

RISQUES

Mettre en sécurité les cavités souterraines

Par Charles Kréziak, adjoint au directeur du département géosciences-risques du Cerema Ile-de-France, et Marie Degas, ingénieur à la direction des risques du sol et du sous-sol à l'Ineris

Outre leurs nombreuses responsabilités en matière de prévention du risque associé aux cavités souterraines abandonnées, les collectivités peuvent dans certains cas avoir la charge de travaux de mise en sécurité. Se pose alors la question du choix des techniques de confortement.

Dans les cas d'urgence avérée, comme un espace public menacé par un effondrement, imminent ou déjà survenu, d'une cavité souterraine, la collectivité se doit de réaliser les travaux de mise en sécurité. Ce type de travaux peut également être engagé, hors situation d'urgence, dans le but d'améliorer la prévention face aux risques induits par les vides souterrains et d'aménager de manière durable les territoires. Différentes techniques existent mais il peut être délicat de choisir la solution optimale car les travaux peuvent cibler différents objectifs et ils doivent être en adéquation avec les conditions propres à chaque site. Le présent article, qui s'appuie sur un guide technique paru en 2016, fournit quelques éléments de choix. Les techniques de prévention et/ou de mise en sécurité répondent usuellement à des objectifs précis et notamment :

- faire face à une menace de ruine imminente ;
- protéger les structures existantes sans risque immédiat ;
- permettre l'aménagement des surfaces sous-cavées, à des fins d'urbanisation ou pour la mise en place d'espaces fonctionnels (voirie, parking,



L'ESSENTIEL

- Les méthodologies de mise en sécurité des cavités souterraines sont conditionnées par l'objectif final recherché (niveau de sécurité recherché) et par les conditions propres à chaque site.
- Selon l'état et la configuration des vides, leur accessibilité et la sensibilité des enjeux à protéger, les travaux pourront intéresser tout ou partie de la cavité, maintenir le vide ou le supprimer voire ne concerner que les biens à protéger.
- Les contraintes attachées à certaines techniques peuvent les rendre inemployables dans certaines circonstances.

espaces verts, etc.). L'objectif étant identifié, le choix de la solution de mise en sécurité optimale est défini à l'issue d'une démarche logique qui s'appuie, en premier lieu, sur une connaissance suffisante de la cavité et des enjeux à protéger (au besoin via des études spécifiques complémentaires). Puis, en fonction des spécificités du site, du niveau de sécurité visé et de critères économiques, le choix s'oriente vers trois grands principes que sont la surveillance, le traitement des cavités ou l'action sur les enjeux allant de l'amélioration de leur résilience jusqu'à leur délocalisation.

L'inventaire des techniques de mise en sécurité ci-dessous n'est pas ex-

haustif mais illustre les deux catégories de méthodes envisageables :

- les mesures de traitement « directes » : actions sur la cavité pour éviter son évolution ;
- les mesures dites indirectes ou passives : actions sur les enjeux pour limiter ou empêcher les impacts des mouvements.

Travaux de confortement

Dans certains cas, les deux types de méthodes peuvent être employés de façon complémentaire. Une première démarche peut consister à conforter la cavité pour améliorer la stabilité sur le long terme. Ces travaux sont particulièrement adaptés lorsqu'on souhaite maintenir l'usage des vides souterrains ou les réutiliser pour une activité qu'elle soit économique, patrimoniale ou d'accès. Pour ce faire, la cavité doit impérativement être accessible dans des conditions de sécurité satisfaisantes. Classiquement, les travaux de confortement vont concerner les points de faiblesse de l'ouvrage souterrain, que sont :

- les toits où des boulonnages (ancrage par des barres en acier scellées au rocher) pourront être mis en œuvre

Principales mesures constructives

Mesures de traitement direct			Mesures de traitement indirect		
Confortement des ouvrages	Comblement total/partiel	Destruction	Renforcement structure	Fondations profondes	Adaptations réseaux
↓	↓	↓	↓	↓	↓
Maçonnerie Boulonnage Béton projeté ...	Fond / surface Matériaux Résistance ...	Effondrement Terrassement ...	Chaînage Radier ...	Pieux Puits ...	Géotextile Raccords souples ...



À Clichy-sous-Bois, les travaux de comblement de l'ancienne carrière de gypse appelée Fosse Maussoin sont réalisés par des moyens classiques de terrassement.

pour solidariser les blocs et bancs instables et ainsi restituer une portée résistante au-dessus des cavités. Selon les contextes, les boulons pourraient être associés à des grillages ou treillis, éventuellement recouverts de béton projeté, pour éviter les chutes de blocs centimétriques ou décimétriques dans les zones dégradées comme les passages de karsts notamment ;

- les piliers (masse rocheuse laissée en place lors de l'extraction) peuvent être renforcés pour garantir le report du poids des terrains de couverture vers la masse rocheuse sous-jacente : ceinturages par armature métallique, maçonnerie ou coffrage en béton permettent de restituer la résistance des piliers endommagés. Des piliers artificiels pourront être réalisés localement dans les secteurs où les distances entre appuis (ou portées au toit des cavités) sont excessives.

À l'issue des opérations de consolidation, les vides souterrains devront être inspectés régulièrement afin de vérifier la tenue dans le temps de ces dispositifs.

Pour garantir l'absence d'évolution des vides souterrains, les solutions les plus efficaces suppriment les vides, soit en les comblant, soit en terrasant les terrains encaissants puis en remblayant l'excavation. Les techniques de comblement consistent à remplir les cavités soit par poussage de matériaux depuis le fond lorsque

la cavité est accessible, soit depuis la surface (injection) en déversant, via des forages, des matériaux de différentes compositions. Les matériaux et les conditions de mise en œuvre dépendent des aménagements prévus en surface et des contraintes spécifiques aux sites.

Techniques d'injection

Pour les injections, les méthodes les moins coûteuses remplissent gravitairement des matériaux inertes voire recyclés (soit secs soit additionnés d'eau) dans des forages d'un diamètre suffisant. Cette technique permet de réduire le volume des vides à des valeurs résiduelles et de garantir l'absence d'évolution vers la surface. Dans le cas où les aménagements de surface et/ou leurs fondations induisent des surcharges, il est nécessaire de garantir l'absence de vides résiduels et de conférer au comblement des propriétés mécaniques performantes. Le traitement de la cavité est alors réalisé par des techniques d'injection, où un mélange fluide comportant une charge minérale et du ciment (coulis) est introduit sous pression dans le vide. Les comblements et injections ne permettant pas d'observer, de visu, la suppression des vides, des forages de contrôle sont nécessaires pour réceptionner les travaux.

Lorsque la profondeur des vides et l'état des terrains de surface le permettent, une alternative est possible

en ouvrant la cavité depuis la surface (par effondrement ou par excavation). Celle-ci est ensuite comblée par des matériaux correctement compactés à l'aide de moyens classiques de terrassement. Ce fut ainsi le cas pour une ancienne carrière souterraine de gypse à Clichy-sous-Bois (Seine-Saint-Denis), dont les opérations de comblement ont débuté en 2014 et se poursuivent encore aujourd'hui.

Étude spécifique

Dans certaines configurations (répartition diffuse des vides, projets neufs ou enjeux peu sensibles), il peut s'avérer plus intéressant de concevoir des enjeux résistant aux mouvements de terrains redoutés. Ces techniques dites « passives » peuvent soit viser à rigidifier les structures pour résister aux tassements de sol (en cas de fontis par exemple), soit incorporer des éléments déformables qui absorberont les déformations (affaissement ou tassement).

Pour les constructions neuves, les descentes de charges sont classiquement reportées en profondeur (si possible sous le niveau des cavités) et la structure est renforcée par des chaînages et des poutres (au niveau des planchers et des murs porteurs). Pour les constructions existantes, des reprises en sous-œuvre peuvent être réalisées (micropieux) en association avec un renforcement des fondations existantes (longrine).

Enfin, lorsque les aménagements en surface peuvent accepter des déformations significatives sans compromettre la sécurité des usagers ou la pérennité des usages (espaces verts, voirie...), on cherchera à atténuer les impacts en surface des dégradations des cavités sous-jacentes en interposant des géogrilles de renforcement à proximité de la surface du sol.

En préalable de toute réalisation, une connaissance approfondie du site est indispensable. Pour cela, une étude spécifique permettra de préciser :

- l'extension des vides et leur calage par rapport à la surface ;
- l'état de conservation de la cavité ;
- les caractéristiques géométriques des cavités et le volume des vides résiduels ;
- les conditions environnementales (présence et usage de la nappe, de faune particulière...); ●●●

Des solutions pour mettre en sécurité les cavités souterraines

GÉOGRILLES DE RENFORCEMENT « ANTI-FONTIS »

Pour l'aménagement du parc départemental des Lilas à Vitry-sur-Seine (Val-de-Marne) sur d'anciennes carrières, une géogrille de renforcement « anti-fontis » a été dimensionnée et mise en place à une profondeur de 1 m. Recouvert de terre végétale, ce filet de polymère peut laisser passer des racines, autorisant la plantation d'arbres. L'ampleur des effondrements est atténuée par la mise en tension de la géogrille qui retient les terrains de surface (système dit parachute) et est capable de supporter le poids des matériels d'entretien. Ces dispositifs, économiquement avantageux par rapport à des solutions de traitement des vides, imposent cependant des reprises après sollicitation : l'absorption des déformations étant temporaire.



Une géogrille a été installée un mètre sous la surface, dans le parc interdépartemental des Lilas de Vitry-sur-Seine.

- - les désordres antérieurs susceptibles d'avoir déstabilisé les terrains.

Les études doivent notamment répondre aux questions suivantes :

- la cavité est-elle accessible ? L'accessibilité au vide offre un panel de solutions assez large et il peut être intéressant, lorsque cela est techniquement et économiquement possible, de créer un accès. Cependant, le choix de solutions de mise en sécurité par confortement des vides impose l'accessibilité aux vides, dans des conditions de sécurité suffisantes pour la conduite des travaux et pour les inspections à long terme (cheminement, ventilation, présence d'eau...);
- quelle est l'emprise à traiter ? La prise en compte de la propagation latérale des désordres conduit souvent à mettre en sécurité les vides sur une extension plus large que la seule emprise de l'enjeu à protéger (notion de marge de sécurité). Dans certains cas, cette nécessité pourra imposer la réalisation de travaux à l'aplomb de propriétés avoisinantes, nécessitant l'obtention de l'accord des propriétaires concernés ;
- à quelle profondeur se situe le vide ? Des profondeurs importantes sont souvent réhabilitables pour des solutions de type terrassement, en particulier dans le cas où des enjeux de surface existent à proximité, et plus encore en milieu urbain ;
- y a-t-il des contraintes environnementales particulières ? L'agressivité

du milieu est à prendre en compte pour garantir la pérennité des dispositifs de mise en sécurité. Il importe aussi de garantir que les solutions retenues seront sans impact sur le milieu. Pour les matériaux de comblement, en particulier dans le cas d'emploi de matériaux dits « alternatifs » (autres que naturels), il est nécessaire de procéder préalablement à une étude technique attestant du caractère inerte des produits employés.

Mission géotechnique

En phase travaux, outre le contrôle des conditions de réalisation visant la vérification de l'atteinte des objectifs fixés, il est recommandé d'imposer une traçabilité des matériaux utilisés pour limiter la responsabilité ultérieure éventuelle du maître d'ouvrage. Les travaux envisagés doivent être menés en tenant compte des objectifs de protection de la faune et de la flore sauvage : par exemple, avant la fermeture d'accès à des vides souterrains,

on vérifiera en particulier la présence éventuelle de chiroptères.

Au regard de la particularité de ce type de travaux, il est vivement conseillé aux maîtres d'ouvrage de se faire assister par un maître d'œuvre (obligation dans le cadre de marchés publics) qui aura la responsabilité des choix techniques. Il est recommandé de faire exécuter préalablement et de manière indépendante une mission géotechnique (encadrée par la norme NF-P 94-500 de novembre 2013) afin de préciser l'ensemble des paramètres conditionnant la solution de traitement. En fin d'exécution, il est impératif de faire établir un dossier de recollement (dossier des ouvrages exécutés) par l'entreprise pour conserver la mémoire et les caractéristiques des travaux. Après transmission aux services de l'État (DDT), ces éléments pourront conduire à engager une procédure de révision des règles d'urbanisme en vigueur au droit des zones traitées. ●

POUR EN SAVOIR +

- « Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines abandonnées d'origine anthropiques », à télécharger gratuitement : bit.ly/2T2NjVv
- « Guide Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol – Analyse et gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement liés aux mécanismes de dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol », à télécharger gratuitement : bit.ly/2R6oHt1