

GUIDE MÉTHODOLOGIQUE DE GESTION DU RISQUE CAVITÉS SOUTERRAINES SOUS INFRASTRUCTURES AUTOROUTIÈRES

RISK ASSESSMENT FOR UNDERGROUND CAVITIES BENEATH HIGHWAY INFRASTRUCTURE : A METHODOLOGICAL GUIDE

Elise TRIELLI¹, Nathalie BÉRENGER², Isabelle BERTOLUS², Céline BOURLIER³, Raphaël BÉNOT⁴, Véronique BERCHE⁵, Charles KRÉZIAK⁶, Cédric LEFÈBVRE⁵, Aline LOMBARD⁷, David MATHON⁸, Emilie THIÉBAUD⁹

¹ *Direction générale de l'aviation civile, Aix-en-Provence, France*

² *Cerema Méditerranée, Aix-en-Provence, France*

³ *Cerema Normandie-Centre, Le Grand-Quevilly, France*

⁴ *Cerema Ouest, Saint-Brieuc, France*

⁵ *Cerema Hauts de France, Saint-Quentin, France,*

⁶ *Cerema Île-de-France, Le Bourget, France*

⁷ *Cerema Est, Nancy, France*

⁸ *Direction départementale des territoires 41, Blois, France*

⁹ *Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement PACA, Marseille, France*

RÉSUMÉ – Des événements d'effondrements au droit d'infrastructures autoroutières ont incité le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire à confier au Cerema la rédaction d'un guide visant à sensibiliser les gestionnaires au risque associé à l'existence de cavités souterraines à l'aplomb de leurs réseaux autoroutiers et à les inciter à adopter une politique préventive de gestion de ce risque.

ABSTRACT – Collapse events in highway infrastructure prompted the Ministry of Ecological and Solidarity Transition to entrust Cerema with the drafting of a guide aimed at raising awareness among managers about the risk associated with the existence of underground cavities straight under their highway networks and encourage them to adopt a preventive policy for managing this risk.

1. Introduction

Ces dernières années, des effondrements liés à la présence et l'évolution de cavités souterraines ont impacté des autoroutes (A71 en 2012, A13 en 2014, A29 en 2017) et ont été à l'origine de conséquences importantes sur l'exploitation de ces infrastructures (coupures de trafic, limitations de vitesse, etc.).

La Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM), service du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (MTES) en charge de la tutelle des concessionnaires autoroutiers, a alors entrepris un audit des mesures de prévention et gestion de ce risque réalisées par les concessionnaires autoroutiers. Les conclusions de cet audit ont montré qu'un certain nombre de concessionnaires ne prenaient pas de mesures préventives et le géraient de façon réactive, en réponse à un

événement. Ce constat a incité la DGITM à entreprendre une action visant à promouvoir une politique de gestion préventive du risque lié à la présence de cavités souterraines sous ces infrastructures.

A cet effet, elle a confié au Centre d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (Cerema), établissement public sous tutelle du MTES et du Ministère de la Cohésion du Territoire, la mission de rédiger un guide méthodologique sur ce sujet.

Pour élaborer ce guide, le Cerema a mobilisé ses experts du domaine, via la constitution d'un groupe de travail. Afin de garantir l'adéquation des préconisations émises par le groupe de travail, un panel de gestionnaires autoroutiers (APRR, COFIROUTE, SANEF) a été consulté afin d'identifier et prendre en compte, via leur retour d'expérience, les bonnes pratiques à mettre en œuvre pour la prévention de ce risque.

Les objectifs de ce guide sont doubles :

1. Sensibiliser les gestionnaires à la problématique du risque lié aux cavités souterraines présentes à l'aplomb de leur réseau.
2. Inciter les gestionnaires à mettre en œuvre une politique de gestion préventive de ce risque.

2. Le risque cavités souterraines

Le risque associé à la présence de cavités souterraines, qu'elles soient anthropiques (mines, carrières, habitations troglodytiques...) ou naturelles (cavités de dissolution) est souvent méconnu. Il est en outre peu prévisible, contrairement à d'autres risques (par exemple les inondations), et n'est pas caractérisable de façon probabiliste.

Le risque d'apparition d'un phénomène (effondrement localisé ou généralisé, affaissement) associé à l'existence d'une cavité souterraine dépend en effet de plusieurs facteurs, dont le premier est la présence en sous-sol d'une formation géologique soit soluble (formations calcaires, gypseuses...), soit présentant un intérêt pour l'Homme (pierres de construction, substances concessibles, création d'abris, d'habitats, marnage des terres agricoles...). Lorsque cette prédisposition géologique est établie, plusieurs facteurs doivent être étudiés pour conclure à la présence potentielle ou non de vides : contexte hydrogéologique favorable, historique d'extraction, désordres de terrain présents en surface, existence de facteurs susceptibles de déstabiliser une cavité souterraine ou d'aggraver son évolution...

La première partie du guide vise donc à donner une connaissance de base sur les cavités souterraines (typologie, répartition géographique, facteurs d'apparition de désordres en surface, types de désordres...) afin que les gestionnaires puissent identifier l'exposition de leur réseau à ce risque.

Une deuxième partie présente l'état des connaissances sur les responsabilités d'un gestionnaire autoroutier vis-à-vis du risque cavités souterraines, avec en premier lieu la question de domanialité des cavités, qui peut se résumer par : « *qui est propriétaire d'une cavité souterraine ?* ».

Les responsabilités des gestionnaires autoroutiers, en tant que concessionnaires gérant un domaine appartenant à l'Etat, sont détaillées. A ce propos, il est rappelé que la sécurité des usagers du réseau autoroutier est une priorité et que, si des cavités ont été identifiées sous ou à proximité du réseau, les gestionnaires doivent, si nécessaire, réaliser des travaux de mise en sécurité et/ou surveiller l'évolution des cavités. Ces responsabilités impliquent que le gestionnaire mette en œuvre une politique de gestion du

risque d'effondrement de cavités souterraines. Si tous les gestionnaires concernés par ce risque appliquent au minimum une politique de gestion curative après chaque événement dommageable, peu ont une politique de gestion préventive, notamment en phase d'exploitation.

Cette démarche préventive passe (i) par une évaluation du risque sur l'itinéraire et (ii) par la détermination d'un plan d'actions préventives adaptées au risque prédéterminé.

Ces deux aspects font l'objet chacun d'un chapitre spécifique du guide.

3. La démarche préventive de gestion du risque cavités souterraines

3.1. La caractérisation du risque associé à la présence de cavités souterraines

Dans un premier temps, le gestionnaire doit pouvoir évaluer le niveau de risque auquel est soumis son réseau ce qui implique d'une part, de caractériser l'aléa cavités souterraines existant et d'autre part, de bien connaître la vulnérabilité de l'infrastructure autoroutière à cet aléa, dans l'ensemble de ses composantes (section courante, échangeurs, barrières de péages, aires de repos, ouvrages d'art, bâtiments d'exploitation...).

La caractérisation de l'aléa nécessite plusieurs étapes (figure 1), qu'on peut rapprocher de celles mises en œuvre pour une caractérisation d'aléa classique, type cartographie d'aléas à visée réglementaire. Ainsi, il est nécessaire successivement de (i) définir la zone d'étude tenant compte des enjeux propres du gestionnaire, de (ii) collecter les données relatives aux cavités souterraines présentes sur ce périmètre puis de (iii) caractériser l'aléa cavités souterraines. La dernière étape (iv) visera à caractériser le niveau de risque lié à la présence de cavités souterraines sur l'ensemble du périmètre d'étude, en croisant l'aléa avec les vulnérabilités de l'infrastructure. Ces vulnérabilités sont en effet multiples, des dommages matériels (vulnérabilité physique, qualifiable par des critères techniques) aux conséquences sociales, économiques et systémiques, liées au contexte dans lequel est insérée l'infrastructure et au rôle qu'elle y joue.

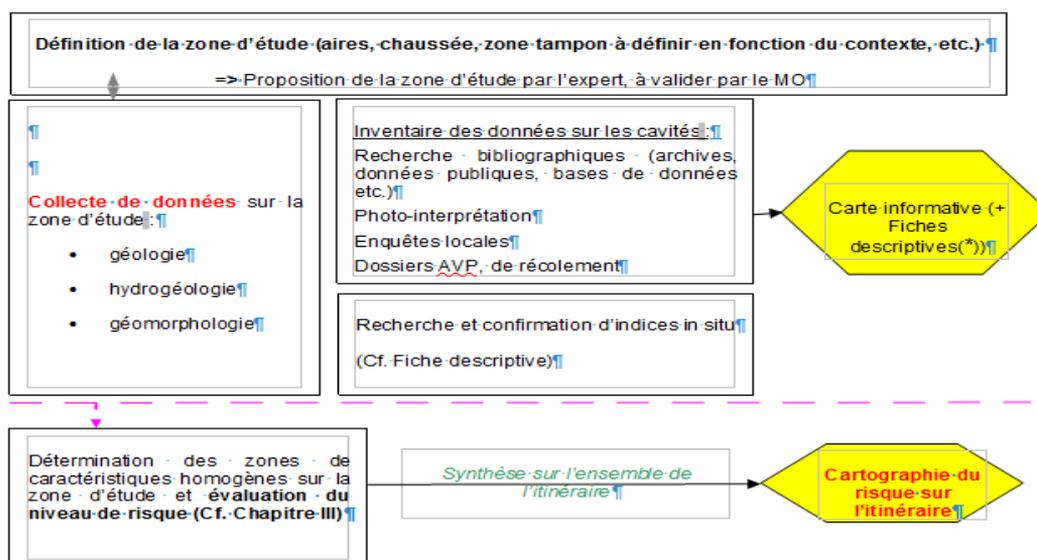


Figure 1. Logigramme décrivant les étapes de caractérisation du risque cavités souterraines sur infrastructure autoroutière

Pour toutes ces étapes, il est fortement conseillé au gestionnaire de s'attacher les services d'un expert du domaine qui pourra veiller à la pertinence et à la qualité des études réalisées.

Le principal apport du guide consiste à proposer une démarche de caractérisation du risque adaptée spécifiquement aux infrastructures autoroutières.

Classiquement, l'aléa cavités souterraines est évalué en croisant la probabilité d'occurrence du phénomène, liée à la prédisposition du site, avec l'intensité de l'événement attendu. Pour une infrastructure autoroutière, les conséquences potentielles de l'émergence d'une cavité en termes de dommages sont considérées comme équivalentes : une simple déformation de la plateforme liée à un affaissement peu marqué peut entraîner un accident et consécutivement une perte de fonctionnalité, partielle ou totale (demi-chaussée impraticable, coupure du trafic...), de l'infrastructure. Il est donc proposé de ne pas tenir compte de l'intensité de l'aléa en tant que paramètre discriminant pour la détermination des actions de prévention à conduire. Le guide propose ainsi de considérer un seul niveau d'intensité de l'aléa, pour toute typologie d'événement lié aux cavités souterraines se situant à l'aplomb ou à proximité des zones circulées. L'aléa résultant dépendra alors uniquement du niveau de probabilité d'occurrence. Cette qualification de l'aléa prend indirectement en compte, via le choix d'un seul niveau d'intensité, la vulnérabilité physique de l'infrastructure autoroutière. En première approche, on peut considérer cette vulnérabilité physique comme forte de façon homogène vis-à-vis des phénomènes en jeu. Ainsi, l'aléa résultant sera le résultat du croisement entre un niveau d'occurrence et un niveau unique d'intensité et de vulnérabilité physique ; il s'agit donc d'une notion intermédiaire entre l'aléa et le risque, désignée sous le terme d'*aléa/risque*.

Il s'agit bien entendu d'une proposition, le gestionnaire, sur conseil d'un expert, peut faire d'autres choix de caractérisation de l'aléa, en fonction du contexte et des connaissances disponibles sur les phénomènes en jeu. Il peut également affiner la connaissance des vulnérabilités de son réseau, lui permettant de définir des niveaux de risque au sein d'un même niveau d'aléa/risque et ainsi de prioriser les actions préventives à mettre en œuvre.

A noter que cette proposition de caractérisation du risque ne concerne pas les cavités souterraines d'origine minière, celle-ci étant réalisée quasiment partout par les services de l'État en charge de la gestion de l'Après-Mine. Il convient donc au gestionnaire de se rapprocher de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) afin de disposer de ces cartographies qui lui permettront de définir ses priorités d'action vis-à-vis de ce type de cavités.

3.2. Le plan d'actions préventives

A l'issue de cette phase de caractérisation du risque, le gestionnaire dispose d'une cartographie du niveau d'aléa/risque cavité souterraine sur l'ensemble de son réseau. Il peut alors, en fonction de ses contraintes propres (notamment budgétaires), prioriser des actions de prévention adaptées. En fonction des niveaux d'aléa/risque déterminés, il aura (i) à mener des investigations de reconnaissance permettant de préciser le contexte d'apparition de désordres ainsi que la position, la géométrie et la profondeur des cavités, (ii) à réaliser des traitements dans le cas de cavités avérées présentant un risque

d'évolution vers la surface et (iii) à mettre en place des mesures de surveillance sur l'ensemble des zones sur lesquelles un aléa/risque non nul a été identifié.

Le guide propose ainsi tout un panel d'actions préventives priorisées, à décliner après la phase de caractérisation des niveaux d'aléa/risque : investigations géophysiques et géotechniques destinées à détecter et reconnaître les cavités, actions de traitement des cavités, actions de surveillance... La démarche est illustrée par le logigramme de la figure 2. Après chaque campagne d'investigations, il est nécessaire de réviser si nécessaire le zonage de l'aléa/risque sur le secteur étudié et de redéfinir ce plan d'actions, en tenant compte des résultats obtenus.

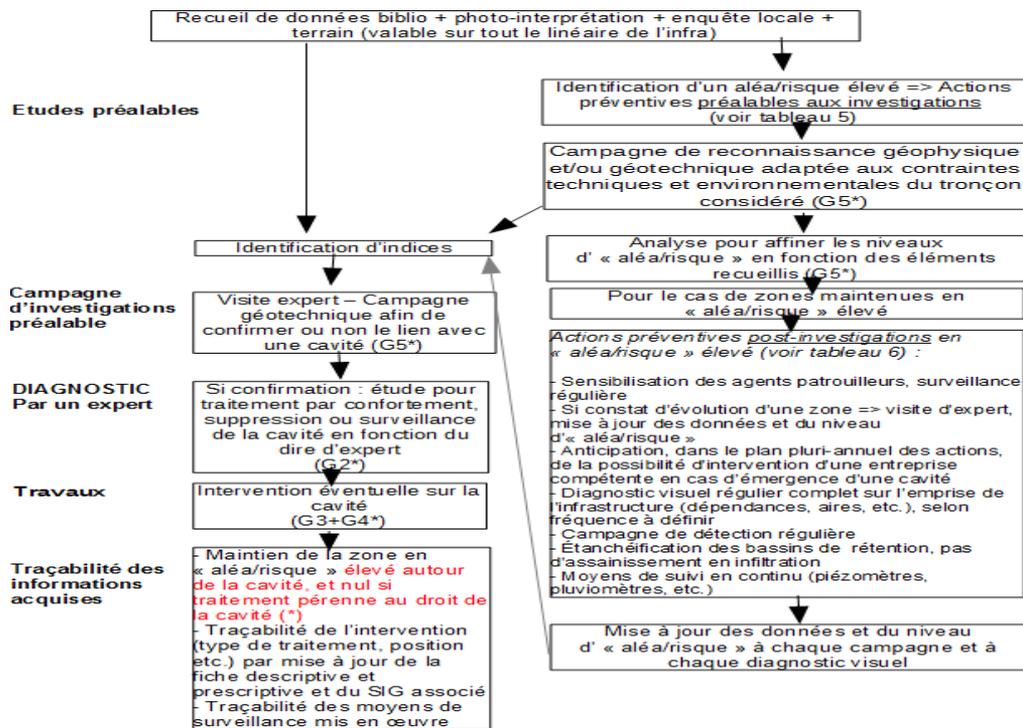


Figure 2. Logigramme présentant les étapes d'une démarche préventive pour un secteur qualifié en aléa/risque élevé

Afin d'aider le gestionnaire à choisir les investigations adaptées à la détection, à la reconnaissance et au traitement des cavités souterraines impactant son réseau, le guide présente une synthèse de l'ensemble des méthodes existantes, en renvoyant pour plus de détails à la littérature technique de la thématique. Les techniques de traitement, qu'elles agissent sur l'aléa ou sur les enjeux, font l'objet d'une présentation détaillant leurs avantages et inconvénients vis-à-vis des contraintes de gestion d'une infrastructure autoroutière (figure 3).

Objectif Méthodes	A/ Traitement des vides										B/ Protection des enjeux				
	A-1/ Maintien des vides					A-2/ Suppression des vides					B-1/ Renforcement de la structure	B-2/ Structure souple			
	Surveillance		Consolidation de la cavité			Remplissage				Terrassement		Effondrement		Radier	Géognelle
	Visuelle	Instrumentée	Maçonnerie ...	Partiel par le fond	Injection	Partiel par le fond	Injection	Total par le fond	Injection	Terrassement	Pilonnage	Foudroyage	Radier	Géognelle	
Accessibilité	oui						1		1	1	1		1	1	
	non														
Profondeur	faible (<15)	2c	2c			2a	2a/1	3a	1						
	moyenne (15-40)									2b		2b			
	grande (>40)											2c	2d	2d	
Superficie	limitée (> 1ha)														
	importante (< 1ha)		2c	2d	2d	2d		1							
Volume	limité (<8.000m³)														
	important (>8.000m³)		2c	2c		1		1					2d	2d	
Caractère stratégique			3a	3a	3a	3a					3b	3b		3a	
Maintien de la circulation			3c	3c			3c								
Milieu	rural														
	urbain									4b				2b	
Environnement					4a	4a	4a	4a	4a	4b	4b	4b	4b	4b	

bien adaptée
 précaution particulière
 inadapté

méthodes à retenir lors d'apparition de désordres en surface

Figure 3. Adaptation des méthodes de diminution de la vulnérabilité aux infrastructures autoroutières

Un focus est également fait sur les techniques de surveillance, que ce soit pour la recherche d'indices précurseurs de l'émergence d'une cavité, pour le suivi de l'évolution d'une cavité pré-identifiée ou pour le suivi des traitements entrepris pour garantir sa stabilité. Il peut s'agir d'une surveillance en surface : recherche visuelle d'indices précurseurs par patrouillage, suivi par instrumentation des déformations de surface ou des facteurs de dégradation d'une cavité. Si la cavité est accessible et que son état de stabilité permet d'assurer la sécurité des personnes, la surveillance peut être souterraine, via la réalisation d'inspections régulières, éventuellement complétées par des instrumentations (en fonds et/ou en surface).

Comme pour la phase de caractérisation de l'aléa/risque de l'infrastructure, la présence d'un expert garantira au gestionnaire l'atteinte des objectifs et du niveau de sécurité requis.

4. Recommandations dans le cadre de la gestion d'un événement

Aucune politique de gestion préventive du risque cavités souterraines ne permet d'écarter le risque d'émergence d'une cavité souterraine non détectée ou dont le diagnostic a conclu à un risque d'apparition de désordre à court terme. Un chapitre spécifique du guide est donc dédié à la gestion de crise et fournit les éléments essentiels au gestionnaire lui permettant de revenir dans les meilleurs délais à un fonctionnement satisfaisant de son réseau.

Le guide présente ainsi les différentes étapes de la gestion de crise, de l'alerte, nécessitant une coordination et une communication sans faille au sein du service gestionnaire, au retour à une situation sinon normale du moins permettant la reprise du trafic si besoin en mode dégradé (neutralisation de voie par exemple). Entre ces deux étapes, il aura été nécessaire de (i) mettre en sécurité les usagers et les agents et/ou opérateurs intervenant sur site (mise en place d'un périmètre de sécurité, fermeture des voies, signalisation...) et de (ii) réaliser un diagnostic visant à déterminer les

reconnaitances, traitements et/ou mesures de surveillance permettant de garantir la sécurité dans l'attente du confortement définitif. Celui-ci peut alors être décalé dans le temps, en fonction des contraintes du gestionnaire.

Il est recommandé à l'issue de l'épisode de gestion de crise, de réaliser un retour d'expérience afin de capitaliser les informations et de tirer les leçons de cet événement, dans un but d'amélioration des pratiques.

La gestion d'un événement nécessite qu'il ait été anticipé. L'anticipation en tant qu'action préventive concourt en effet, notamment par l'élaboration de protocoles dédiés, à résoudre plus rapidement une crise. Cette anticipation passe en premier lieu par la sensibilisation des agents patrouilleurs et de ceux acteurs de la gestion de crise, afin qu'ils puissent détecter et analyser rapidement les signaux précurseurs. Ils doivent être également parfaitement au fait des procédures d'urgence mises en place au sein de la structure.

Une bonne organisation en amont est également un facteur de réussite de la gestion d'un événement. Il est recommandé de pré-identifier les besoins en matériels et prestataires susceptibles d'intervenir dans ces situations, en contractant par exemple des marchés qui seront déclenchés au besoin. La chaîne décisionnelle et d'information au sein des services ainsi que celle de communication vers l'extérieur (préfet de zone, services de l'Etat, usagers, médias...) doit être également définie avant les événements.

5. Les autres apports du guide

Dans le but d'aider les concessionnaires à établir leur propre politique de gestion du risque, le guide se termine par un chapitre consacré d'une part à des exemples de gestion préventive du risque cavités souterraines déjà mis en œuvre sur autoroutes ou infrastructures linéaires de transport et d'autre part, à la présentation d'éléments d'aide à la rédaction de cahiers des charges pour les prestations susceptibles de faire l'objet d'une consultation (recensement des indices de cavités souterraines, expertise, diagnostic géotechnique, investigations géotechniques).

La traçabilité des données étant une priorité, une partie spécifique aborde les prescriptions minimales à respecter pour la constitution d'une base de données qui doit impérativement être mise à jour à chaque nouvelle information disponible.

6. Conclusions et perspectives

L'apparition soudaine d'effondrement ou la découverte de cavités souterraines au droit des infrastructures autoroutières nécessite des interventions en urgence pour d'une part, sécuriser les zones concernées et d'autre part, traiter les désordres et dommages. Les conséquences humaines, économiques et médiatiques associées à ces événements sont souvent importantes et peuvent engager la responsabilité des gestionnaires.

Le guide méthodologique de gestion du risque cavités souterraines sous infrastructures autoroutières a pour objectifs de sensibiliser les gestionnaires autoroutiers au risque induit par la présence de cavités souterraines et à les inciter à mener une politique de gestion préventive de ce risque.

Le guide propose d'une part une méthode de caractérisation de l'aléa puis du risque et d'autre part, une démarche préventive de gestion de ce risque. Il traite également de la gestion d'événements impactant le réseau autoroutier, afin que les gestionnaires aient les

éléments essentiels pour en limiter les conséquences, notamment en termes d'exploitation (retour le plus rapide possible à un fonctionnement du réseau).

Ce guide, en cours d'édition par le Cerema (parution attendue pour la fin de l'année 2020), pourrait être adapté à d'autres gestionnaires d'infrastructures de transports (routes nationales, départementales, voies ferrées) ou de distribution (énergie, eau...).

7. Références bibliographiques

- Berche V. (2009). Cartographie des risques sur itinéraires, rapport méthodologique. Convention DGPR – LCPC n° 0001567, 95 pages.
- Bérenger N. (2017). La gestion du risque cavités souterraines, guide à l'usage des collectivités. Cerema, 118 pages.
- Didier C., Watelet J.M. (2012). Plan de prévention des risques naturels, cavités souterraines abandonnées. MEDDE, 82 pages.
- Ouvrage collectif (2002). Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines. LCPC, Collection environnement, Les risques naturels, 132 pages.
- Ouvrage collectif (2008). Les marnières de Haute-Normandie, Méthodologies d'étude et de prévention, guide technique. LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 116 pages.
- Ouvrage collectif (2014). Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées, guide méthodologique. IFSTTAR, 111 pages.
- Ouvrage collectif (2016). Guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique. Ineris, 127 pages.
- Pinon C., Degas M. (2016). Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique, rapport d'étude. Ineris, 78 pages.