

ROLE DES AMENAGEMENTS ANTHROPIQUES SUR L'APPARITION D'EFFONDREMENTS EN CONTEXTE KARSTIQUE, EN FRANCE

ROLE OF HUMAN CONSTRUCTIONS ON SINKHOLES OCCURRENCE IN KARST CONTEXT, IN FRANCE

Gildas NOURY¹, Jérôme PERRIN¹

¹ BRGM, Orléans, France

RÉSUMÉ – Le risque de mouvements de terrain lié à des cavités karstiques est amplifié par les aménagements. 77 cas ayant touché la métropole ont été collectés, analysés et confrontés à la bibliographie. Ils ont permis de modéliser certaines configurations, de confirmer le rôle aggravant des bassins, des fuites de canalisation et des ouvrages d'infiltration ponctuelle et de proposer des recommandations techniques pour y remédier.

ABSTRACT – Sinkholes hazard in karst context is increased in case of human construction. 77 cases concerning France have been collected, analyzed and compared to the bibliography. They conduct to model some configurations. They confirm the aggravating role of basins, water pipe leakage and punctual infiltration works. They provide elements to propose some mitigation measures.

1. Introduction

Environ 40 % du territoire métropolitain est constitué de roches karstiques (Nicod, 2010). Les cavités souterraines naturelles qui y sont présentes peuvent générer des mouvements de terrain en surface. Des méthodes sont actuellement en cours de montage afin de mieux évaluer cet aléa. Celles-ci indiquent d'ors et déjà que certains aménagements anthropiques augmentent la probabilité de déstabilisation des terrains. Grâce à un financement du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (Direction Générale de la Prévention des Risques), le BRGM a réalisé, en 2015-2016 un état des lieux global de la problématique. La bibliographie a été confrontée à un retour d'expérience national et permet de recenser les configurations anthropiques les plus dangereuses en France. Certains phénomènes ont par ailleurs été conceptualisées, à travers la modélisation de la saturation des sols sous un ouvrage fuyard. L'ensemble de ces réflexions aboutit à une série de recommandations visant à limiter les impacts de ces aménagements dans les zones à risque.

2. Etat des lieux

2.1. Synthèse bibliographique internationale

En Chine, sur la base d'une analyse de près de 45 000 désordres, environ 87 % d'entre eux sont induits par des causes anthropiques ; en Pennsylvanie (1 574 désordres analysés), cette proportion est de 58 % (Waltham et al., 2005). Pour la Chine, Meng et al. (2012) aboutissent à des conclusions similaires.

Les aménagements incriminés sont les suivants (Waltham et al., 2005 – Gutierrez et al., 2014) : irrigation, conduites fuyards, canaux et fossés fuyards, bassins de rétention,

suppression de la végétation, opérations de forage (mauvais colmatage, injection de fluides). Par la suite, nous avons retenu 6 catégories d'aménagements : les bassins, les canalisations aériennes (eau à l'air libre), les canalisations enterrées, les ouvrages d'infiltration ponctuelle, les pompes, et les autres ouvrages.

2.2. Retour d'expérience en France

La recherche dans les archives du BRGM a été complétée par l'envoi d'un questionnaire à la plupart des acteurs participant à la gestion du risque « cavité » en France : BRGM, CEREMA, INERIS, administrations, bureaux d'étude et experts nationaux du karst. 77 retours d'expérience ont ainsi été réunis et analysés. Bien qu'il ne soit certainement pas exhaustif (en raison en particulier de la perte de mémoire : près de 90% des cas datent de moins de 15 ans), ce nombre apparaît suffisant pour offrir un panorama représentatif de la problématique à l'échelle nationale.

La répartition spatiale des retours d'expérience montre le plus d'exemples en Haute Normandie (29 cas) puis en Franche-Comté (15 cas) et en Aquitaine (8 cas) (Figure 1). Notons également le cas du Loiret (6 cas). Cette répartition des désordres est relativement cohérente avec celle des cavités, les régions indiquées étant celles en contenant le plus (Haute-Normandie : karst de la craie, Franche-Comté : karst nu du calcaire jurassique, Aquitaine et Loiret : karst sous-couverture de calcaire éocène).

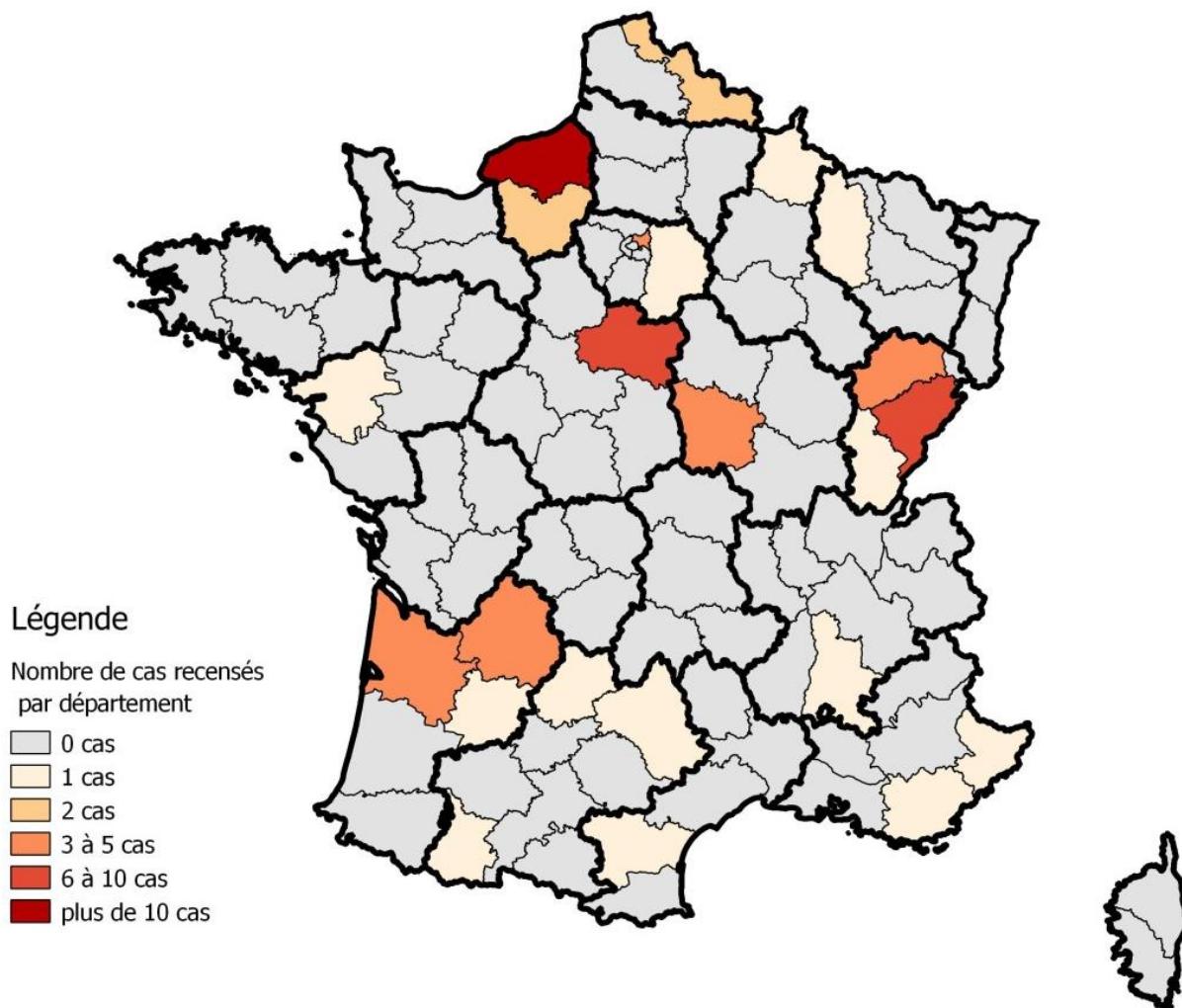


Figure 1: Répartition (par départements) des retours d'expérience

Concernant la configuration géologique, 40 cas concernent le karst du calcaire, 30 celui de la craie et 7 celui du gypse. La majorité des cas se situe par ailleurs en contexte de karst sous couverture (65 cas, 85 %), le karst nu ne correspond qu'à 8 cas (10 %) et celui de contact à 4 cas (5%). En rapportant cette répartition aux surfaces occupées par ces types de karst (karsts sous-couverture : 170 000 km², karst nu : 40 000 km² - Nicod, 2010), les aménagements en contexte de karst sous-couverture sont affectés par 2 à 2,5 fois plus de désordres qu'en contexte de karst nu¹.

A l'exception du val d'Orléans et de la Seine-Maritime, la mise en perspective du rôle des aménagements vis-à-vis de la situation « normale » (sans aménagement) n'est pas possible (absence d'étude détaillée de la situation « normale »). Pour le val d'Orléans, 20% des désordres de la période 2010-2016 sont liés à des aménagements. En Seine-Maritime, l'analyse d'une étude réalisée sur la sinistralité des bassins de rétention indique qu'entre 5 et 15 % des désordres seraient d'origine karstique (David et al., 2010).

Le délai entre la construction de l'aménagement et l'apparition du désordre n'est connu que pour 15 cas : 3 évènements ont eu lieu pendant les travaux, les 12 autres touchent des aménagements achevés sans encombre.

Concernant les types d'aménagement (Figure 2), les bassins sont les plus représentés avec 42% des cas, suivent, à égalité, les canalisations à l'air libre et enterrées (19% chacune), les ouvrages d'infiltration ponctuelle (13%), les pompages (5%).

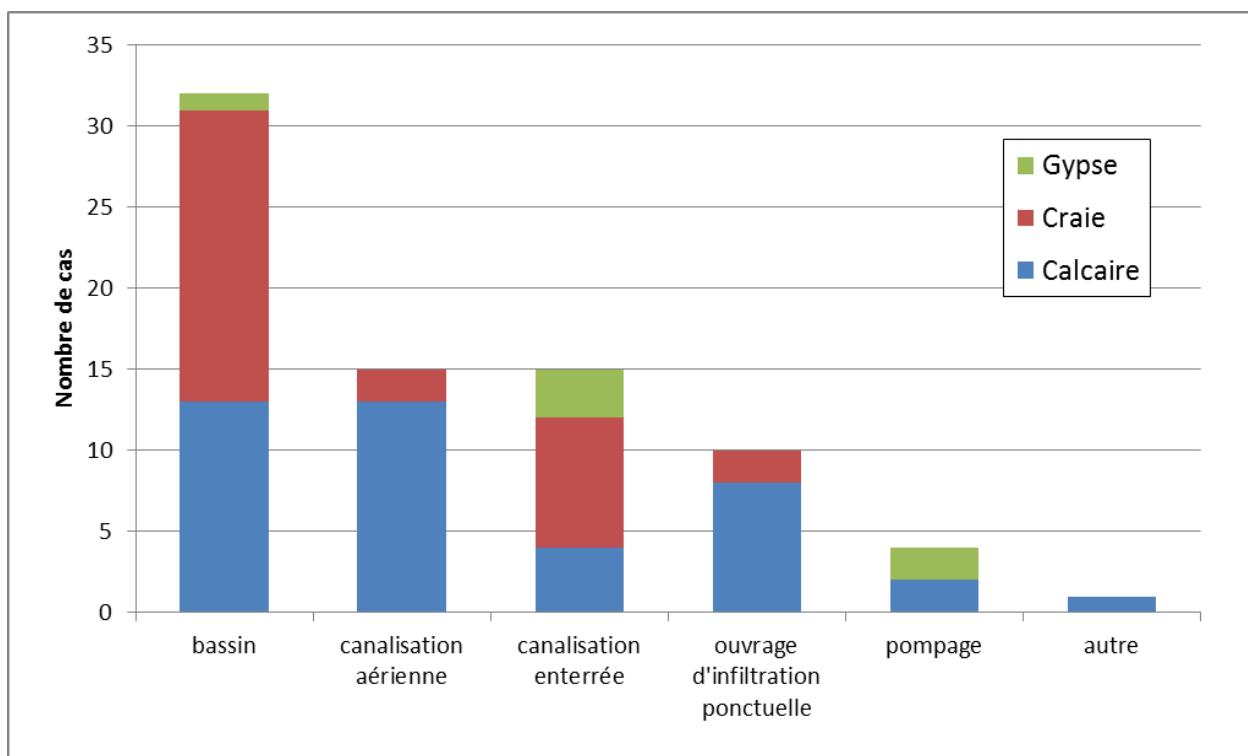


Figure 2 : Nombre de retours d'expérience par types d'aménagement et par contexte karstique

Suivant la classification du guide méthodologique « cavités souterraines » (Figure 3), la majorité des désordres est d'intensité limitée (diamètre inférieur à 3 m pour 55 % des cas), suit l'intensité modérée (diamètre compris entre 3 et 10 m pour 30% des cas) et, pour finir, l'intensité élevée (diamètre supérieur à 10 m pour 15% des cas).

Ces désordres ont presque toujours entraîné des dommages : généralement la mise hors d'usage des aménagements (67% des cas). Le cas le plus grave est une opération de forage ayant causé deux victimes.

¹ Cette analyse de densité n'est pas possible pour les karsts de contact car leur surface, même si elle est très faible, n'est pas connue à l'échelle du territoire.

2.3. Quelques cas remarquables

Parmi les 77 cas collectés, on peut retenir les cas emblématiques suivants :

- En Seine-Maritime : dans le contexte du karst de la craie sous-couverture, l'apparition concentrée de bâtoires au niveau de bassins (stations d'épuration : 73 touchées, bassins de lutte contre les inondations : 15% sur 413, synthèse BRGM – David et al., 2010) concerne particulièrement les ouvrages non imperméabilisés.
- Dans les Hautes-Pyrénées, le canal d'irrigation de la Neste s'implante, au niveau de la commune de Hèches, sur un karst calcaire sous-couverture (linéaire concerné : environ 2 kms). Entre 20 à 30 désordres se sont produits sur cette zone entre 1909 et 2014 (affaissements et effondrements, certains très grands : longueur = 18 m pour l'un d'entre eux). Les analyses réalisées indiquent un agrandissement des cloches de fontis au sein de la couverture argileuse (plusieurs mètres en 30 ans), et ce à proximité immédiate du canal (synthèse par le BRGM).
- A Bonnevent-Veloreille (Haute-Saône), sur un karst de contact marne/calcaire, la réinfiltration des eaux de source et pluviale par des puisards aurait fortement accéléré l'érosion interne du colmatage des vides karstiques (débourrage) faisant apparaître, entre 1993 et 2008, plusieurs désordres (information CEREMA).
- Dans un contexte de karst calcaire sous couverture éocène et quaternaire (35 m d'épaisseur), la réalisation d'un forage d'eau, apparemment réalisé sans les précautions nécessaires, a engendré un fontis de 7 m de diamètre et 3 m de profondeur, puis, de manière différée, l'apparition d'autres effondrements. Ce cas dramatique (2 victimes) est en cours d'instruction judiciaire (information CEREMA).
- Au nord de Paris : l'exploitation de la nappe du Lutétien, qui inclut des formations gypseuses, est corrélée avec l'apparition de désordres (Toulemont, 1987).

3. Saturation des sols sous un ouvrage d'infiltration

Deux phénomènes sont supposés avoir engendré la majeure partie des désordres des cas concernant les karsts sous-couverture :

- la « desquamation » qui opère par des micro-ruptures mécaniques de la voûte d'une cavité liées au poids de l'eau (pression interstitielle) (Tharp, 1999 & 2002) ;
- le soutirage/suffusion qui consiste en une érosion interne des particules causée par l'écoulement d'eau (processus actif lorsque la vitesse d'écoulement de l'eau est supérieure à la résistance critique au cisaillement) (Jiang et al., 2015).

Le soutirage/suffusion nécessite un milieu saturé alors que la desquamation peut se produire en milieu initialement saturé (baisse du niveau piézométrique) ou non saturé (front de percolation).

Une série de modélisations a été réalisée pour tester la dynamique de saturation d'un milieu initialement non saturé et pour obtenir l'évolution du profil des gradients de pression interstitielle au cours de la saturation du milieu. Le logiciel MARTHE, développé au BRGM, a été utilisé. Ce code est un logiciel de calcul d'écoulement en milieu poreux (en aquifère) basé sur la méthode des volumes finis (maillage du domaine). Le cadre introduit correspond à une formation poreuse homogène (couverture du karst, porosité efficace de 20 %), relativement peu perméable ($3 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$) d'une épaisseur non saturée initiale de 16 m (profondeur de la nappe à 16 m) au sommet de laquelle un aménagement est introduit (bassin ou infiltration concentrée). Les configurations simulées comprennent deux conditions aux limites (charge imposée pour représenter le cas d'un bassin et flux imposé pour le cas d'une fuite de canalisation ou l'infiltration d'un fossé ou d'un puisard) et plusieurs géométries (épaisseur couverture, dimension aménagements) et paramètres

hydrodynamiques (perméabilité et porosité de la couverture). Deux séries de résultats sont présentées ci-dessous à titre d'exemple (Figure 3).

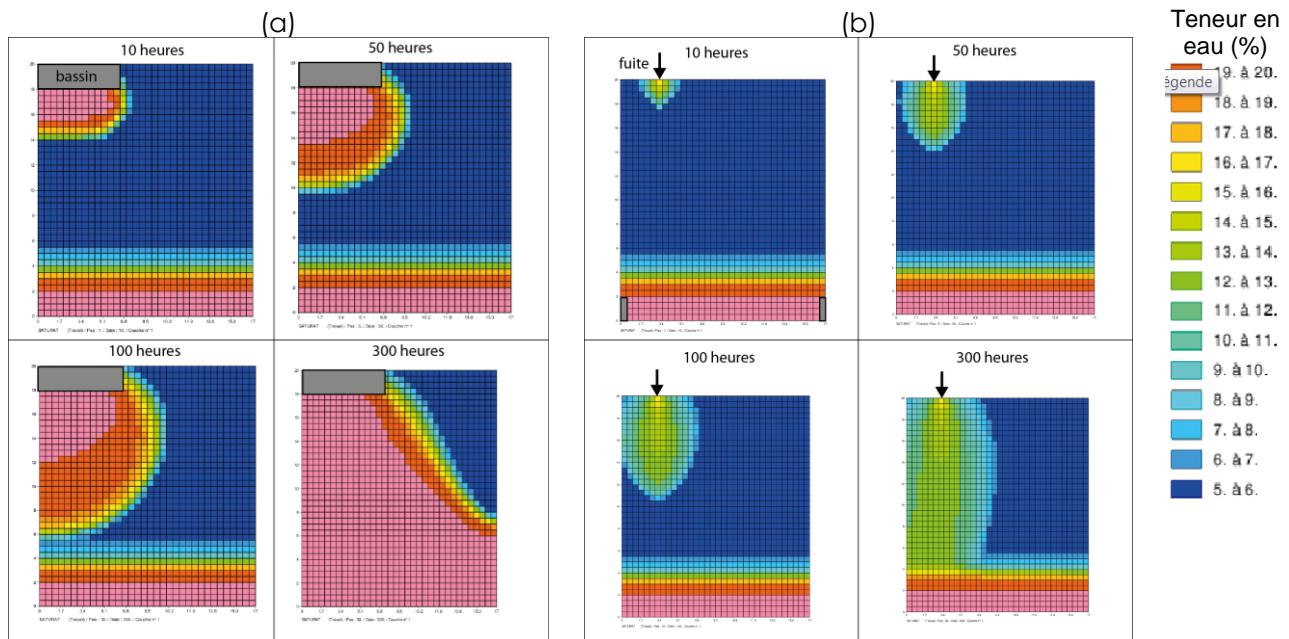


Figure 3 : Evolution des teneurs en eau à quatre temps successifs : (a) bassin de rétention et (b) fuite en surface ; les conditions saturées sont représentées en rose (100 % de saturation)

Pour les deux scénarios, les gradients de pression interstitielle sont les plus marqués au droit du front de percolation. Ces conditions sont favorables au processus de desquamation comme déjà indiqué par Tharp (1999).

Les scénarios avec un bassin de rétention montrent qu'un régime saturé est atteint selon une durée variable (1 à 58 jours) après la mise en eau du bassin en fonction de la configuration. La perméabilité des terrains a le plus fort contrôle sur cette durée. Après saturation, le processus de soutirage/suffosion peut alors se mettre en place. Au contraire, les scénarios de fuite d'une canalisation ou de puisard en surface montrent que pour des débits modestes ($< 1 \text{ L.s}^{-1}$), la saturation n'est pas atteinte et qu'un régime pseudo-permanent s'établit en condition non saturée. Le processus de soutirage/suffosion ne semble donc pas pouvoir être évoqué (sauf forts débits).

Ces résultats exploratoires, sont préliminaires. Il serait intéressant de pousser plus loin les tests en considérant des contextes hétérogènes et des scénarios plus réalistes (variations temporelles de charge ou de débit).

4. Conclusions et recommandations

L'analyse des retours d'expérience montre des désordres liés à des aménagements pour tous les types de contexte karstique (calcaire, craie, gypse) avec une prépondérance d'événements dans le cas des karsts carbonatés sous couverture meuble. Ce résultat est cohérent avec la forte sensibilité de ces karsts couverts à l'aléa mouvement de terrain (Perrin et al., 2014). Dans ce cas, le processus dominant est le soutirage/suffosion et la desquamation des matériaux meubles de la couverture vers les vides karstiques qui en sont le réceptacle.

Les différents types d'aménagement à l'origine de désordres (bassins, canalisations à l'air libre ou enterrées, ouvrages d'infiltration ponctuelle, pompages et tunnel) correspondent aux principaux types d'aménagement identifiés dans les références bibliographiques internationales. Une différence notable est le rôle minime des pompages

puisque ceux-ci ne sont évoqués que dans quatre cas dans le cadre du retour d'expérience réalisé à l'échelle nationale.

Dans tous les cas, l'aménagement va accélérer des mécanismes déjà actifs mais qui, normalement, progressent sur des échelles de temps bien plus longues (accélération de l'érosion interne en karst sous couverture, accélération de la dissolution en contexte de gypse) voire même pourra initier un processus inopérant en conditions naturelles (mise en place d'un gradient hydraulique, saturation d'un terrain non saturé, augmentation des pressions d'eau interstitielle, etc.) Les résultats de la modélisation exploratoire et les éléments issus de la bibliographie montrent que les paramètres clés dans l'accélération ou l'apparition de l'instabilité sont :

- Dans le cas d'une concentration de l'infiltration : La perméabilité, la cohésion et l'épaisseur de la couverture ; la nature de l'aménagement (débit d'infiltration, charge imposée, variations de charge ou de débits) ;
- Dans le cas de modifications du niveau piézométrique : La position de la nappe par rapport à l'interface couverture-karst, la dynamique de la nappe (amplitude des variations, vitesses de variation).

Sur la base de ces résultats, des précautions doivent être prises pour la réalisation des aménagements susnommés. De manière générale, si le contexte géologique est sensible, la première étape d'une étude doit comprendre un diagnostic karstique par un bureau d'étude spécialisé afin de préciser l'aléa mouvement de terrain. Cette analyse ne doit pas se contenter d'étudier le seul site du projet, elle doit s'étendre à la zone d'influence potentielle du projet vis-à-vis du fonctionnement de l'ensemble du secteur karstique. En cas d'aléa avéré et si l'aménagement ne peut pas être déplacé en dehors de la zone d'aléa ou si le risque est considéré comme acceptable, alors il convient d'adapter la construction à l'aléa en prenant certaines mesures préventives. Nous proposons ici quelques principes déclinés en fonction du type d'aménagement et du type de karst (Tableau 1). Ces principes sont basés sur les résultats du retour d'expérience, de la modélisation exploratoire et de l'analyse bibliographique.

Tableau 1 : Exemples de mesures préventives préconisées en cas d'aménagement dans un contexte sujet au risque mouvement de terrain lié à la présence de karst

Aménagement	Karst nu	Karst s/couverture
Bassin (de rétention) Canalisation à l'air libre	Imperméabilisation locale des points ou le karst est comblé, drainage hors zone de karst comblé ; décapage du comblement jusqu'au rocher	Imperméabilisation des secteurs en eau en particulier en cas de forte perméabilité du sol ($> 10^{-6}$ à 10^{-7} m.s ⁻¹)
Canalisation enterrée	Vérification régulière des canalisations, suivie d'une réparation des fuites	Utilisation de conduites flexibles à joint télescopique. Inspection régulière .
Puits/puisard pour la réinfiltration des eaux	Eviter le choix d'un site où le karst est colmaté ; isoler la partie altérée du calcaire (épikarst) par cimentation. Ouvrages existants : limiter infiltrations	Isoler les formations de couverture et le toit du karst : cimentation jusqu'à la zone saine (forage télescopique) Ouvrages existants : limiter infiltrations
Réalisation d'un sondage ou forage	Pas de précaution particulière (s'assurer de l'absence de vide ou de bouchon d'altération à faible profondeur)	Isoler les formations de couverture : tubage à l'avancement, cimentation (forage télescopique)
Pompage	Vérifier l'influence du pompage sur de possibles débouvrages (suivi piézométrique et évaluation de la zone d'influence du pompage	Limiter le rabattement (ne pas dénoyer la couverture et l'interface avec le karst) ; éviter les fluctuations à proximité de l'interface

Deux rapports ont été édités à l'issue de l'étude. Ils sont à accès public et disponibles sur le site du BRGM (références : RP-65280-FR et RP-66446-FR).

5. Références bibliographiques

- David P-Y., Moisan D., Nachbaur A., Dörfliiger N. (2010). Aménagements des bétoires en Haute Normandie – Etat de l'art et préconisations de bonnes pratiques. Rapport BRGM RP-58795-FR.
- Gutierrez F., Parise M., De Waele J., Jourde H. (2014). A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews* 138: 61–88
- Jiang F. (2015). Study on the Critical Velocity of Groundwater to Form Subsidence Sinkholes in Karst Area.
- Meng, Y., Lei, M. T., Lin, Y. S., Dai, J. L., & Guan, Z. D. (2012). Models and mechanisms of drilling-induced sinkhole in China. *Environ Earth Sci* 67: 1961–1969.
- Nicod J. (1984). Instabilité des dépressions karstiques. In Flageollet J-C. (Ed) 1984. Mouvements de terrain. Communications du Colloque de Caen. Documents du BRGM n°83 : 678 p.
- Nicod J. (2010). Panorama des karsts de France, types et répartition. *Grottes et karsts de France. Karstologia Mémoires*, Association française de karstologie, 19, 144-145.
- Perrin J., Noury G., Cartannaz C. (2014). ALEA-Karst : vers une approche multicritères de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire. Volume 1 : Trame méthodologique – Rapport BRGM/RP-63771-FR.
- Perrin J., Noury G., Cartannaz C., Gutierrez T., Van Laere A. (2014). ALEA-Karst : vers une approche multicritères de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire. Volume 2 : étude de sites - Rapport BRGM/RP-63771-FR, 119 p.
- Tharp, T.M. (1999). Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes. *Engineering Geology* 52, 23–33.
- Tharp, T.M., (2002). Poroelastic analysis of cover-collapse sinkhole formation by piezometric surface drawdown. *Environmental Geology* 42, 447–456.
- Toulemon M. (1987). Les risques d'instabilités liés au karst gypseux lutétien de la région parisienne – Prévisions en cartographie. *Bulletin liaison laboratoire des Ponts et Chaussées* 150/151 : 109-116.
- Waltham A.C., Bell F.G., Culshaw M.G. (2005). *Sinkholes and Subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 382 p.