

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-15-149564-02401A

26/09/2016

**Guide sur les solutions de mise en sécurité des
cavités souterraines abandonnées d'origine
anthropique**

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable*

Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines abandonnées d'origine anthropique

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

PREAMBULE

Dans le cadre du programme d'appui aux pouvoirs publics EAT-DRS02 intitulé « Analyse, prévention et maîtrise des risques de mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines et de versants rocheux instables », l'INERIS a réalisé ce document pédagogique relatif aux méthodes de traitement destinées à réduire la vulnérabilité des territoires sous-cavés.

Ce document s'inscrit également dans le cadre de l'action 9 du Plan National Cavité.

Il a été établi sur la base de l'expérience de l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur. Il a fait ensuite l'objet d'une relecture par des administrations, professionnels et collectivités, susceptibles d'utiliser ou de diffuser ce document.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent document intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

Liste des relecteurs :

Mathilde BASTAERT – MEEM – DREAL Alsace

Behrooz BAZARGAN-SABET – BRGM

Véronique BERCHE – Cerema – Direction territoriale Nord-Picardie

Samuel COUSSY - BRGM

Pascal DEPARIS – Ville d'Amiens

Sandrine FAUCHET – MEEM – Direction générale de la prévention des risques

Mélanie FONTAINE – BRGM

Charles KREZIAK – Cerema – Direction territoriale Ile de France

Albin GUYON- IGC Paris

Cédric LEFEBVRE – Cerema – Direction territoriale Nord-Picardie

David MATHON – Cerema – Direction territoriale

Jean-Frédéric OUVRY – ANTEA GROUP

Bernard PIQUETTE - INERIS

Serge TERRAMORSI – MEEM – DDTM Bouches du Rhône

Cyrille THOMAÏDIS – Bureau des Carrières Souterraines de Gironde

Émilie VANOUDEUSDEN – BRGM

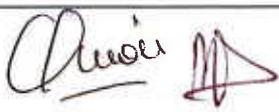
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	C. PINON - M. DEGAS	J-M. WATELET	C. FRANCK
Qualité	Ingénieurs à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Ingénieur à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Délégué appui technique de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	5
1.1 Contexte.....	5
1.2 Domaines d'application	6
2. LES PRÉALABLES À LA MISE EN SÉCURITÉ.....	7
2.1 Quelles urgences ?	7
2.2 Comment choisir la méthode de traitement ?.....	7
2.3 Dans quel(s) objectif(s) ?	9
3. LES MÉTHODES DE TRAITEMENT.....	11
3.1 Comment conserver la cavité ?.....	13
3.1.1 Par boulonnage	13
3.1.2 Par renforcement des piliers.....	13
3.1.3 Par édification de piliers artificiels.....	14
3.1.4 Par portiques ou cintrage.....	15
3.2 Comment combler la cavité ?.....	15
3.2.1 Par déversement gravitaire depuis la surface.....	16
3.2.2 Par injections	16
3.2.3 Par remplissage avec une mousse thermodurcissable.....	17
3.2.4 Par poussage en souterrain.....	17
3.3 Comment supprimer ou détruire la cavité ?.....	18
3.3.1 Par terrassement-comblement	18
3.3.2 Par foudroyage	19
3.4 Comment mettre en sécurité par techniques « passives » ?.....	19
4. LES CONTRAINTES ET PRÉCAUTIONS.....	23
4.1 Les pré-requis	23
4.1.1 Quelle emprise traiter ?	23
4.1.2 La cavité est-elle accessible ?	24
4.1.3 Quel volume de vide traiter ?.....	24
4.1.4 A quelle profondeur se trouve la cavité ?.....	25
4.1.5 Comment faire en zone urbanisée ?.....	26
4.2 Quelle procédure administrative ?.....	26
4.3 Quelles sont les contraintes environnementales à ne pas négliger ?.....	27

4.3.1 Quel matériau choisir ?.....	27
4.3.2 En phase « travaux »	28
4.3.3 La faune et la flore	29
4.4 Les impacts et la traçabilité des travaux.....	29
5. SYNTHÈSE DES CRITÈRES À PRENDRE EN COMPTE POUR LE CHOIX DE LA MÉTHODE	31
6. POUR ALLER PLUS LOIN.....	35
7. GLOSSAIRE.....	39
8. LISTE DES ANNEXES	43

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

L'excavation du sous-sol a souvent accompagné l'histoire et le développement économique et démographique de nombreuses régions ou agglomérations qui ont dû faire face dès le XIX^{ème} siècle à une forte croissance de population et à la construction de vastes ensembles urbanisés. De nombreuses villes et leur périphérie sont sous-cavées par des vides souterrains de toute origine qui peuvent poser des problèmes de sécurité pour les populations et des difficultés de développement pour les constructions futures et les projets d'aménagement.

La démarche de sécurisation des personnes et des biens concerne toutes les surfaces sous-cavées. Elle oblige soit à prendre des mesures préventives de sauvegarde, parfois très mal acceptées par les intéressés, soit au contraire à engager des travaux de protection, dont les coûts peuvent avoir de sérieuses incidences sur le contexte socio-économique de la zone affectée. Il s'agit néanmoins d'un investissement souvent nécessaire, voire indispensable, pour garantir la sécurité des personnes, la pérennité du bâti existant ou le développement de projets d'urbanisation.

Dans chaque cas d'exposition à un risque d'effondrement, le choix de la méthode de traitement la plus adaptée à la situation se pose non seulement sur le plan purement technique, mais aussi sur le plan décisionnel en définissant clairement les objectifs visés quant à la destination du site et le niveau de protection adapté aux enjeux. Le choix final de la solution retenue repose inévitablement sur des critères techniques et économiques, mais également sociaux et politiques.

Le présent document a pour objectif d'apporter aux acteurs concernés (administrations locales, élus, gestionnaires, aménageurs), des éléments d'aide à la décision pour la sécurisation des terrains impactés par des cavités abandonnées. Pour cela, il comprend :

- une description des méthodes de traitement les plus souvent pratiquées, en phase préventive (lorsque l'on a connaissance de la présence de vides mais que les affaissements ou effondrements n'ont pas eu lieu) comme en phase de crise, après effondrement (formation de *fontis* par exemple) ;
- une description de la démarche de décision avec la définition de critères de choix pour une méthode de mise en sécurité ;
- une synthèse des principales contraintes et précautions à prendre dans le cadre de la mise en sécurité.

Sont joints à ce document : un glossaire (*tous les mots en italique sont définis dans le glossaire en fin de rapport*), des références pour ceux qui désirent en savoir plus (certaines disponibles sur internet), des fiches récapitulatives comprenant les avantages et inconvénients des principales grandes familles de traitement, des exemples d'application, une aide à la rédaction du dossier de consultation d'un *maître d'œuvre* de travaux et une définition de la *marge de sécurité*.

1.2 DOMAINES D'APPLICATION

Le type de *cavités* concernées par ce document sont les *cavités* souterraines abandonnées d'origine *anthropique*, c'est-à-dire issues de l'activité humaine et pour lesquelles il n'y a plus de travaux d'extraction, ni d'exploitant connu. Ces *cavités* ont pour origine aussi bien l'extraction de matériaux non concessibles (carrières souterraines, marnières...) que le creusement de refuges (souterrains moyen-âgeux, habitats troglodytiques, sapes de guerre...).

Bien que les méthodes de sécurisation qui sont présentées dans ce document soient globalement comparables à celles utilisées pour les mines (régime des concessions) et les carrières souterraines en activité (*ICPE*), il est rappelé que les mines et les carrières souterraines en activité relèvent de procédures administratives (réglementations, responsabilité...) et de contrôles différents. Pour autant, mines et *cavités* possèdent un point commun, celui d'affecter irrémédiablement le sous-sol, les mécanismes d'instabilité y pourvoyant étant identiques. Le présent guide ne traite pas des mines (abandonnées ou non) ou des carrières souterraines en activité.

Les méthodes de sécurisation des *cavités* souterraines d'origine naturelle, que sont les vides de dissolution par exemple, peuvent différer pour certaines applications en fonction des contraintes géologiques et hydrauliques.

En outre, le présent document ne traite pas des techniques de surveillance [10] ou encore des modalités de déplacement des *enjeux* de surface. Seules les méthodes de traitement sont présentées ici.

Les différentes typologies de *cavités* souterraines abandonnées d'origine *anthropique* et les instabilités associées ne sont pas reprises dans ce document. Ces informations sont largement disponibles dans les ouvrages et/ou sites internet cités en bibliographie [8][13][20][21][22][23][25][26].

2. LES PRÉALABLES À LA MISE EN SÉCURITÉ

2.1 QUELLES URGENCES ?

En présence d'un site sous-cavé, 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...¹), 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, nous pouvons citer : inspection et diagnostic des vides souterrains autour de la zone effondrée, recherches en archives, analyse des études antérieures, des documents historiques, reconnaissances géologiques-géotechniques (géophysique, sondages, décapage à la pelle, etc.), création de *puits* d'accès... ;
2. 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 [13][26]. 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 [22][20][25].

2.2 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 au maire (en vertu de l'article L563-6 du Code de l'environnement), mettre en place une démarche coordonnée et logique de gestion du risque. La démarche proposée pour gérer au mieux le risque lié à la présence de *cavités* souterraines est schématisée en Figure 1.

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* [13][20][25][26]. Il est 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*.

¹ Procédure décrite dans le guide de gestion des cavités à l'usage des maires [22].

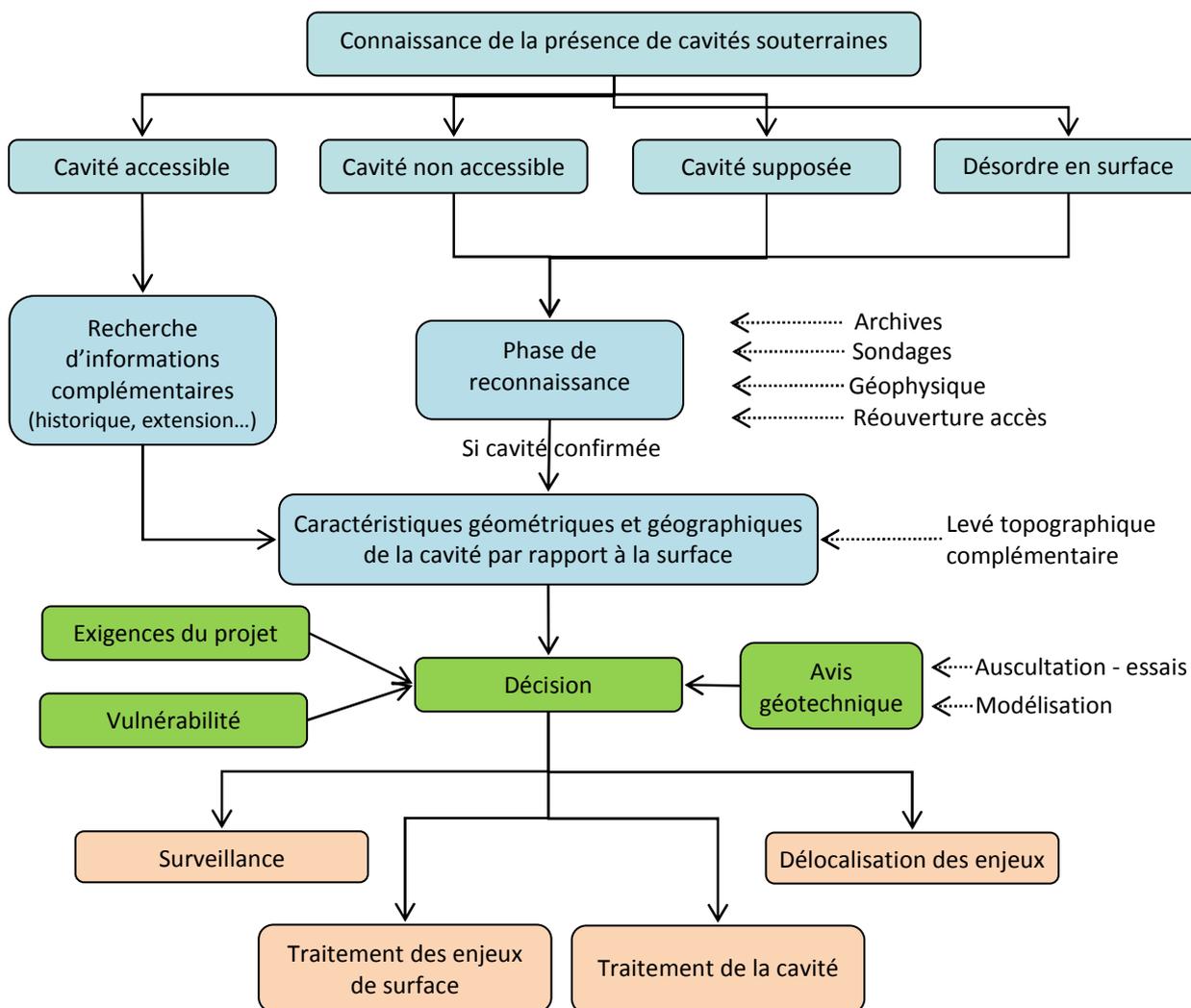


Figure 1 : Diagramme de gestion du risque cavités
(en bleu : phase informative ; en vert : phase de diagnostic ;
en saumon : phase de gestion de la mise en sécurité)

Le présent document ne traite pas des techniques de surveillance² ou encore des modalités de déplacement des enjeux de surface³. Seules les méthodes de traitement sont présentées ici. Rappelons toutefois que la **surveillance** est un maillon important de la mise en sécurité.

Le choix du mode de traitement dépend alors :

- 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) ;

² Pour plus de détails sur ces thématiques, se reporter au guide « Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : surveillance- traitement » réalisé par l'INERIS en 2007 [25] et au guide surveillance des cavités souterraines, à paraître [10].

³ 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 [22].

- 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...).

A cette liste s'ajoutent les **critères techniques et économiques**.

Un document spécifique a été rédigé par l'INERIS en 2013 donnant quelques exemples de mise en œuvre de traitements basée sur l'analyse de retours d'expérience [19].

2.3 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 destruction 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 réseaux⁴) ;
- **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 *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* ;

⁴ 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.

- l'intérêt de **conserver les cavités** souterraines ouvertes (dans le cadre d'un projet d'aménagement ouvert au public, comme un musée des carrières 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 [10][25].

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 terme⁵ ;
- 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 A échéance centennale [10].

3. LES 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. Elles se classent en deux catégories :

- les **mesures de traitement dites *directes (ou actives)*** : on entend par méthodes directes, les méthodes qui consistent à traiter directement la *cavité*, il s'agit des méthodes de *confortement*, des méthodes de *comblement* et des méthodes de destruction des vides ;

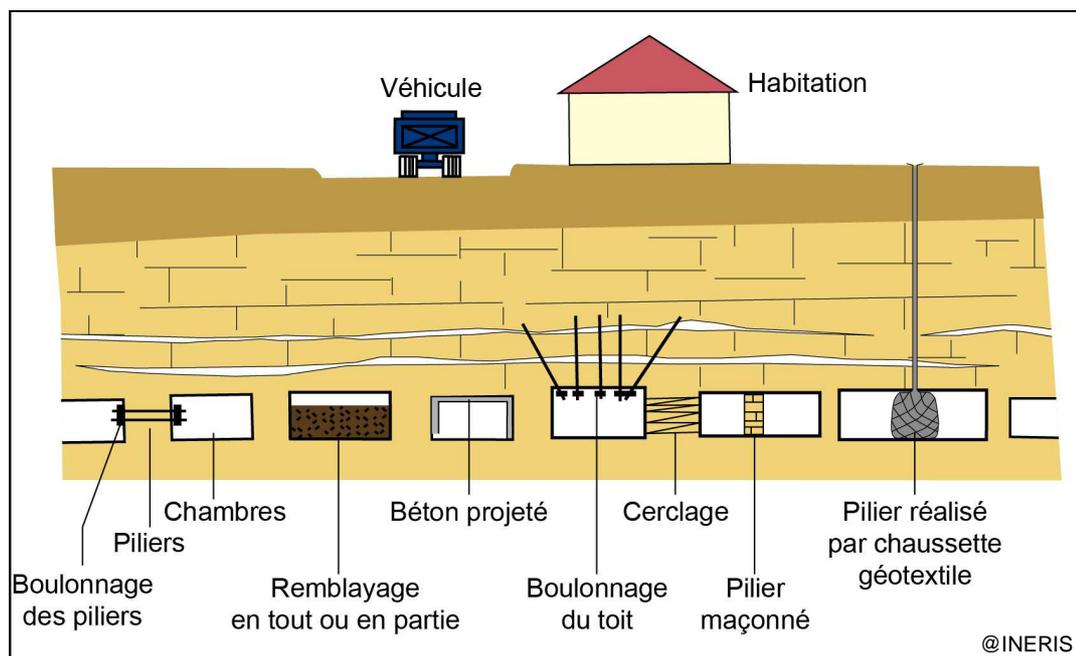


Figure 2 : Schéma présentant les différentes mesures de traitement directes (hors méthodes de destruction)

- les **mesures de traitement dites *indirectes ou passives*** : 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*.

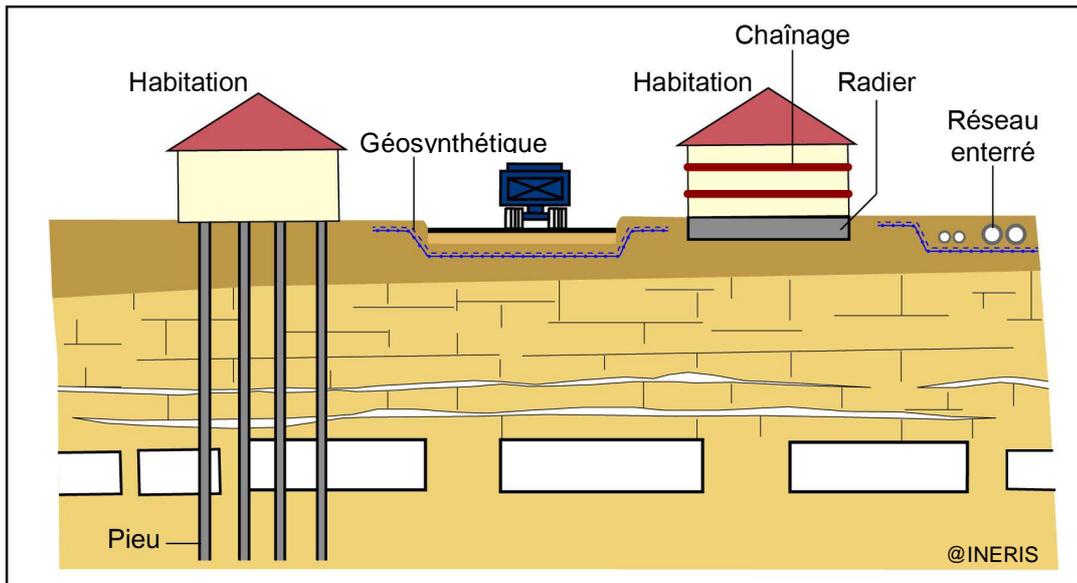


Figure 3 : Schéma présentant les différentes mesures de traitement indirectes

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.

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.

Toutes les mesures constructives de mise en sécurité de la surface vis-à-vis du risque lié aux cavités souterraines sont, par ailleurs, détaillées dans le guide « Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : surveillance-traitement » réalisé par l'INERIS en 2007 [25].

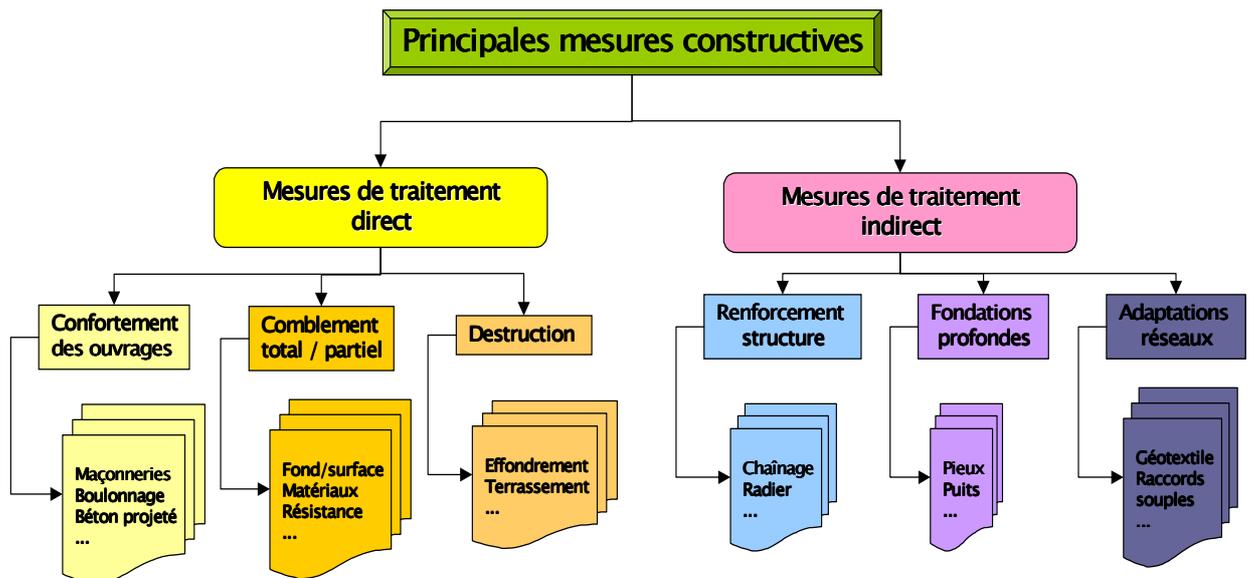


Figure 4 : Les principales mesures constructives

Afin de rendre plus concrètes les méthodes de mise en sécurité, et de donner une approche financière de ce type de travaux, quelques exemples de mise en sécurité de *cavités* sont synthétisés en annexe.

3.1 COMMENT 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**, en particulier lorsque l'on souhaite réutiliser ces *cavités* comme musées, champignonnières, lieux d'exposition ou tout autre type d'activité. 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.

3.1.1 PAR BOULONNAGE

Le **confortement par boulonnage (appelé aussi clouage)** 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

3.1.2 PAR RENFORCEMENT DES PILIERS

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



Figure 6 : Reprise d'un pilier par maçonnerie



Figure 7 : Cerclage-ceinturage d'un pilier

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

3.1.3 PAR ÉDIFICATION DE PILIERS ARTIFICIELS

Le **confortement** par construction de pilier maçonné 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 : Construction d'un pilier maçonné

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.

3.1.4 PAR PORTIQUES OU CINTRAGE

Le **confortement** par mise en place de portiques 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.



Figure 9 : Soutènement par portique

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*.

3.2 COMMENT 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.

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. 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.

Les matériaux de *comblement* utilisés dépendent des contraintes de mise en œuvre :

- pour le déversement gravitaire depuis la surface (remplissage des *cavités* sans *clavage*), 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 (§4.3.1) ;
- pour les *injections*, les *coulis*, au sens général, comprennent toujours un liant hydraulique associé à une charge inerte constituée d'un matériau noble (sable ou « sablon ») ;
- les mousses : celles à base de polyuréthane ne sont plus utilisées, et actuellement les mousses sont à base de résine de phénol-formaldéhyde ou d'urée-formaldéhyde.

3.2.1 PAR DÉVERSEMENT GRAVITAIRE DEPUIS LA SURFACE

La technique du **comblement gravitaire** vise à remplir la *cavité* avec un matériau inerte par le biais de *forages*.



Figures 10 : Comblement par déversement gravitaire

Plusieurs méthodes sont possibles : voie sèche (matériau granuleux sans ajout d'eau), voie semi-humide (matériaux pâteux) et voie humide ou hydraulique (matériaux semi-liquides). Des *vides résiduels* peuvent subsister en fin de traitement ou réapparaître après *consolidation* des matériaux.

3.2.2 PAR INJECTIONS

Le principe du **comblement par injections** consiste à envoyer sous pression un mélange capable de durcir dans le temps et à remplir totalement la *cavité*. Ces mélanges, nommés « *coulis* », ont des natures et propriétés différentes selon les cas.



Figure 11 : Comblement par coulis de silicates

3.2.3 PAR REMPLISSAGE AVEC UNE MOUSSE THERMODURCISSABLE

Cette solution de **comblement par mousse** est onéreuse mais permet de remplir entièrement et rapidement la *cavité*. La mousse est injectée sous pression par *forage*.



Figure 12 : Tunnel édifié à travers la mousse expansive pour maintenir un passage

La pérennité mécanique dans le temps de la mousse n'a pas été évaluée à ce jour ; ainsi que son impact environnemental.

3.2.4 PAR POUSSAGE EN SOUTERRAIN

Il s'agit d'un mode de remblaiement par mise en place directe de remblais tout-venant, acheminés et déversés par des engins mécaniques (camions, chargeurs et bulldozers).

Eu égard aux contraintes de rendement (mécanisation intensive) et de sécurité du personnel, cette méthode de remblaiement n'est envisageable que si les avantages économiques demeurent favorables en considérant des conditions de site suivantes : vides peu dégradés et n'engendrant pas de risques pour la sécurité du personnel, vides accessibles et suffisamment grands pour permettre le passage des différents engins, réseau de ventilation adapté.

L'intérêt de la méthode est de pouvoir disposer de produits peu coûteux (bruts ou parfois simplement criblés, déblais tout-venant, déchets de taille de carrières, terres de fouilles, stériles miniers ou sablons ou graves), susceptibles d'offrir un bénéfice économique par stockage.

La principale contrainte demeure cependant la nature et la qualification du matériau utilisé (§4.3.1).

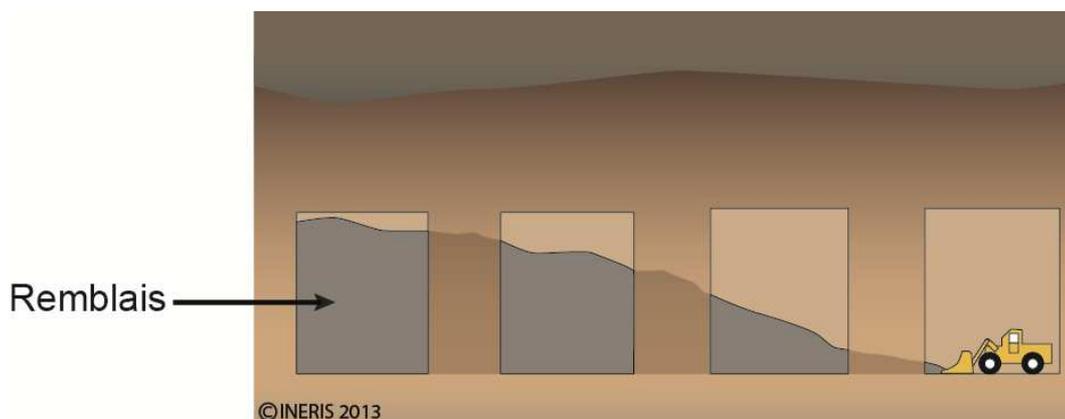


Figure 13 : Comblement mécanisé en souterrain

3.3 COMMENT SUPPRIMER OU DÉTRUIRE LA CAVITÉ ?

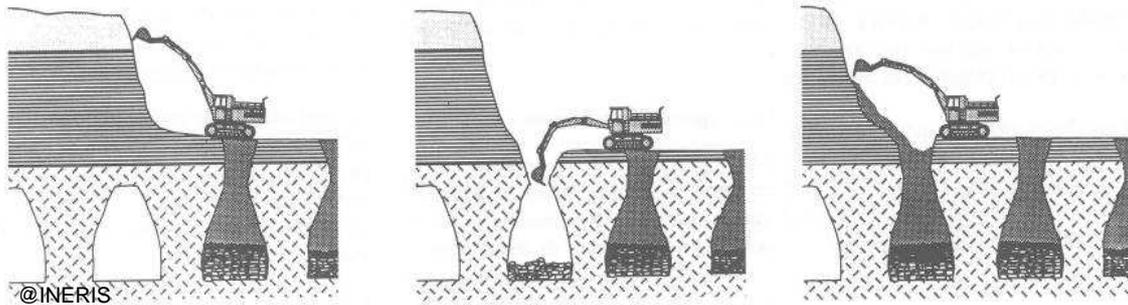
3.3.1 PAR TERRASSEMENT-COMPLEMENT

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 ;
- par *terrassement* jusqu'à la tête des *cavités* et remblaiement de ces dernières avec les matériaux de la couverture ou des matériaux d'apport (Figures 14).

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.



Figures 14 : Terrassement-comblement

3.3.2 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.

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

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.

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...).

Pour ces raisons, le *foudroyage* est une technique peu utilisée pour traiter les *cavités* souterraines abandonnées d'origine *anthropique*.

3.4 COMMENT METTRE EN SÉCURITÉ PAR 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* ».

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



Figure 15 : Pieu traversant une cavité

Pour les constructions neuves, l'emploi de *fondations* adaptées (*fondations* profondes, *pieux*...) 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.

Pour les réseaux (infrastructures routières et ferroviaires, canalisations enterrées...) **et les zones non bâties**, l'utilisation de méthodes dites parachutes (mise en place de *géosynthétiques*) permet de réduire la *vulnérabilité* de surface. Ces méthodes sont notamment utilisables dans les zones où un tassement de la surface reste acceptable.

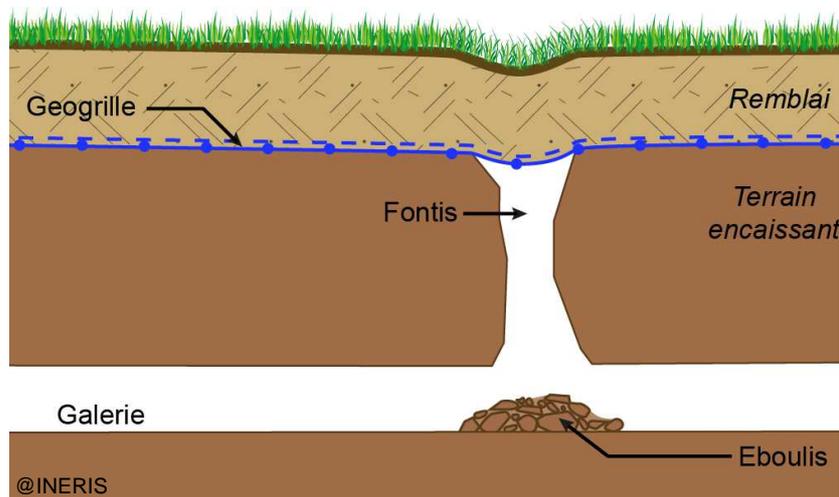


Figure 16 : Mise en place d'une géogridle (géosynthétique)

Dans le cas des cavités débouchant en surface par un puits (*catiches*, *marnières*, *crayères*), l'édification d'une **dalle en béton armé** (ou géogridle⁶) permet de parer au manquement de stabilité du bouchon qui ferme le *puits*

⁶ Etude de faisabilité en cours à l'INERIS.

d'accès. Elle est disposée au niveau de la tête du *puits* et déborde de part et d'autre du bouchon (besoin d'ancrage et *marge de sécurité*).

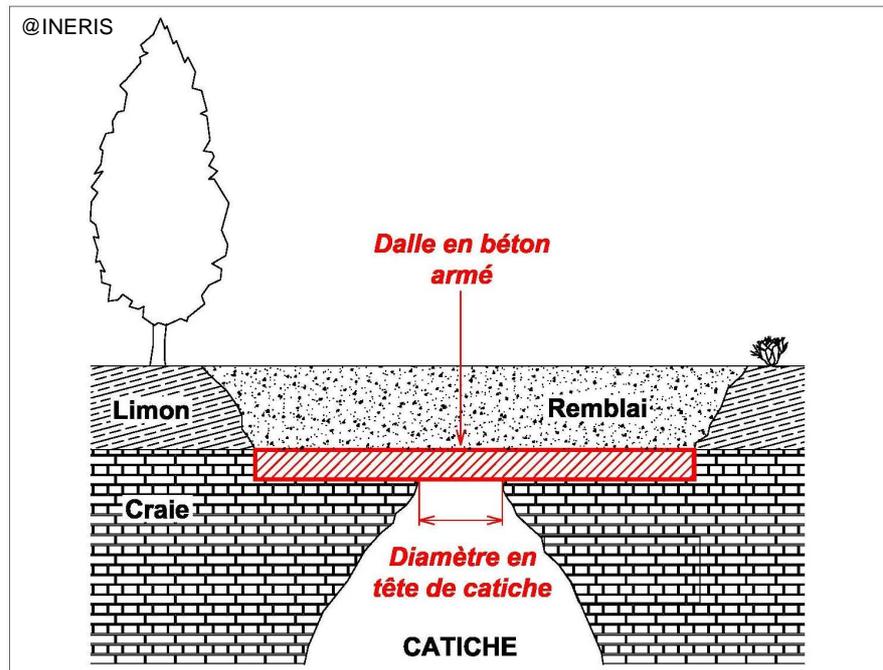


Figure 17 : Schéma d'une dalle en béton armé fermant une catiche

4. LES CONTRAINTES ET PRÉCAUTIONS

4.1 LES PRÉ-REQUIS

Indépendamment du diagnostic préliminaire mentionné dans la démarche générale de gestion du risque, une analyse de faisabilité technique est nécessaire pour estimer l'ampleur des travaux et définir la nature des traitements les plus appropriés au contexte. Cette analyse est réalisée à partir de travaux de reconnaissance complémentaires qui concernent plus particulièrement :

- la reconnaissance des limites des *cavités* et leur calage par rapport à la surface ;
- la vérification de l'état de conservation des *cavités* ;
- l'estimation du volume des vides ;
- l'environnement de la *cavité* (présence d'une nappe et son usage...) ;
- en présence de *cavités* effondrées ou de *fontis*, les effets de la décompression des terrains de *recouvrement*.

4.1.1 QUELLE EMPRISE TRAITER ?

Dans les zones urbanisées, l'emprise de la zone à traiter est dépendante de l'occupation des sols : les bâtis existants et les voies publiques sont à traiter en priorité pour mettre en sécurité les personnes et les biens. Rappelons que la plupart des effondrements localisés ayant entraîné le décès de personnes en France se sont produits en bordure de bâti, dans les jardins. Il est donc recommandé de traiter toute la (ou les) parcelle(s) concernée(s) par les *cavités*. Le groupement des opérations de *comblement* favorise en outre l'optimisation des coûts et permet de traiter plus largement les zones non aménagées. Toutefois, il est très rarement réalisé en raison des contraintes socio-économiques.

Par ailleurs, si l'effondrement d'une *cavité* se propage généralement à l'aplomb de celle-ci, il peut également engendrer un désordre latéralement, à une distance d'autant plus grande que les terrains de surface sont de mauvaise qualité (faible résistance géomécanique). Inversement, pour protéger un enjeu en surface (une route, une habitation...), il ne suffit pas de traiter les vides qui se trouvent à l'aplomb de cet enjeu mais aussi ceux qui, latéralement, peuvent influencer sur un enjeu situé dans la zone d'influence. Il est donc nécessaire d'évaluer cette emprise théorique de manière à définir une ***marge de sécurité*** par rapport à la position de l'enjeu ou une *marge de recul* par rapport au vide. Cette problématique est détaillée en annexe.

Compte tenu de cette *marge de sécurité* à intégrer à l'emprise de la zone à traiter, il devient, dans de nombreux cas, nécessaire de réaliser des travaux de mise en sécurité au-delà de l'emprise administrative du propriétaire de l'enjeu. Il faut donc tenir compte également des parcelles voisines qui peuvent ne pas appartenir à la même personne ou entité et dont il faudra solliciter l'accord et, éventuellement, la participation financière.

En particulier, 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).

4.1.2 LA CAVITÉ EST-ELLE ACCESSIBLE ?

Une autre question essentielle est de connaître les conditions d'accessibilité du site souterrain, notamment :

- peut-on accéder en souterrain par des entrées en *cavage* ou des *puits*, réalisés et praticables ou même potentiellement réalisables (réouverture du site) ?
- peut-on évoluer dans un espace souterrain de dimensions suffisantes que ce soit pour circuler librement à pied ou pour procéder à des travaux et des contrôles en souterrain (remblaiement direct, ou opérations de *confortement* des *cavités*, etc.) ?
- peut-on opérer les travaux dans des conditions d'hygiène et de sécurité suffisamment bonnes ?

Ces conditions impliquent un bon état de stabilité des *cavités* souterraines (*toit*, piliers, *galeries*), mais aussi une ventilation convenable pour assurer ou établir une atmosphère salubre dans l'ensemble du chantier souterrain.

En cas d'*enjeux* existants ou futurs, l'inaccessibilité à la *cavité* (ennoyage, gaz ou l'état de ruine avancée de la *cavité*) ne laisse, par contre, place qu'à des solutions de traitement par suppression des vides, opérables depuis la surface (§3.2) ou encore à des traitements des *enjeux* de surface (§3.4).

Si les conditions de sécurité le rendent possible, on ne doit surtout pas omettre la possibilité de créer un accès (*fonçage*, réouverture, curage d'un *puits* d'accès) car la connaissance précise des caractéristiques du vide rend possible la déclinaison de toutes les options de traitement et de contrôles en phase travaux.

4.1.3 QUEL VOLUME DE VIDE TRAITER ?

L'évaluation du vide à traiter est fondamentale pour le choix de la méthode et surtout pour maîtriser le coût de mise en sécurité.

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.

Dans les *cavités* plus difficilement identifiables, plus dégradées ou plus complexes, présentant des extensions mal délimitées ou des zones effondrées, le calcul des volumes devient beaucoup plus délicat. On doit estimer les pertes liées aux vides persistant au sein des remblais ou des zones foisonnées (adopter

également des coefficients correcteurs souvent empiriques qui peuvent être affinés par des enregistrements paramétriques⁷).

Pour limiter le volume de matériaux à mettre en œuvre (et donc le coût du traitement), il est possible de confiner la zone à traiter par la mise en place de barrages en souterrain. La constitution des barrages permet une certaine maîtrise des volumes injectés, notamment en cas d'utilisation de *coulis*. La meilleure des solutions est de réaliser ces barrages depuis le fond. Cette option n'est toutefois pas toujours possible : *cavité* non accessible ou dangereuse, coût élevé des travaux... C'est pourquoi, des solutions de traitement basées sur l'utilisation de matériaux à granulométrie élevée ou encore de géotextile comme « chaussette » de remplissage du matériau ont été élaborées pour faciliter le confinement de la zone à traiter.



Figure 18 : Barrage de confinement en souterrain

Il est impératif de vérifier si les travaux de mise en sécurité n'isolent pas un secteur de la *cavité* souterraine, surtout si celle-ci est accessible et visitable. Le maintien d'un passage ou la réouverture d'un *puits* d'accès supplémentaire constitue un surcoût important et des contraintes.

Pour diverses raisons d'opérabilité (travail en hauteur, effet de taille du chantier, etc.), certaines techniques comme le *confortement* (§3.1) sont plus difficiles à mettre en œuvre (d'un point de vue économique et pratique) dès lors que la hauteur du vide est supérieure à 5 ou 6 m.

4.1.4 A QUELLE PROFONDEUR SE TROUVE LA CAVITÉ ?

Dans les sites souterrains inaccessibles, l'épaisseur du *recouvrement* (profondeur des *cavités*) constitue un paramètre dominant pour le choix des méthodes de traitement depuis la surface.

⁷ Par exemple issus de forages de reconnaissance ou d'essais spécifiques du type essai d'injection.

Certaines méthodes, comme le *terrassement-comblement* et le *foudroyage* (§3.2.4), ne sont en effet 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.

Par ailleurs, les techniques de remblaiement par déversement gravitaire (§3.2.1) sont plus difficiles à des profondeurs supérieures à 30 - 40 m pour des raisons de réalisation de foration (précision des implantations, diamètre, tubage, déviation etc.).

Les techniques de *comblement* par *injections* (§3.2.2), opérées en *forages* de petit diamètre et systématiquement avec tubage, sont utilisables jusqu'à des profondeurs plus importantes, voisines de 70 - 80 m.

4.1.5 COMMENT FAIRE EN ZONE URBANISÉE ?

Les techniques de *comblement* depuis la surface sont évidemment plus délicates à mettre en œuvre en zones urbanisées qu'en zones non urbanisées (amenée et stockage des matériaux, bruit, poussières, vibrations...). Elles supposent l'utilisation de petites machines, limitées en performances (en termes de profondeur par exemple).

Les méthodes destructives, comme le *terrassement-comblement*, peuvent être envisagées en milieu urbain sous réserve que les emprises permettent d'assurer le développement des talus de déblais dans des conditions de stabilité appropriées. Quant aux méthodes de destruction par *foudroyage* à l'explosif ou pilonnage des terrains, elles sont maintenant écartées compte tenu des pressions sociétales et des désordres possibles sur les avoisinants.

4.2 QUELLE PROCÉDURE ADMINISTRATIVE ?

Afin de réaliser le projet de traitement de la *cavité* souterraine dans les conditions de délais, de qualité ainsi que de coûts fixés par le projet, il est recommandé que le *maître d'ouvrage*, propriétaire et commanditaire des travaux, se fasse aider par un *maître d'œuvre* (c'est une obligation dans le cadre des marchés publics⁸).

Les missions de maîtrise d'œuvre « réhabilitation d'infrastructure » (selon l'arrêté du 21 décembre 1993 – Annexe III de la loi MOP) peuvent être appliquées aux marchés relatifs à la réduction du risque lié à la présence de *cavités* et donc au traitement de *cavités* souterraines.

Il est toutefois conseillé de faire réaliser les études de diagnostic de manière indépendante, avant de lancer la procédure de maîtrise d'œuvre ; la partie géotechnique du diagnostic pourra être calée sur la mission G5 de la norme NF

⁸ En marché public, la maîtrise d'œuvre ne peut être chargée d'effectuer elle-même les travaux, puisqu'elle ne doit pas avoir de liens juridiques avec les entreprises travaillant sur le chantier. Le contrat conclu entre la personne publique et le *maître d'œuvre* de droit privé est construit en fonction de la loi MOP (Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée).

P94-500 de novembre 2013. Mais, dans le cadre d'une urgence ou de solution unique, l'ensemble des missions peut être attribué directement à un *maître d'œuvre*.

La maîtrise d'œuvre sera responsable des choix techniques inhérents à la réalisation des travaux de traitement conformément aux exigences de la maîtrise d'ouvrage.

Un document-type pouvant être utilisé comme trame de consultation d'un *maître d'œuvre* pour le traitement de *cavités* sous-cavant une commune est présenté en annexe. Son organisation part du principe que les études de diagnostic du risque ont déjà été réalisées de manière à permettre le cadrage technique et financier de la mission de maîtrise d'œuvre. Pour chaque chapitre, il comprend une description de ce qu'il doit contenir, illustré par une rédaction type banalisée et adaptable.

4.3 QUELLES SONT LES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES À NE PAS NÉGLIGER ?

4.3.1 QUEL MATÉRIAU CHOISIR ?

En milieu agressif, c'est-à-dire un milieu ou un massif rocheux constitué, par exemple, de roches salines ou évaporitiques (tels le gypse et l'anhydrite, le sel gemme ou les sels potassico-magnésiens), la corrosion peut fortement se développer sur les matériaux ferreux (*boulons*, cintres, grillage, treillis, cerclage, etc.) couramment utilisés dans les méthodes de *confortement* (§3.1). Toujours dans ces milieux agressifs, les produits cimentés, *mortiers* et *coulis* (§3.2) seront soumis à une altération chimique non négligeable. La présence de venues d'eaux acides, en particulier les eaux séléniteuses (massif rocheux contenant des formations gypseuses), provoque les mêmes phénomènes de corrosion et d'altération chimique.

Les caractéristiques des matériaux de *remblayage* font maintenant l'objet de spécifications assez rigoureuses [25][8][9], mentionnées souvent explicitement dans un *cahier des charges* établi par le *maître d'ouvrage*, sur la base, par exemple, des notices IGC¹⁰ en région parisienne [14][15][16]. Ces spécifications concernent principalement les propriétés de résistance mécanique et 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 dehors des matériaux naturels comme les sablons, sables et graviers, d'autres « matériaux alternatifs » peuvent être utilisés à condition qu'ils soient qualifiés d'inerte⁹ (déchets inertes du Bâtiment et Travaux Publics par exemple, sous réserve du contrôle de leur contenu) [8][9]. Ils peuvent être utilisés seuls pour former un remblai ou en association avec un liant dans un mélange contenant une quantité plus ou moins importante d'eau. Tout projet de valorisation de « matériaux alternatifs » en *comblement* de *cavités* souterraines nécessite au préalable une étude technique approfondie. Un document proposant une

⁹ On définit la notion de matériaux inertes par rapport à un environnement comme n'ayant pas de charge polluante ou de capacité de réaction au contact d'autres matériaux, des terrains encaissants ou de l'eau, susceptible d'engendrer un impact sur cet environnement.

procédure opérationnelle pour l'acceptation de ce type de matériau est en cours de rédaction (2016).

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 entraîner 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.

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.

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.).

4.3.2 EN PHASE « TRAVAUX »

Les travaux de mise en sécurité réalisés sous la responsabilité du *maître d'ouvrage*, représenté fréquemment par un *maître d'œuvre*, doivent correspondre aux spécificités du *cahier des charges* définies dans la phase de conception. Ainsi pendant les travaux, un contrôle régulier des différents moyens et procédures de mise en œuvre est recommandé. Le *maître d'œuvre*, en accord avec le *maître d'ouvrage*, peut imposer des contrôles extérieurs (bureau de contrôle).

Dans le cas du *remblayage* de carrières souterraines abandonnées, le contrôle du chantier par l'administration ne s'exerce que dans le cadre de la protection de l'hygiène et de la sécurité des travailleurs, directement par l'inspection du travail et souvent par l'intermédiaire d'un coordinateur de sécurité (la plupart des chantiers de traitement suppose la présence simultanée de plusieurs entreprises). Le contrôle de la nature des produits de *remblayage* n'est en fait pas directement soumis à une autorité administrative, sauf si les matériaux ou l'activité sont clairement répertoriés sous la nomenclature *ICPE*. Le site traité devient alors lui-même une installation classée. Cependant, certaines collectivités (IGC¹⁰ à Paris par exemple) exercent un contrôle qualitatif des travaux prescrits, en phase chantier, et se prononcent ensuite sur les documents de récolement.

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 lors des suppressions/destructions de *cavités* mais également lorsque les travaux conduisent à la mise en pression des terrains de *recouvrement* lors des opérations de *clavage*.

¹⁰ Inspection Générale des Carrières de Paris.

4.3.3 LA FAUNE ET LA FLORE

Les solutions de fermeture définitive des orifices reliant la *cavité* souterraine à la surface (essentiellement les entrées en *cavage*) devront être adoptées en tenant compte des directives et accords relatifs à la protection de la faune et la flore sauvage (selon la directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992) et notamment la préservation des chiroptères, espèces nichant fréquemment dans les *cavités* souterraines, notamment à proximité des accès. Le guide rédigé en 2011 par l'INERIS relatif aux bonnes pratiques pour la mise en sécurité d'ouvrages miniers débouchant en surface (*puits*, entrées de *galerie*...) peut aider à l'élaboration des fermetures de ces ouvrages spécifiques [12].

4.4 LES IMPACTS ET LA TRAÇABILITÉ DES TRAVAUX

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 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 fiche¹¹ 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) » [18]).

Cette fiche-travaux ou le dossier de récolement, conservé par le propriétaire, devra être transmis à la collectivité concernée (mairie...) ou/et à l'administration (DDT...) et permettra d'assurer une traçabilité des travaux de mise en sécurité. Ce document pourra, par exemple, être transmis au BRGM ou à une base communautaire pour compléter les données relatives aux *cavités* et mouvements de terrain.

En fonction de la technique et/ou des matériaux utilisés, des mouvements résiduels de sols (tassements) pourront se produire dans le temps.

Pour les 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 [10].

¹¹ Téléchargeable sur le site de l'INERIS : <http://www.ineris.fr/centredoc/annexe6-fiche-travaux-1360659144.pdf>.

5. SYNTHÈSE DES CRITÈRES À PRENDRE EN COMPTE POUR LE CHOIX DE LA MÉTHODE

Le mode de traitement du site dépend fondamentalement du niveau de mise en sécurité que l'on recherche pour la destination des terrains (zones bâties ou à *urbaniser*).

Cette association traitement-*enjeux* peut être évidente (on assurera par exemple un traitement maximum sur une zone que l'on envisage d'urbaniser en pavillons et un traitement léger sur cette même zone en espace vert) mais elle suppose parfois de mener une réflexion préalable sur les alternatives possibles, notamment sur le choix des techniques. Dans certains cas, un règlement peut imposer le mode de traitement (PPR,...).

Compte tenu des **objectifs fixés**, il s'agit de déterminer la méthode la plus **performante** (rapidité, rendement, etc.), la plus **fiable** et la plus **pérenne**, et si possible la plus **facile de mise en œuvre** sur le plan technologique (opérations de foration, approvisionnement et préparation des produits, moyens nécessaires à la mise en place, reconnaissances préliminaires et contrôles, etc.).

Il faut aussi considérer les **conditions générales d'hygiène et de sécurité** du personnel (cas des travaux en souterrain) tout comme les **incidences de la technique sur l'environnement** (transport des produits, bruit, poussières, vibrations, modification du régime hydrologique du site, pollutions de toute nature, etc.).

C'est cependant le coût prévisionnel des travaux qui constitue généralement le paramètre déterminant du choix de la méthode retenue, même si cela entraîne parfois des manquements (approximation des volumes, mauvaise préparation des barrages, dimensionnement aléatoire des *confortements*...) et ouvre la voie à des contentieux préjudiciables et à la non satisfaction de l'objectif de mise en sécurité des personnes et biens.

On peut ainsi retenir deux objectifs principaux de traitement :

- la reconstitution, qui va rendre au terrain sa qualité d'origine et qui consiste le plus souvent à un remblaiement total avec *injections* de *clavage* ; elle est mise en œuvre quand les *enjeux* existants en surface sont forts ou que des projets d'aménagement sont envisagés et qu'aucun mouvement de la surface n'est admissible ;
- les techniques qui bloqueront toute évolution brutale des *cavités* mais qui n'empêcheront pas les mouvements de surface de type affaissement ou tassement. Les mouvements de surface ne sont pas préjudiciables à l'utilisation du site ou à la sécurité publique ; elle peut être associée à des mesures complémentaires comme la mise en place de « parachute » à base de *géosynthétiques* (géogrilles).

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 essentiels.

En situation de crise, après un effondrement de terrain par exemple, la procédure à suivre est décrite dans le guide de gestion des *cavités* à l'usage des maires [22]. Il convient, a minima, de mener une expertise pour identifier l'origine et le mécanisme de l'effondrement. En zone urbanisée, un *comblement* provisoire au sable humide est fréquemment nécessaire afin d'éviter un mouvement des parois de la *cavité*, et ce avant de réaliser des investigations¹² qui détermineront les travaux à mettre en œuvre en vue d'une mise en sécurité à long terme.

¹² En particulier, lorsque la *cavité* n'est pas connue, il est intéressant de pouvoir assurer un accès (*puits*) au souterrain pour préciser son extension et les possibilités de sécurisation.

Destination Critères de site		DÉFORMATIONS ACCEPTABLES DE LA SURFACE		DÉFORMATIONS NON ADMISSIBLES DE LA SURFACE		ESPACE SOUTERRAIN REUTILISE
		ESPACES VERTS, ZONE DE LOISIRS, PARC, PARKING	INFRASTRUCTURES LINÉAIRES ET RÉSEAUX DIVERS	CONSTRUCTION EXISTANTE	CONSTRUCTION NOUVELLE	
CAVITE SOUTERRAINE ACCESSIBLE		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 ¹³ et/ou reprise en sous-œuvre	Confortement ou comblement total avec injections ¹³ et/ou renforcement du bâti et/ou fondations adaptées	Toutes méthodes de confortement
CAVITE SOUTERRAINE INACCESSIBLE	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 ¹³	Terrassement-comblement ou comblement total avec injections ¹³ et/ou renforcement du bâti et/ou fondations adaptées	SO
	Hauteur de recouvrement >10 m	Comblement partiel et/ou traitement des enjeux	Comblement partiel et/ou renforcement des structures et adaptation éventuelle des réseaux	Comblement total avec injections ¹³	Comblement total avec injections ¹³ et/ou renforcement du bâti et/ou fondations adaptées	SO
CAVITE 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

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

¹³ Injections de clavage et injections de traitement des terrains si nécessaire.

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

++ Bonne adaptation de la méthode au domaine

+ Adaptation avec précautions ou travaux complémentaires

- Inadaptation de la méthode au critère

SO Sans objet

1 Solution économiquement discutable

2 Adéquation technique non garantie (2a : réactivité trop faible si évolution; 2b : problème d'emprise; 2c : renforcement potentiel insuffisant)

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

4 Incidence potentiellement néfaste sur l'environnement (4a : pollution possible; 4b : nuisances en phase travaux)

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

6. POUR ALLER PLUS LOIN

- [1] AFTES - *Groupe de travail sur les injections* - Tunnels et ouvrages souterrains n°164, mars/avril 2001, pages 68 – 89 : http://www.aftes.asso.fr/publications_recommandations.html
- [2] AFTES – *Recommandations : Béton projeté renforcé de fibres : technologie et mise en œuvre* - Tunnels et ouvrages souterrains n°126, 1994 : http://www.aftes.asso.fr/publications_recommandations.html
- [3] AFTES – *Recommandations : Choix du soutènement en galerie* - Tunnels et ouvrages souterrains n°1, 1974 : http://www.aftes.asso.fr/publications_recommandations.html
- [4] AFTES – *Recommandations : Conception et dimensionnement du béton projeté utilisé en travaux souterrains* - Tunnels et ouvrages souterrains n°164, 2001 : http://www.aftes.asso.fr/publications_recommandations.html
- [5] AFTES – *Recommandations : Technologie du boulonnage* – Tunnels et ouvrages souterrains n°241, 2014 : http://www.aftes.asso.fr/publications_recommandations.html
- [6] AFTES – *Recommandations : Conditions d'emploi du boulonnage* - Tunnels et ouvrages souterrains n°31, 1979 : http://www.aftes.asso.fr/publications_recommandations.html
- [7] AFTES – *Recommandations : Emploi des cintres en travaux souterrains* - Tunnels et ouvrages souterrains n°27, 1978 : http://www.aftes.asso.fr/publications_recommandations.html
- [8] AUBERT C. et BAZARGAN SABET B. – *Qualité environnementale des matériaux en comblement de cavités (phase 1)*, rapport BRGM référencé BRGM/RP-62579-FR de juillet 2013 : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62579-FR.pdf>
- [9] AUBERT C., BAZARGAN SABET B. et COUSSY S. – *Qualité environnementale des matériaux en comblement de cavités (phase 2)*, rapport BRGM référencé BRGM/RP-64257-FR de décembre 2014 : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64257-FR.pdf>
- [10] BENNANI M., BOUFFIER C. et FRANCK C. - *Guide de surveillance des carrières souterraines*, rapport INERIS référencé DRS-16-156834-00810A, à paraître.
- [11] DIDIER C. et WATELET J.M. – *Plan de prévention des risques naturels, Cavités souterraines abandonnées, Guide méthodologique*, document INERIS à l'initiative du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, Direction Générale de la Prévention Risques – SRNH d'octobre 2012 : http://catalogue.prim.net/201_plan-de-prevention-des-risques-naturels-cavites-souterraines-abandonnees-guide-methodologique.html
- [12] FRANCK C. et SALMON R. - *Guide de bonnes pratiques pour la mise en sécurité d'ouvrages miniers débouchant en surface*, rapport INERIS

référéncé DRS-11-119291-02819A de mars 2011.
<http://www.ineris.fr/ressources/recherche/iddoc=2583>

- [13] IFSTTAR – *Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées, Guide méthodologique*, guide technique de la Collection Environnement Les risques naturels, septembre 2014 : <http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/librairie/>
- [14] INSPECTION GÉNÉRALE DES CARRIÈRES DE PARIS – *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*, 6 janvier 2003¹⁴ : <http://www.igc-versailles.fr/telechargement.html>
- [15] INSPECTION GÉNÉRALE DES CARRIÈRES DE PARIS – *Notice technique : Travaux d'injection des anomalies liées à la dissolution du gypse antéludien*, 10 janvier 2003¹⁴ : <http://www.igc-versailles.fr/telechargement.html>
- [16] INSPECTION GÉNÉRALE DES CARRIÈRES DE PARIS – *Notice technique : Travaux de consolidations souterraines exécutés par injection pour les carrières de Calcaire Grossier, de gypse, de craie et les marnières*, 16 janvier 2003¹⁴ : <http://www.igc-versailles.fr/telechargement.html>
- [17] INSPECTION GÉNÉRALE DES CARRIÈRES DE PARIS – *Notice technique : Travaux de consolidations souterraines exécutées par piliers maçonnés dans les carrières de calcaire grossier situées en région parisienne*, 15 juillet 2004¹⁴ : <http://www.igc-versailles.fr/telechargement.html>
- [18] LAMBERT C. - *Programme additionnel au « Plan national pour la prévention des risques liés aux effondrements des cavités » - 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 du 21 décembre 2012 : <http://www.ineris.fr/centredoc/drs-12-128945-07936a-nouvelle-version-1385385946.pdf> et <http://www.ineris.fr/centredoc/guideeffondrement-web-1360659356.pdf>
- [19] LECOMTE A. - *Bilan technique, économique, environnemental et social de la gestion des carrières souterraines. Analyse de retours d'expérience*, rapport INERIS référencé DRS-13-135683-11926A du 19 décembre 2003.
- [20] PINON C. - *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 de juillet 2014, <http://www.ineris.fr/dossiers-thematiques-ineris/144763>

¹⁴ Nouvelle version à venir en 2016.

- [21] Portail de prévention des risques majeurs : www.prim.net
- [22] *Guide de gestion des cavités souterraines à l'usage des maires* – A paraître – Document en cours de rédaction par le CEREMA à partir de :
- Préfecture du Nord - *Guide de gestion des cavités souterraines à l'usage des maires*, Edition du 15 avril 2011 : http://www.nord.gouv.fr/content/download/14433/90984/file/Guide_gestion_cavités_souterraines_maires.pdf
 - Département et Préfecture de Seine-Maritime - *Gestion et prévention des risques liés à la présence de cavités souterraines en Seine-Maritime, Guide à l'usage des maires*, février 2007 : <http://www.seinemaritime.fr/docs/gestion-prevention-risque-cavite-souterraine.pdf>
 - Syndicat intercommunal Cavités 37 - *Dossier Cavités 37*, 1999 à 2008 : <http://cavites37.com>
 - Agglomération saumuroise - *Guide « Troglo'Guide »*, février 2011.
- [23] Site internet de recensement des cavités souterraines : <http://www.georisques.gouv.fr>
- [24] SOLETANCHE BACHY – Guide technique : Construire sur du solide : <http://www.soletanche-bachy.com/sbf/sbf.nsf/guideEnvoi>
- [25] TRITSCH J.J. - *Guide « Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : surveillance – traitement »*, rapport INERIS référencé DRS-07-86042-02484A du 12 février 2007 : www.ineris.fr/centredoc/Guide_carrieres.pdf
- [26] TRITSCH J.J., TOULEMONT M., DURVILLE J.-L., POTHERAT P. - *Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines : Guide technique du LCPC/INERIS/MEDD* – Collection environnement, les risques naturels – juin 2002 : <http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/librairie/>

7. GLOSSAIRE

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.
Boisage	Soutènement en bois mis en place pour éviter des éboulements localisés du ciel de carrière.
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
Bourrage	Remblais mis en place dans une carrière souterraine, pour combler les vides ou stocker les déchets de taille sans avoir à les remonter.
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 dans le nord de la France pour désigner une petite exploitation de craie en forme de bouteille (Crayère en Champagne)
Cavage	Cavité souterraine creusée par l'homme. Entrée en cavage : Entrée d'une carrière, à flanc de coteau.
Cavité	(en géologie) Espace 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 destinés à ralentir l'évolution des dégradations dans une carrière 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 injection, en particulier dans la région parisienne (notice IGC concernant les travaux de consolidations souterraines exécutés par injection pour les carrières de calcaire grossier, de gypse, de craie et les marnières).

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 »).
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)
Etude de sol	Elle est définie et codifiée par la norme NF-P-94 500 version 2013 (Etude géotechnique). Pour les cavités souterraines, elle comprend selon les cas : analyse de la documentation existante, visites de terrain, campagne géophysique, sondages (avec éventuellement vidéoscopie), relevé topographique, repositionnement du vide par rapport à la surface et si possible examen visuel des cavités souterraines.
Flambage	Phénomène d'instabilité d'une structure (pilier naturel ou artificiel), qui soumise à un effort de compression, a tendance à se déformer et à éclater perpendiculairement à sa hauteur. Synonyme : flambement.
Foncer fonçage	Action de percer, creuser une excavation.
Fondations	Partie de la structure transférant les efforts au sol. Les fondations peuvent être superficielles, semi-profondes ou profondes.
Fontis	Cratère formé en surface par l'effondrement brutal et inopiné des terrains à l'arrivée au jour d'une cloche de fontis.
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.
Galerie	Voie de cheminement utilisée dans l'exploitation des carrières. 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.
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement.
Injection	Action de combler la cavité depuis la surface et pratiquée avec des produits se rigidifiant par la suite.
Karst ou Poche de dissolution	Zone affectée de dissolution naturelle provoquant un vide parfois bourré par la suite. Le traitement de ce type de cavité relève de techniques particulières existantes ou en cours de développement qui ne sont pas abordées dans ce document.
Maître d'œuvre	Entité retenue par le maître d'ouvrage afin de réaliser les travaux dans les conditions de délais, de qualité ainsi que de coûts fixés par le projet, le tout conformément à un contrat.
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). Cf. annexe 4.

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.
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.
PLU	Plan Local d'Urbanisme
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.
Purger	Action de décoller et de faire tomber des blocs instables.
Radier	Mode de fondation surfacique amenant au sol une contrainte normalement uniforme. Ferrailé 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 carrière.
Remblayage	Fait de remblayer. Action de combler une cavité avec des matériaux rapportés, mais aussi résultat de cette action. Synonymes : 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	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.
Tréfonds	Sous-sol d'un terrain considéré sous l'angle d'une propriété.
Vides résiduels	Espace libre présent au ciel de carrière après remblayage (absence de clavage).
Vulnérabilité	Au sens large, exprime les conséquences prévisibles sur les enjeux exposés au risque (ici de mouvement de terrain) : personnes, biens et environnement (eau, faune, flore, patrimoine, activités...).
Zone à urbaniser	Au titre de l'article R 123.6 du Code de l'urbanisme, secteurs à caractère naturel de la commune destinés à être ouverts à l'urbanisation.
Zone urbaine	Au titre de l'article R 123.5 du Code de l'urbanisme, les secteurs déjà urbanisés et les secteurs où les équipements publics existants ou en cours de réalisation ont une capacité suffisante pour desservir les constructions à implanter.

8. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Fiches de synthèse des principales méthodes de traitement	7 A4
Annexe 2	Exemples de mise en sécurité de cavités souterraines	2 A4
Annexe 3	Document d'aide à la rédaction d'un dossier de consultation pour une maîtrise d'œuvre de travaux de mise en sécurité	9 A4
Annexe 4	La « marge de sécurité »	3 A4

**ANNEXE 1 : FICHES DE SYNTHÈSE
DES PRINCIPALES
MÉTHODES DE TRAITEMENT**

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

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

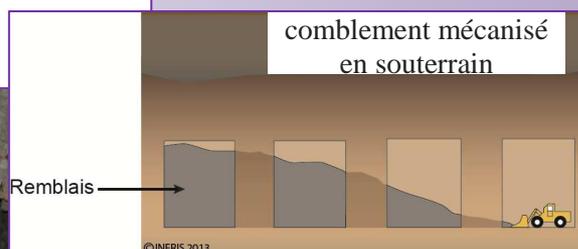
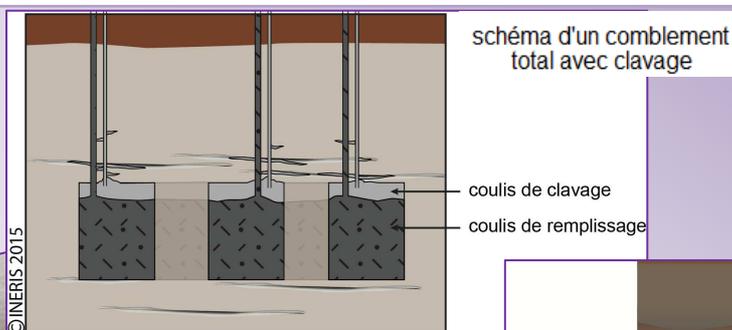
- Supprimer (si comblement total) ou diminuer (si comblement partiel) le vide souterrain
- Amélioration de la tenue des piliers par confinement
- Déverser un matériau de remblai ou un coulis (de façon gravitaire ou sous pression) depuis la surface à partir de forages - ou directement par le fond

➤ 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)

- Disponibilité d'un site accessible en surface si forages/déversement depuis la surface
- 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

DESTRUCTION

➤ ROLES

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

➤ PRINCIPES

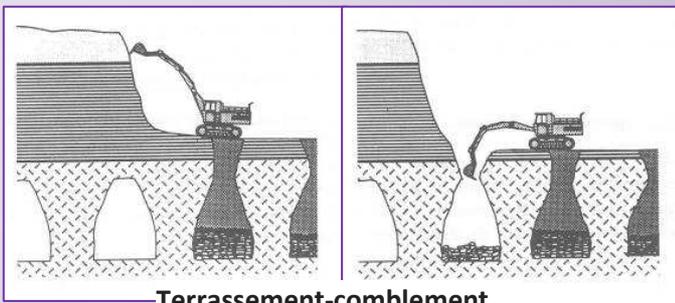
- Comblement direct des cavités sous-jacentes à partir des matériaux de recouvrement abattus par voie mécanique
- Remblaiement avec les matériaux de recouvrement (suivi d'un compactage) effectué après mise à jour des cavités par décaissement mécanisé (terrassement-comblement)
- Foudroyage dirigé des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

➤ TECHNIQUES

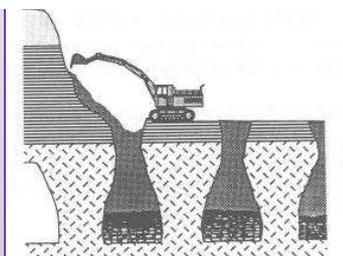
- Abattage mécanique
- Abattage à l'explosif
- Terrassement des terrains de recouvrement

➤ RECOMMANDATIONS

- Prévoir un phasage précis des opérations



Terrassement-comblement



- 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



Abattage mécanisé



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

FONDATEIONS 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



Fondation profonde par pieu



- 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



Pieu traversant la cavité



- 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

➤ RÔLE

- 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

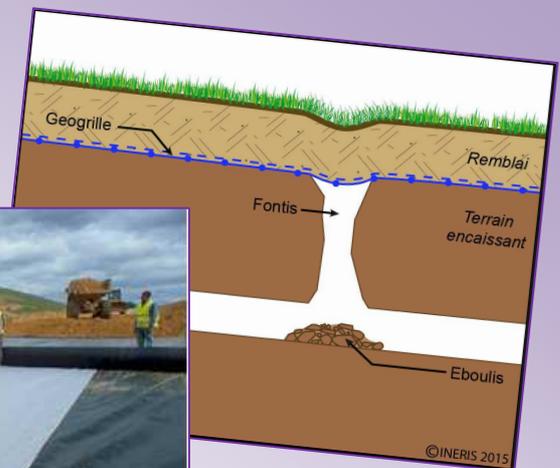
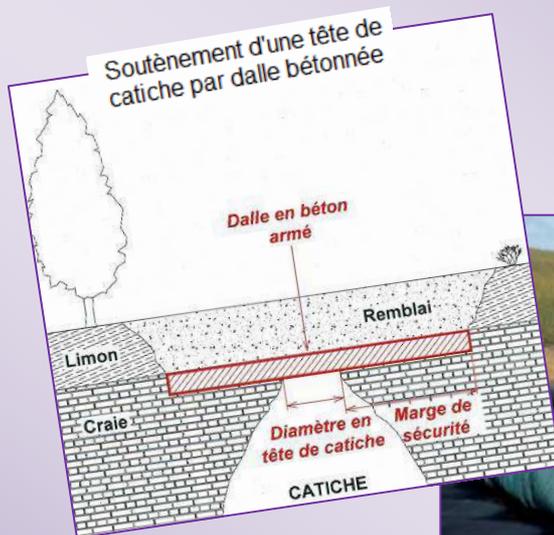
- Créer un filet (méthodes parachutes) ou une dalle pour retenir les personnes en cas d'effondrement

➤ 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)

REPRISE EN SOUS-OEUVRE DU BATI EXISTANT

➤ RÔLE 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
- Etaisement, ancrages, vérins...



Consolidation par augmentation
de la surface d'appui



- 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



Etaisement avant consolidation



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

**ANNEXE 2 : EXEMPLES DE MISE EN SÉCURITÉ
DE CAVITÉS SOUTERRAINES**

TYPE DE CAVITÉ	MAÎTRE D'OUVRAGE	ENJEUX SURFACE/ SOUTERRAIN	TECHNIQUE MISE EN ŒUVRE	RÉSULTATS OBJECTIFS	ANNÉES DES TRAVAUX	COÛT
Carrière de gypse, de grande hauteur, par chambres et piliers deux couches superposées, partiellement remblayées, profondeur de 40 m	Mairie	Friche industrielle située à proximité du centre-ville	Comblement gravitaire (sans barrage) par forages depuis la surface clavage sous zone constructible maillage variable des forages (10 m x 10 m à 4 m x 4 m) en fonction de l'utilisation future de la surface	20 ha de surface mis en sécurité pour création d'un espace vert ouvert au public, et de terrains où la construction est possible	2005-2006	10 millions d'euros pour 170 000 m ³ de matériaux de comblement soit environ 500 €/m ² sécurisé
Carrière de craie par chambres et piliers à une profondeur de 10 à 15 m dimensions des galeries : largeur 2 m-3 m hauteur 0,7 à 2 m Accessible par puits	Mairie et privés	Zone urbaine avec habitations et routes	Comblement gravitaire par coulis (sablon ciment), clavage et localement injections sous faible pression quand les terrains de couverture sont décomprimés mise en place de barrages en souterrain	Mise en sécurité définitive du domaine public (voirie) et de parcelles privées où la construction est ainsi possible sous conditions	2012-2013	De 180 à 230 €/m ³ de matériau mis en place, soit environ 300 à 400 €/m ² sécurisé (car faible hauteur de vides)
Crayères sur un seul niveau accessible dimensions : carré de 10 m de coté hauteur 15 m	Producteur de champagne	Souterrain utilisé en ERP	Confortement de type boulonnage, soutènement par cadre, renforcement des piliers par boulons et tirants, ceinturage-cerclage des piliers	Mise en sécurité du souterrain et de la surface	De 2003 à 2014	Boulonnage : 45 à 100 €/m ² Soutènement par cadre : 500 à 1000 €/unité Renforcement des piliers : 45 à 55 €/m ² Ceinturage des piliers : 250 €/m ²
Différents types de carrières superposées (cave, carrière de pierre, carrière de sable...)	Mairie et privés	Zone hyper-centre	Zones de petite superficie traitées par : confortement comblement réalisation de pieux	Mise en sécurité de petites zones en surface	De 2001 (PPR approuvé) à 2014	Confortement : 5000 à 15000 € Comblement : 50000 à 100000 € Réalisation de pieux : >100000 €

**ANNEXE 3 : DOCUMENT D'AIDE À LA RÉDACTION D'UN DOSSIER DE
CONSULTATION POUR UNE MAÎTRISE D'ŒUVRE DE TRAVAUX DE MISE
EN SÉCURITÉ D'UNE CAVITÉ SOUTERRAINE**

Avertissement

Ce document indicatif vise à aider un maître d'ouvrage privé ou public à établir un dossier de consultation pour un marché de maîtrise d'œuvre spécifique à la gestion du risque cavités.

Il a été établi, à l'origine, à la demande d'une administration déconcentrée qui cherchait à fournir à des collectivités concernées par ce risque et plus ou moins démunies, un outil simple d'utilisation et compréhensible dans le cadre des missions telles que définies par la loi MOP.

L'organisation de ce cahier des charges part toutefois du principe que les études de diagnostic du risque ont déjà été réalisées et permettent le cadrage technique et financier de la mission de maîtrise d'œuvre.

Bien sûr, cette démarche ne répondra pas aux mêmes besoins selon que l'utilisateur est un aménageur donneur d'ordres, une collectivité importante avec des services techniques structurés (département, communauté de communes, villes) et rodés à la procédure d'appels d'offres ou une petite commune dont les élus (même formés à cette approche) apparaissent souvent comme les seuls interlocuteurs, voire éventuellement un particulier.

Dans ces derniers cas, il est certain que ces décideurs ont intérêt à s'appuyer sur une assistance à maîtrise d'ouvrage et se tourner vers des services spécifiques s'ils existent au sein des communautés de communes, voire des bureaux d'études.

TABLE DES MATIÈRES

1. CONTEXTE	3
2. OBJET DU MARCHÉ	4
3. NATURE ET CONSISTANCE DES PRESTATIONS.....	5
4. DESCRIPTIF TECHNIQUE	5
5. ORGANISATION.....	7
6. CONSTITUTION DE LA RÉPONSE.....	7

Pour chaque chapitre, ce document comprend d'abord les **éléments de compréhension, en caractère bleu**, puis un *texte banalisé et adaptable, en noir et italique*.

Les points majeurs sur lesquels une attention particulière doit être apportée sont encadrés en saumon.

1. CONTEXTE

Cette partie situe et décrit le contexte général qui comprend à la fois :

- la localisation du site sous-cavé ;
- le niveau de connaissance du site, les documents existants et les recherches qui ont été faites, les documents mis à disposition par le maître d'ouvrage pour la maîtrise d'œuvre ;
- le résultat des études de diagnostic qui ont été réalisées, dont les rapports d'étude devront être joints en annexe de la consultation, et qui permettent au maître d'œuvre d'évaluer le contenu et le coût de sa mission. Il faut donc reprendre ici la description du site ainsi que les conclusions formulées par le BE qui a réalisé ces études notamment concernant la typologie, l'état géotechnique et l'environnement des cavités, le type et la hiérarchisation des travaux de confortement à entreprendre ;
- la synthèse des données géométriques des vides : hauteur, largeur, périmètre réellement concerné pour chaque partie (collectivité, particulier, aménageur, industriel...) en intégrant les marges de sécurité ;
- l'état de la cavité, la présence de dégradation spécifique (montée de voûte par exemple), l'état des parements (type et densité de la fracturation, écaillage, piliers en diabolos...);
- la synthèse des données d'instrumentation si la cavité est surveillée ;
- l'influence de l'eau dans l'évolution des dégradations du site (venues d'eau naturelles, fuite localisée de canalisation...).

La qualité des **études de diagnostic** est fondamentale car elles orientent toutes les actions qui vont suivre. Leur coût ne doit pas être négligé car il reste faible par rapport à celui des travaux qui seront préconisés. Or, moins le site est connu, plus la tendance sécuritaire est grande. Le diagnostic géotechnique en lui-même peut être calé sur la mission G5 de la norme NF P94-500 de novembre 2013.

La **hiérarchisation des travaux de traitement** est nécessaire car elle permet au maître d'ouvrage de planifier la mise en sécurité des sites sur plusieurs années éventuellement.

Le **traitement** proposé doit être **adapté aux enjeux existants ou futurs**. Cette association traitement-enjeux peut être évidente (on assurera par exemple un traitement maximum sur une zone que l'on envisage d'urbaniser en pavillons et un traitement léger sur cette même zone en espace vert) mais elle suppose parfois de mener une réflexion préalable sur les alternatives possibles (laisser le choix d'options).

La cavité abc est localisée sur la commune de XXX. Elle sous-cave des habitations (domaine privé) et une partie du domaine public situées entre les rues...

La collecte d'informations et le dépouillement des archives (mairie, DDT, documents transmis par le service d'inspection des carrières quand il existe) ont fourni le plan de la cavité abc et des rapports sur l'évolution de son état géotechnique (secteurs sensibles et traitements éventuels) de « année i » à « année n ».

Plusieurs secteurs sensibles en termes de stabilité ont été repérés et parfois traités. La cavité n'est cependant plus inspectée depuis l'année n et des désordres de type affaissement-fontis-effondrement généralisé sont apparus en année n+x et...

La récente inspection a permis de vérifier l'accès à la cavité ainsi que le géoréférencement du plan de la cavité. Il apparaît que la cavité abc est accessible, via un puits équipé d'une échelle et fermé en tête par un boulon spécifique.

Ces informations ont fait l'objet d'une note de synthèse du BE YY (référence du dossier).

Les observations faites lors de cette inspection et l'interprétation de l'instrumentation (capteurs de déplacement, peinture, bâches...) mise en place depuis les années nn confirment que la cavité abc à XXX est dégradée et évolutive.

Au terme de cette visite, la cavité a été sectorisée afin de définir les traitements techniquement les plus adaptés à chaque configuration :

- les secteurs a, c et e, au droit d'habitations, sont classés « Rouge » : les désordres recensés, de type montée de voûte ou chute de parement, sont nombreux et ont fortement évolué depuis n années (fracturation mécanique importante, montée de voûte de grande étendue et dont la hauteur ciel-voûte mesurée est importante...). Le BE recommande de traiter ces secteurs (de telle manière) en priorité 1, tout en veillant à ne pas bloquer l'accès aux autres secteurs de la cavité ;
- les secteurs b et f sont classés « Rouge » mais dans une zone non bâtie (jardins privés) : le BE recommande de traiter, en priorité 2, ces secteurs (par telle méthode) ;
- le secteur d est classé « Orange » : les évolutions depuis la dernière inspection sont moins nombreuses mais importantes. Ce secteur doit être surveillé très régulièrement (fréquence annuelle, si possible après les périodes très pluvieuses) ;
- les autres galeries de la cavité sont classées « Vert » : les parements et le ciel de cavité sont d'apparence sains et/ou peu dégradés et n'ont pas subi d'évolutions notables depuis n années. Cependant, il convient de préconiser une surveillance régulière de toutes les galeries non comprises dans les secteurs sensibles (au moins tous les 5 ans ou immédiatement après l'apparition de tout indice de désordre en surface) afin d'en anticiper le traitement.

L'ensemble du dossier référencé aa.2013.dd est donné en annexe au présent appel d'offre.

2. OBJET DU MARCHÉ

Préciser ici les zones de travaux concernées par le marché de maîtrise d'œuvre et issues des périmètres réellement concernés, y compris les marges de sécurité.

Le comblement de zone peut **bloquer l'accès** à des vides qui ne seraient pas traités lors des travaux ; il faut s'assurer que ces vides puissent être accessibles pour des visites ultérieures, voire créer un nouvel accès.

L'objectif de ce marché est la maîtrise d'œuvre de la réduction du risque lié à la présence de cavités sous le domaine public et éventuellement en domaine privé contigu, c'est à dire :

- le traitement de la partie du secteur a située sous la rue ... classée en zone « Rouge », nécessitant donc un traitement de telle manière ;
- le traitement de la partie du secteur b située sous la rue ... classée en zone « Orange », nécessitant donc un traitement de telle manière...

Les fiches de présentation de ces traitements respectifs sont données dans le dossier joint en annexe dans la partie relative à chacun des secteurs.

3. NATURE ET CONSISTANCE DES PRESTATIONS

Cette partie précise les objectifs de la mission qui va être confiée au maître d'œuvre et la décomposition globale en tranche ferme, conditionnelle et les missions complémentaires qui pourront être envisagées. Cette décomposition résulte de l'analyse de l'étude diagnostic et du croisement avec les enjeux que le maître d'ouvrage se doit de mettre en sécurité et qui ont fait l'objet d'une hiérarchisation, technique et financière. Si la collectivité ne souhaite pas réaliser cette partie seule, elle peut s'appuyer sur une AMO ou préciser que l'organisation finale des tranches pourra être revue avec le maître d'œuvre retenu dans le cadre de l'optimisation du projet global (en phase AVP).

La synthèse des informations d'archives et les données acquises par le BE constituent a minima, pour le maître d'ouvrage, les études de diagnostic (voir rapport et préconisations de mise en sécurité en annexe). La prestation de maîtrise d'œuvre débute donc à l'AVP-PRO et comporte une tranche ferme et une tranche conditionnelle :

- *la tranche ferme porte sur le comblement total de la partie du secteur ... sous la rue ... et la marge de sécurité correspondante ;*
- *la tranche conditionnelle est relative aux mêmes prestations sous le domaine privé qui jouxte le domaine public, compris entre la limite de la marge de sécurité et la zone à mettre en sécurité sous domaine privé.*

4. DESCRIPTIF TECHNIQUE

Cette partie détaille les missions décrites succinctement au paragraphe précédent de manière à permettre une réponse claire des pétitionnaires.

Il est nécessaire d'y rappeler le périmètre géométrique de l'intervention et les principales dégradations qui l'affectent et qui devront être traitées ainsi que l'objectif du traitement. On peut retenir 2 objectifs principaux de traitement :

- la reconstitution, qui va rendre au terrain sa qualité d'origine et qui consiste le plus souvent à un remblaiement total avec injection de clavage ; elle est mise en œuvre quand les enjeux existants en surface sont forts ou que des projets d'aménagement sont envisagés ou encore quand aucun mouvement de la surface n'est admissible ;
- le remblaiement partiel ou total sans clavage qui bloquera toute évolution brutale des cavités mais qui n'empêchera pas les mouvements de surface de type affaissement ou tassement ; mise en œuvre quand les mouvements de surface ne sont pas préjudiciables à l'utilisation du site ou à la sécurité publique ; elle peut être associée à des mesures complémentaires comme la mise en place de « parachute » à base de géosynthétiques (géogrilles).

Puis, il s'agit de préciser le périmètre d'intervention de la maîtrise d'œuvre c'est-à-dire les missions (type MOP) qu'elle aura à réaliser.

L'ensemble des précisions techniques proposé ci-dessous peut être conservé en l'état pour une **mission générale débutant à l'AVP-PRO**.

L'intervention en domaine privé est présentée ici en tranche conditionnelle mais, si le sujet a été complètement examiné en amont (techniquement et administrativement), elle peut rejoindre la tranche ferme. Il faut noter cependant que, en fonction du résultat des échanges entre la collectivité et les propriétaires des parcelles privées concernées

(notamment sur la prise en charge financière du surcoût du traitement par parcelle), il peut être intéressant d'en faire des lots séparés (règlement direct du surcoût par chaque propriétaire).

Une mission complémentaire pourrait être l'assistance au maître d'ouvrage pour consulter des entités compétentes dans la recherche des financements complémentaires, dans la mise en place de la communication avec les riverains concernés...

Tranche ferme – Comblement total sous domaine public

La zone à traiter se situe sous la rue ..., à proximité de sa jonction avec la rue du 2 montées de voûte, MVx et MVy, affectent partiellement le domaine public.

Les prestations à réaliser comprennent l'ensemble des missions de maîtrise d'œuvre à partir des études d'avant projet (AVP-PRO) et jusqu'aux opérations de réception (AOR).

Elles nécessitent notamment, outre le contenu courant des missions de maîtrise d'œuvre (DCE, ACT...) :

- *la vérification de la position des vides concernés par rapport à un repère de surface ; cette vérification, réalisable par sondages (ceux-ci pouvant être réutilisés pour le traitement) ou par des moyens topographiques (directs par mesure géomètre ou par balise fond-jour), permet de réduire l'incertitude de calage des plans ;*
- *le positionnement des limites de la (ou des) zone(s) à combler pour mettre en sécurité le domaine public ; ce positionnement prendra en compte la géométrie des cavités et la marge de recul qui, dans un premier temps, peut être estimée avec un angle global de x° par rapport à la verticale ; cette marge de recul amènera à intervenir et conforter sous une partie du domaine privé ;*
- *le choix et la description de la méthode de réalisation des barrages ; la méthode proposée pour la réalisation des barrages (en souterrain ou depuis la surface) devra être détaillée et comprendre des contrôles en souterrain pour s'assurer de leur bonne tenue (en cours de réalisation et pendant le remblayage) ;*
- *l'évaluation des volumes nécessaires au comblement ;*
- *le choix et la description du mode de comblement (gravitaire, injections de clavage), la composition des produits de comblement ; la base des cavités pouvant être, ponctuellement et périodiquement, sous le niveau de la nappe, l'emploi de terres polluées, compressibles putrescibles, de cendres volantes... n'est pas autorisé ;*
- *le suivi des travaux correspondant et des opérations de contrôle en phase travaux et de réception.*

Tranche conditionnelle – Comblement total complémentaire sous domaine privé

Les propriétaires privés concernés par le secteur x pourront mettre à profit la présence des entreprises et du matériel de mise en sécurité du domaine public pour mettre en sécurité leur parcelle. Aussi, la ville leur proposera de s'associer à cette phase de travaux. En cas de réponse positive de leur part, le maître d'œuvre devra estimer le volume nécessaire à la mise en sécurité de chaque propriété et le coût correspondant. Il assurera la maîtrise d'œuvre de ces travaux complémentaires de la même manière qu'il le fait pour la tranche ferme. Le coût supplémentaire sera pris en charge par la ville qui le répercutera aux riverains par la suite (sauf convention et paiement direct par les propriétaires).

5. ORGANISATION

Outils et moyens

Le titulaire du marché devra présenter les moyens humains qu'il affectera à la mission. La validation des compétences se fera par analyse des CV des prestataires et des références professionnelles du pétitionnaire, qui seront annexées au dossier de réponse.

Le titulaire devra également présenter des moyens matériels. L'ensemble du matériel nécessaire à l'expertise sera propriété du titulaire chargé de la mission. Il s'agira à minima des Equipements de Protection Individuelle ou collective adaptés au travail en cavité souterraine : casque, gants, lampes, détecteurs multi-gaz, matériel de descente sur cordes adéquat, etc.

Une liste du matériel pouvant être mis à disposition par le titulaire sera annexée au dossier de réponse. Le matériel aura été vérifié et, si nécessaire, certifié par un organisme agréé.

Sécurité en souterrain

Des procédures de prévention des risques inhérents au travail souterrain seront respectées :

- toutes les précautions devront être prises pour éviter toute intrusion de personne non autorisée dans la cavité pendant l'intervention,*
- des mesures de secours seront définies en cas d'incident (malaise, chute, effondrement, etc.) pour garantir la sécurité des intervenants,*
- un plan de maîtrise des risques sera établi et signé avant toute intervention en souterrain.*

Planning prévisionnel

- Réception des offres : jusqu'au*
- Choix du titulaire : semaine du*
- Démarrage : autour du*
- Rendu :*
- Travaux :*

6. CONSTITUTION DE LA RÉPONSE

(à mettre dans le Règlement de la Consultation)

Les offres seront entièrement rédigées en langue française.

Le dossier à remettre par les candidats comprendra les pièces suivantes :

- imprimé DC1 ou la lettre de candidature et habilitation du mandataire par ses co-traitants ;
- imprimé DC2 ou la déclaration du candidat et les renseignements permanents ;
- les pièces prévues aux articles D 8222-5, D 8222-7, D 8222-8 du code du travail ;

- imprimé NOTI2 ou les certificats et déclarations sur l'honneur mentionnés à l'article 46 du Code des Marchés Publics justifiant qu'il a satisfait à ses obligations fiscales et sociales¹ ;
- les références de l'Entreprise et des renseignements permettant d'évaluer les capacités professionnelles, techniques et financières du candidat, notamment ses moyens humains et matériels ;
- le chiffre d'affaires des 3 dernières années ;
- les certificats de capacités délivrés par les hommes de l'art pour des prestations de nature similaire ainsi que les qualifications correspondantes : qualifications 1001 ou 1002 de l'OPQIBI. ou équivalent.

Le dossier de candidature à ce marché comprendra également :

- une note méthodologique de présentation des différentes phases de la mission adaptées au cas à traiter,
- l'ensemble des références de la société, en lien avec le travail de consolidation de cavités souterraines : méthodes mises en œuvre, études réalisées, missions d'accompagnement effectuées, etc.
- concernant le personnel : noms, CV détaillés, fonctions dans l'entreprise, références professionnelles en lien avec le travail en cavité souterraine, organigramme,
- une liste du matériel qui sera mis à disposition par le candidat,
- une proposition de mode de chiffrage de la mission (pourcentage, forfait...) et un montant estimatif,
- une proposition de calendrier prévisionnel, le plus adapté possible au planning ci-dessus.

Pour justifier de ses capacités professionnelles, techniques et financières, le candidat, même s'il s'agit d'un groupement, peut demander que soient également prises en compte les capacités d'un ou de plusieurs opérateurs économiques, quelle que soit la nature juridique des liens existants entre cet opérateur et lui (sous-traitant, filiale, cotraitant ou autre). Dans ce cas, le candidat devra produire les mêmes documents concernant le ou les opérateurs économiques que ceux exigés des candidats par le pouvoir adjudicateur.

Les capacités professionnelles, techniques et financières du candidat, s'agissant des pièces de candidature, seront évaluées sur les critères suivants :

- valeur technique : entre 70 % et 50 % (peut être détaillée en : mémoire technique, méthodologie, planning...);
- prix : entre 30 % et 50 %.

En cas de capacités professionnelles, techniques et financières insuffisantes la candidature sera écartée.

¹ Le candidat qui aura été déclaré attributaire à l'issue de la consultation devra produire dans un délai de 10 (dix) jours maximum à compter de la date de la demande du pouvoir adjudicateur, l'imprimé NOTI2, ou les certificats délivrés par les Administrations et Organismes compétents mentionnés à l'article 46 du code des marchés publics, sous peine de rejet de son offre. Dans ce cas, l'élimination du candidat sera prononcée par le pouvoir adjudicateur, qui présentera la même demande au candidat suivant dans l'ordre du classement des offres.

ANNEXE 4 : LA MARGE DE SÉCURITÉ

Un vide dans le sol peut entraîner un désordre à l'aplomb de sa position mais aussi latéralement (tiretés bleus). L'expérience montre que du fait de l'extension latérale des désordres, certaines parcelles situées en périphérie immédiate peuvent se trouver affectées :

- soit par des désordres francs ;
- soit par des décompressions de terrains, en particulier lorsque les effondrements n'ont pas fait l'objet d'un comblement rapide en surface ou lorsque les terrains alentours sont pentés.

Ainsi, pour protéger un enjeu en surface (une route, une habitation...), il ne suffit pas de traiter les vides qui se trouvent à l'aplomb de cet enjeu mais aussi ceux latéralement (tiretés rouges). Il est donc nécessaire d'évaluer une marge de sécurité ou bande latérale de sécurité à définir par rapport à la position de l'enjeu.

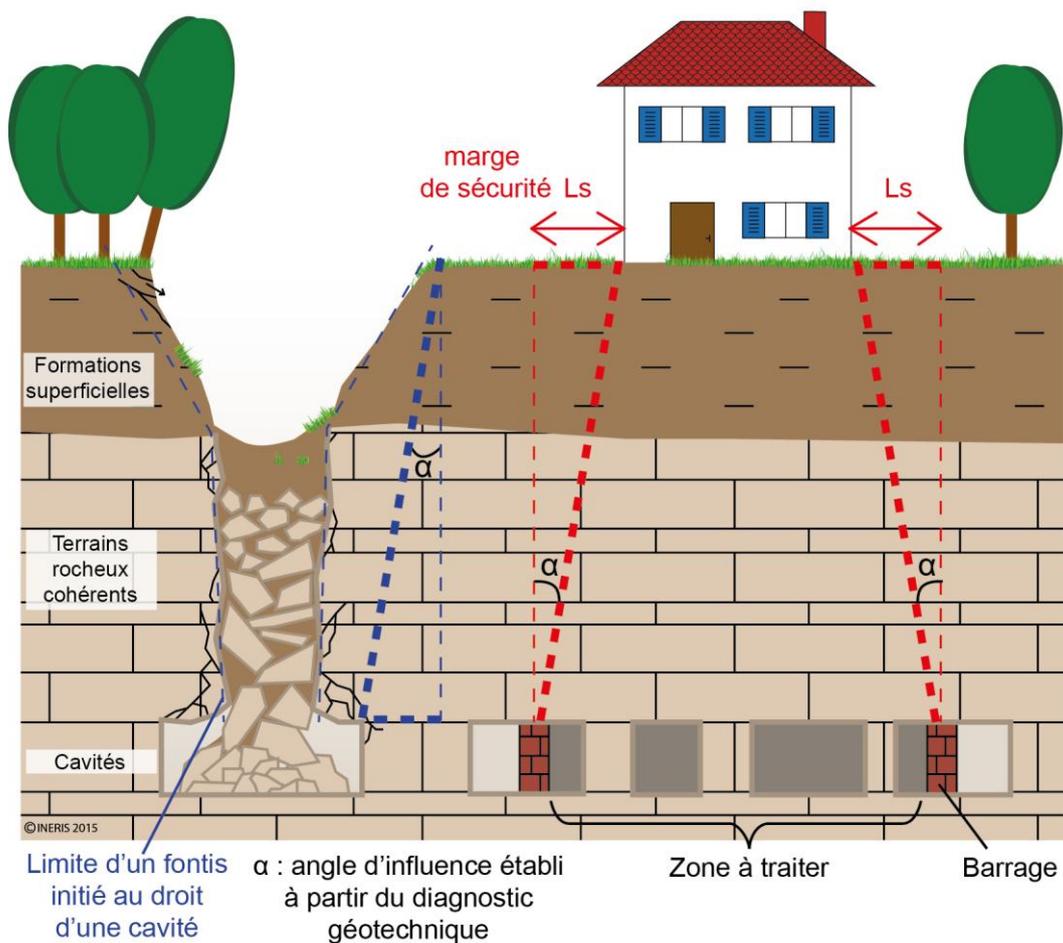


Figure 1 : Représentation de la marge de sécurité dans le cas d'un traitement d'une habitation

La largeur de cette bande latérale de sécurité, L_s , est fonction de l'incertitude de localisation de la cavité (variable selon le niveau de connaissance), de l'épaisseur des terrains au-dessus des cavités, et de l'angle de rupture, α , de ces terrains par rapport à la verticale (45° pour les formations superficielles et 10° à 45° à moyen terme pour les terrains sains ou cohérents).

A titre d'exemple et avec les hypothèses du schéma ci-avant, une épaisseur de formations superficielles (angle de rupture α de 45°) de l'ordre de 4 m, un toit de cavité vers 12 m de profondeur (soit 8 m de terrain cohérent ; angle de rupture α pris à 20° par rapport à la verticale) et en supposant une incertitude de positionnement de 3 m, on obtient une marge de sécurité de 10 m.

La marge de sécurité peut être réduite par l'amélioration du positionnement réel des vides par rapport au plan (sondages de reconnaissance, topographie, calage fond-jour...). Des modélisations géomécaniques (définition et caractéristiques mécaniques des sols et roches composant le recouvrement) peuvent être envisagées pour affiner les zones d'influence d'éventuel effondrement.

Enfin, à court terme (de l'ordre de quelques mois à plusieurs années en fonction de l'état d'altération des terrains), l'angle α dans les terrains sains et cohérents peut être considéré comme vertical, ce qui permet ainsi de réduire la largeur de la marge de sécurité.

Toutefois, la géométrie des cavités souterraines et donc le positionnement des barrages conduisent souvent à l'application d'une surlargeur à la largeur théorique calculée. Parfois même, le remplissage total d'un vide de taille réduite est moins onéreux que la mise en œuvre de barrage(s) délimitant strictement la zone à combler.

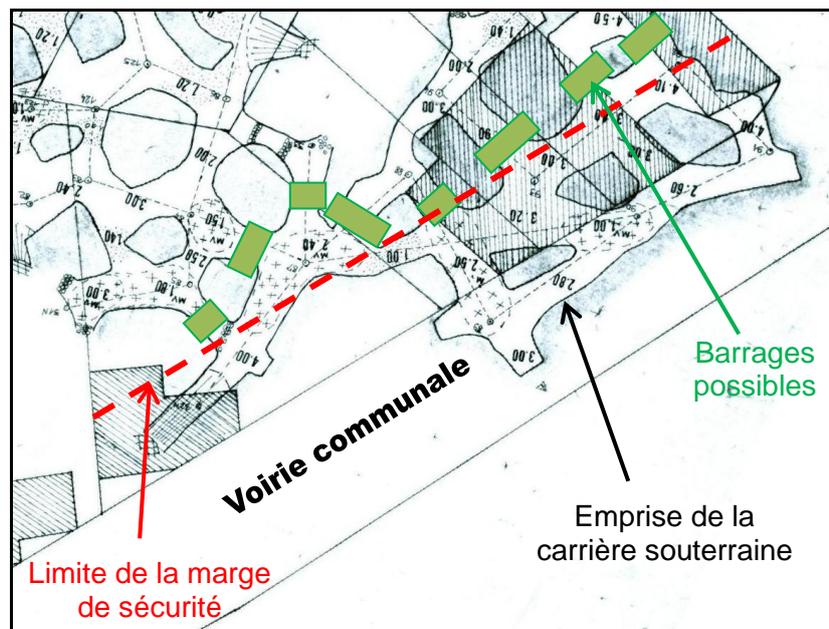


Figure 2 : Exemple de tracé de la marge de sécurité au droit d'une carrière souterraine pour la mise en sécurité d'une voirie communale uniquement

Remarque : Cet exemple montre la complexité des cas réels où il convient toujours de s'interroger sur l'intérêt d'étendre les travaux aux enjeux adjacents (ici maisons par exemple).