l'exhaustivité de la phase de collecte des données. Ceci étant dit, il est possible de réaliser des interprétations prudentes.

4.1 Corrélation événements-fuites

Les ACP montrent que les zones de concentration d'évènements et de fuites de réseaux ont tendance à être corrélées. Il convient de rappeler qu'il s'agit d'une

corrélation spatiale : la temporalité n'est pas prise en compte. Ce type de corrélation peut s'expliquer par un scénario d'emballlement géotechnique : une fuite commence à apparaître sur un réseau, les arrivées d'eau conséquentes déstabilisent les terrains en place, ce qui peut à son tour aggraver la dégradation du réseau et augmenter encore la traîlle de l'effondrement en surface, et ainsi de suite. La cause initiale n'est pas nécessairement connue : la fuite initiale peut avoir pour origine un premier effondrement ou une autre cause. Ce type de scénario a été observé lors d'un effondrement important survenu dans la zone d'étude en 2022 qui a mené à la destruction de plusieurs immeubles et qui a fait l'objet d'investigations conséquentes. Il convient de préciser que si ce type de

scénario est connu et est cohérent avec les observations, il n'est pas le seul possible : de tels effondrements peuvent apparaître indépendamment des réseaux. La corrélation effondrement-fuites n'est d'ailleurs pas systématique : certaines zones de concentration d'effondrements ne correspondent pas à des zones de concentration de fuite et vice-versa.

4.2 Corrélation événements-cavités anthropiques

Les ACP montrent que les zones de concentrations des événements ne sont que peu corrélées aux zones de concentration des cavités anthropiques. Cette faible corrélation est à première vue surprenante, car de nombreux effondrements du centre-ville d'Orléans sont liés à ce type de cavités. Cependant, les cavités anthropiques de la zone d'études sont pour la plupart de faibles dimensions et ne correspondent pas au profil des carrières anthropiques orléanaises généralement à l'origine d'effondrements. Les investigations menées à la suite de l'effondrement de 2022 ont bien mis en évidence le rôle du karst dans sa survenue. La Figure 13 montre une coupe réalisée dans le cadre de ces investigations, à partir de nombreuses données de forages. Elle met en évidence des anomalies au sein du substratum calcaire, bien en-dessous du niveau de la nappe et du niveau des cavités anthropiques connues dans le secteur (Philippe et al., 2026). Le faible lien de corrélation constaté avec la densité de cavités anthropiques reste donc cohérent avec les connaissances disponibles sur la zone d'étude.

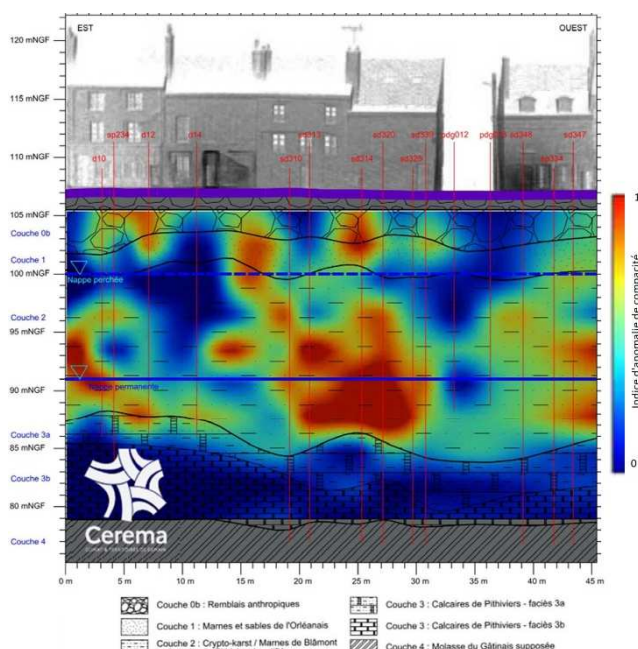


Figure 13. Coupe avec interpolation des anomalies observées en sondages autour d'un effondrement

4.3 Corrélation avec les autres critères

Les critères utilisés ont été retenus car considérés a priori comme pouvant avoir un lien avec la survenue d'effondrement. Des corrélations plus ou moins fortes étaient donc attendues et n'ont pas été observées. L'épaisseur de recouvrement/couverture par exemple est citée par le guide sur l'aléa (Clément *et al.*, 2023) comme un facteur clé pour ce type de phénomènes. Trois explications à cette absence de corrélation sont possibles :

- Soit les critères sont insuffisamment caractérisés, faute de données assez détaillées ;
- Soit les critères sont pertinents mais trop homogènes sur la zone d'étude pour qu'un effet soit visible sur les zones de corrélation ;
- Soit les critères n'ont pas une influence significative sur la survenue d'effondrement dans ce contexte particulier.

En l'état actuel, il n'est pas possible de trancher entre ces hypothèses.

4.4 Caractérisation des tronçons

Il apparaît que l'infrastructure identifiée comme la plus vulnérable correspond aux branchements d'assainissement : le niveau de criticité est toujours au moins moyen et il s'agit de l'infrastructure avec le plus de surface de tronçon de niveau fort ou très fort. Cependant, cet état de fait illustre surtout une disparité dans la qualité des données disponibles : contrairement aux branchements AEP, il n'existe pas de recensement de la localisation et de la nature des branchements assainissement. Les branchements ont donc été considérés comme étant tous constitués de grès, un matériau identifié comme majoritairement présent dans la zone d'étude par les services gestionnaires. Or, ce matériau est aussi considéré comme particulièrement fragile lorsqu'il est positionné dans ce contexte de terrain encaissant évolutif. Une meilleure caractérisation du réseau d'assainissement pourrait donc mener à une évaluation sensiblement différente de la criticité sur le secteur. Il reste que ce classement par tronçon permet de donner une appréciation assez fine de la vulnérabilité des infrastructures sur la zone d'étude. La séparation par infrastructure permet également d'adapter le rendu pour chaque service concerné. Des préconisations de gestion de l'aléa effondrement pour chaque thématique ont ainsi pu être formulées. Un tableau récapitulatif a été établi, avec, pour chaque tronçon, le niveau de criticité de chaque infrastructure et le niveau de priorité des préconisations formulées. Les préconisations ont été formulées suivant les 7 axes de la démarche française de prévention des risques majeurs.

5 CONCLUSIONS

La synthèse des données de base de l'étude sur une superficie de 25 ha a montré une disparité : d'une part, les informations relatives au contexte géologique et hydrogéologique sont parcellaires, mais d'autre part, les effondrements survenus sont plutôt bien documentés. Cela a conduit à adapter la méthodologie. En effet, l'idée initiale était de définir un zonage de susceptibilité de survenue basée sur des critères naturalistes, mais la disparité des données a conduit à privilégier une approche basée sur la localisation des effondrements connus. Bien que fortement dépendante de l'exhaustivité du recensement, cette approche a permis un niveau de différenciation au sein de la zone d'étude qui aurait été impossible à partir des critères naturalistes.

L'association des cartes de chaleur et des ACP a permis de mettre en évidence une corrélation entre les zones de concentration des effondrements et les zones de concentration des fuites sur réseaux AEP et d'assainissement. Cette corrélation est cohérente avec un scénario d'emballage géotechnique dans lequel les fuites aggravent les effondrements et vice-versa, sans qu'il soit possible de déterminer quel est la cause initiale du phénomène. Ce type de scénario n'est pas nécessairement le seul possible sur la zone d'étude, les zones de concentration d'effondrements n'étant pas systématiquement associées aux zones de concentration des fuites. Néanmoins, il correspond aux observations réalisées lors d'un événement majeur récent ayant impacté plusieurs bâtiments de la zone d'étude.

Les ACP ont également mis en évidence que les zones de concentration des cavités anthropiques ne sont que peu corrélées aux zones de concentration d'évènements. Ce résultat peut paraître surprenant au premier abord, étant donné que de nombreux effondrements du centre-ville d'Orléans sont attribuables à la présence de cavités anthropiques. Il s'avère que dans la zone concernée, les cavités anthropiques sont généralement de faibles dimensions et situées à faible profondeur, contrairement aux cavités dites « caves-carrières » présentes dans d'autres secteurs et connues pour provoquer des effondrements. De telles cavités ne semblent pas cohérentes avec les dimensions observées des plus grands événements connus. L'ensemble de ces éléments tend à privilégier l'hypothèse d'une origine karstique des événements. Le caractère karstique du secteur avait été identifié lors d'investigations réalisées à la suite de l'événement évoqué précédemment, qui avaient mis en évidence l'existence d'anomalies bien en dessous du niveau de la nappe.

Un certain nombre d'autres critères étudiés ne sont pas corrélées aux zones de concentration des événements. Cette absence de corrélation ne signifie pas nécessairement qu'ils ne jouent aucun rôle dans la survenue des effondrements. Elle peut être le signe que les critères sont insuffisamment caractérisés ou que leurs variations au sein de la zone d'étude n'est pas suffisamment significative pour qu'un effet soit mesurable.

Un niveau de vulnérabilité pour 5 infrastructures a pu être estimé pour chaque tronçon de la zone d'étude à partir des données disponibles sur les réseaux d'assainissement, les réseaux AEP et les voiries. Ce niveau a ensuite été croisé avec la densité pondérée des effondrements. Le zonage obtenu a servi de base pour établir des préconisations et prioriser leur importance à une échelle assez fine. Un récapitulatif permet de classer les tronçons selon leur densité d'événements et/ou selon la criticité pour chaque infrastructure, permettant de donner à chaque service concerné les informations pertinentes pour son domaine d'action.

Des recommandations générales ont également été données, notamment la réalisation d'investigations afin d'améliorer la connaissance du contexte géologique, géotechnique et hydrogéologique. Ces investigations pourraient permettre d'identifier des variations pertinentes et de construire une cartographie prédictive sur la base de ces critères, telle que prévu initialement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Noury G., Perrin J., Gourdière S. (2018). Rôle des intempéries dans les mouvements de terrain liés aux cavités : retour sur la crise « Loiret » juin 2016. Journées Nationales de Géotechniques et de Géologie de l'Ingénieur. Champs-sur-Marne. France. 8 pages ;
- Clément F., Husson E., Noury G., Védié E. (2023). Guide méthodologique Aléa mouvements de terrain d'origine karstique en contexte carbonaté. Evaluation et cartographie. Cerema éditions ;
- Husson F., Josse J, Lê S., Maze J., FactoMineR (plugin du logiciel R), disponible à l'adresse <http://factominer.free.fr/>, consulté le 27/11/2025 ;
- MEDDE. (2012). Plan de prévention des risques naturels. Carrières souterraines abandonnées. Guide Méthodologique. 82 pages ;
- Philippe A., Dore L., Can S., Saussaye L. (2026). Essai de modélisation 3D d'un système karstique actif en contexte urbain dense : retour d'expérience à Orléans. 13èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur. Grenoble. 8 pages.