



# Bilan des techniques de mise en sécurité des cavités souterraines

26 septembre 2022

### **Catherine PINON**





Ce rapport a été rédigé dans le cadre du module 4, activité 1, du projet Interreg RISSC.

#### **PRÉAMBULE**

Le présent document a été réalisé dans le cadre du projet INTERREG RISSC, soutenu financièrement par le Fonds Européen de Développement Régional, la Région Wallonne et les opérateurs du projet.

Ce rapport a pour but de synthétiser les observations et actions menées en lien avec le module de travail concerné.

La responsabilité des auteurs ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, les auteurs ne peuvent pas être tenus responsables en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par les auteurs dans le cadre du projet, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur éventuel. Par conséquent, la responsabilité des auteurs ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective.

L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. Les auteurs dégagent également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet du projet.



### **TABLE DES MATIÈRES**

1		Contexte et objectifs	5
2		Démarche mise en place	
3		Domaine d'application	
4		Préalables à la mise en sécurité	7
	Α.	. Quelles urgences ?	7
	В.	. Comment choisir la méthode de traitement ?	8
	C.	Dans quel(s) objectif(s) ?	9
5		Méthodes de traitement	10
	Α.	. Conserver la cavité	12
	В.	. Combler la cavité	14
	C.	. Supprimer ou détruire la cavité	17
	D.	. Les techniques « passives »	18
6		Mises en œuvre en Wallonie et dans les Hauts-de-France	20
	A.	. Comparatif	20
	В.	. Solutions alternatives au comblement par béton	22
	C.	. Cas particuliers des vides d'origine karstique	24
	D.	. Mesures de contrôle	26
7		Synthèse et perspectives	27
8		Bibliographie	31
9		Annexes	34



### **TABLE DES FIGURES**

Figure 1 : Exemple de diagramme de gestion du risque cavités (en bleu : phase informative ; en ve	rt:
phase de diagnostic ; en saumon : phase de gestion de la mise en sécurité)	8
Figure 2 : Schéma présentant les différentes mesures de traitement directes (hors méthodes de	
suppression de la cavité) [34]	11
Figure 3 : Schéma présentant les différentes mesures de traitement indirectes [34]	11
Figure 4: Les principales mesures constructives [34]	
Figure 5 : Boulonnage du toit d'une galerie (France)	13
Figure 6 : Reprise d'un pilier par maçonnerie en Hauts-de-France	
Figure 7 : Cerclage-ceinturage d'un pilier (France)	
Figure 8 : Pilier maçonné en Hauts-de-France	14
Figure 9 : Soutènement par portique en Hauts-de-France	14
Figures 10 : Comblement par déversement gravitaire (France)	
Figure 11 : Injections de béton en Wallonie	
Figure 12 : Chantier d'injections de coulis en Hauts-de-France	15
Figure 13 : Barrage en béton en Wallonie	
Figure 14 : Barrage en big bag de mousse en Hauts-de-France	16
Figure 15 : Principe de la méthode de terrassement-comblement de catiches	17
Figure 16 : Pieu traversant une cavité en Hauts-de-France	18
Figures 17 : Mise en place d'une géogrille (géosynthétique) en Hauts-de-France	19
Figures 18 : Exemple d'une dalle en béton armé fermant une catiche en Hauts-de-France	19
Figures 19 : Exemple d'une sécurisation d'un puits de mine en Wallonie	20
Figure 20 : Définition et principe de la marge de sécurité pour un traitement par comblement en	
France [34]	21
Figure 21 : Limite du foudroyage en souterrain en Wallonie	22
Figure 22 : Stabilisation d'un barrage par injections de béton en Wallonie	22
Figure 23: Principe du comblement par mousse expansive [34]	23
Figure 24 : Mise en place d'un géosynthétique instrumenté au-dessus d'une catiche à Lille (Hauts-	-
de-France)	24
Figure 25 : Remblaiement bloqué à sa base par une dalle en béton armée [14]	24
Figure 26 : Remblaiement d'un effondrement à l'aide de matériaux granulaires présentant une	
granulométrie étagée [14]	25



#### Résumé:

Le module 4 du projet RISSC a pour objectifs d'analyser et de développer des solutions adaptées pour réduire le risque lié aux cavités souterraines, à l'échelle transfrontalière France-Belgique (Hauts de France – Wallonie).

Dans ce cadre, l'activité 1, intitulée « bilan des méthodologies et techniques de prévention du risque lié aux cavités », est pilotée par l'Ineris. Cette étude est basée sur un retour d'expérience réalisé auprès de maitres d'ouvrage belges et français en matière de gestion du risque et notamment des travaux de mise en sécurité. Elle a été complétée par une recherche bibliographique et des interviews ciblés avec des experts en gestion des cavités du côté wallon, comme du côté français.

Le document ne traite pas des techniques de surveillance ou encore des modalités de déplacement des enjeux de surface. Seules les méthodes de traitement sont présentées. Il existe de nombreuses techniques applicables et ce document propose une description de celles les plus souvent pratiquées, en phase préventive (lorsque l'on a connaissance de la présence de vides mais que les désordres n'ont pas encore affecté la surface) comme en phase de crise, après effondrement (formation de fontis par exemple). Des fiches récapitulatives des principales grandes familles de traitement sont jointes en annexe. Le comblement reste la solution la plus utilisée de part et d'autre de la frontière.

L'analyse des données a également permis de dégager les points de similitude ou de différence entre Wallonie et Hauts-de-France.

#### Mots-clés:

Cavités souterraines, Mouvements de terrain.

#### Pour citer ce document :

Bilan des techniques de mise en sécurité des cavités souterraines, PINON C., 2022, Rapport de synthèse du Module 4 - activité 1 du projet INTERREG RISSC.



### 1 Contexte et objectifs

En raison d'une géologie et d'une histoire industrielle similaire, les régions de Wallonie et des Hauts-de-France comptent sur leur territoire de nombreuses cavités souterraines, qu'elles soient d'origine anthropique (mines, carrières, etc.) ou naturelles (karst, etc.). De ce fait, des problèmes de mouvements de terrain se rencontrent localement de part et d'autre de la frontière franco-belge, tant en zone habitée que constructible. Ils touchent aussi certaines grandes infrastructures publiques transfrontalières (routes, voies ferrées, réseaux d'énergie, pipelines, etc.) avec des conséquences importantes sur l'implantation de leur tracé et leur coût de réalisation. Ces phénomènes potentiels induisent une menace à l'égard de la sécurité des personnes, des biens immobiliers, des projets d'aménagement et de l'attractivité socioéconomique de certains territoires.

Des deux côtés de la frontière, les politiques publiques de prévention et de gestion des risques du sous-sol visent des objectifs communs. Elles déploient néanmoins des outils différents et perfectibles. Ainsi, le projet Interreg RISSC a été pensé pour apporter une réponse coordonnée au bénéfice de la sécurité des populations dans une perspective transnationale et européenne. Réalisé avec le soutien du Fonds Européen de Développement Régional, il réunit des partenaires actifs en Wallonie et Hauts-de-France en matière de caractérisation, prévention et gestion des risques du sous-sol.

Le projet RISSC est organisé en trois modules techniques dont le module 4, coordonné par l'Ineris, qui a pour objectifs d'<u>analyser et de développer des solutions</u> adaptées pour <u>réduire le risque lié aux cavités souterraines</u>, à l'échelle transfrontalière.

Dans le cadre de l'activité 1 de ce module 4, l'Ineris a ainsi mené un retour d'expériences sur plusieurs secteurs exposés au risque de mouvements de terrain liés aux cavités de part et d'autre de la frontière pour lister les différentes techniques de mise en sécurité utilisées. Le présent rapport synthétise ce travail. Des références, pour celles et ceux qui désirent en savoir plus (certaines disponibles sur internet), un glossaire et des fiches récapitulatives, comprenant les avantages et inconvénients des principales grandes familles de traitement, se trouvent en fin de ce document.

Le présent document ne traite pas des techniques de surveillance<sup>1</sup> qui font l'objet de l'activité 2 du module 4 du projet Interreg RISSC, ou encore des modalités de déplacement des enjeux de surface<sup>2</sup>. Seules les méthodes de traitement sont présentées ici. Par ailleurs, les différentes typologies de cavités souterraines et les instabilités associées ne sont pas reprises dans ce document. Ces informations sont explicitées dans le module 3 (activité 1) du projet RISSC.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Dans les Hauts-de-France, les conditions d'évacuation, d'expropriation et de financements s'y référant sont traitées dans le guide de gestion des cavités à l'usage des maires [13].



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Voir aussi le guide « surveillance des cavités souterraines » [12].

### 2 Démarche mise en place

Dans un premier temps, une enquête par retour d'expérience a été menée afin d'identifier les différentes démarches transfrontalières mises en œuvre pour gérer le risque de mouvements de terrain lié aux cavités. Ainsi, un questionnaire de 15 items courts à choix multiples (Annexe 2) a été adressé en octobre 2018. Le but du questionnaire était de compiler les informations et de cibler les opérateurs concernés en France et en Belgique. Ainsi, les acteurs suivants ont été consultés :

- pour les Hauts-de-France : 11 communes et 2 bureaux d'étude en géologie/géotechnique ;
- pour la Wallonie : 1 intercommunale<sup>3</sup>, 3 bureaux d'étude en géologie/géotechnique et 1 exploitant minier<sup>4</sup> ;
- 7 organismes partenaires de l'Interreg RISSC.

Ce questionnaire, mis en ligne pendant un mois et demi a permis de recueillir 44 % de réponses (soit 11 retours, 4 belges et 7 français). Ce faible taux de réponse peut s'expliquer par le délai assez court du temps de réponse, imposé par le site gratuit de questionnaire en ligne, mais également en raison d'un ressenti de « non-légitimité » d'y répondre de certains destinataires.

Environ 30 % des répondants sont des maitres d'ouvrage et la moitié des répondants assiste le maitre d'ouvrage (services des carrières, Cerema, Ineris et Service Public de Wallonie) dans les projets de gestion du risque cavité.

En outre, ce questionnaire a permis d'intéresser au projet Interreg RISSC les villes et entités concernées par les cavités en Wallonie et Hauts-de-France.

À l'issue de cette enquête par questionnaire mais sans se restreindre aux seuls répondants, des entretiens ou contacts plus ciblés ont été organisés, entre 2019 et 2021. Ainsi ont été contactés :

- Madame Lorraine DEWAIDE de l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP) ;
- Madame Patricia RUSCART et monsieur Daniel PACYNA de la Cellule d'Avis et de Conseils Effondrement (CACEff) du Service Public de Wallonie (SPW);
- Messieurs Jean-Marc WATELET et Marwan AL HEIB de l'Ineris;
- Messieurs Gaëtan CHEPPE et Guillaume FAUCHEUX du Service Commun des Carrières Souterraines de la Métropole Européenne Lilloise;
- Monsieur Philippe DELFORGES de la Division des Charbonnages du Borinage;
- Monsieur Pascal DEPARIS du Service Gestion des Risques de la Ville d'Amiens;
- Monsieur le Professeur Olivier KAUFMANN de l'Université de Mons (géologie et géophysique) ;

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Même si le projet RISSC concerne essentiellement les cavités hors mine, les méthodes et outils de gestion et de traitement sont similaires en mines et en carrières souterraines. Il est paru intéressant d'interroger un exploitant minier belge, toujours en activité, sur cette thématique.



6/34

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> En Belgique, on appelle intercommunale une association de plusieurs communes (au moins deux) afin d'accomplir des missions de service public d'intérêt communal.

- Monsieur Georges MICHEL de la Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites souterrains (CWEPSS);
- Monsieur Frédéric VAN DIJCK de la Cellule Aménagement-Environnement du Service public de Wallonie (SPW).

Nous les remercions pour leur disponibilité, leurs précieux témoignages et la mise à disposition de leurs archives.

<u>Remarque</u>: certaines données restent propriétaires du client de l'étude, en France comme en Belgique (études archivées par Ineris, Cerema, bureaux d'étude, SPW). Toutefois, d'autres archives sont consultables, en particulier celles des villes et collectivités françaises, celles de l'exploitant minier belge et celles du SPW (partiellement).

En complément, une recherche bibliographique a été menée pour compléter ces éléments et réaliser un inventaire des différentes méthodologies et techniques de sécurisation applicables à la gestion du risque lié aux cavités.

### 3 Domaine d'application

L'enquête transfrontalière, les entretiens ciblés et la recherche bibliographique sur les méthodes de mise en sécurité ont montré que les gestionnaires impliqués de part et d'autre de la frontière (collectivités, organismes publics, exploitants et bureaux d'étude) sont confrontés à des cavités de tous types (carrières, mines, puits, sapes de guerre, souterrains refuges, vieux égouts, karsts, etc.), en majorité situées entre 0 et 20 m de profondeur et en général en milieu urbanisé ou sous voirie.

### 4 Préalables à la mise en sécurité

### A. Quelles urgences?

En présence d'un site sous-cavé, en Wallonie comme dans les Hauts-de-France, deux situations sont possibles :

- 1. un effondrement de terrain vient d'avoir lieu (phase « post-effondrement »): dans ce cas, malgré l'urgence de la situation de crise (arrêté de péril sur bâtiments menacés, délocalisation des enjeux à proximité, coupure de voirie et de réseaux...), il convient, a minima, de mener une expertise pour identifier l'origine et le mécanisme de l'effondrement. Cette première étape permet d'adapter la solution technique pour une sécurisation optimale du site. Parmi ces études préliminaires classiques, il y a l'inspection et le diagnostic des vides souterrains autour de la zone effondrée, les recherches en archives, l'analyse des études antérieures, des documents historiques, les reconnaissances géologiques-géotechniques (géophysique, sondages, décapage à la pelle, etc.), la création de puits d'accès...;
- aucun désordre n'a eu lieu en surface, ce qui reste heureusement la situation la plus courante : il convient de mener une étude de hiérarchisation des risques en fonction de l'état des cavités et en fonction de la nature des enjeux existants et à venir [20][40].



Cette étude permettra de mettre en évidence les secteurs à mettre en sécurité de manière prioritaire et de définir au mieux les modes de traitement [13][35][39].

### B. Comment choisir la méthode de traitement ?

En présence d'une cavité supposée ou connue, qu'il soit public ou privé, le propriétaire doit, après l'avoir déclarée aux autorités compétentes (au maire<sup>5</sup> en France, au Bourgmestre<sup>6</sup> en Wallonie), mettre en place une démarche coordonnée et logique de gestion du risque. La démarche proposée en France pour gérer au mieux le risque lié à la présence de cavités souterraines est schématisée en Figure 1. Elle est également appliquée en Wallonie.

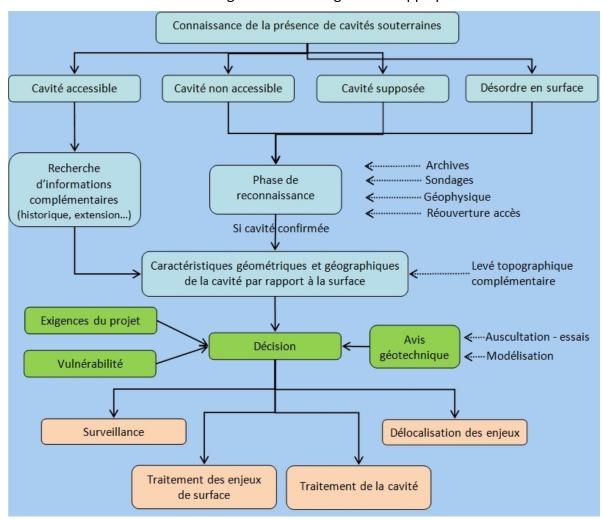


Figure 1 : Exemple de diagramme de gestion du risque cavités (en bleu : phase informative ; en vert : phase de diagnostic ; en saumon : phase de gestion de la mise en sécurité)

En premier lieu, il est nécessaire de rassembler les informations disponibles sur cette cavité. Si les informations ne sont pas suffisantes, il faudra alors mener des investigations afin d'établir un diagnostic le plus complet possible de la cavité [20][35][13][39][40]. Il est

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Conseillé et aidé si nécessaire par la Cellule d'Aide et de Conseils Effondrements (CACeff) du Service Public de Wallonie.



<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> En vertu de l'article L563-6 du Code de l'environnement.

également nécessaire de caractériser les enjeux exposés au risque (actuels et futurs = vulnérabilité) afin d'adapter la décision et la solution de gestion de la cavité.

En fonction des caractéristiques de la cavité, des enjeux en surface et des exigences du projet (par exemple : rendre constructible la surface, conserver la cavité ouverte ou éviter au maximum les nuisances du chantier...), il est alors possible de s'orienter vers 3 grands principes : surveiller l'évolution des cavités, les traiter ou délocaliser les enjeux.

Le choix du mode de traitement dépend :

- du niveau de sécurité recherché (tassements résiduels admissibles en surface) pour les enjeux en surface et des objectifs à atteindre en termes de maîtrise du risque et de la destination du site (prévention du risque, réhabilitation de la surface, conservation des vides);
- des configurations de site et des caractéristiques du milieu dans lequel le traitement est envisagé (accessibilité, volume à traiter, présence d'eau, risques en souterrain pour le personnel...).

À cette liste s'ajoutent les critères techniques et économiques.

### C. Dans quel(s) objectif(s)?

Dans le cadre d'une démarche générale de prévention, le choix du meilleur traitement doit correspondre à des besoins précis de mise en sécurité qui peuvent être liés à des objectifs de nature différente :

- faire face à une menace de ruine imminente de la cavité souterraine (cloche de fontis proche de la surface, chute récente de blocs, pilier désagrégé...).
   Il s'agit alors de mettre en place rapidement des mesures de prévention élémentaires : évacuation puis délocalisation des enjeux et repérage en surface de la zone de risque avant traitement par comblement ou suppression de la cavité, couplé à une surveillance des terrains avoisinant le secteur;
- protéger les structures existantes en surface.
   La protection du bâti existant, des voies publiques ou des réseaux enterrés (notamment les conduites d'eau) impose de limiter les mouvements résiduels en surface pour empêcher les dégâts sur les structures, superficielles ou enterrées. Les traitements adaptés feront alors appel à des techniques de remblaiement complétées, si besoin, par des injections de clavage. Il est enfin possible de ne traiter que les structures existantes (renforcement des structures, reprises en sous-œuvre, adaptation des réseaux<sup>7</sup>);
- à des fins d'urbanisation :
  - en agissant directement sur le futur bâti et les voiries éventuellement associées par l'utilisation notamment de fondations adaptées (superficielles renforcées ou profondes reposant sur un horizon stable en-dessous des

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Il est conseillé dans des secteurs sous-cavés d'utiliser, pour les réseaux, des raccords souples et des aciers déformables qui « encaisseront » certains mouvements de terrain (tassement, affaissement...) sans causer de fuite, ni de rupture.



- cavités) ou de techniques de renforcement indirect, les cavités pouvant être remblayées ou non ;
- en agissant sur les cavités par remblaiement ou effondrement afin de présenter un certain niveau de garantie de stabilité de la surface au droit ainsi qu'aux abords des cavités;
- pour les zones d'espaces verts, de loisirs, parc, parking... en éliminant tout risque d'effondrement par remblaiement ou par utilisation de géosynthétiques;
- l'intérêt de conserver les cavités souterraines ouvertes (dans le cadre d'un projet d'aménagement ouvert au public, comme un musée ou tout autre établissement à caractère troglodytique). Soulignons que la perspective de conserver un vide se traduira par sa mise en sécurité et par une surveillance organisée (visuelle et/ou instrumentée) et régulière dans le temps [12][39].

Dans tous les cas, les finalités du traitement sont les suivantes :

- présenter un certain niveau de garantie de stabilité de la surface dans le long terme<sup>8</sup>;
- valoriser les terrains de surface ;
- réduire, voire supprimer le risque associé aux cavités.

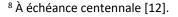
Toute méthode et/ou matériau employé doivent bien entendu satisfaire aux exigences environnementales du site.

### 5 Méthodes de traitement

Il existe de nombreuses méthodes de traitement pour mettre en sécurité la surface vis-à-vis du risque lié aux cavités souterraines. L'objectif du présent document n'est pas d'en faire un inventaire exhaustif mais de détailler les techniques les plus couramment utilisées en Wallonie et Hauts-de-France. Elles se classent en deux catégories :

- les mesures de traitement dites directes ou actives (Figure 2): on entend par méthodes directes, les méthodes qui consistent à traiter directement la cavité, il s'agit des méthodes de confortement, de comblement et de suppression des vides ;
- les mesures de traitement dites indirectes ou passives (Figure 3): il s'agit des méthodes qui ne concernent pas directement la cavité, mais qui ont pour objectif de sécuriser les enjeux en limitant ou empêchant les effets en surface (ou sur les structures proches de la surface) des mouvements liés à la présence de la cavité.

Il est parfois nécessaire, dans certains contextes, d'associer deux catégories de mesures constructives (directes et indirectes) : les fondations profondes sont très souvent assorties de l'injection préalable des cavités par exemple.





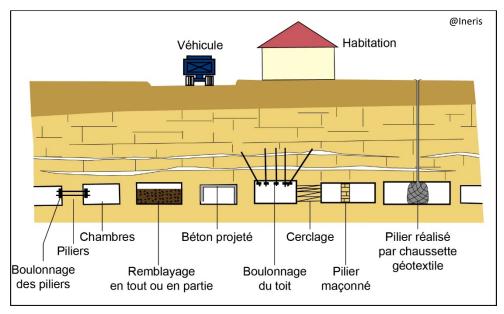


Figure 2 : Schéma présentant les différentes mesures de traitement directes (hors méthodes de suppression de la cavité) [34]

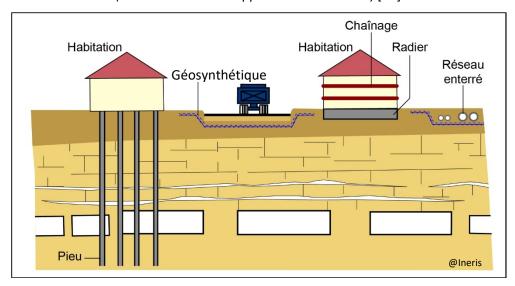


Figure 3 : Schéma présentant les différentes mesures de traitement indirectes [34]

La Figure 4 récapitule les principales mesures constructives mentionnées dans la suite du rapport. En annexe du présent document, des fiches synthétiques exposent les rôles, les principes, les techniques, les avantages et les inconvénients de ces principales techniques.



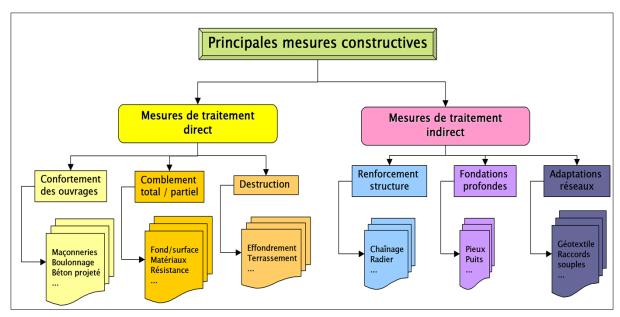


Figure 4: Les principales mesures constructives [34]

### A. Conserver la cavité

Le confortement est un moyen de traitement des cavités souterraines permettant de maintenir ou rétablir une stabilité suffisante à plus ou moins long terme. Ces travaux de confortement sont limités par deux facteurs essentiels qui sont : l'accessibilité à la cavité et les conditions de sécurité dans celle-ci.

Si ces techniques sont utilisées en Hauts-de-France, en particulier lorsque l'on réutilise les cavités comme musées, champignonnières, lieux d'exposition ou tout autre type d'activité, elles semblent peu usitées en Wallonie. En effet, ces méthodes sont pratiquées plus spécifiquement dans les anciennes cavités de calcaire grossier (nombreuses en Hauts-de-France), massif plus résistant et homogène que dans la craie (matériau principalement exploité dans les carrières wallonnes). On peut citer :

#### le boulonnage :

Le confortement par boulonnage (appelé aussi clouage, Figure 5) permet de supporter les bancs ou les blocs désolidarisés du toit et de freiner les mouvements de paroi au niveau des piliers. Le boulonnage a donc un rôle de soutien, de confinement et de renforcement du massif. Il peut être associé à la pose de grillages (ou treillis soudé), en particulier dans les zones fracturées et karstifiées. Après la mise en place de ces boulons, du béton peut être également projeté sur le toit et les parements des galeries pour un meilleur confinement.





Figure 5 : Boulonnage du toit d'une galerie (France)

#### • le renforcement des piliers :

Le confortement par ceinturage-cerclage (Figure 7) ou reprise de maçonnerie (Figure 6) intervient lorsqu'un pilier naturel est trop endommagé pour assurer son rôle d'appui. Le but de cette technique est de contenir les déformations tout en augmentant la capacité de portance.



photo@Ineris

Figure 6 : Reprise d'un pilier par maçonnerie en Hauts-de-France

Figure 7 : Cerclage-ceinturage d'un pilier (France)

Le confortement par projection d'une coque de béton ou de résine est un type de confinement permettant de minimiser l'écaillage et la dégradation du massif rocheux.

#### • l'édification de piliers artificiels :

Le confortement par construction de pilier maçonné (Figure 8) est mis en œuvre pour reprendre la portance de la cavité jugée insuffisante et/ou lorsque la portée du toit entre deux piliers est trop importante ou montre des signes d'instabilités de type fractures mécaniques ou flambage.







Figure 8 : Pilier maçonné en Hauts-de-France

Figure 9 : Soutènement par portique<sup>9</sup> en Hauts-de-France

Le pilier doit être fondé sur le « bon sol », c'est-à-dire sur la roche en place et non sur le remblai qui peut avoir été laissé au sol des cavités. Le clavage ou matage, entre la partie supérieure du pilier et le toit de la cavité, doit être aussi parfait que possible, en ne laissant subsister aucun vide sur toute la surface du pilier afin que la transmission des efforts soit totale [27].

### • les portiques ou le cintrage :

Le confortement par mise en place de portiques (Figure 9) ou de cintres métalliques ou béton est un type de soutènement porteur. Plaqué le plus directement possible au toit des galeries, il maintient la structure en la « supportant » de façon directe.

La pose de portiques ou cintres métalliques est souvent accompagnée de mise en place de plaques de blindage au toit ou sur l'ensemble des parements afin d'assurer une meilleure tenue des galeries<sup>10</sup>.

Pour ces travaux de confortement où l'espace souterrain reste accessible, il convient de maintenir un minimum de surveillance pour vérifier, d'une part que les secteurs non traités n'évoluent pas et d'autre part que les confortements mis en place ne se dégradent pas et continuent d'assurer leur rôle.

### B. Combler la cavité

Le comblement de la cavité reste la solution la plus efficace et la plus pérenne pour assurer la sécurité des terrains de surface. En fonction des enjeux et des projets futurs de surface, le remblayage pourra être partiel (un vide résiduel plus ou moins important est laissé en tête de la cavité) ou total, avec un éventuel clavage sous pression pour assurer la complétude du comblement (obturer les vides résiduels au toit de la cavité). Pour restituer les caractéristiques mécaniques des terrains de recouvrement (en vue de nouvelles constructions par exemple), on a recours à des injections de traitement.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Pour assurer un meilleur contact et augmenter l'efficacité de ce type de soutènement, un « garnissage » peut être mis en place entre les plaques et la roche.



<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> ou cadre.

Les solutions de traitement par comblement restent les plus utilisées en Hauts-de-France comme en Wallonie. Les matériaux de comblement utilisés dépendent des contraintes de mise en œuvre :

• pour le déversement gravitaire depuis la surface (remplissage des cavités sans clavage, Figures 10), les matériaux utilisés sont dits « tout-venant », comme les sables, les graves, les granulats calcaires, les terres de fouilles, voire des matériaux issus de démolitions ou éventuellement des matériaux alternatifs. Cependant dans ce dernier cas, il devra être démontré l'absence d'impact potentiel de ces matériaux sur l'environnement en général, et sur les eaux souterraines en particulier [15]. Cette technique par déversement gravitaire est peu adaptée pour des profondeurs de cavités supérieures à 30 - 40 m pour des raisons de réalisation de foration (précision des implantations, diamètre, tubage, déviation etc.);





Figures 10 : Comblement par déversement gravitaire (France)

• pour **les injections** (mélange sous pression capable de durcir dans le temps et de remplir totalement la cavité, Figure 11 et Figure 12), les coulis (y compris le béton), au sens général, comprennent toujours un liant hydraulique associé à une charge inerte constituée d'un matériau noble (sable ou « sablon »). Ces techniques de comblement par injections, opérées en forages de petit diamètre et systématiquement avec tubage, sont utilisables jusqu'à des profondeurs plus importantes, voisines de 70 – 80 m.



Figure 11 : Injections de béton en Wallonie



Figure 12 : Chantier d'injections de coulis en Hauts-de-France



Dans le cas de comblement limité à une partie de la carrière, des barrages sont disposés afin de confiner le coulis ou remblai à l'emprise traitée (Figure 13 et Figure 14). Le passage entre les différentes zones de la cavité peut être maintenu par le biais de « tunnel » ou par la création de puits d'accès depuis la surface.





Figure 13 : Barrage en béton en Wallonie

Figure 14 : Barrage en big bag de mousse en Hautsde-France

La détermination du volume de remplissage des vides francs ne présente pas de difficultés particulières. Par contre, l'évaluation des pertes en matériau dues aux fuites (problème de barrages par exemple), à l'imprégnation dans les remblais de pied et à l'essorage pour un remblai hydraulique ou un coulis nécessite d'adopter des coefficients compensateurs pour tenir compte, au mieux, de ces pertes dans le calcul. Ces pertes ne sont pas négligeables et peuvent atteindre 40% rien que pour l'imprégnation des remblais.

Les caractéristiques des matériaux de remblayage font maintenant l'objet de spécifications assez rigoureuses, mentionnées souvent explicitement dans un cahier des charges établi par le maître d'ouvrage. Ces spécifications concernent principalement les propriétés de résistance mécanique<sup>11</sup> et/ou de déformabilité. La nature du matériau de remblai est rarement imposée de manière précise, sauf pour l'utilisation de mortiers ou coulis dans les chantiers d'injection.

En cas de cavités noyées ou partiellement ennoyées, il est indiqué d'utiliser des matériaux drainants à la base du comblement pour éviter toute modification du régime hydraulique en souterrain.

De manière générale, les matériaux de comblement ne doivent pas présenter de risque de pollution, en particulier vis-à-vis de l'eau. Même si les vides souterrains sont souvent localisés au-dessus du niveau de la nappe superficielle, la percolation d'eau à travers ces matériaux depuis la surface peut aussi entrainer la migration potentielle de polluants. Rappelons aussi qu'en présence ou à proximité d'une nappe superficielle circulante, le matériau de remblai ne doit pas contenir d'éléments à granulométrie trop fine susceptibles d'être emportés à terme et par effet « renard », de mettre en péril la stabilité des barrages de confinement.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Par exemple, en zone bâtie, des cahiers des charges peuvent préconiser des coulis de comblement ayant « *une résistance à la compression supérieure ou égale à 3 MPa à 28 jours* ».



Pour limiter a posteriori la responsabilité du maître d'ouvrage, le cahier des charges doit imposer des documents sur la traçabilité des matériaux utilisés (lieu de provenance, nom du fournisseur, quantités approvisionnées, analyses chimiques éventuelles des matériaux et de l'eau utilisés, types de contrôle, etc.).

Juste avant le démarrage des travaux et à leur réception, il est préférable de réaliser un état des lieux contradictoire des biens (bâti, voirie, réseaux...) avoisinants le projet afin de pouvoir justifier si nécessaire les détériorations liées aux travaux, notamment liées à la mise en pression des terrains de recouvrement lors des opérations de clavage.

### C. Supprimer ou détruire la cavité

Les méthodes de suppression des vides consistent à écarter (voire supprimer) le risque par suppression de la cavité :

### • par terrassement-comblement :

La méthode de terrassement-comblement consiste à supprimer, depuis la surface, les vides sous-jacents par déblaiement des terrains de couverture puis terrassement. Elle peut s'opérer :

- par terrassement complet jusqu'à la base des cavités et remise en place par couches compactées (Figure 15);
- o par terrassement jusqu'à la tête des cavités et remblaiement de ces dernières avec les matériaux de la couverture ou des matériaux d'apport.

Un compactage minutieux permet de minimiser les tassements différés des remblais, les terrains peuvent être réhabilités comme espaces verts et éventuellement pour de nouvelles constructions, après consolidation par injections ou protection indirecte (ou « passive ») des structures.

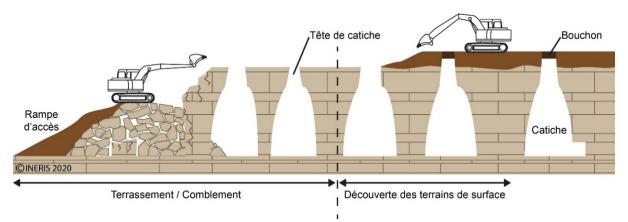


Figure 15 : Principe de la méthode de terrassement-comblement de catiches

#### par foudroyage :

Les méthodes de suppression des vides par foudroyage consistent à réaliser un abattage des piliers ou du toit à l'aide d'explosifs pour auto-combler la cavité et déstructurer les terrains de recouvrement en laissant un minimum de vide.

Elles présentent l'inconvénient de laisser en place des vides résiduels significatifs, notamment lorsque les terrains de recouvrement se présentent sous forme de bancs



massifs. Ces vides résiduels peuvent éventuellement se compenser au fil du temps. Ces techniques créent donc une grande incertitude pour l'analyse de l'aléa et ne permettent pas de garantir l'absence de mouvements de terrain en surface après traitement.

Ce sont des opérations extrêmement délicates qui exigent d'être réalisées par des entreprises spécialisées.

Elles engendrent, de surcroît, un certain nombre de nuisances, des risques de dégâts ou encore des effets induits (en souterrain et en surface) difficilement maîtrisables. Cette technique est évidemment proscrite en milieu urbain (vibrations du sol pouvant provoquer des désordres aux constructions, perturbations de l'écoulement des eaux dans le sol...).

Ces méthodes ne sont adaptées que pour des traitements à faible ou moyenne profondeur et plutôt pour des terrains peu résistants (sable, argile, craie...). Des précautions pourront être prises pendant les phases de chantier (circulation des engins, terrassement, apport de matériaux de complément...) lorsque les terrains de recouvrement ont été reconnus de qualité médiocre, fortement tectonisés et altérés, ou encore en zones de fontis possible.

### D. Les techniques « passives »

Il s'agit de prévoir ou de modifier, dès la conception du projet en surface, les mesures de construction pour rendre les enjeux insensibles aux mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines. On parle de « protection passive » par renforcement du sol et/ou du bâti et des structures.

Pour les enjeux bâtis, il s'agit de la mise en œuvre de techniques de type reprise en sousœuvre (pieux, micro-pieux...) visant à renforcer les structures bâties pour qu'elles s'affranchissent des mouvements de sol.

Pour les constructions neuves, l'emploi de fondations adaptées (fondations profondes, pieux..., Figure 16) et/ou dispositifs de renforcement du bâti (radier général, chaînage, poutres...) peut réduire ou pallier les mouvements de terrains liés à l'évolution d'une cavité ; cette technique s'applique strictement au bâti.

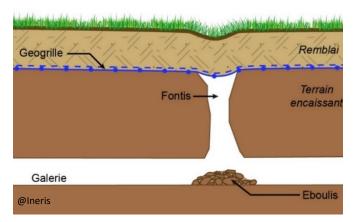


Figure 16 : Pieu traversant une cavité en Hauts-de-France

Pour les réseaux (infrastructures routières et ferroviaires, canalisations enterrées...) et les zones non bâties, l'utilisation de méthodes dites « parachutes » (mise en place de géogrille)



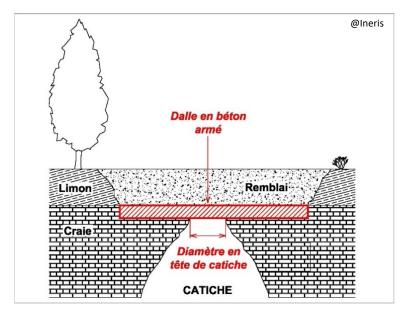
permet de réduire la vulnérabilité de surface (Figures 17). On parle alors de renforcement du sol. Ces méthodes sont notamment utilisables dans les zones où un tassement de la surface reste acceptable.





Figures 17 : Mise en place d'une géogrille (géosynthétique) en Hauts-de-France

Dans le cas des cavités débouchant en surface par un puits (catiches, marnières, crayères), l'édification d'une dalle en béton armé permet de parer au manquement de stabilité du bouchon qui ferme le puits d'accès. Elle est disposée au niveau de la tête du puits et déborde de part et d'autre du bouchon (Figures 18). Cette technique nécessite un dimensionnement adapté afin d'intégrer des points d'ancrage de la structure dans un encaissant résistant.





Figures 18 : Exemple d'une dalle en béton armé fermant une catiche en Hauts-de-France



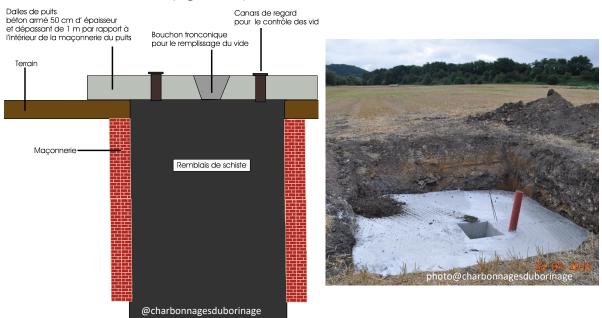
## 6 Mises en œuvre en Wallonie et dans les Hautsde-France

### A. Comparatif

D'un point de vue général, les approches techniques et réglementaires sont très comparables en Wallonie et en Hauts-de-France.

On retiendra les méthodes suivantes selon les situations :

- pour les nouvelles constructions en zone (potentiellement) sous-cavée, il est privilégié, de part et d'autre de la frontière, l'adaptation du projet de construction par rapport aux contraintes du sous-sol (c'est-à-dire le déplacement des enjeux) ou la mise en place d'un radier avec une gestion adaptée des eaux (§5D);
- pour la sécurisation des anciens puits (très nombreux en Hauts-de-France et en Wallonie) les techniques sont globalement les mêmes par comblement et mis en place d'une dalle en tête (Figures 19) et/ou d'un bouchon;



Figures 19 : Exemple d'une sécurisation d'un puits de mine en Wallonie

• pour la mise en sécurité des cavités, on note que le confortement en souterrain (par piliers artificiels, boulonnage... §5A) n'est plus utilisé en Wallonie (cette technique suppose notamment que la cavité soit accessible aux personnels et aux engins, qu'elle soit peu « dangereuse » et qu'elle soit creusée dans une roche compétente comme le calcaire...configuration peu présente en Wallonie). Ces techniques sont pratiquées dans les Hauts-de-France et plus spécifiquement dans les anciennes cavités de calcaire grossier, massif plus résistant et homogène que la craie. De même, les techniques de renforcement par pieux ou géosynthétique ne sont quasiment pas connues en Wallonie dans le domaine du risque cavités;



 en cas d'effondrement ou en prévention, on constate que les solutions de traitement par comblement restent les plus utilisées en Hauts-de-France comme en Wallonie (§5B). Il s'agit, dans la majorité des cas, d'un remblayage, depuis la surface, avec un coulis à base de ciment.

On notera que, pour les cas répertoriés, les démarches de mise en sécurité par remblayage considèrent, systématiquement, en France, la prise en compte d'une marge de sécurité (déduite de l'angle d'influence  $\alpha^{12}$ ) en souterrain pour s'affranchir, en surface, des conséquences d'un effondrement au-delà de la zone sécurisée (Figure 20). De fait, la mise en sécurité peut s'avérer problématique en cas de cavités qui s'étendent sur plusieurs parcelles appartenant à différents propriétaires (accord nécessaire de tous les propriétaires pour réaliser les travaux). Les exemples de traitement en Wallonie se localisent à l'aplomb direct des enjeux, même si des emprises non aedificandi restent réservées en surface.

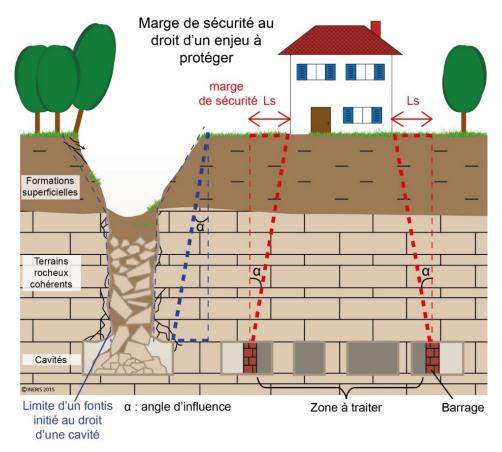


Figure 20 : Définition et principe de la marge de sécurité pour un traitement par comblement en France [34]

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> L'angle d'influence est défini en fonction des retours d'expérience des effondrements passés (sur site ou sites similaires), des observations in-situ et, dans certains cas, de calculs / modélisations numériques.



### B. Solutions alternatives au comblement par béton

Comme les solutions de comblement avec du béton sont onéreuses, l'identification de solutions de mise en sécurité alternatives est intéressante. Des exemples existent de part et d'autre de la frontière :

- le terrassement-comblement de catiches dans la région lilloise (§0 et Figure 15). Une technique comparable, comprenant le décaissement intégral et le remblayage des vides latéraux, a été mise en œuvre au nord de la Wallonie (province de Brabant-Wallon) pour des cavités peu profondes au droit d'un projet d'habitation d'extension limitée;
- l'effondrement provoqué (foudroyage) des cavités dans le secteur de la carrière de la Malogne à Cuesmes (Wallonie) géré par la SNCB, au droit d'une ligne de chemin de fer (§0). L'ancienne ligne de Chemin de Fer Bruxelles Paris, installée durant les années soixante, passe à la verticale des carrières souterraines dans une tranchée d'environ 10 m de profondeur. Le toit des carrières a été détruit par effondrement provoqué au moyen d'engins de terrassement depuis le fond de la tranchée (Figure 21). Des remblais ont ensuite été basculés dans les vides afin de rétablir l'altitude de terrain désiré. Plusieurs années après cette sécurisation, certaines limites de foudroyage ont dû être restabilisées à l'aide d'injections au béton (Figure 22);



Figure 21 : Limite du foudroyage en souterrain en Wallonie



Figure 22 : Stabilisation d'un barrage par injections de béton en Wallonie

le comblement par injection de mousse (traitements d'urgence, cavités difficiles d'accès, réalisation de barrages) près de Lille (§5B). Les mousses à base de polyuréthane ne sont plus utilisées. Elles sont remplacées actuellement par des mousses à base de résine de phénol-formaldéhyde ou d'urée-formaldéhyde. Elles sont injectées par pistolet-injecteur depuis le souterrain et/ou par forage (Figure 23) et permettent de remplir entièrement et rapidement la cavité. Toutefois, la pérennité mécanique dans le temps de la mousse n'a pas été évaluée à ce jour ; ainsi que son impact environnemental [33][34];



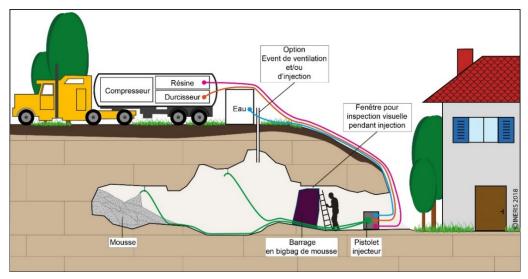


Figure 23: Principe du comblement par mousse expansive [34]

- le comblement avec un béton-mousse sur différents projets urbains en Wallonie (§5B). Cette technique semble être une solution mixte entre injections et mousses. Souvent usité en Wallonie, ce matériau est constitué d'un mélange de ciment, d'eau et d'un agent moussant (issu de protéines animales ou végétales). Pendant le pompage, des millions de bulles d'air sont ajoutées au mortier de manière homogène. Il n'a pas la propriété de gonfler mais a l'avantage d'être léger et facilement mis en place grâce à une unité mobile du même type que celle présentée en Figure 23. Sa résistance à la compression est moindre qu'un béton classique;
- le confortement par piliers maçonnés à Laon (§5A, Figure 8 et [27]);
- le « pontage » d'un vide, par une structure en béton armé, sur une trentaine de mètres de longueur, sous voirie en Wallonie (§5D);
- le renforcement à l'aide de géosynthétique instrumenté pour réduire l'intensité de l'aléa, protéger les personnes et diminuer significativement l'endommagement des structures et des infrastructures [11][16][38]. Dans le cadre du projet scientifique REGIC (REnforcement par Géosynthétique Intelligent sur Cavités naturelles ou anthropiques), des tests in situ (au droit d'une tête de catiche) ont été menés à Lille en 2017 (Figure 24). La technique consiste à mettre en place, sous une faible épaisseur du sol en place remanié (granulaire ou cohérent), un géosynthétique (§5D et Figures 17) instrumenté qui possède une double raideur en traction, s'activant l'une après l'autre, pour détecter les petites déformations en premier, puis assurer une grande raideur en traction lors de l'effondrement de la cavité. D'autre part, elle fournit au maître d'ouvrage un outil autonome de suivi et surveillance du risque, qui transmet les données du site en continu et à distance, via le dispositif PREDITECT®. Un guide rassemblant des recommandations et les retours d'expérience sur l'utilisation de géosynthétique instrumenté en tant que système de renforcement et de mitigation du risque d'effondrement localisé (fontis) a ainsi été établi [11]. Il comprend notamment les principes généraux pour la conception et le dimensionnement du géosynthétique.





Figure 24 : Mise en place d'un géosynthétique instrumenté au-dessus d'une catiche à Lille (Hauts-de-France)

### C. Cas particuliers des vides d'origine karstique

Concernant les cavités d'origine karstique, les méthodes de traitement sont variées de part et d'autre de la frontière. On peut citer les plus courantes [14] :

#### • le comblement depuis la surface :

Cette technique est mise en œuvre lors de l'apparition d'un effondrement en surface (à proximité d'un ouvrage existant ou lors d'une phase de terrassement). Le remplissage avec du « tout venant » est une stratégie généralement perdante. En effet, la stabilité n'étant assurée qu'à court terme, il est probable qu'un nouvel affaissement/effondrement apparaitra de nouveau au même endroit quelques années plus tard, notamment suite à des variations du niveau de la nappe ou à des infiltrations importantes d'eau.

Après avoir cherché (géophysique, hydrogéologie...) le mécanisme moteur du phénomène, deux approches peuvent être proposées pour garantir la stabilité dans le temps du remplissage, y compris sous l'effet de l'eau (a minima, les précipitations) :

o soit une obturation du conduit de l'effondrement avec, par exemple, une dalle en béton posée sur les niveaux sains environnants (Figure 25);

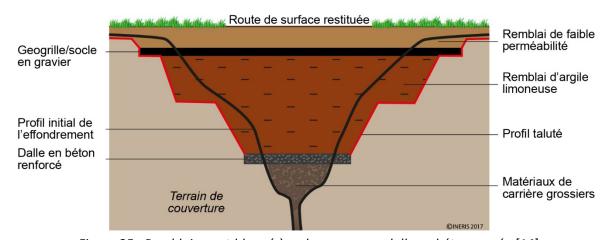


Figure 25 : Remblaiement bloqué à sa base par une dalle en béton armée [14]



o soit un remplissage par des matériaux granulaires frottants présentant une granulométrie correctement graduée depuis la surface (éléments fins) jusqu'en profondeur (éléments grossiers) (Figure 26).

Seul le remblaiement par des matériaux granulaires permet de limiter l'incidence des travaux sur les circulations aquifères sous-jacentes.

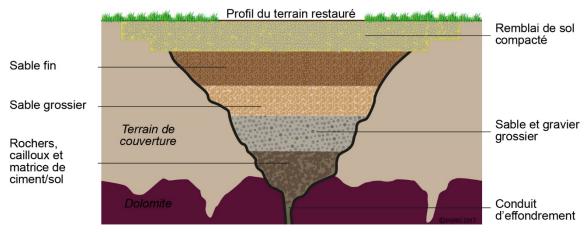


Figure 26 : Remblaiement d'un effondrement à l'aide de matériaux granulaires présentant une granulométrie étagée [14]

### • les injections :

Différentes techniques d'injection peuvent être mises en œuvre pour combler ou consolider une zone de dissolution. En présence d'une nappe ou d'un écoulement, ces travaux doivent impérativement s'accompagner de dispositions permettant de limiter les impacts hydrauliques (modifications de gradients, effet barrages ...) au risque d'engendrer d'autres désordres. Le suivi de surface et l'ajustement des pressions d'injection au besoin sont alors nécessaires.

Selon les conditions du site, les injections viseront soit à remplir les vides (injection de comblement), soit à consolider des terrains remaniés (injection de traitement) afin d'obtenir des valeurs de résistance des sols jugées suffisantes à la construction du projet ou à la mise en sécurité du site.

Pour le remplissage des vides, il est préconisé de déverser gravitairement un mortier de ciment comprenant une charge minérale importante (sable voire cendres volantes ou fillers pour des mortiers prêts à l'emploi) mais fluide, dans un réseau de forages disposés suivant une maille adaptée aux enjeux. Puis, après une période de 7 jours, un mélange comprenant une plus forte proportion de ciment (coulis) doit être injecté sous pression dans les forages pour combler les vides résiduels : il s'agit du clavage.

Néanmoins, une attention particulière doit être portée quant à l'influence des travaux de comblement par injection qui peuvent avoir une influence sur l'écoulement des eaux souterraines.



### D. Mesures de contrôle

Enfin, les mesures de contrôle et de surveillance post-travaux sont pratiquées de part et d'autre de la frontière selon des procédures relativement similaires : contrôle de la qualité et de la quantité de coulis mis en œuvre, forages de contrôle pour les traitements par comblement ou encore surveillance visuelle du tassement des remblais sous la dalle de puits par exemples. Toutefois, en Wallonie, en raison de la nature limoneuse des terrains au-dessus des cavités, les essais au pénétromètre statique (CPT) sont très fréquents en phase de reconnaissance (avant traitement) et en phase de contrôle (après traitement) pour détecter, par exemple, un fontis en cours d'évolution vers la surface ; dans les Hauts-de-France, on réalisera plutôt des forages destructifs avec enregistrement des paramètres.

Les travaux de mise en sécurité sont susceptibles de modifier les règles d'urbanisme (sortie de zone la plus restrictive en contraintes d'urbanisme) ou de constructibilité existantes. C'est pourquoi, une fois les travaux réalisés, il est recommandé, en France comme en Wallonie, de faire établir, par l'entreprise, un dossier de récolement des travaux (ou Dossier des Ouvrages Exécutés DOE) afin de conserver la mémoire de ces objets, de leurs caractéristiques et de leur positionnement, notamment lorsqu'ils sont souterrains. A minima, il est conseillé d'établir, éventuellement avec l'aide de l'entreprise, une fiche récapitulative des travaux réalisés (pour exemple, une telle fiche est disponible en annexe du « Guide local à usage des particuliers pour la mise en sécurité d'effondrement de cavités souterraines situé en domaine privé dans le département du Nord (59) » [26].



### 7 Synthèse et perspectives

Le module 4 du projet RISSC a pour objectifs d'analyser et de développer des solutions adaptées pour réduire le risque lié aux cavités souterraines, à l'échelle transfrontalière.

Dans ce cadre, l'activité 1, intitulée « bilan des méthodologies et techniques de prévention du risque lié aux cavités », est pilotée par l'Ineris. Cette étude est basée sur un retour d'expérience réalisé auprès de maitres d'ouvrage belges et français en matière de gestion du risque et de travaux de mise en sécurité. L'enquête réalisée a mis en évidence une gestion régulière des cavités de tous types (carrières, mines, puits, sapes de guerre, vieux égouts...), en majorité situées entre 0 et 20 m de profondeur, et en général localisées en milieu urbanisé ou sous voirie. Elle a été complétée par une recherche bibliographique et des interviews ciblés avec des experts en gestion des cavités du côté wallon, comme du côté français.

L'analyse de ces données a permis de dresser un inventaire des différentes techniques de sécurisation par rapport au risque lié aux cavités (fiches récapitulatives en annexe) et de dégager les points de similitude ou de différence entre la Wallonie et les Hauts-de-France.

Les cavités, ou leurs accès, sont mis en sécurité par diverses méthodes, le comblement restant la solution la plus utilisée de part et d'autre de la frontière.

Le choix de la méthode de traitement est fait après une étude approfondie de l'ensemble des éléments à considérer : état et accessibilité de la cavité, ses caractéristiques géométriques, son mode d'exploitation, l'importance des vides, les matériaux disponibles, la destination du sol. De manière synthétique, les tableaux suivants récapitulent les critères à prendre en compte dans le choix de la (ou des) méthode(s) de traitement d'une cavité souterraine abandonnée d'origine anthropique :

- le Tableau 1 présente les solutions minimales de traitement en fonction de la destination du site considéré et des mouvements admissibles en surface. Ce tableau n'intègre pas la notion d'inspection et de surveillance pour les cavités accessibles;
- le Tableau 2 compare les différentes méthodes de traitement à partir de critères de choix techniques, environnementaux et/ou économiques ;
- le Tableau 3 propose des solutions de traitement en fonction du type de cavité considéré. Ces différents types de cavités, recensés en Wallonie et Hauts-de-France, sont définis et détaillés dans le rapport de l'activité 1 du module 3 du projet Interreg RISSC.

Parallèlement, des solutions alternatives (avec conservation des vides et valorisation touristique des sites souterrains) à celles proposées dans ce document seront développées dans l'activité 3 du module 4 du projet RISSC.



Tableau 1 : Choix des solutions minimales de traitement en fonction de la destination du site [34] (classification indicative, chaque cas devant faire l'objet d'une étude spécifique)

	Destination	_	ONS ACCEPTABLES A SURFACE	DÉFORMATIONS DE LA	ESPACE SOUTERRAIN REUTILISE	
Critère	es de site	ESPACES VERTS, ZONE DE LOISIRS, PARC, PARKING	INFRASTRUCTURES LINÉAIRES ET RÉSEAUX DIVERS	CONSTRUCTION EXISTANTE	CONSTRUCTION NOUVELLE	
	Traitement des enjeux et/ou confortement ou comblement partiel		Confortement ou comblement et/ou renforcement des structures et adaptation éventuelle des réseaux	Confortement ou comblement total avec injections <sup>13</sup> et/ou reprise en sous-œuvre	Confortement ou comblement total avec injections <sup>13</sup> et/ou renforcement du bâti et/ou fondations adaptées	Toutes méthodes de confortement
ITE SOUTERRAINE	Hauteur de recouvrement <10 m	Terrassement- comblement et/ou comblement partiel ou traitement des enjeux	Comblement partiel et/ou renforcement des structures et adaptation éventuelle des réseaux	Comblement total avec injections <sup>13</sup>	Terrassement- comblement ou comblement total avec injections <sup>13</sup> et/ou renforcement du bâti et/ou fondations adaptées	SO
CAVITE S INAC	Hauteur de recouvrement >10 m  Comblement partiel et/ou renforcement des structures et adaptation éventuelle des réseaux		Comblement total avec injections <sup>13</sup>	Comblement total avec injections <sup>13</sup> et/ou renforcement du bâti et/ou fondations adaptées	SO	
	AVITE SOUTERRAINE EFFONDREE Traitement des enjeux		Injections de traitement de terrain et/ou renforcement des structures et adaptation éventuelle des réseaux	Injections de traitement du terrain et/ou reprise en sous-œuvre	Injections de traitement du terrain et/ou renforcement du bâti et/ou fondations adaptées	SO

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Injections de clavage et injections de traitement des terrains si nécessaire.

France-Wallonie-Vlaanderen PISSC

Tableau 2 : Analyse comparative des méthodes de traitement établie par critères techniques, environnementaux et/ou économiques [34]

		Traitement des vides						Traitement des enjeux				
CRITERES	Confortement des cavités	Par déversement gravitaire		Par injections de mortiers ou coulis		Suppression  Terrassement comblement Foudroyage		Méthodes parachutes (géogrille, dalle)	Fondations profondes	Renforcement du bâti	Reprise en sous-œuvre (en cas de désordre en surface sous bâti)	
CRITERES			partiel	total	simple	avec clavage						
Exigence de conservation	Oui	++	-	-	-	-	-	-	++	-	++	so
des cavités	Aucune	so	++	++	++	++	++	++	++	++	++	so
Accessibilité	Oui	++	++	++	++ 1	++ 1	+ 1	++	so	+	so	so
11000000101110	Non	-	+	+	++	++	++	-	++	++	++	++
	Faible (< 5 000 m <sup>3</sup> )	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
Volume ou dimensions des cavités	Moyenne (compris entre 5 000 m³ et 100 000 m³)	++	++	++	++	++	++	++	+ 2c	++	-	+ 2c
	Importante (> 100 000 m³)	+	++	++	+ 1	+ 1	++	++	+	+ 2c	-	-
	< 10 m	++	+ 2a	++ 3a	+ 2a	++ 1	++	++	+	+ 1	++	++
Profondeur	10-30 m	++	++	++	++	++	+ 2b	+ 2b	++	++	++	+ 1
	> 30 m	++	+	+	++	+	-	-	++	-	+ 2c	+
	Zone bâtie	+ 3a	-	-	+ 3a	++ 2b		-	so	so	+	++
Occupation existante de la surface	Infrastructures linéaires et réseaux divers	++	+ 3a et 2b	+ 3a et 2b	+ 1 et 2b	+ 1	-	-	+ 2c	so	so	so
200	Espaces verts, parc, parking, zone de loisirs	+ 1	++	++	-	-	++	++	+	-	so	so
	Zone bâtie	++ 3a	-	+ 3a	-	++	+ 3a et 3b	+ 3a	-	++	+ 3a et 1	so
Adaptation par rapport à la destination future du site	Infrastructures linéaires et réseaux divers	+ 2a et 2c	-	++	+ 2a	++	++	++	++	-	so	so
destination later et a site	Espaces verts, parc, parking, zone de loisirs	-	++	+ 1	-	-	++	++	++	-	so	so
Pérenni	Pérennité de la méthode			++	++	++	++	++	+	+	+	++
Hygiène et se	Hygiène et sécurité du personnel		+ 3c	+ 3e	+ 3b	+ 3b	+ 3c	+ 3c	so	++	++	+ 3c
Faibles nuisances sur l'environnement		++	+ 4a et 4b	+ 4a et 4b	+ 4a et 4b	+ 4a et 4b	- 4b et 3b	- 4b et 3b	+ 4b	+ 4b	+ 4b	+ 4b
Coûts indicatifs	< 50	par m <sup>2</sup>							par m <sup>2</sup>	fortement		fortement dépendant
en Euros	50-100	par m <sup>2</sup>								dépendant de la surface du bâti et	fortement dépendant de la	de la surface du bâti
par m <sup>3</sup>	100-150											
(coûts 2016)	> 150											

<sup>++</sup> Bonne adaptation de la méthode au domaine

<sup>3</sup> Niveau de sécurité insuffisant (3a : évolution possible; 3b : impacts possibles sur les avoisinants; 3c : sécurité pour les ouvriers)



Adaptation avec précautions ou travaux complémentaires

Inadaptation de la méthode au critère

<sup>1</sup> Solution économiquement discutable

 $<sup>2 \</sup>stackrel{Adéquation technique non garantie (2a: réactivité trop faible si évolution; 2b: problème d'emprise; 2c: renforcement potentiel insuffisant)$ 

Tableau 3 : Propositions de traitement en fonction du type de cavité (proposition indicative, chaque cas devant faire l'objet d'une étude spécifique)

		Traitement des vides						Traitement des enjeux			
	Confortement des cavités	Par déve gravi partiel	rsement	Par inject mortier of simple		Suppr Terrassement comblement	ession Foudroyage	Méthodes parachutes (géogrille, dalle)	Fondations profondes	Renforcement du bâti	Reprise en sous-œuvre (en cas de désordre en surface sous bâti)
Karst	so	-	+	+	+	+ si faible recouvrement	-	++ cf. 2	++ cf. 2	++ cf. 2	+
Exploitation en chambres et piliers	++ si cavité accessible cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	++ si cavité à faible profondeur	++ si cavité à faible profondeur	++ cf. 2	++ cf. 2	++ cf. 2	+
Ardoisière (exploitation par grande chambre)	++ si cavité accessible cf. 3	so	so	so	so	-	-	-	-	-	+
Exploitation par hagues et bourrages	SO	so	so	++ cf. 3	++ cf. 3	++ si cavité à faible profondeur	-	++ cf. 2	++	++ cf. 2	+
Petite exploitation par puits et courtes galeries (marnière)	++ si cavité accessible cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	+ si cavité à faible profondeur	-	++ cf. 2	++	++	+
Puits	so	+ cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	-	-	++ cf. 2	-	++	+
Galeries filantes (y compris ouvrages civils)	++ si cavité accessible cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	++ si cavité à faible profondeur	-	++ cf. 2	++	++	+
Ouvrage militaire (souterrain refuge)	++ si cavité accessible cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	++ si cavité à faible profondeur	+ si cavité à faible profondeur	++ cf. 2	++ cf. 2	++ cf. 2	+
Habitat troglodytique/Cave	++ si cavité accessible cf. 3	+ cf. 3	+ cf. 3	++ cf. 3	++ cf. 3	+ si cavité à faible profondeur	+ si cavité à faible profondeur	-	-	++ cf. 2	+

<sup>++</sup> Méthode adaptée



<sup>+</sup> Adaptation avec précautions ou travaux complémentaires (ex : injections de clavage ou des terrains décomprimés, renforcement du bâti, etc.)

<sup>-</sup> Méthode a priori inadaptée

SO Méthode techniquement réalisable mais jamais observée

<sup>3</sup> Niveau de sécurité insuffisant (évolution possible, impacts possibles sur les avoisinants, sécurité pour les ouvriers)

<sup>2</sup> Adéquation technique non garantie (problème d'emprise, renforcement potentiel insuffisant)

### 8 Bibliographie

- [1] (2014). Effondrements et affaissements du sol, Un colloque inédit sur les techniques de prévention et la gestion des crises, Synthèse des résumés SPW Edition, 24p: <a href="http://geologie.wallonie.be/files/events/Effondrements2014/Effondrements2014">http://geologie.wallonie.be/files/events/Effondrements2014/Effondrements2014</a> R%c3%a9sum%c3%a9s.pdf
- [2] (2010). Présence avérée ou soupçonnée d'une carrière souterraine, Recommandations quant au contenu de l'étude géotechnique à réaliser. Annexe DRIGM/CSSG/ET-GEOTECH-CARSOUT, SPW, 3p.
- [3] (2005). Cartographie de synthèse des périmètres de contraintes physiques inhérentes au karst en zones urbanisables, en zone agricole, en zones forestières, naturelles, d'espaces verts et de parcs et aux alentours des infrastructures en projet en Région Wallonne. Rapport de synthèse. Université de Liège (Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection), Faculté Polytechnique de Mons (Service de Géologie Fondamentale et Appliquée) et Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites Souterrains, 61p.
- [4] AFTES (2018 à paraître). Recommandations : Conception et guide de dimensionnement du boulonnage radial, GT30.
- [5] AFTES (2014) *Recommandations : Technologie du boulonnage*. Tunnels et ouvrages souterrains n°241 : <a href="http://www.aftes.asso.fr/publications">http://www.aftes.asso.fr/publications</a> recommandations.html
- [6] AFTES (2001). *Groupe de travail sur les injections* Tunnels et ouvrages souterrains n°164, pages 68 89 : http://www.aftes.asso.fr/publications\_recommandations.html
- [7] AFTES (2001). Recommandations: Conception et dimensionnement du béton projeté utilisé en travaux souterrains Tunnels et ouvrages souterrains n°164: <a href="http://www.aftes.asso.fr/publications recommandations.html">http://www.aftes.asso.fr/publications recommandations.html</a>
- [8] AFTES (1994). Recommandations : Béton projeté renforcé de fibres : technologie et mise en œuvre Tunnels et ouvrages souterrains n°126 : <a href="http://www.aftes.asso.fr/publications">http://www.aftes.asso.fr/publications</a> recommandations.html
- [9] AFTES (1978). Recommandations: Emploi des cintres en travaux souterrains. Tunnels et ouvrages souterrains n°27 : http://www.aftes.asso.fr/publications recommandations.html
- [10] AFTES (1974). Recommandations: Choix du soutènement en galerie Tunnels et ouvrages souterrains n°1 : <a href="http://www.aftes.asso.fr/publications recommandations.html">http://www.aftes.asso.fr/publications recommandations.html</a>
- [11] AL HEIB M., DELMAS D, RIOT M., EMERIAULT F. & VILLARD P. (2021). Renforcement par géosynthétique pour la réduction des risques associés à un effondrement localisé guide de recommandations. Projet REGIC financé par l'ADEME : <a href="https://fr.calameo.com/read/006146335692ee172c7de">https://fr.calameo.com/read/006146335692ee172c7de</a>
- [12] BENNANI M., BOUFFIER C. & FRANCK C. (2016). Guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique. Rapport Ineris DRS-16-156834-00810B, 127p:



- https://www.ineris.fr/fr/guide-surveillance-cavites-souterraines-origine-anthropique
- [13] BERANGER N. (2017). La gestion du risque cavités souterraines, Guide à l'usage des collectivités. Collection Références, Cerema, 118p: <a href="https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/gestion-du-risque-cavites-souterraines">https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/gestion-du-risque-cavites-souterraines</a>
- [14] CHARMOILLE A., LECOMTE A. & KREZIAK C. (2018). 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. Guide méthodologique Ineris/Cerema référencé DRS-17-164710-03375A: <a href="https://www.ineris.fr/fr/guide-dissolution-naturelle-gypse-sous-sol-analyse-gestion-aleas-mouvements-terrain-type">https://www.ineris.fr/fr/guide-dissolution-naturelle-gypse-sous-sol-analyse-gestion-aleas-mouvements-terrain-type</a>
- [15] COUSSY S., ALBNET R., DJOUAD I. & BALON P. (2016). Guide méthodologique de comblement de cavités à l'aide de matériaux alternatifs. Rapport BRGM/RP-66500-FR, 22p: <a href="http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-66500-FR.pdf">http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-66500-FR.pdf</a>
- [16] DELLI CARPINI M., EMERIAULT F., VILLARD P., RIOT M., BRIANCON L., DELMAS P. & AL HEIB M. (2022). *Utilisation d'un géosynthétique à double raideur pour le renforcement des remblais cohésifs sur cavités*. 13<sup>ème</sup> Comité Français des Géosynthétiques.
- [17] FRANCK C. & SALMON R. (2011). Guide de bonnes pratiques pour la mise en sécurité d'ouvrages miniers débouchant en surface. Rapport Ineris référencé DRS-11-119291-02819A: <a href="https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/drs-11-119291-02819a-guide-traitement-odj-1454063573.pdf">https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/drs-11-119291-02819a-guide-traitement-odj-1454063573.pdf</a>
- [18] FUNKEN L. & WELTER P. (2004). Inspections et mesures permanentes dans les carrières souterraines de la Malogne à Cuesmes (Mons) en Belgique. Actes des JNGG à Lille, pp347 à 354.
- [19] GEUSE A. & MICHELON S. (2005). Canevas décisionnel en matière d'étude préalable à prescrire dans le cadre de demandes de permis d'urbanisme et de permis de lotir dans le cas d'habitations et visant des terrains situés en zones de contraintes karstiques. Livret-guide. Faculté Polytechnique de Mons (Service de Géologie Fondamentale et Appliquée et Service d'Architecture), 18p.
- [20] IFSTTAR (2014). Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées, Guide méthodologique. Guide technique de la Collection Environnement Les risques naturels : http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/librairie/
- [21] INSPECTION GENERALE DES CARRIERES DE PARIS (2016). Notice technique : Travaux d'injection des anomalies liées à la dissolution du gypse antéludien. <a href="http://www.igc-versailles.fr/pdf/inj">http://www.igc-versailles.fr/pdf/inj</a> dissol gypse.pdf
- [22] INSPECTION GENERALE DES CARRIERES DE PARIS (2004). Notice technique : Travaux de consolidations souterraines exécutées par piliers maçonnés dans les carrières de calcaire grossier situées en région parisienne. <a href="http://www.igc-versailles.fr/pdf/piliers">http://www.igc-versailles.fr/pdf/piliers</a> maconnes.pdf
- [23] INSPECTION GENERALE DES CARRIERES DE PARIS (2003). Notice technique : Injection gravitaire, clavage et traitement des fontis, préalables à la mise en œuvre de



- fondations profondes, de type pieux ou micro-pieux de type supérieur ou égal à II, en zone sous-minée par d'anciennes carrières souterraines ou à ciel ouvert. <a href="http://www.igc-versailles.fr/pdf/inj">http://www.igc-versailles.fr/pdf/inj</a> avant pieux.pdf
- [24] INSPECTION GENERALE DES CARRIERES DE PARIS (2003). Notice technique : Travaux de consolidations souterraines exécutés par injection pour les carrières de Calcaire Grossier, de gypse, de craie et les marnières. <a href="http://www.igc-versailles.fr/pdf/injection.pdf">http://www.igc-versailles.fr/pdf/injection.pdf</a>
- [25] KAUFMANN O. (2000). Les effondrements karstiques du Tournaisis: Genèse, évolution, localisation, prévention. Thèse de doctorat, Faculté Polytechnique de Mons, Hors-Série SPELEOCHRONOS, 400p.
- [26] LAMBERT C. (2012). Mise en sécurité d'effondrement de cavités souterraines situé en domaine privé dans le département du Nord (59) Procédure d'intervention et Guide technique local à l'usage des particuliers pour la mise en sécurité d'effondrement de cavités souterraines situé en domaine privé dans le département du Nord (59).

  Rapport Ineris référencé DRS-12-128945-07936A:

  <a href="http://www.ineris.fr/centredoc/drs-12-128945-07936a-nouvelle-version-1385385946.pdf">http://www.ineris.fr/centredoc/drs-12-128945-07936a-nouvelle-version-1360659356.pdf</a>
- [27] LAMBERT C. & DUVAL C. (2013). Retours d'expérience de méthodes de traitement de cavités souterraines Principes de diagnostic des constructions maçonnées en carrière souterraine. Rapport Ineris DRS-12-126055-12421A, 84 pages.
- [28] LAMBERT C. & SALMON R. (2007). Evaluation et traitement du risque de fontis lié à l'exploitation minière. Rapport Ineris DRS-07-86090-05803A, 127p: <a href="https://www.ineris.fr/fr/evaluation-traitement-risque-fontis-lie-exploitation-miniere">https://www.ineris.fr/fr/evaluation-traitement-risque-fontis-lie-exploitation-miniere</a>
- [29] PACYNA D. & DENAYER J. (2010). *Mines, minières et carrières souterraines en Wallonie : Risques associés et contraintes.* SPW, 36p.
- [30] PACYNA D. & KHEFFI A. (2018). Elaboration de cartographies de zones d'aléas de mouvement de terrain engendrés par les objets souterrains connus de Wallonie, rapport méthodologique. Rapport 0326/2018, 130p: <a href="http://geologie.wallonie.be/home/acquisition-de-donnees/telechargements/rapports.html">http://geologie.wallonie.be/home/acquisition-de-donnees/telechargements/rapports.html</a>
- [31] PACYNA D. & KHEFFI A. (2018). Les carrières souterraines de craie blanche du Bassin de Mons. Mission SPW/ISSeP « Aléas de mouvements de terrain » 2013-2017, 8p: <a href="http://geologie.wallonie.be/files/ressources/soussol/aleas/Fascicule\_Info\_CarSout\_Craie\_Hainaut.pdf">http://geologie.wallonie.be/files/ressources/soussol/aleas/Fascicule\_Info\_CarSout\_Craie\_Hainaut.pdf</a>
- [32] PACYNA D. & KHEFFI A. (2018). Les marnières souterraines, carrières souterraines de craie et de « tuffeau », carrières souterraines mixtes silex/ « tuffeau » et carrières souterraines de craie phosphatée du Bassin de Mons. Crétacé de Hesbaye et du Bassin de Mons. Mission SPW/ISSeP « Aléas de mouvements de terrain » 2013-2017, 22p: <a href="http://geologie.wallonie.be/files/ressources/soussol/aleas/ISSeP">http://geologie.wallonie.be/files/ressources/soussol/aleas/ISSeP</a> Aleas-Myt Rapport Final Anx3-Marnieres.pdf
- [33] PINON C. (2018). Retour d'expérience de l'utilisation de mousse urée-formol pour la mise en sécurité de cavités souterraines. Rapport Ineris DRS-18-171467-02488A, 24p. 33/34

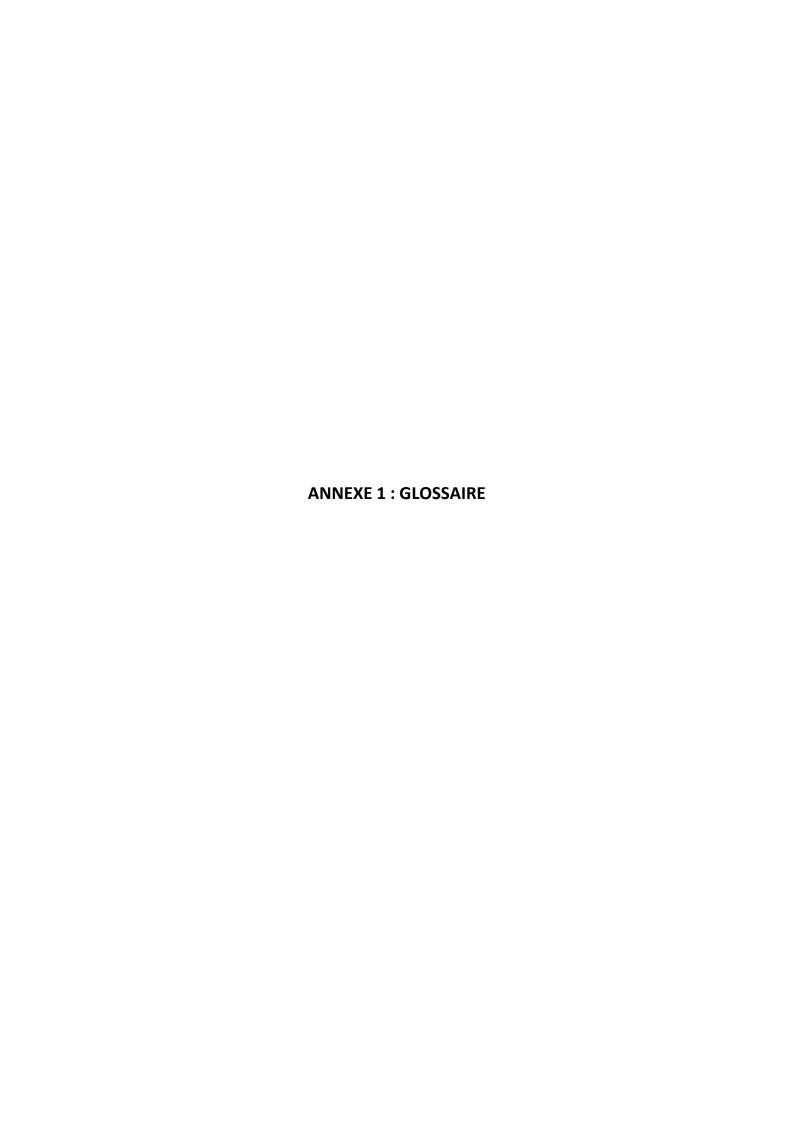


- [34] PINON C. & DEGAS M. (2016). Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines abandonnées d'origine anthropique. Rapport Ineris DRS-15-149564-02401B, 78p: <a href="https://www.ineris.fr/fr/guide-solutions-mise-securite-cavites-souterraines-abandonnees-origine-anthropique">https://www.ineris.fr/fr/guide-solutions-mise-securite-cavites-souterraines-abandonnees-origine-anthropique</a>
- [35] PINON C. (2014). Cavités souterraines : démarche de gestion des risques dans le département du Nord Méthodes et outils à l'usage des collectivités pour l'évaluation, l'aide à la décision et la rédaction de dossier de consultation. Rapports Ineris : <a href="https://www.ineris.fr/fr/assistance-maitrise-ouvrage-reduction-risque-lie-presence-cavite-souterraine-phase-1-document">https://www.ineris.fr/fr/assistance-maitrise-ouvrage-reduction-risque-lie-presence-cavite-souterraine-phase-1-document</a>
- [36] RAEDSCHELDERS H., DELCOURT C., HANCE L. SIMON G. & THIMUS J.F. (1987). *Mise en évidence de cavités souterraines sous le ring ouest de Mons.* Annales des travaux publics de Belgique, Numéro 5, pp 79-96.
- [37] SALMON M. & PACYNA D. (2010). Les outils WebGIS au service de la prévention des risques liés au sous-sol en Wallonie. SPW. Article du congrès International sur la gestion des rejets miniers et l'après-mine (GESRIM) à Marrakech, 12p.
- [38] RIOT M., MONNET T., BALLAND C., AL HEIB M., DELMAS P., EMERIAULT F., VILLARD P. & BRIANCON L. (2022). Système d'auscultation et d'alerte par un géosynthétique bimodule pour le renforcement de sols cohésifs sur cavités. 13ème Comité Français des Géosynthétiques.
- [39] TRITSCH J.J. (2007). Guide « Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : surveillance traitement ». Rapport Ineris DRS-07-86042-02484A : www.ineris.fr/centredoc/Guide carrieres.pdf
- [40] TRITSCH J.J., TOULEMONT M., DURVILLE J.-L & POTHERAT P. (2002). Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines. Guide technique du LCPC/Ineris/MEDD, Collection environnement, les risques naturels : <a href="http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/librairie/">http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/librairie/</a>

### 9 Annexes

Repère	epère Désignation				
Annexe 1	Glossaire	4 A4			
Annexe 2	Questionnaire sur les méthodologies et techniques de prévention du risque lié aux cavités	5 A4			
Annexe 3	Fiches de synthèse des principales méthodes de traitement	8 A4			





Aléa	Probabilité qu'un phénomène se produise sur un site donné, au cours d'une période de référence, en atteingnant une intensité ou une gravité qualifiable ou quantifiable. Il s'agit du croisement de l'intensité prévisible d'un phénomène avec sa probablité d'occurence.
Anthropique	Qui a une origine humaine ; qui est causé par l'homme.
Banc	Couche naturelle de roche se terminant au-dessus et au-dessous par une séparation nette, c'est la plus petite subdivision du terrain.
Blindage	L'ensemble du dispositif de boisage d'un puits comprenant les planches et cerces avec coins de serrage dans le cas d'un puits rond ; les planches, les poteaux, etc. dans le cas d'un puits carré ou d'une galerie d'avancement.
Boulon Boulonnage	Dispositif de renforcement composé d'une tige la plupart du temps métallique comportant un scellement arrière (ancrage) et une plaque d'appui externe.  Synonyme : clou, clouage
Cahier des charges	Document descriptif d'un ouvrage. Cette description porte sur les fonctionnalités à respecter. Il peut également proposer ou imposer certaines solutions techniques et les performances minimales des matériaux à employer.
Catiche	Appellation employée localement (en particulier dans le nord de la France) pour désigner une petite exploitation de craie en forme de bouteille
Cavité	(en géologie) Vide ou espace souterrain creux, naturel ou artificiel, plus moins large, plus ou moins profond, fermé ou non, dans un massif rocheux (ex : carrière souterraine, karst, grotte, caverne).
Ceinturage ou cerclage	Cintres métalliques ou anneau maçonné ou coffrage en béton entourant un pilier affaibli, un puits ou encore un ancien fontis.
Chaînage	Partie rigidifiant horizontalement ou verticalement un mur en appareil de brique, de pierre taillée ou de blocs en béton.
Ciel	Banc rocheux laissé au toit d'une carrière formant son plafond naturel.
Clavage	Opération finale de comblement visant à obstruer tous les vides résiduels. Pour un pilier maçonné, on parlera de "matage".
Cloche de fontis	Ciel tombé qui évolue progressivement par éboulement des bancs du ciel en prenant une forme tronconique ou semi-elliptique (voûte), susceptible de déboucher en surface (fontis).
Comblement	Remplissage d'une cavité au moyen de matériaux d'apport (remblais), comblement d'une tranchée, d'un fossé, d'un puits. Synonymes : remplissage, remblaiement, remblayage.
Compactage	Opération consistant à tasser mécaniquement un sol, par vibration ou pilonnage, afin d'éliminer les vides présents, donc d'en augmenter la compacité.
Confortement ou consolidation	Edification de murs, poteaux ou piliers maçonnés, généralement de maçonneries, destinés à ralentir l'évolution des dégradations dans une exploitation souterraine. On parle également de "confortation". Le terme de "renforcement" s'applique plus spécifiquement à la mise en place de soutènements moins traditionnels tels que le boulonnage ou les cadres métalliques. Le terme de consolidation s'applique également, de façon plus large, aux travaux menés par injections.
Coulis	Terme générique pour désigner un mélange pompable et capable de durcir dans le temps destiné au remplissage des vides. Pouvant aller du fluide au mortier en fonction des objectifs recherchés et des proportions des éléments constitutifs. Il est composé d'eau, d'un liant et d'une charge inerte constituée d'un matériau noble (sable ou « sablon »).
Décaissement	voir "Terrassement"
Effet de renard	Phénomène d'instabilité (érosion interne) provoquant l'entrainement des grains d'un matériau sous l'effet de l'eau.



Enjeux	Personnes, animaux, biens, activités, moyens, infrastructures, patrimoines susceptibles d'être affectés par un phénomène au sens large (dans le cas présent par un mouvement de terrain)
Essai au pénétromètre statique (CPT)	Essai, in situ, consistant à foncer verticalement dans le terrain, à vitesse lente et constante, un train de tiges/tubes terminé à sa base par une pointe conique généralement de même diamètre que les tubes, permettant de mesurer la résistance des sols traversés.
Essorage	Opération consistant à retirer d'un produit un liquide qui l'imprègne.
Flambage	Phénomène d'instabilité d'une structure (mur, pilier naturel ou artificiel) élancée (plus haute que large), qui soumise à un effort de compression, a tendance à se déformer et à éclater perpendiculairement à sa hauteur. Synomyme : flambement.
Fondations	Partie de la structure transférant les efforts au sol. Les fondations peuvent être superficielles, semi-profondes ou profondes.
Fontis	Cratère formé, brutalement et de manière inopiné, en surface par un effondrement des terrains à l'arrivée au jour d'une cloche de fontis, initiée au toit d'une cavité.
Forage sondage	Réalisation d'un trou de faible diamètre avec une machine (tarrière, en percussion, en rotation). Il s'agit d'un moyen de reconnaissance directe du sous-sol.  Les forages servent aussi à remblayer ou injecter le vide depuis la surface, à réaliser des pieux
Foudroyage	Abattage des piliers et/ou du toit à l'aide d'explosifs pour auto-combler la cavité en déstructurant les terrains de recouvrement.
Fractures mécaniques	Cassure au niveau d'un banc ou d'un parement de pilier dont l'origine est liée au creusement ou à une sollicitation trop forte sur la roche
Galerie	Voie de cheminement utilisée dans les exploitations souteraines. Les dimensions, très variables, sont déterminées par la hauteur des bancs de matériaux à extraire, la circulation pour l'évacuation des blocs, la solidité du ciel.
Géophysique	Dans le cas des cavités, discipline appliquée à la recherche de vide par une approche indirecte mettant en œuvre des moyens physiques (gravimétrie, magnétisme, sismique, etc.).
Géosynthétique	Un géosynthétique est un produit, dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux. Il peut avoir plusieurs fonctions, dont celle de renforcement (géogrille) principalement utilisée pour les cavités souterraines.
Injection	Action de combler la cavité depuis la surface et pratiquée, sous pression, avec des produits capable de durcir dans le temps et de remplir totalement la cavité.
Imprégnation	Pénétration par la surface d'un sol au moyen d'un liant fluide.
Karst ou Poche de dissolution	Zone affectée de dissolution naturelle provoquant un vide parfois bourré par la suite.
Maître d'ouvrage	Désigne le propriétaire de l'ouvrage ou commanditaire des travaux.
Marge de sécurité (marge de recul)	Zone d'influence d'un vide souterrain par rapport à la position d'un enjeu en surface (= marge de recul par rapport au vide).
Matage	Opération finale d'édification d'un pilier maçonné visant à obstruer le vide résiduel au sommet du pilier et assurer un bon contact avec le ciel. Le terme de clavage est également employé pour cette opération dans le cas du comblement d'une cavité.
Mesures de traitement directes	Méthodes qui consistent à traiter directement la cavité, par confortement, comblement ou destruction des vides.



Mesures de traitement indirectes	Méthodes qui ne concernent pas directement la cavité, mais qui ont pour objectif de sécuriser les enjeux en limitant ou empêchant les effets en surface des mouvements liés à la présence de la cavité.
Mortier	Type de coulis présentant une rigidité importante, utilisé notamment en remplissage de cavité.
Mur	Limite inférieure d'un banc ou d'une exploitation. Synonyme : "sol" de carrière, parfois "sole" (terme minier).
Pieux	Fondations profondes s'appuyant sur une couche de sol située à une grande profondeur. En présence de cavités, elles devront s'appuyer dans les terrains situés sous les vides.
Puits	Conduit vertical reliant la surface à la cavité souterraine. Le diamètre et la forme varient selon l'utilisation, aérage, extraction, descente du personnel ou acheminement des matériels.
Radier	Mode de fondation surfacique amenant au sol une contrainte normalement uniforme. Ferraillé spécifiquement, il permet de résister à certaines conditions de fontis (adaptation aux dimensions d'un éventuel fontis sous le radier).
Recouvrement	Ensemble des terrains rencontrés au-dessus d'une exploitation souterraine.
Remblayage/ Remblaiement	Fait de remblayer. Action de combler une cavité avec des matériaux rapportés, mais aussi résultat de cette action.  Synonyme : remblaiement, comblement, colmatage, rebouchage.
Reprise en sous- oeuvre	Action de soutenir les fondations existantes souvent superficielles pour palier une perte de portance, un effondrement Cela consiste à renforcer le sol ou à reporter des charges à une profondeur supérieure de celle de la fondation initiale.
Terrassement/ Décaissement	Technique consistant à déplacer des quantités importantes de matériaux (sols, roches). Le remaniement des terrains entraîne une modification de la structure des terrains de recouvrement (terrain en place remplacé par des remblais, pas nécessairement de moins bonne qualité).
Toit	Synonyme de ciel de carrière (" toit immédiat ") ou masse supérieure d'une exploitation souterraine.
Vides résiduels	Espace libre présent au ciel d'une cavité après remblayage (absence de clavage).
Vulnérabilité	Au sens large, qualifie le niveau des conséquences dommageables prévisibles sur des enjeux exposés au risque (ici de mouvement de terrain) : personnes, biens et environnement (eau, faune, flore, patrimoine, activités).



ANNEXE 2 : QUESTIONNAIRE SUR LES METHODOLOGIES ET TECHNIQUES DE PREVENTION DU RISQUE LIE AUX CAVITES

# Méthodologies et techniques de prévention du risque lié aux cavités

Il s'agit d'identifier les différentes démarches transfrontalières mises en oeuvre pour gérer le risque de mouvements de terrain lié aux cavités.

Ce questionnaire général permettra de récolter les retours d'expérience de mise en sécurité utilisées et de savoir où trouver des informations sur cette thématique.

A l'issue du dépouillement, des visites et temps d'échange seront programmés.

Ce questionnaire est transmis en priorité aux partenaires de l'Interreg RISSC qui pourront le remplir et le diffuser à leurs contacts privilégiés (en France et en Belgique) concernés par cette problématique.

Identification Merci d'indiquez ici l'organisme ou la collectivité représenté	réponse obligatoire
Question 1 Etes vous partenaire de l'INTERREG RISSQ ?	réponse obligatoire
un seul choix autorisé  oui non	
Commentaires	
Question 2 Quelle est votre zone d'intervention ?	réponse obligatoire
un seul choix autorisé	
<ul><li>Wallonie</li><li>Hauts-de-France</li><li>□ Autre</li></ul>	
Commentaires	
Question 3 Avez-vous déjà eu à gérer des secteurs sous-cavés ?	réponse obligatoire
un seul choix autorisé	
□ oui □ non	
Question 4 Si oui, combien de secteurs de cavité avez-vous eu à gérer durant ces 10 dernières années ?	réponse obligatoire
un seul choix autorisé	
□ entre 1 et 3 □ entre 3 et 10	
□ plus de 10	

Question 5	réponse obligatoire
A quel titre ?	
(plusieurs réponses possibles)	
maître d'ouvrage (collectivité, propriétaire, aménageur)	
conseil à maître d'ouvrage (bureau d'études, services publics)	
Autre réponse	
Commentaires	
Question 6	réponse obligatoire
Quelle était la configuration générale de ces cavités ?	
(plusieurs réponses possibles)	
carrière en chambres et piliers	
carrière exploitée par "catiche"	
carrière exploitée par "galeries filantes"	
sape de guerre, souterrain-refuge	
puits	
cavité naturelle (karst, de dissolution)	
☐ travaux miniers (de faible profondeur - puits - galeries)	
cave (ouvrage souterrain avec activités : stockage)	
Autre réponse	
Question 7	réponse obligatoire
	i openie oznigaten e
Quelles étaient les profondeurs moyennes de ces cavités ? (plusieurs réponses possibles)	
entre 0 et 10 m	
entre 10 et 20 m	
ntre 20 et 50 m	
au-delà de 50 m	
Question 8	réponse obligatoire
Précisez le type d'enjeux en surface :	
(plusieurs réponses possibles)	
milieu urbanisé	
☐ bâtiments sensibles	
□ voirie	
☐ zone rurale (champs, forêt)	
☐ espace vert	
☐ Autre réponse	

Quelles actions ont été mises en place sur ces cavités ? (plusieurs réponses possibles)  détude documentaire (recherches en archives, interviews, comparaison de photographies aériennes  campagne de reconnaissance de cavité par géophysique  campagne de reconnaissance de cavité par sondages  levé topographique (ou par scanner laser 3D) de la cavité  diagnostic de stabilité de cavité (inspection visuelle)  information/communication sur le risque "cavité"  surveillance de la cavité (ponctuelle ou instrumentée)  surveillance des enjeux en surface  traitement de la cavité  aucune	ponse obligatoire
☐ Autre réponse	
Commentaires	
Avec quel(s) objectif(s) ces actions ont-elles été réalisées ? (plusieurs réponses possibles)  en situation de crise (effondrement ou danger imminent) en prévention sur les enjeux existants pour réhabiliter des terrains de surface (projet d'aménagement) pour conserver et valoriser la cavité Autre réponse  Commentaires	ponse obligatoire
Question 11  Quelles sont, en général, les techniques de traitement privilégiées ? (plusieurs réponses possibles)  comblement total (avec injections de clavage)  comblement partiel  confortement en souterrain (boulonnage, pilier artificiel, portique)  terrassement - comblement  foudroyage  fondations profondes (pieux)  géosynthétique  dalle en béton  aucun	ponse obligatoire
Autre réponse	
Commentaires	

Question 12 Si comblement, quel type de matériaux a été utilisé ?  □ coulis à base de ciment □ matériaux de démolition	
<ul> <li>□ matériaux alternatifs (mousse, cendres volantes, billes d'argile)</li> <li>□ Autre réponse</li> </ul>	]
Commentaires	
Question 13 Quels contrôles ont été mis en place ?	
Question 14  Les deprées de ces cavités et de leur gestion sont elles consultables facilement 2	toire
Les données de ces cavités et de leur gestion sont-elles consultables facilement ?  oui ou non ?  si oui, où ?  si oui, quand ?  merci d'indiquer une adresse mail de contact :	
Commentaires	
Question 15 Les démarches mises en oeuvre ont-elles répondu aux attentes des acteurs publics, des populations concernées ?	toire

# ANNEXE 3 : FICHES DE SYNTHESE DES PRINCIPALES METHODES DE TRAITEMENT

# **COMBLEMENT TOTAL/PARTIEL**

#### > ROLES

- Supprimer ou diminuer le risque d'effondrement en surface à long terme
- Minimiser le risque de tassement résiduel en surface (si comblement total)
- Réhabiliter les terrains de surface en restituant les propriétés mécaniques du sol
- Traiter des terrains décomprimés ou d'anciens remblais

#### > PRINCIPES

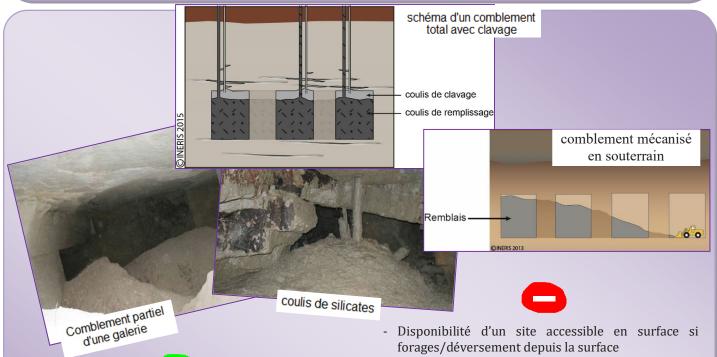
- Supprimer (si comblement total) ou diminuer (si comblement partiel) le vide souterrain
- Amélioration de la tenue des piliers par confinement
- Déverser un matériau de remblai ou un coulis (de façon gravitaire ou sous pression) depuis la surface à partir de forages ou directement par le fond

### > TECHNIQUES

- Mise en place à sec par « poussage » en souterrain par des engins mécaniques
- Déversement gravitaire par voie sèche ou humide
- Réalisation de barrages s'il faut limiter la zone à traiter
- Forages pour l'injection ou le déversement
- Possibilité d'effectuer un clavage final (comblement total)

#### > RECOMMANDATIONS

- Prise en compte d'une marge de recul par rapport à la zone à traiter
- Nature des produits à ne pas utiliser : matériaux argileux, organiques, polluants



- Méthode efficace et pérenne
- Possibilité de mise en œuvre à grande profondeur, en cas de cavités inaccessibles et/ou de grandes dimensions
- Protection du bâti existant
- Méthodes adaptées pour les constructions nouvelles (comblement total)
- Cavité peu dégradée, suffisamment grande et bien ventilée si comblement par « poussage »
- Mauvaise dispersion des remblais si déversement gravitaire
- Tassements différés possibles si pas de clavage en comblement total et affaissements possibles de la surface si comblement partiel
- Nécessité de reconnaissances préliminaires développées et de contrôles rigoureux pendant et après la mise en place, volume précis difficile à estimer



# **CONFORTEMENT**

#### > ROLES

- Améliorer les conditions de stabilité locale d'un site souterrain
- Mise en sécurité des terrains de surface (espaces verts, voirie, bâti existant)

### > PRINCIPES

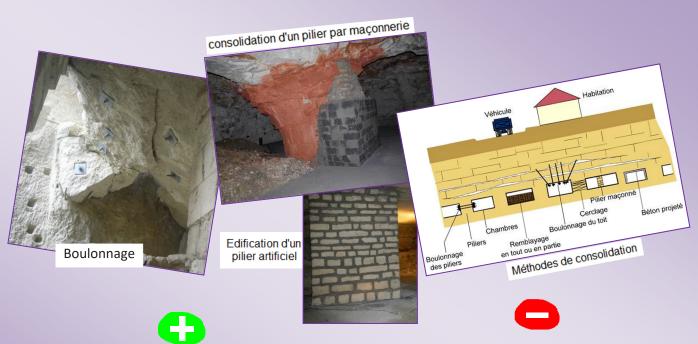
- Augmenter la portance (piliers)
- Améliorer la solidarisation entre bancs (toit)
- Améliorer la résistance globale de l'ouvrage par confinement des parements et du toit

### > TECHNIQUES

- Traitement **du toit et des galeries** par boulonnage, maçonnerie, cadres, revêtement bétonné...
- Traitement **des piliers** par injections de consolidation, boulonnage des parements, projection de béton, ceinturage/cerclage...
- Edification de piliers artificiels

### > RECOMMANDATIONS

- Exige un personnel compétent
- Accessibilité dans le temps pour contrôle régulier des ouvrages



- Permet la conservation ou le réaménagement des sites (parking, stockage, musée,...)
- Ne condamne pas les accès à la cavité (surveillance possible)
- Adapté à la mise en sécurité de l'existant
- Minimise les nuisances sur l'environnement
- Réalisable pour des cavités profondes

- Non réalisable dans des cavités trop dégradées ou non accessibles
- Solution localisée et non pérenne à long terme
- Non recommandé pour des constructions nouvelles
- Etudes préalables de dimensionnement et contrôle régulier des ouvrages dans le temps
- Coût variable et personnel qualifié



# **FONDATIONS PROFONDES**

#### > ROLE

- Isoler la construction des mouvements de terrain par des fondations prenant leur assise sous le niveau des cavités dans un bon sol

# > TECHNIQUES

- Pieux
- Puits bétonnés

#### RECOMMANDATIONS

- Ancrage des pieux dans le bon sol sous le niveau duquel se trouvent les cavités
- Précautions à prendre pour la traversée des cavités (chemisage ou ceinturage obligatoire)
- Puits ou pieux de diamètre suffisant pour éviter le cisaillement



- Applicable dans le cas de cavités inaccessibles
- Technique connue et efficace
- Peut supporter des charges élevées
- Permet de s'affranchir de tassement même minime
- Utilisable pour tous les types de cavités
- Exécutable en sous-œuvre dans une zone déjà construite et adaptée pour des nouvelles constructions





- Technique coûteuse
- Sécurise seulement la structure concernée
- Terrain peu accidenté pouvant être terrassé et accessible à des engins de chantier lourds
- Nécessite des études de dimensionnement (frottement négatif)



# RENFORCEMENT DEPUIS LA SURFACE

#### > ROLE

- Supporter les éléments surplombant les cavités (effet d'arche) et éviter les déformations inadmissibles susceptibles de mettre en péril la stabilité des ouvrages de type route, réseaux... présents en surface et la sécurité des personnes

#### > PRINCIPE

- Créer un filet (méthodes parachutes) ou une dalle pour retenir les personnes en cas d'effondrement

### > TECHNIQUES

- Treillis galvanisés sous la couche de terre végétale (circulation des piétons uniquement)
- Géosynthétique disposé et ancré sous les chaussées ou réseaux pour enjamber les zones décomprimées et réduire les déformations en surface
- Dalle en tête de puits ou d'exploitation en forme de bouteille (catiche, marnière, crayère...)

### > RECOMMANDATIONS

- Dimensions et positions des ancrages (position, longueur...)
- Emprise définie en surface de la zone à traiter





- Applicable dans le cas de cavités inaccessibles ou soupçonnées
- Technique peu coûteuse et facile à mettre en œuvre
- Technique adaptée aux espaces verts, de loisirs ou voirie

- Technique réservée pour des désordres de dimensions limitées (fontis d'ordre métrique)
- Terrain peu accidenté et non bâti (pouvant être terrassé)
- Nécessite des études préalables de dimensionnement
- Ne protège pas le bâti (seulement mise en sécurité des personnes), tassements possibles
- Bonne connaissance du vide (position et dimensions)



# RENFORCEMENT DU BÂTI FUTUR

#### > ROLE

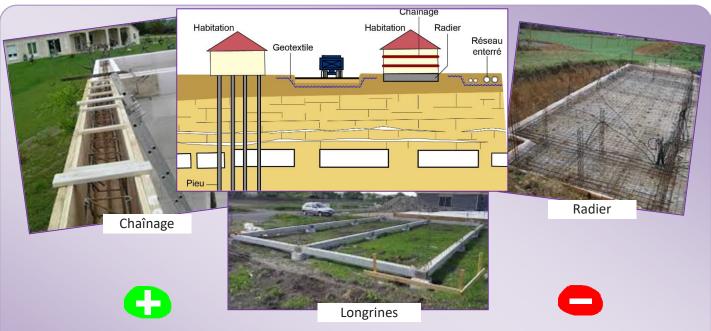
- Rendre la construction assez rigide pour qu'en cas d'effondrement localisé de la surface, elle ne présente que des mouvements d'ensemble

### > TECHNIQUES

- Renforcement du bâti par radiers, longrines, poutres, chaînage, ...

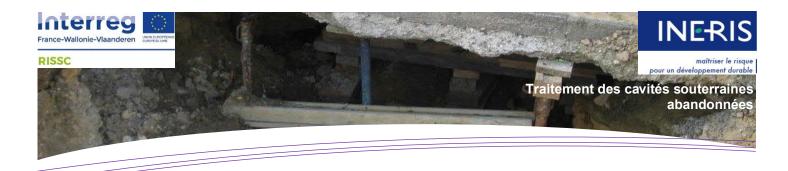
### > RECOMMANDATIONS

- Raideur des éléments de renforcement dépend fortement de l'amplitude des déformations attendues



- Applicable dans le cas de cavités inaccessibles
- Réservée à de petits vides ou terrains décomprimés ou effondrés
- Technique connue et efficace
- Applicable aux constructions neuves

- Surcoût de la construction
- Nécessite des études préalables de dimensionnement
- Sécurise seulement la structure concernée
- Peu adaptée pour les bâtis existants



# REPRISE EN SOUS-OEUVRE DU BATI EXISTANT

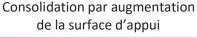
#### ➤ ROLE et PRINCIPE

- Renforcer les fondations existantes insuffisantes (en particulier lors d'apparition de désordre en surface)
- Assurer la stabilité des constructions mitoyennes de fouilles plus profondes que leurs fondations

## > TECHNIQUES

- Consolidation par amélioration des qualités mécaniques de la surface d'appui (injections)
- Consolidation par report de charges sur un terrain plus résistant
- Etaiement, ancrages, vérins...









- Applicable depuis le fond ou la surface
- Applicable en cas de désordre apparu en surface
- Technique connue et efficace
- Exécutable dans une zone déjà construite



- Technique coûteuse
- Nécessite des études préalables de dimensionnement
- Sécurise seulement la structure concernée
- Non adaptée pour les constructions neuves



# SUPPRESSION-DESTRUCTION

#### **ROLES**

- Supprimer les vides
- Supprimer tout risque d'effondrement à long terme
- Réhabiliter les terrains de surface

#### > PRINCIPES

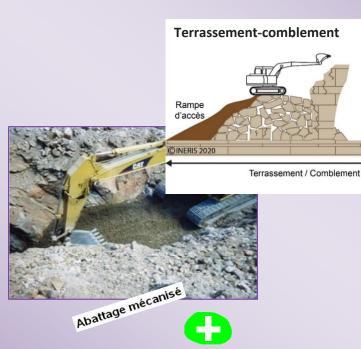
- Comblement direct des cavités sous-jacentes à partir des matériaux de recouvrement abattus par voie mécanique
- Remblaiement avec les matériaux de recouvrement (suivi d'un compactage) effectué après mise à jour des cavités par décaissement mécanisé (terrassement-comblement)
- Foudroyage dirigé des piliers résiduels et/ou du toit de manière à provoquer l'effondrement des terrains de recouvrement

# > TECHNIQUES

- Abattage mécanique
- Abattage à l'explosif
- Terrassement des terrains de recouvrement

### > RECOMMANDATIONS

- Prévoir un phasage précis des opérations



- Méthodes efficaces et pérennes
- Facilité de mise en œuvre si terrains peu résistants
- Coût économique intéressant
- Applicable dans le cas de cavité non accessible
- Méthodes adaptées pour les constructions nouvelles avec fondations renforcées

- Non applicable en zone déjà bâtie
- Applicable si cavité peu profonde (< 20 m)</li>
- Tassement des remblais avec le temps
- Terrain peu accidenté pouvant être terrassé et accessible à des engins de chantier lourds

Découverte des terrains de surface

Catiche

- Nécessité d'évaluer les vibrations induites si enjeux sensibles à proximité
- Législation stricte quant au type, à la détention, au transport et à l'utilisation d'explosifs
- Explosifs à proscrire pour les cavités présentant des risques d'émission de gaz explosifs