

Guide de recommandations

Année 2021



Renforcement par géosynthétique pour la réduction des risques associés à un effondrement localisé

Projet
financé
par :

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

Travail réalisé dans le cadre du projet de recherche & développement **REGIC**
(Renforcement par Géosynthétique Intelligent sur Cavités naturelles
ou anthropiques).

Rédacteurs :

- Marwan AL HEIB (Ineris)
- Philippe DELMAS et Mathilde RIOT (Afitexinov)
- Fabrice EMERIAULT et Pascal VILLARD (3SR)

Comité d'experts :

- Marianne CHAHINE (Cerema)
 - Hubert GIRAUD (SNCF)
 - Yasmina BOUSSAFIR (IFSTTAR)
- 
- 

Table des matières

1.	Introduction.....	6
2.	Les cavités présentes dans le sous-sol.....	8
2.1.	Les cavités anthropiques	9
2.2.	Les cavités naturelles	10
3.	Les dégradations, effondrements de cavités et mouvements de terrain associés	12
3.1.	Affaissement.....	13
3.2.	Effondrement localisé (fontis)	13
3.2.1.	Cavités d’origine anthropique	14
3.2.2.	Cavités naturelles	18
3.2.3.	Puits et ouvrages verticaux	19
3.3.	Effondrement généralisé	20
3.4.	Crevasses.....	20
4.	Méthodes de réduction de l’aléa « mouvement de terrains »	22
5.	Renforcement par géosynthétique	27
5.1.	Caractéristiques physiques et mécaniques des géosynthétiques.....	27
5.2.	Objectifs et intérêt du renforcement par géosynthétique.....	29
5.3.	Exemple d’application de GSY	32
5.4.	Domaines d’application du renforcement par géosynthétique.....	36
5.5.	Principe de fonctionnement d’un sol renforcé par GSY.....	39
5.6.	Mécanismes de base du renforcement	41
6.	Principe des méthodes de dimensionnement du géosynthétique.....	44
6.1.	Démarche de conception d’une solution de renforcement par géosynthétique avec détection/auscultation.....	44
6.2.	Mécanisme de la remontée de la cavité vers la surface	45
6.3.	Paramètres de dimensionnement du renforcement	47
6.3.1.	Affaissement admissible.....	48
6.3.2.	Charge agissant sur le géosynthétique.....	50
6.3.3.	Dimensionnement de l’ancrage et des recouvrements	51
7.	Mise en œuvre	55
8.	Surveillance des cavités à l’aide d’un géosynthétique instrumenté	60

8.1.	Introduction.....	60
8.2.	Surveillance à l'aide de géosynthétique instrumenté	61
9.	Synthèse – avantages et limites.....	66
9.1.	Avantages et limites.....	66
9.2.	Synthèse des données et des résultats.....	70
10.	Conclusion	74
11.	Références bibliographiques et normatives	76
12.	Liste des illustrations.....	80
12.1.	Liste des figures	80
12.2.	Liste des tableaux	82
12.3.	Glossaire.....	82

Résumé

Les aménagements routiers et urbains sont parfois confrontés à des désordres localisés (fontis) dus à l'effondrement de cavités naturelles (karstiques) et anthropiques (anciennes mines souterraines ou d'anciennes carrières souterraines) situées à faible profondeur.

Ce document présente d'abord les différents types de cavités et les mouvements de terrain qui peuvent être induits par la dégradation puis la remontée en surface de ces cavités. Sont ensuite présentées succinctement les méthodes de traitements disponibles pour réduire l'aléa ou le risque ainsi que des illustrations d'utilisation de renforcement par géosynthétique au-dessus de cavités.

La méthode de renforcement par géosynthétique est ensuite décrite pour un sol granulaire et cohésif. Le géosynthétique « bi-raideur » développé dans le cadre du projet REGIC est notamment présenté.

Des recommandations méthodologiques concernant l'emploi de géosynthétiques instrumentés sont formulées. Elles permettent d'une part d'employer le géosynthétique comme un système de renforcement du sol au-dessus des cavités susceptibles de présenter un aléa d'effondrement localisé de petites dimensions, généralement inférieures à 4 m. D'autre part, l'intégration d'une instrumentation par fibres optiques, lors de la production du géosynthétique permet d'assurer des fonctions de suivi en continu des déformations, et d'alerte en cas de remontée de la cavité.

Ce document vise à apporter aux acteurs concernés par la gestion des risques de mouvements de terrain, notamment les administrations déconcentrées, élus et gestionnaires locaux, aménageurs, bureaux d'étude et fabricants de géosynthétique des éléments d'aide à la décision pour la sécurisation des terrains impactés par des cavités abandonnées d'origine anthropique (mines, carrières souterraines, marnières, souterrains-refuges, habitats troglodytiques, sapes de guerre, etc.) ou naturelles (cavités de dissolution, karst, etc.).

1. Introduction

Le territoire français est largement exposé aux risques liés à la présence de cavités souterraines d'origine naturelle ou anthropique. Elles sont de différentes origines : karstiques, anciennes mines¹ souterraines ou anciennes carrières souterraines situées à faible profondeur. La présence de ces cavités constitue un risque majeur pour les ouvrages en surface.

La gestion du risque lié aux effets des effondrements potentiels de ces cavités, notamment vis-à-vis des enjeux, représente donc un défi particulièrement important pour les Maîtres d'ouvrage. Il faut, en effet, faire face à un aléa dont il n'est souvent pas possible de décrire avec précision ni la localisation ni la probabilité d'occurrence.

La réduction de l'aléa correspondant et l'atténuation de ses conséquences potentielles constituent l'un des objectifs de gestion de risques de mouvements de terrain. Le choix de la méthode de maîtrise du risque doit tenir compte à la fois de critères de sécurité à court et long termes et de coût. Le guide des solutions de mise en sécurité des cavités souterraines (Ineris, 2016a) présente les méthodes de traitement possibles. Le renforcement par géosynthétique (GSY) est l'une des solutions permettant d'améliorer la protection des enjeux en surface. Il est employé depuis de nombreuses années en raison de ses avantages économiques et environnementaux, ainsi que de sa facilité de mise en œuvre.

L'objet de ce document d'utilisation des géosynthétiques dans les zones à risque d'effondrement localisé est donc de fournir aux maîtres d'œuvre, aux bureaux d'études et aux entreprises les principes généraux indispensables pour la conception et le dimensionnement de ces sols renforcés par un géosynthétique et instrumentés ainsi que les éléments nécessaires à l'élaboration de leurs projets :

- que ce soit pour le renforcement par géosynthétique ;
- ou pour la surveillance des cavités à l'aide de géosynthétique instrumenté.

Le document explicite également les critères de sélection de la solution de protection par géosynthétique parmi les méthodes de traitement et de mise en sécurité disponibles sur le marché.

Lorsque le choix de l'utilisation de la solution géosynthétique est fait, le document décrit :

- la démarche à effectuer pour la conception de la solution de renforcement par géosynthétique avec détection/auscultation ;
- la synthèse des avantages, des limites et précautions d'emploi de la solution géosynthétique ;
- ainsi qu'une synthèse d'un certain nombre de cas réels d'application de la solution géosynthétique sur cavités en France et à l'étranger.

¹ La particularité réglementaire entre mines et carrières souterraines n'est pas abordée dans ce document, seule est considérée la notion d'aléa mouvement de terrain.

Le document suppose en revanche que la Maitrise d'ouvrage et la Maitrise d'œuvre ont au préalable défini les objectifs en matière de durée de protection des biens et des personnes contre les effets en surface des effondrements (durée de service). Il est également nécessaire à ce stade d'en déduire les caractéristiques ou coefficients de sécurité à considérer pour tenir compte de la durabilité des produits ou de leur dégradabilité (notamment lors de la pose) ainsi que pour effectuer une analyse comparée du cycle de vie des différentes solutions envisagées.

Pour ce faire, il pourra être utile de se baser, en dehors de tout référentiel propre au Maître d'Ouvrage, sur les normes et recommandations en vigueur ainsi que sur l'état de l'art national ou international. Le document se décompose en différents chapitres :

- **Chapitre 1 : Introduction**

- **Chapitre 2 : Les cavités présentes dans le sous-sol.**

Ce chapitre décrit brièvement l'origine des cavités en France et leur densité.

- **Chapitre 3 : Les dégradations, effondrements de cavités et mouvements de terrain associés.**

Ce chapitre précise les différents types de mouvements de terrain ainsi leur conséquence en surface. Une attention particulière est accordée à l'aléa effondrement localisé (fontis).

- **Chapitre 4 : Méthodes de réduction de l'aléa mouvement de terrains.**

Ce chapitre est consacré aux différentes méthodes de traitement, et notamment une méthodologie pour choisir la méthode la mieux adaptée au contexte.

- **Chapitre 5 : Renforcement par géosynthétiques.**

Ce chapitre décrit les différents types de géosynthétique, leur comportement mécanique, les caractéristiques physiques et mécaniques. Il donne également son utilisation en tant que système de renforcement des cavités souterraines, notamment leur domaine d'application.

- **Chapitre 6 : Méthode de dimensionnement par géosynthétique.**

Ce chapitre décrit d'abord les mécanismes de renforcement. Il précise également le mécanisme et le fonctionnement du renforcement, les principes des méthodes de dimensionnement de géosynthétique de renforcement pour un remblai granulaire et cohésif ainsi que le dimensionnement de l'encrage. Il précise les données nécessaires, notamment en termes de tassement admissible.

- **Chapitre 7 : Mise en œuvre. Ce chapitre est consacré à l'installation de géosynthétique au-dessus des cavités.**

Il formule des recommandations pour une mise en œuvre réussie, notamment du compactage du sol au-dessus de géosynthétique.

- **Chapitre 8 : Surveillance.**

Ce chapitre décrit l'objectif de la surveillance des cavités renforcées par un géosynthétique instrumenté à l'aide de fibre optique. Il décrit deux configurations celle d'une cavité localisée et ou une zone des cavités potentielles (non localisées).

- **Chapitre 9 : Synthèse – avantages et limites.**

Ce chapitre précise et résume la démarche à suivre pour un dimensionnement d'une nappe. Il précise également les principaux avantages et limitations techniques de l'installation de géosynthétique de renforcement.

- **Chapitre 10 : Conclusion**

2. Les cavités présentes dans le sous-sol

Largement réparties sur le territoire national, les cavités souterraines anthropiques, grottes, exploitations abandonnées, habitations troglodytiques, refuges souterrains, sapes de guerre, etc., constituent un problème préoccupant pour de nombreuses communes et maîtres d'ouvrage du fait de leur concentration et du caractère inéluctable de leur dégradation.

Le **Plan National Cavités**, lancé par l'Etat en 2013² pour la prévention des risques d'effondrements de cavités souterraines (hors mines) mentionne qu'il y a plus de 500 000 cavités souterraines sur le territoire français. Certains territoires, comme la Normandie, les Hauts-de-France ou l'Île-de-France, sont particulièrement concernés par l'existence de cavités (Figure 1 et Figure 2).

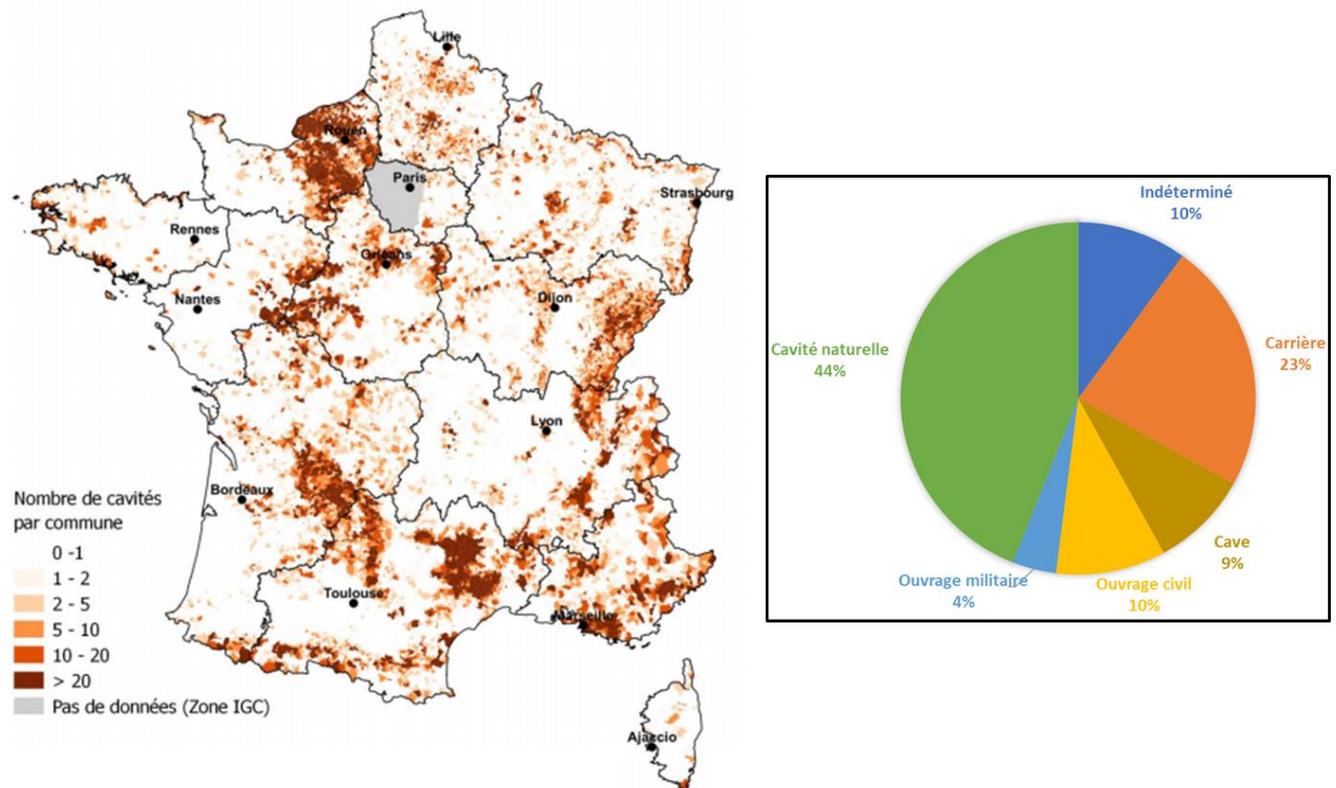


Figure 1 : Inventaire des cavités souterraines naturelles et anthropiques (hors mines) – source : BRGM (2019)

Les vides du sous-sol constituent une source de danger pour les personnes, les biens et plus largement pour l'activité économique. Ils peuvent induire des contraintes fortes en termes d'aménagement et de développement urbain. Des accidents ou incidents liés à l'instabilité de ces ouvrages se produisent régulièrement et sont particulièrement

2

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2014_DGPR_plan_national_cavites_def_web.pdf

préoccupants lorsqu'ils affectent des zones fortement urbanisées et traversées par des infrastructures routières nationales ou internationales.

En France existe plus que 500 000 cavités souterraines, des accidents ou incidents (effondrement ou affaissement se produisent régulièrement liés à l'instabilité de ces cavités naturelles ou anthropiques.

2.1. Les cavités anthropiques

Les cavités anthropiques, c'est-à-dire creusées par l'homme, ont eu de multiples usages, les plus courants étant :

- **l'extraction de matériaux**, pour la construction (pierre à bâtir), pour l'agriculture (amendement des sols) ou pour l'industrie (ciment, sel, charbon, minerais divers, etc.) ;
- **l'habitat permanent** (habitations troglodytiques ainsi que leurs caves et dépendances associées) et temporaire (les souterrains et refuges) ;
- **le stockage** (caves, entrepôts, etc.) ;
- **le passage de réseaux enterrés** (eau, électricité, gaz, etc.) ;
- **le déplacement ou le refuge pour les biens et personnes** (tunnels, sapes de guerre, souterrains, etc.).

Si les plus anciennes exploitations souterraines datent de la Préhistoire, l'activité extractive s'est considérablement développée à partir du Moyen Âge et est restée importante jusqu'à la moitié du XXe siècle, en lien avec les besoins énergétiques et l'urbanisation progressive du territoire. Aujourd'hui, en France, les extractions de matériaux en souterrain (mines et carrières) sont relativement rares, la plupart des exploitations sont fermées et abandonnées, quelques-unes étant réutilisées pour l'agriculture (caves vinicoles, culture des champignons, etc.), pour le tourisme (musées, restaurants, etc.) ou encore pour l'industrie (zones de stockage). Si plusieurs facteurs ont conditionné l'activité d'extraction en souterrain, le principal d'entre eux restait un contexte géologique favorable, c'est-à-dire la présence à faible ou moyenne profondeur (jusqu'à quelques dizaines de mètres généralement) d'un matériau utile et extractible. Cette prédisposition géologique explique en partie la répartition spatiale des cavités anthropiques en Ile-de-France hors Seine-et-Marne (Figure 2), y compris dans des zones de forte pression foncière actuellement.

Ainsi, par exemple, d'après l'Inspection Générale des Carrières (IGC), il y a plus de 3000 hectares de terrains, répartis sur 70 communes, affectés par la présence d'anciennes carrières (Figure 2) en région parisienne. La densité de marnières (ancienne exploitation de craie pour amender le sol) en zone de plateau est potentiellement de 14 par km², soit 100 000 à 120 000 marnières en Haute-Normandie uniquement (Portail Géorisques, cavités souterraines). Dans le bassin ferrifère lorrain, plus de 2000 ha sont sous-minés en zones urbanisées.

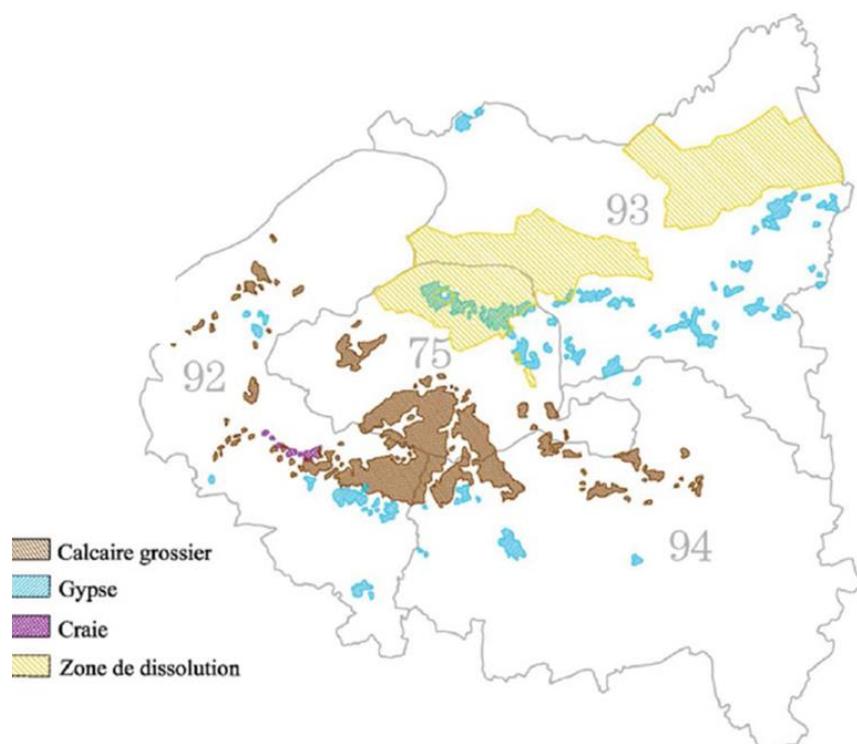


Figure 2 : Localisation des carrières souterraines abandonnées en Ile de France, par type de matériau extrait (hors 77) – Source : IGC

Il existe également des milliers d'ouvrages verticaux notamment des puits d'accès et d'aération ou d'exhaure pour les cavités souterraines. Ils représentent des points critiques en termes de risque d'effondrement localisé.

2.2. Les cavités naturelles

Les cavités naturelles sont également nombreuses et souvent mal connues. Elles se développent dans le sous-sol sous l'effet de la dissolution (Ineris 2017), de la suffusion ou de l'activité volcanique par exemple. La dissolution reste très largement répandue sur le territoire national et concerne les régions où il existe des formations plus sensibles à ce phénomène : évaporites, calcaire (Karst – Figure 3).

Les phénomènes de dissolution se développant dans le sous-sol entraînent une altération des propriétés du massif encaissant et peuvent conduire, à terme, à la formation de cavités. Les dimensions et la profondeur de ces cavités sont très variables, elles peuvent atteindre des volumes de plusieurs milliers de m³.

In fine, ces cavités peuvent évoluer en volume et, par conséquent, vers l'apparition d'effondrements en surface semblables aux cavités anthropiques, phénomènes difficilement prévisibles et potentiellement dangereux pour les personnes et les biens.

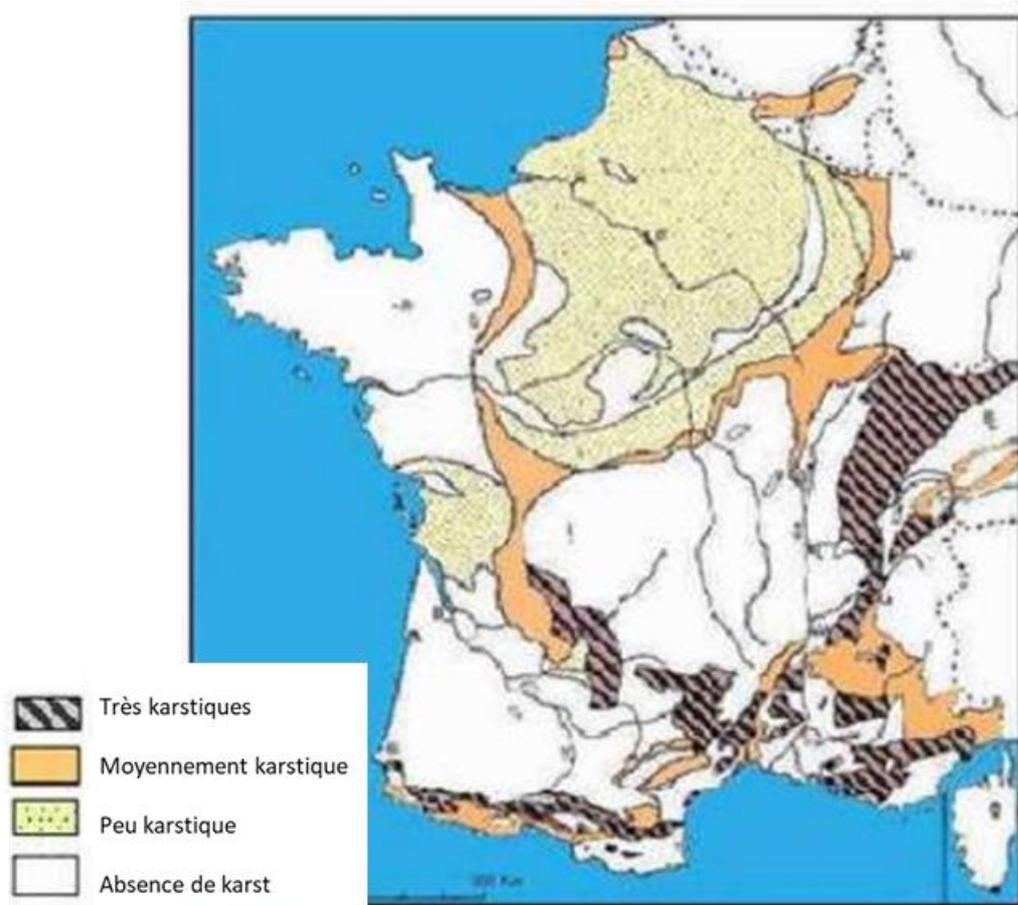


Figure 3 : Carte de probabilité de karst français - Source : © DR

3. Les dégradations, effondrements de cavités et mouvements de terrain associés

Les cavités naturelles et anthropiques évoluent avec le temps et se dégradent en fonction de conditions intrinsèques au massif et/ou de facteurs extérieurs. À terme, des phénomènes d'instabilité locale se produisent au sein de l'ouvrage (dégradation des piliers, du toit immédiat, Figure 4). Dans le cas d'une propagation vers la surface (Figure 5), les cavités souterraines naturelles ou anthropiques représentent une menace vis-à-vis des enjeux de surface situés dans l'emprise de l'effondrement. Cet effondrement peut être progressif ou brutal en fonction de la configuration du vide et de la nature du sol sus-jacent. En surface, différents types de mouvements de terrain plus ou moins prévisibles et redoutés se produisent, qui endommagent les structures situées dans la zone de mouvement.



Figure 4 : Dégradations observées dans une carrière souterraine - Source : Ineris



Figure 5 : Effondrement localisé au droit d'une ancienne mine de fer de Lorraine (à gauche) et d'une ancienne carrière de craie (à droite) - Source Ineris

3.1. Affaissement

L'affaissement est une dépression continue du sol au-dessus d'une cavité ou plusieurs cavités naturelles ou anthropiques (Figure 6). Lors de l'effondrement de cavités souterraines isolées ou multiples, les terrains éboulés peuvent combler partiellement ou totalement les vides. Si les conditions de foisonnement et de profondeur le permettent, l'affaissement entraîne une déformation progressive des terrains, formant une dépression topographique sans rupture cassante importante. Il se développe souvent sous forme d'une cuvette. L'amplitude et l'extension de cette cuvette d'affaissement dépendent des dimensions de la cavité, de sa profondeur et de la qualité du foisonnement des terrains du recouvrement.



Figure 6 : Exemple d'une cuvette d'affaissement - Source : Ineris

3.2. Effondrement localisé (fontis)

L'effondrement localisé (ou fontis) s'observe à la suite de la rupture du massif au-dessus d'une cavité naturelle ou anthropique située à faible profondeur généralement à moins de 50 m d'après les nombreuses observations associées au foisonnement du terrain. La remontée de fontis vers la surface dépend de la nature de la cavité, de sa forme géométrique et de la nature des terrains de recouvrement au-dessus.

Dans la suite, nous précisons les conditions d'apparition de fontis pour les trois types de cavités : anthropiques, naturelles ainsi que les ouvrages verticaux (puits).

3.2.1. Cavités d'origine anthropique

Dans les exploitations souterraines, il s'agit souvent d'une montée de voûte qui progresse vers la surface par ruptures successives des terrains surmontant la cavité initiale. Ce processus est amorcé par un décollement de bancs puis par une rupture locale du toit de la cavité (Figure 7). Cette chute de toit se produit lorsque le premier banc du toit n'est pas suffisamment résistant vis-à-vis des contraintes qu'il subit. Le terme de fontis désigne aussi bien le mécanisme d'effondrement que le cratère classiquement observé en surface.

Deux situations peuvent être observées : soit le processus s'arrête de lui-même à une hauteur correspondant à une voûte auto-stable (qui reste une situation d'équilibre), soit il se développe verticalement jusqu'à atteindre les matériaux meubles de la couverture puis la surface. La vitesse de progression du fontis, et donc le temps compris entre l'effondrement en profondeur et la manifestation en surface, est extrêmement variable ; elle dépend de la taille du fontis, de la profondeur de la cavité, de la nature des matériaux et de conditions locales (présence d'eaux, failles, trafic, vibrations, etc.). Quelques jours pour des terrains peu résistants à plusieurs années pour des terrains résistants.

La présence d'une nappe aquifère ou d'une circulation d'eau, qui va étaler les éboulis dans les galeries, favorise le développement de la cloche de fontis vers la surface.

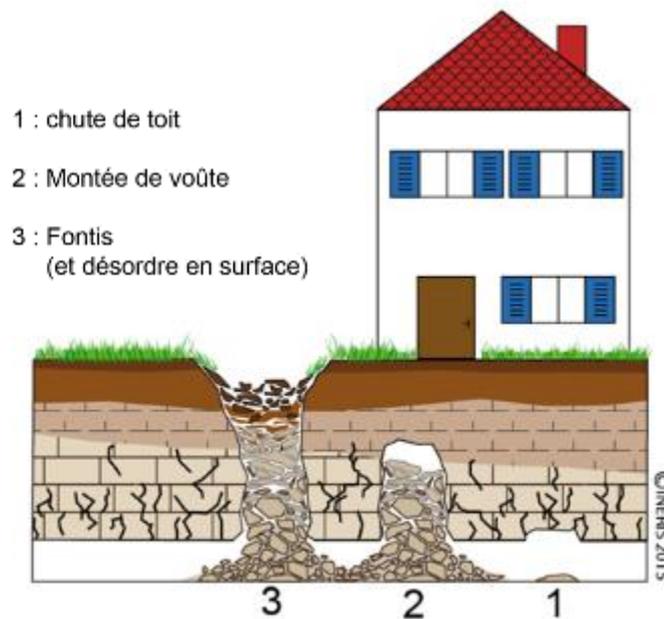


Figure 7 : Remontée de fontis – Source : Ineris

Les conséquences prévisibles sur la sécurité des personnes et des biens présents en surface dans la **zone d'influence du désordre dépendent** :

- **du diamètre** de l'effondrement en surface (Tableau 1). On distingue le diamètre de l'entonnoir en configuration stabilisée (Figure 8) du diamètre « instantané » de la zone affectée lors de l'effondrement (bien souvent de forme sensiblement cylindrique moins important que le précédent) ;

- **de la profondeur** du cratère : les fontis se caractérisent par un mouvement gravitaire à composante essentiellement verticale qui peut atteindre une amplitude sensiblement égale à la hauteur de la cavité (Figure 8).

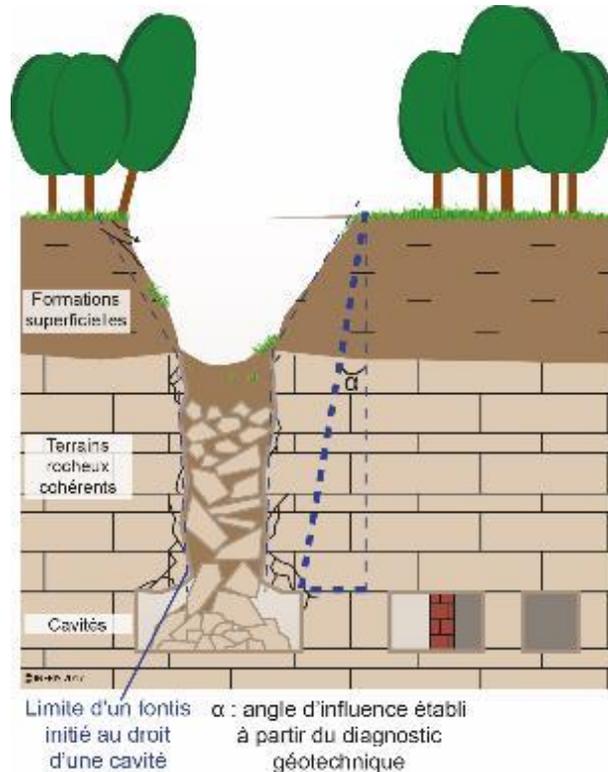


Figure 8 : Évolution du diamètre d'effondrement et emprise finale en surface – Source : Ineris

Le désordre au fond peut également avoir pour origine la ruine, brutale ou progressive, de tout ou partie d'un pilier de soutènement qui va engendrer un éboulement dans plusieurs galeries adjacentes au fond. Même si l'éboulement se bloque sur les piliers voisins, les conséquences en surface seront plus importantes que celles d'un effondrement d'une cavité seule ou isolée.

Ainsi, en fonction du mécanisme à l'origine de la ruine, de la nature et de l'épaisseur des terrains de recouvrement, les caractéristiques en surface d'un effondrement localisé peuvent donc varier d'un site à l'autre. On peut graduer leur importance selon des niveaux d'intensité qui vont avoir un impact sur les mesures de prévention à mettre en œuvre (affichage, sécurisation des enjeux).

Le Tableau 1 présente les classes d'intensité couramment admises pour les analyses de risques d'effondrements de cavités. La Figure 9 montre des exemples d'effondrements localisés (fontis) de cavités souterraines.

Tableau 1 : Exemples de classes d'intensité de dommages potentiels en fonction du diamètre de l'effondrement

Diamètre de l'effondrement en surface	Classe d'intensité de dommages (en surface)
Effondrement auto-remblayé à proximité ou affaissement d'une amplitude limitée	Très limitée
Diamètre < à 5 m	Limitée
Diamètre \geq à 5 m et < à 10 m	Modérée
Diamètre \geq à 10 m	Élevée à très élevée



Figure 9 : Exemples d'effondrements localisés au droit de cavités d'origine anthropique – source : Ineris

La Figure 10 présente une répartition des diamètres de 420 fontis apparus au-dessus des anciennes carrières de la région parisienne. Il est à noter, pour ces données, que 90% et 84 %

de la population des désordres ont un diamètre de fontis respectivement inférieur à 5 m et à 4 m. Plus de 74% ont un diamètre inférieur ou égal à 3 m.

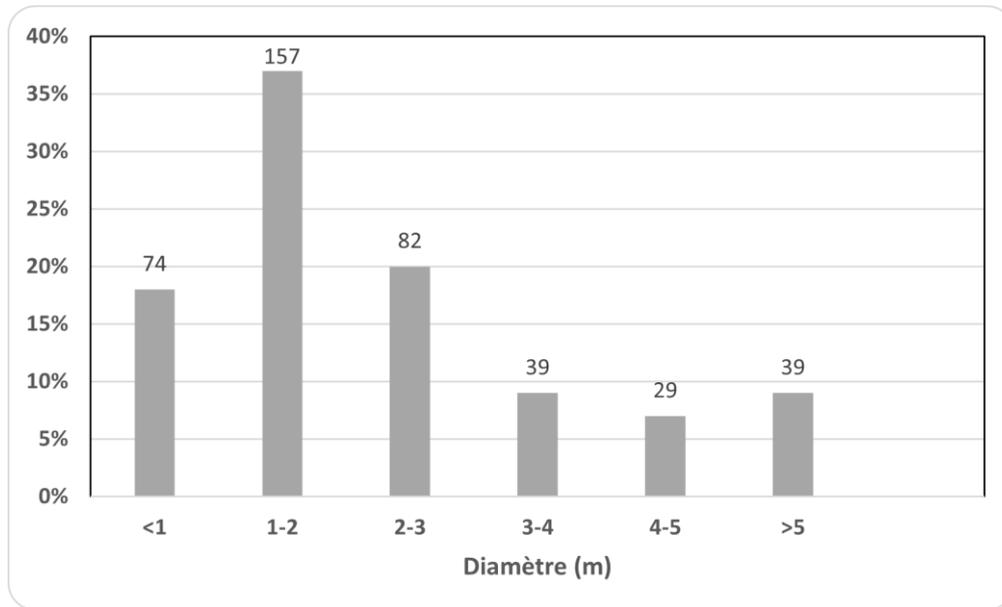


Figure 10 : Distribution du diamètre du fontis (en surface) et en l'absence du traitement pour des carrières de gypse et calcaire de la région parisienne – Population de 420 cas de fontis (données de l'IGC, traitées par l'Ineris)

Il est difficile de dégager une corrélation entre le diamètre de fontis et la profondeur de la cavité (Figure 11). Le diamètre du fontis dépend de la profondeur et de la taille de la cavité, mais aussi de la nature de terrain au-dessus de la cavité et du coefficient de foisonnement.

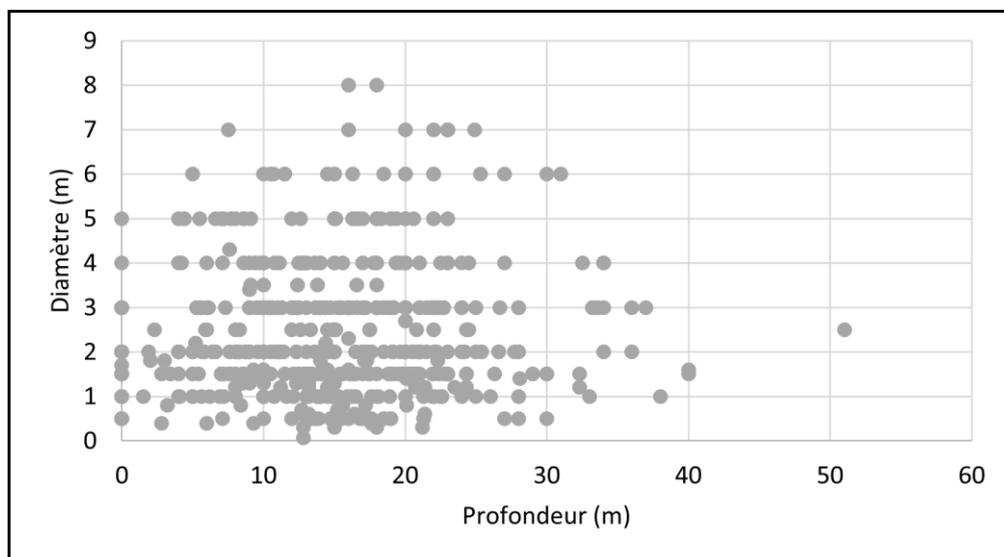
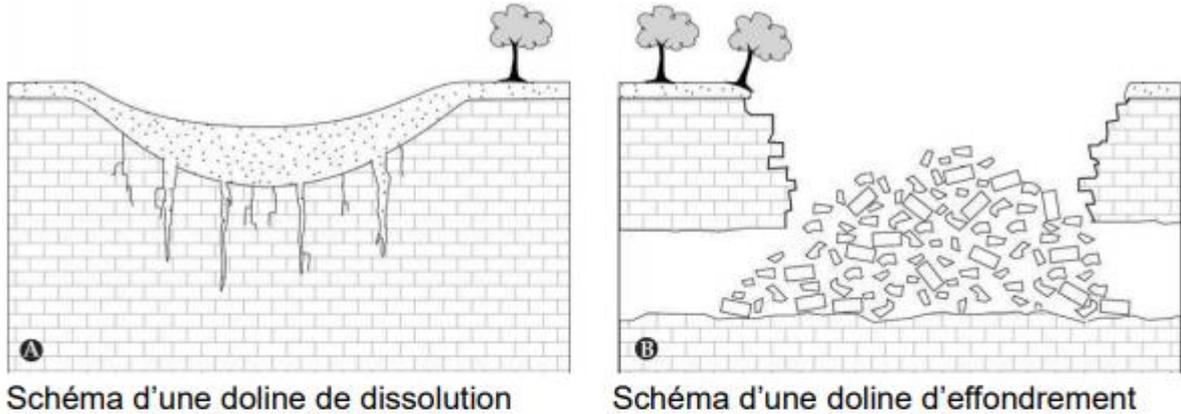


Figure 11 : Diamètre du fontis (en surface) et en fonction de la profondeur pour des carrières de gypse et calcaire de la région parisienne – (données de l'IGC, traitées par l'Ineris)

3.2.2. Cavités naturelles

Les conséquences du développement des cavités naturelles jusqu'en surface, qu'elles aient pour origine la dissolution d'évaporites ou de karst calcaire, sont identiques. La Figure 12 présente deux exemples possibles de conséquences en surface pour des cavités de dissolution karstique.



Exemple de doline de dissolution (76)



Exemple de doline d'effondrement (76)

Figure 12 : Différents types de cavités de dissolution et leur conséquence en surface (d'après Salvati et Sasowsky, 2002)

En contexte gypseux, la propagation du vide peut être en plus accentuée par la présence d'eau. Celle-ci va avoir une double incidence : la modification des caractéristiques de foisonnement (diminution du coefficient) et l'accentuation de la progression du vide vers la surface, notamment, lorsque le cône d'influence de la cavité provoque la rupture de l'écran imperméable de la nappe sus-jacente et la mise en relation de deux systèmes aquifères (Toulemont, 1981). Une fois que cet horizon est atteint par l'effondrement, des processus d'érosion et de suffusion se mettent en place du fait de la différence de pression entre les aquifères.

Les mouvements de terrain sont souvent associés à des déformations horizontales. Celles-ci risquent de générer des dommages au niveau du sol, des structures et des infrastructures. Différentes méthodes analytiques et numériques permettent d'estimer la déformation

horizontale associée en particulier à un affaissement. La méthode empirique de NCB (National Coal Board, 1975) permet de calculer la déformation horizontale maximale en fonction de l'affaissement maximal au niveau du sol de surface (S), de la profondeur de la cavité (H) et d'un coefficient empirique k fonction de la nature du terrain de recouvrement. Cette relation ($\epsilon_{\max} = k (S/H)$) a été adaptée pour des cavités à faible profondeur. L'annexe A donne à titre indicatif les déformations horizontales du sol pour différentes configurations de la cavité.

Dans le cas d'un sol renforcé, l'objectif recherché est que le géosynthétique transforme le fontis en affaissement. La déformation horizontale du sol au niveau du géosynthétique peut être considérée sensiblement égale à celle du sol en surface.

3.2.3. Puits et ouvrages verticaux

Dans plusieurs régions, les anciennes exploitations souterraines ne sont accessibles que par des puits verticaux creusés depuis la surface (marnières, catiches, crayères, minières...). Ces puits souvent mal rebouchés et mal connus constituent des configurations particulièrement sensibles à l'apparition de fontis (Figure 13). Le diamètre de ces puits est généralement inférieur à 5m, et majoritairement de 2 à 3m. Ces puits sont abandonnés après la mise en place d'un bouchon ou/et après avoir été remplis à l'aide de matériaux (souvent du tout-venant). Un ancien puits mal remblayé, notamment en présence d'eau, peut débourrer, c'est-à-dire voir son remblai s'écouler au sein des ouvrages souterrains auxquels il est raccordé, avec pour conséquence la formation en surface d'un cratère présentant les mêmes dimensions que la colonne du puits.

Ce déboufrage peut s'accompagner, ou être suivi, d'une rupture du revêtement du puits et d'un effondrement des terrains encaissants peu cohésifs, comme le sont généralement les terrains superficiels. Il se produit alors un cône d'effondrement dont les dimensions dépendent des caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et mécaniques locales des terrains (Figure 13).



Figure 13 : Exemples de déboufrage de différents puits d'exploitation - Sources : Ineris et ORRNA

3.3. Effondrement généralisé

L'effondrement généralisé, également appelé effondrement en masse, se manifeste par la rupture, souvent dynamique (quelques secondes), de tout ou partie d'une exploitation souterraine, affectant ainsi la stabilité des terrains de surface sur des étendues pouvant atteindre plusieurs hectares (Figure 14). La hauteur d'effondrement affectant la partie centrale peut atteindre plusieurs mètres, et même plusieurs dizaines de mètres. Cette zone centrale est bordée par des fractures ouvertes, subverticales, délimitant des « marches d'escalier » dont les conséquences peuvent, elles aussi, s'avérer très dommageables pour les personnes et les biens situés en surface. Ce sont des phénomènes rares dont les conséquences sont néanmoins potentiellement graves car ils mobilisent une quantité considérable d'énergie. Ils peuvent ainsi s'accompagner de secousses sismiques et d'effets de souffle susceptibles de projeter, sur de grandes distances, des matériaux par les galeries et les puits ouverts.



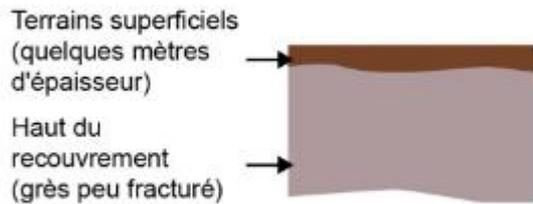
Figure 14 : Exemple d'un effondrement généralisé - Source : Ineris

3.4. Crevasses

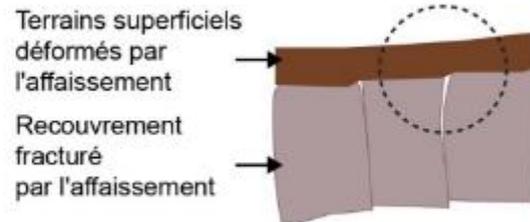
Les crevasses sont associées aux aléas miniers liées à l'affaissement ou l'effondrement des cavités souterraines. Elles peuvent être aussi associées à des karsts. Elles sont définies de manière purement géométrique, elles correspondent à des discontinuités marquées, d'ouverture pluri-centimétrique à pluri-décimétrique, d'extension pouvant aller de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres, et de profondeur variable pouvant atteindre plusieurs mètres. Plusieurs typologies de phénomènes peuvent être à l'origine de leur formation,

comme les affaissements ou les effondrements généralisés. Une crevasse peut se manifester plusieurs années après sa formation (Figure 15). Elles sont ainsi souvent découvertes à l'occasion de travaux anthropiques de surface (décapage des sols et terrassements de voiries, infrastructures ou bâtiments). Plus rarement, elles peuvent apparaître en surface lors d'épisodes climatiques particuliers (pluviométrie importante, épisodes de gel-dégel) ou lorsque les activités anthropiques génèrent des flux d'eau importants (fuites de réseaux). Le phénomène en surface est comparable à un effondrement localisé longitudinal.

A - Etat initial avant l'exploitation minière



B- Affaissement minier et création des fractures du recouvrement



C - Erosion des terrains superficiels et apparition de la crevasse en surface

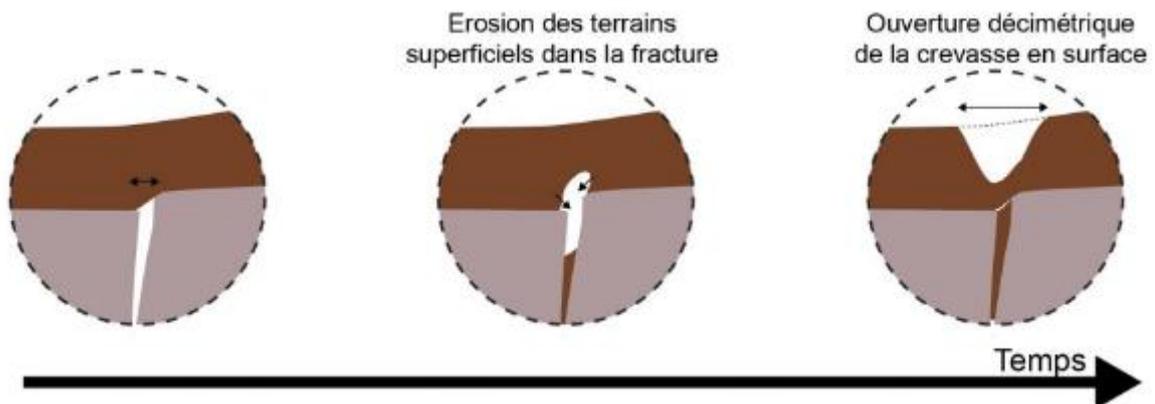


Figure 15 : Formation (A, B) et évolution d'une crevasse d'origine minière – Source : Guide Ineris 2017

L'effondrement inopiné et brutal des cavités naturelles ou anthropiques conduit à la formation d'un fontis en surface, appelé aussi aléa « mouvement de terrain ». Les personnes, biens, activités, infrastructures, patrimoine, etc..., appelés aussi les enjeux, sont susceptibles d'être affectés par la formation de fonction.

4. Méthodes de réduction de l'aléa « mouvement de terrains »

L'aléa est un terme couramment employé en prévention des risques. Il correspond à la probabilité qu'un phénomène se produise sur un site, au cours d'une période de référence donnée, en atteignant une intensité qualifiable ou quantifiable. La caractérisation d'un aléa repose classiquement sur le croisement de l'intensité prévisible du phénomène avec sa probabilité d'occurrence.

En matière de prévention des risques, on entend comme période de référence une durée de l'ordre de plusieurs dizaines, voire centaines d'années, pour fixer un ordre de grandeur. Il est donc nécessaire d'intégrer à l'analyse la dégradation inéluctable dans le temps des anciennes cavités anthropiques. L'intensité du phénomène correspond à l'ampleur des désordres, séquelles ou nuisances susceptibles de résulter du phénomène redouté. Cela intègre une notion de grandeur des événements redoutés (taille et profondeur d'un fontis, mais également leurs potentiels effets sur les personnes et les biens. La notion de probabilité d'occurrence traduit la sensibilité d'un site à être affecté par un phénomène. Quelle que soit la nature des événements redoutés en présence des cavités, la complexité des mécanismes, la nature hétérogène du milieu naturel, le caractère partiel des informations disponibles et le fait que de nombreux désordres, séquelles ou nuisances ne soient pas répétitifs, expliquent qu'il est généralement impossible de raisonner avec une approche probabiliste quantitative. On utilise donc une classification qualitative qui caractérise une prédisposition du site à être affecté par tel ou tel type de phénomène. C'est donc cette notion qui est retenue dans la qualification de l'aléa « fontis ou effondrement localisé ».

Donc la présence des cavités est associée à un **aléa de mouvement de terrains** (affaissement, effondrement localisé, etc.), **le risque** est la manifestation des conséquences sur les enjeux en surface.

Risque = Aléa x enjeux

Plusieurs méthodes de traitement préventives, passives (qui réagissent lors de la formation de fontis en surface) ou actives (qui empêchent le développement d'un mécanisme de rupture au sein du massif) existent pour réduire ou supprimer l'aléa. D'autres méthodes visent plutôt à réduire la vulnérabilité des structures ou infrastructures.

Le Tableau 2 constitue un élément pour choisir la méthode de traitement en fonction de l'usage actuel ou futur du sol (ex. espace vert ou une infrastructure) et les résultats attendus après la réalisation du traitement (suppression totale de l'aléa ou réduction de l'intensité de l'aléa.

Le guide (guide Ineris, 2016) fournit plus d'informations sur chaque méthode de traitement. On trouve également dans ces guides les avantages et les inconvénients de chaque méthode et leur domaine d'application. Il comprend notamment :

- **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.

Il est fortement recommandé de consulter ces guides pour le choix de la méthode de traitement la plus adaptée.

Le choix de mettre en œuvre l'une ou l'autre de ces méthodes de traitement dépend essentiellement :

- des objectifs visés en termes de maîtrise du risque et de destination du site (empêcher le fontis de se développer et d'atteindre la surface, diminuer l'intensité du fontis, diminuer les dommages en surface) ;
- de la configuration des cavités et de la nature du massif encaissant ;
- du risque résiduel acceptable en surface après traitement ;
- des aspects économiques.

La Figure 16 représente un logigramme décisionnel du choix de la méthode de traitement d'une cavité souterraine présentées dans le Tableau 2. La première étape est la qualification de l'aléa. L'aléa est caractérisé par les facteurs géologiques, géométriques, hydrologiques. Ces facteurs permettent de qualifier l'aléa. La deuxième étape est la qualification des dommages sur les enjeux, notamment l'impact de fontis sur les enjeux socio-économiques et l'environnement. A la suite d'analyses technico-économiques, la meilleure méthode de traitement est adoptée.

Le Tableau 2 présente les méthodes de traitement allant du comblement total permettant de supprimer complètement l'aléa « fontis » et à la mesure d'interdiction d'accès à la zone d'aléa par la mise en place d'une clôture. Le choix de la méthode est principalement réalisé en fonction de l'occupation du sol en surface (enjeux) et des considérations techniques et économiques. Certaines méthodes permettent d'atténuer l'aléa ou ses conséquences ; d'autres permettent de le supprimer complètement. Le Tableau 2 mentionne également le risque résiduel qui pourrait exister après le traitement, notamment en termes d'affaissement de faible amplitude. Parmi les méthodes de mise en sécurité figure la méthode de renforcement à l'aide de géosynthétique.

Le chapitre 5 du document est consacré à la méthode de renforcement par géosynthétique. Il décrit le produit, son utilisation, des cas d'application et les étapes pour la réalisation d'un dimensionnement.

Les méthodes de traitement ont pour objectif de réduire l'intensité de l'aléa « mouvement de terrain » associé à l'effondrement des cavités souterraines ou/et de ces conséquences sur les enjeux en surface. Le choix de la méthode de traitement dépend du niveau de l'aléa, des enjeux en surface et du mouvement résiduel admissible. Ce choix dépend également de rapport coût – bénéfice.

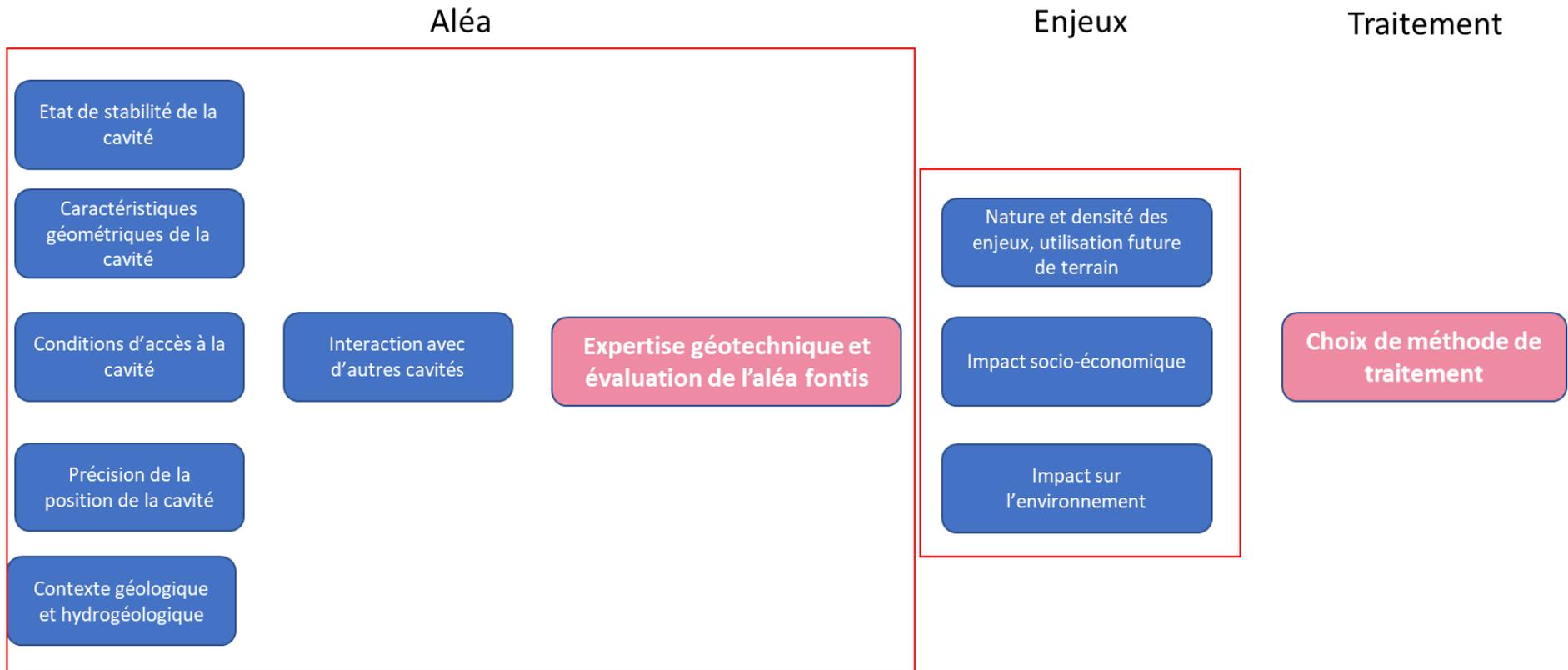


Figure 16 : Logigramme décisionnel du choix de la méthode de traitement d'une cavité souterraine présentées dans le Tableau 2

Tableau 2 : Aide pour le choix des méthodes de réduction de l'aléa « fontis » (adapté et complété du guide Ineris, 2016a)

Méthodes	Utilisations de la surface	Techniques de réalisation	Conséquences	Risque résiduel
Comblement intégral des cavités (avec ou sans clavage)	<ul style="list-style-type: none"> • espaces verts • chaussées • constructions existantes • constructions nouvelles 	<ul style="list-style-type: none"> • à partir du fond par des engins mécanisés • par déversement gravitaire à partir de la surface • injections de mortier ou de coulis • mousses thermodurcissables 	Suppression de l'aléa	Affaissement (si pas clavage)
Consolidation (Confortements) des cavités	<ul style="list-style-type: none"> • espaces verts • chaussées • constructions existantes et constructions nouvelles 	Renforcement et confinement du massif par : <ul style="list-style-type: none"> • projection de béton ou de résine • boulonnage • édification de piliers artificiels / coffrage des piliers 	Réduction de la prédisposition de l'aléa	A long terme fontis et affaissement
Comblement partiel des cavités	Espaces verts	<ul style="list-style-type: none"> • à partir du fond par des engins mécanisés • par déversement gravitaire à partir de la surface 	Réduction de l'intensité de l'aléa	Affaissement

Mise en place d'un géosynthétique	<ul style="list-style-type: none"> • espaces verts • chaussées/voies ferrées • remblais d'ouvrages courants* • réseaux 	Géosynthétique de renforcement mis en place au-dessus des cavités avec un système d'ancrage, et éventuellement instrumenté	Modification de l'aléa + Réduction des conséquences sur les structures et infrastructures	Affaissement contrôlé (éventuellement nul en surface si nécessaire)
Renforcement des sols ou adaptation de fondations	Constructions nouvelles ou existantes	Pieux, micropieux ou inclusions rigides à partir de la surface du sol, réalisés par foration et remplissage + injection	Réduction de la vulnérabilité des structures et infrastructures	Fontis / affaissement hors bâti (zones non traitées)
Amélioration du sol Fondations superficielles avec longrines Renforcement de structure Inclusions rigides	<ul style="list-style-type: none"> • constructions nouvelles • chaussées • remblais de construction 	<ul style="list-style-type: none"> • fondations continues • radier ou dalle en béton armé 		Fontis / affaissement - fissures sur bâti
Clôtures (grillages, treillis...)	Espaces verts restreints	Clôtures (grillages, treillis...)	Protection des personnes	Affaissement / Fontis

* ouvrages courants : projets relevant de la catégorie géotechnique 2 (selon les Eurocodes), c'est à-dire ouvrages qui ne présentent pas de risque exceptionnel et ne sont pas exposés à des conditions de terrain ou de chargement difficiles.

5. Renforcement par géosynthétique

5.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des géosynthétiques

Selon la norme NF EN ISO 10318, le géosynthétique (GSY) est un terme générique désignant 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 dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. Les principaux polymères pour la fabrication de géosynthétiques sont :

- le polyester (PET) : résistance aux UV, filaments, déformation à la rupture environ 10 %, faible fluage, si $\text{pH} < 4$ ou $\text{pH} > 9$ dégradable ;
- le polypropylène (PP) : version améliorée du PET, filament, déformation à la rupture environ 15 %, sensible au fluage, stable pour un pH allant de 2 à 13 ;
- le polyacétate de vinyle (PVA) : filaments, très haut module, déformation à la rupture environ 7 %, faible fluage, si $\text{pH} < 4$ ou $\text{pH} > 9$ dégradable ;
- l'aramide (HTA) : filaments, très haut module, déformation à la rupture environ 4 %, faible fluage, si $\text{pH} < 4$ ou $\text{pH} > 9$ dégradable.

En plus de sa déformabilité, le géosynthétique est caractérisé par sa résistance à la traction et éventuellement au poinçonnement. Le comportement en traction d'un géosynthétique, déterminé suivant la norme NF EN ISO 10319, est caractérisé par la relation entre l'effort de traction T (force par unité de largeur exprimée en kN/m) et l'allongement ou la déformation ε du géosynthétique (exprimée en pourcentage). A partir de la courbe « effort de traction – allongement », on détermine la résistance ultime à la traction (encore appelée force de rupture T_r (kN/m)), la déformation à l'effort maximum (encore appelée allongement à la rupture ε_r (%)). En outre la courbe « effort de traction – allongement », permet de calculer la raideur sécante J du géosynthétique à l'allongement ε ou sur une plage de déformation $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$, comme le rapport entre la force de traction T par unité de largeur (respectivement la différence d'effort $T_1 - T_2$) et l'allongement ε ou la plage de déformation $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ correspondante (Figure 17). Différentes valeurs de raideurs peuvent être calculées, à partir de la courbe (effort-allongement) en fonction de la plage de déformations.

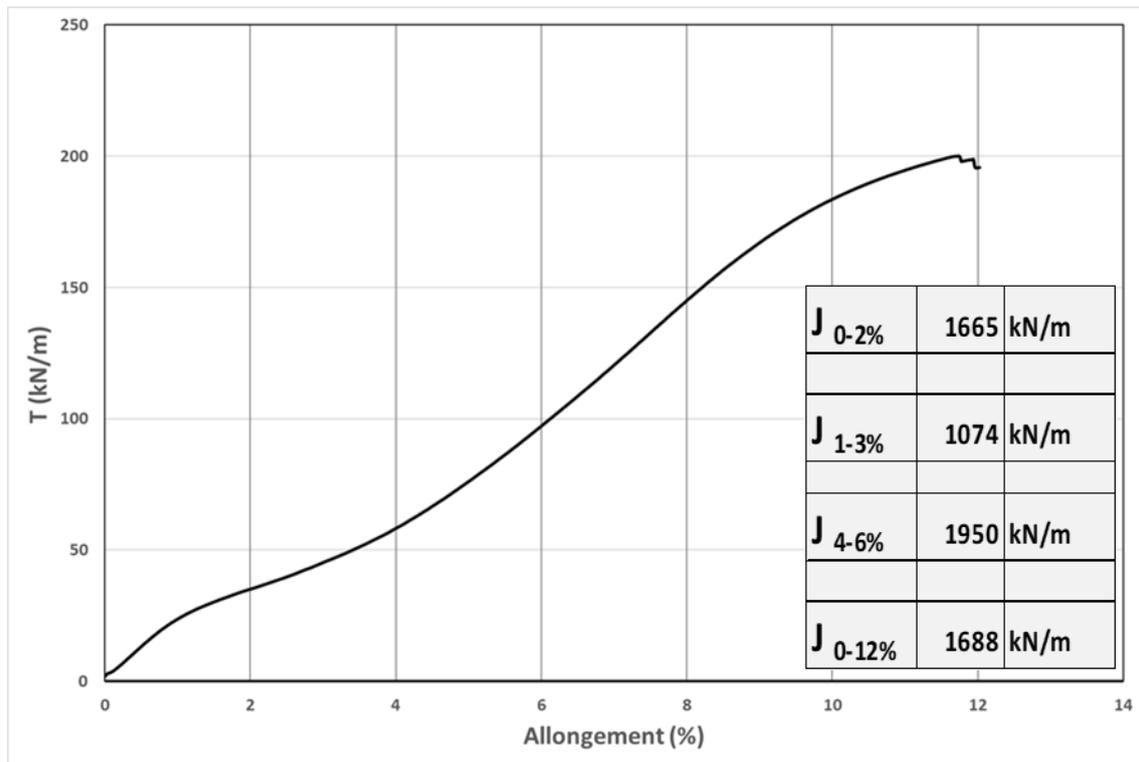


Figure 17 : Comportement de GSY – effort-déformation, exemple d'évaluation des raideurs sécantes pour deux plages de déformations définies pour une courbe de traction de GSY en polyester – allongement. Source : Afitexinov

Afitexinov a développé un géosynthétique innovant (Brevet n° FR3029943 – 2016-06-17) sous la dénomination « géosynthétique de renforcement de sol à comportement multi-module inversé », qui confère à la nappe de renforcement deux raideurs en traction s'activant l'une après l'autre ; la première étant plus faible que la seconde (contrairement au géosynthétique classique « bi-raideur » pour lequel la première est plus élevée que la seconde).

Grâce à une technologie de tricotage, des capteurs peuvent être intégrés dans ce géotextile comme dans les précédents (mono-modules). Il s'agit ici de fibres optiques (FO), insérées dans le GSY dès la production (Figure 18). L'intégration des fibres optiques dans les géosynthétiques est un moyen de mesurer les déformations. Associé à ce dispositif de mesure, le géosynthétique « bi-raideur inversé » instrumenté permet de détecter le début d'une rupture de la couche de sol (grâce à la première raideur plus faible du géosynthétique) tout en garantissant le même niveau de sécurité qu'un géosynthétique à une seule raideur (la deuxième raideur plus importante s'active après le seuil de déformation nécessaire à la détection des mouvements liés à la cavité).

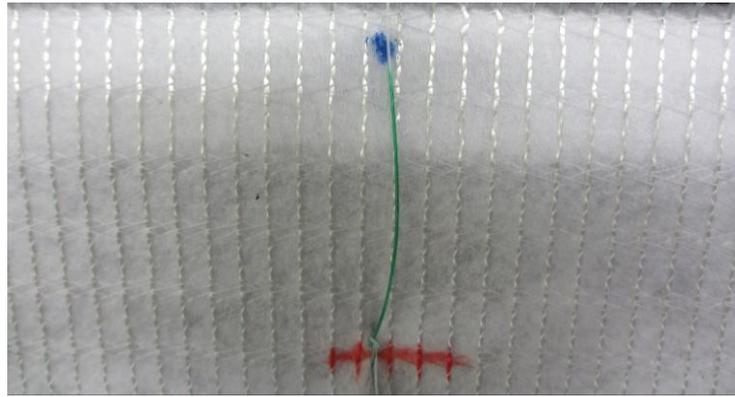


Figure 18 : Insertion de fibre optique (en vert) dans un géosynthétique de renforcement lors de la production par la technologie de tricotage - Source : Afitexinov

Le géosynthétique est à base de polymère synthétique ou naturel, se présente sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. Le géosynthétique est caractérisé par sa résistance à la traction et éventuellement au poinçonnement.

Le géosynthétique mono-module (mono-raideur) est caractérisé par une seule raideur, en revanche le géosynthétique bi-raideur inversé est caractérisé par deux raideurs, la première est très faible permettant de détecter les premières déformations, et la deuxième est très importante permettant d'assurer le maintien de la stabilité de la surface et des ouvrages en surface.

5.2. Objectifs et intérêt du renforcement par géosynthétique

Selon la norme NF EN ISO 10318, le renforcement à l'aide de géosynthétique résulte de la mobilisation du comportement en résistance-déformation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géosynthétiques. Le renforcement par géosynthétique permet d'améliorer les propriétés mécaniques du sol ou d'autres matériaux de construction.

Le renforcement à l'aide de GSY permet de réduire l'intensité de l'aléa, de protéger les personnes et de réduire significativement l'endommagement des structures et des infrastructures (Figure 19). Il est utilisé dans le cas de l'existence de cavités dans le sous-sol présentant un aléa fontis. Le renforcement à l'aide de géosynthétique présente des impacts environnementaux limités par rapport à d'autres solutions traditionnelles (ex. dalle en béton armé).

Plusieurs études ont été réalisées pour évaluer l'impact environnemental des solutions utilisant des géosynthétiques en tant que système de renforcement. On peut noter par exemple l'étude réalisée par l'ETH Zürich (Swiss Federal Institute of Technology) et ESU-services Ltd (<https://www.eagm.eu>) à la demande de l'EAGM qui présente une série d'études

comparatives d'évaluation du cycle de vie pour divers cas d'application des géosynthétiques par rapport à des méthodes de construction classiques.

Plus spécifiquement pour le renforcement au-dessus de cavités, on notera l'étude réalisée dans le cadre du projet REGIC (Riot et al. 2022). Celle-ci analyse l'impact environnemental des différentes solutions de construction de remblai pour résoudre le problème de la construction au-dessus de cavités potentielles. Elle a entre autres permis d'identifier les paramètres les plus influents sur l'empreinte environnementale, ainsi que de confirmer et de quantifier l'intérêt de l'emploi d'un renforcement géosynthétique couplé à un dispositif d'alerte autonome et à distance pour détecter, localiser la cavité et surveiller l'ouvrage.

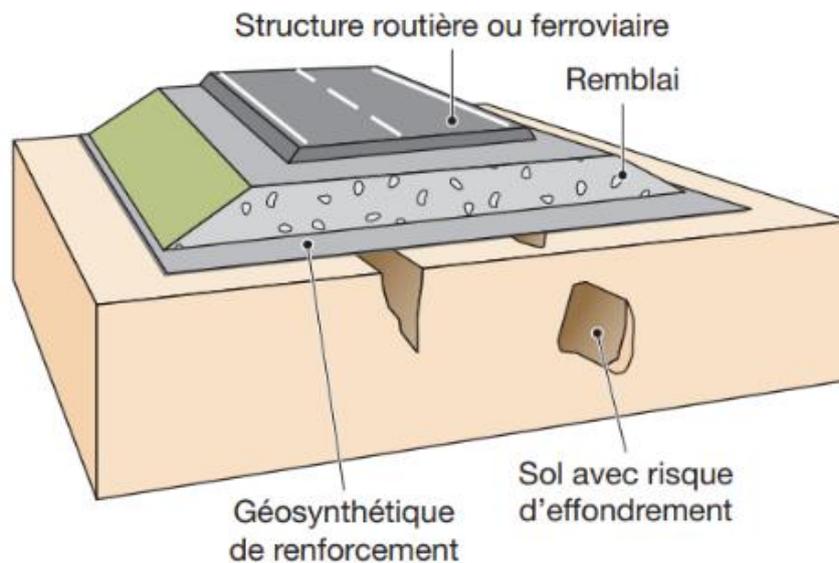
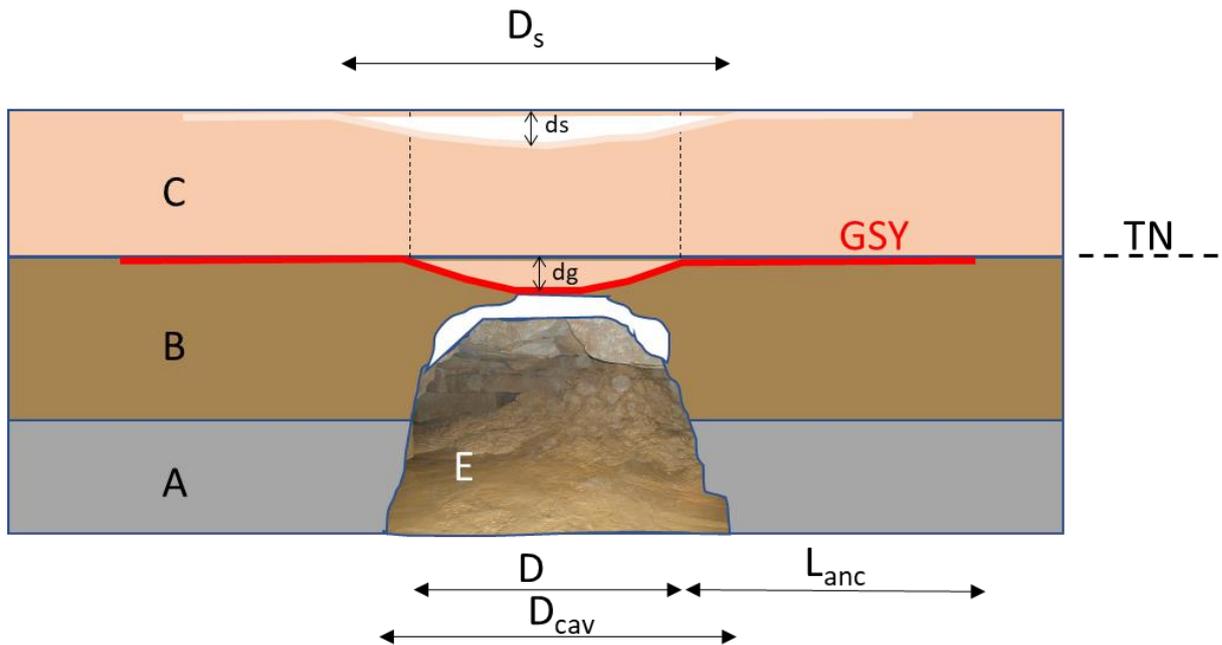


Figure 19 : Application d'un géosynthétique de renforcement sur cavités – Source : CFG, Le Moniteur, 2015

Sous réserve de respecter les règles de l'art du dimensionnement, le géosynthétique permet d'assurer une sécurité temporaire ou pour la durée de service³, avant la mise en place d'un traitement définitif correspondant au comblement des vides dans les zones où des effondrements se sont produits (guide dissolution naturelle du gypse, Ineris, 2017). L'objectif, dans ce cas, est d'offrir un renforcement préventif-passif, permettant d'arrêter ou de limiter la progression du fontis jusqu'en surface. L'effondrement d'une cavité non-renforcée pourrait conduire à la formation d'un fontis en surface. En revanche l'effondrement d'une cavité renforcée par géosynthétique conduit, si le renforcement est correctement dimensionné, à une cuvette d'affaissement d'une amplitude d'un tassement inférieur ou égale au tassement admissible (d_s) au sens de l'impact sur les enjeux en surface (Figure 20). Le géosynthétique est sollicité et une flèche correspondant à un déplacement vertical se produit (d_g).

³ Durée de service de l'ouvrage est définie par le maître d'ouvrage ou par les normes et les recommandations de l'Eurocode



- | | |
|---|---|
| A : couche de la cavité | Dcav : largeur ou diamètre de la cavité |
| B : recouvrement | Lanc : largeur de l'ancrage |
| C : remblai | ds : amplitude de l'affaissement maximal |
| D : largeur ou diamètre du fontis | dg : déflexion maximale de géosynthétique |
| E : terrains éboulés | TN : terrain naturel |
| Ds : largeur ou diamètre de l'affaissement en surface | |

Figure 20 : Vue transversale - Illustration d'un géosynthétique implanté au-dessus d'une cavité – Source : Ineris

Les géosynthétiques existant sur le marché, à la date de parution de ce document sont employés pour des cavités d'un diamètre < 5 m. Au-delà de 5 m, les GSY ne permettent pas de répondre aux exigences actuelles du dimensionnement. Les fontis de grand diamètre (>5 m) sont beaucoup moins fréquents, comme le montre l'exemple des données de fontis observés dans la région parisienne (Figure 10).

Dans le cas d'un géosynthétique « instrumenté », c'est-à-dire équipé par des fibres optiques associées à un système d'auscultation approprié, un deuxième objectif de l'utilisation du géosynthétique est la détection de la propagation de fontis vers la surface, grâce aux mesures des déformations du recouvrement, avant que la cloche de fontis n'arrive au niveau du GSY.

Les deux photos de la Figure 21 présentent un exemple de cette utilisation sur le site de Trois-Luc à la Valentine (Delmas et Gourc, 2017). Ce cas montre l'intérêt du renforcement qui permet un affaissement de faible amplitude.



Figure 21 : Affaissement obtenu en 2015 au-dessus d'une zone renforcée par un géosynthétique – Source : Trois Luc à La Valentine, Delmas et Gourc, 2017

Le renforcement à l'aide de GSY permet de réduire l'intensité de l'aléa « mouvements de terrain », de protéger les personnes et de réduire significativement l'endommagement des structures et des infrastructures. Le géosynthétique « instrumenté », équipé par des fibres optiques associées à un système d'auscultation approprié, permet la détection de la propagation de fontis vers la surface, grâce aux mesures des déformations du recouvrement, avant que la cloche de fontis n'arrive au niveau du GSY.

5.3. Exemple d'application de GSY

Le Tableau 3 présente quelques exemples d'utilisation de géosynthétique comme solution de réduction de l'aléa fontis. Ces cas permettent d'illustrer les différentes possibilités de renforcement par géosynthétique des sols au-dessus de zones à risque d'effondrement. Les principales informations géométriques caractérisant la structure ou l'infrastructure, la cavité et le géosynthétique ont été renseignées au mieux (Figure 22).

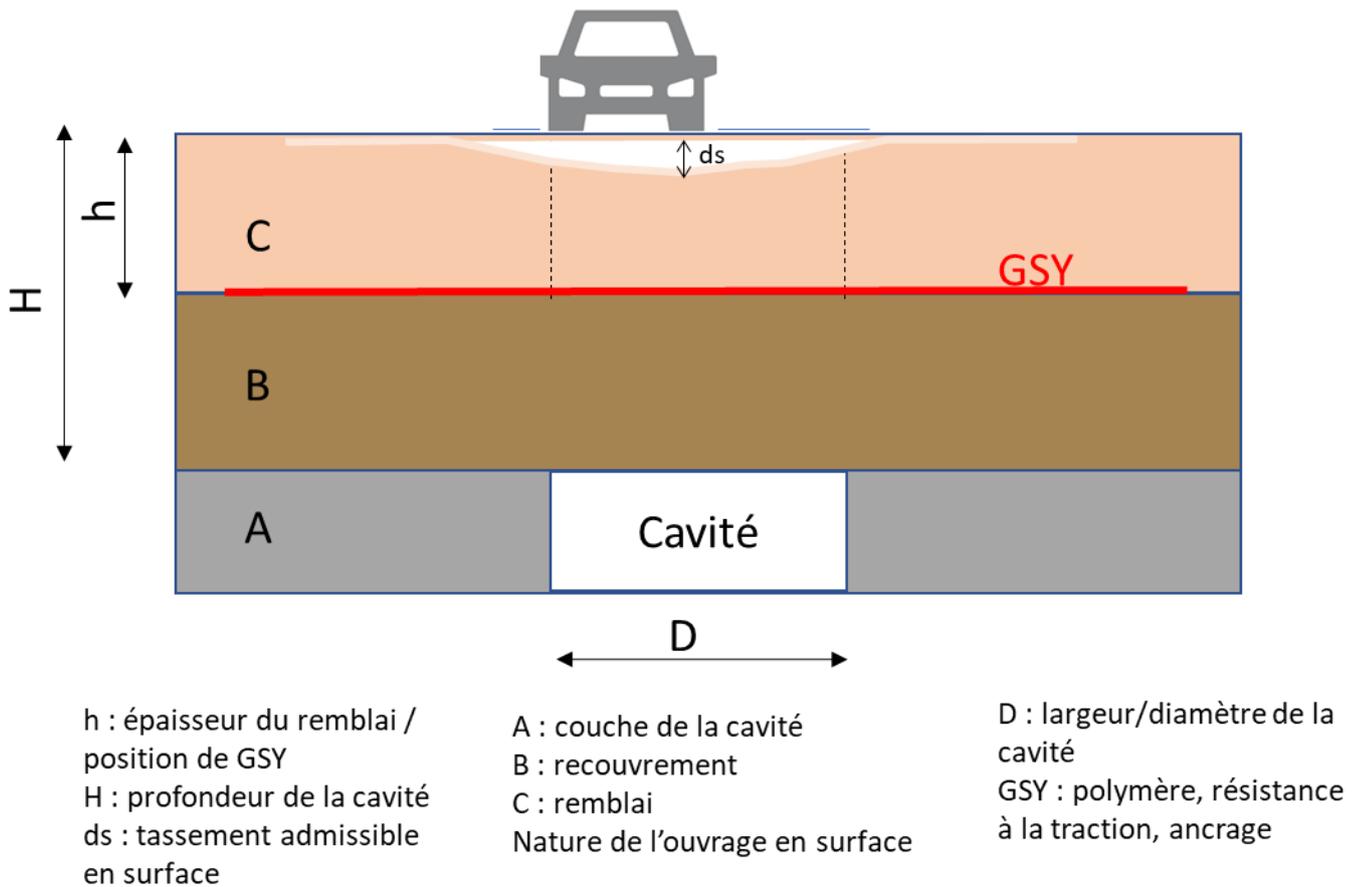


Figure 22 : Principaux paramètres collectés pour l'analyse des cas d'applications -
 Source : Ineris

Parmi les cas présentés ci-après, le géosynthétique a été mobilisé lors d'un effondrement survenu après l'installation du géosynthétique (ex. Trois Lucs à la Valentine).

A noter cependant, que peu de cas de renforcement se réfèrent à un géosynthétique instrumenté. Les observations suivantes peuvent être faites :

- Les cas d'application concernent à la fois des cavités naturelles (cavités karstiques) et anthropiques (mines et carrières).
- Les enjeux concernés sont des infrastructures (autoroutes, routes, voies ferrées) et des espaces publics (parcs et parkings).
- Le diamètre de fontis potentiel est inférieur à 6 m. Le seul cas de 6 m correspond à un parc. On notera que ce diamètre est supérieur à la limite conseillée dans ce document ; l'objectif principal dans ce cas est de limiter le risque de chute de personnes, le tassement en surface n'étant pas le critère principal.
- La profondeur initiale des cavités est peu mentionnée dans les sources.
- Le géosynthétique est majoritairement utilisé avant la formation du fontis, parfois il est associé à d'autres méthodes de traitement comme le comblement des cavités. Il est aussi parfois utilisé pour sécuriser la surface après la formation de fontis.

Tableau 3 : Exemples de cas d'application du géosynthétique au-dessus de cavités naturelles et anthropiques (NF : donnée non fournie)

PP : géosynthétique en polypropylènes ; PET : géosynthétique en polyesters ;

d_s : tassement admissible en surface

Site	Infrastructure	Cavité			Géosynthétique / infrastructure				Remarques/auteurs
		Type	Diamètre (m)	Profondeur (m)	d_s (cm)	Polymère/résistance (kN/m)	Hauteur du remblai (m)	Ancrage (m)	
Montbéliard	Autoroute A36	Karst	0,8	Variables	0,2	PET/300	1	2	Plusieurs cavités – Riot et al., 2013
Kukruse (Estonie)	Autoroute E20	Mine	4	3 à 14	16	PET/1350/135	2	Horizontal	Fissures et cavités découvertes sur le site. Auray et Garcin, 2010
Glan Llyn (UK)	A55-E22	Karst	Variables	1 à 10	NF	NF /150	0,50	NF	Nichol, 1998
Tunis	Autoroute A3	Karst	2 à 4	NF	NF	NF	0,80	NF	Plusieurs effondrements avant les travaux. Zaghouani, 2017
Paris-Vendenheim	LGV-Est	Karst	0,5 (fissures)	Variables	0,1	PP/75/75	0,5 - 1,05	2 m	Exbrayat et Garcin, 2006

St Lô	RN 174		3		15	PP/200	1,17	1m	Jaffrot et al., 2009
Meaux	A140-RD5	Carrières	2	20 - 40	10	HTA-PP/190	1	Horizontal	Blivet et al., 2006
Trois Lucs à la Valentine	Route	Mine	2	18		HTA-PET/200	NF	Tranchée	Plusieurs effondrements localisés. Delmas, 2017
Gauteng (Afrique du Sud)	Route N14-P158	Karst	NF	NF	NF	PC/100-100	0,5	Horizontal	Après affaissement. Kaytech, 2006
Arras	Place	Carrière de craie	4	14 - 20	20	PET/1800	1	Tranchée	Abdelouhab et al., 2018
Vitry-sur-Seine	Parc	Carrière	6	45	Important	PET/625	< 0,50	Variables	Affaissement généralisé. Dubreucq et al., 2006
Lille	Parc	Carrière - Catiche	2	8 - 15	15	1550	0,50	5	Tête de catiche en maçonnerie. Hassoun et al., 2017
Fife (UK)	Remblai - Parc	Mine	4	15	NF	PET/500-50	2,75	NF	2 couches ont été utilisées l'une est perpendiculaire à l'autre. TenCate, 2012

5.4. Domaines d'application du renforcement par géosynthétique

Dans la suite du document, on précise la partie « Traitement » de la Figure 16, c'est-à-dire que l'on propose une démarche permettant de choisir entre deux configurations de méthodes de traitement par un géosynthétique ou par une autre méthode de traitement comme le comblement partiel ou total (Figure 23). Cette Figure 23 précise également le choix de la surveillance (observation ou/et instrumentale) en l'absence d'un comblement total de la cavité. On peut distinguer deux configurations en fonction des objectifs de la mise en sécurité de la cavité :

- **Configuration 1** : traitement dans le cas où les cavités sont bien connues et d'un diamètre inférieur à 5 m ;
- **Configuration 2** : traitement dans le cas où les cavités sont difficilement localisables ou méconnues ou dans les cas de cavités connues d'un diamètre supérieur à 5 m. Dans ce cas, les mesures de déformation du géosynthétique et des mouvements du sol permettent de localiser la cavité et d'anticiper d'éventuelles conséquences graves sur les structures et les infrastructures. On peut distinguer deux sous-configurations en fonction de l'ampleur des mouvements du sol situé sous le géosynthétique (Figure 23) :
 - des mouvements relativement faibles (par exemple dans le cas d'une cavité d'un diamètre ≤ 4 m, exceptionnellement ≤ 5 m), le géosynthétique permet dans ce cas d'assurer la stabilité de l'infrastructure et son instrumentation permet de réaliser la surveillance de l'ouvrage ;
 - des mouvements de grande ampleur (par exemple taille de la cavité ou de l'effondrement supérieur à 5 m), la solution de renforcement par géosynthétique n'est pas appropriée pour assurer la stabilité de l'infrastructure. Le géosynthétique instrumenté (sans fonction de renforcement) peut être utilisé pour mesurer la progression des déformations du sol et détecter la remontée des cavités non localisées pour éviter un traitement coûteux ou non-planifié suite à un mouvement de terrain. Il permettrait dans ce cas de localiser la cavité en s'appuyant sur l'évaluation des déformations du géosynthétique. Dans le cas où les mouvements dépassent les valeurs seuils, il convient de prévoir un autre traitement de la cavité (par exemple comblement, ou autre, voir Tableau 3).

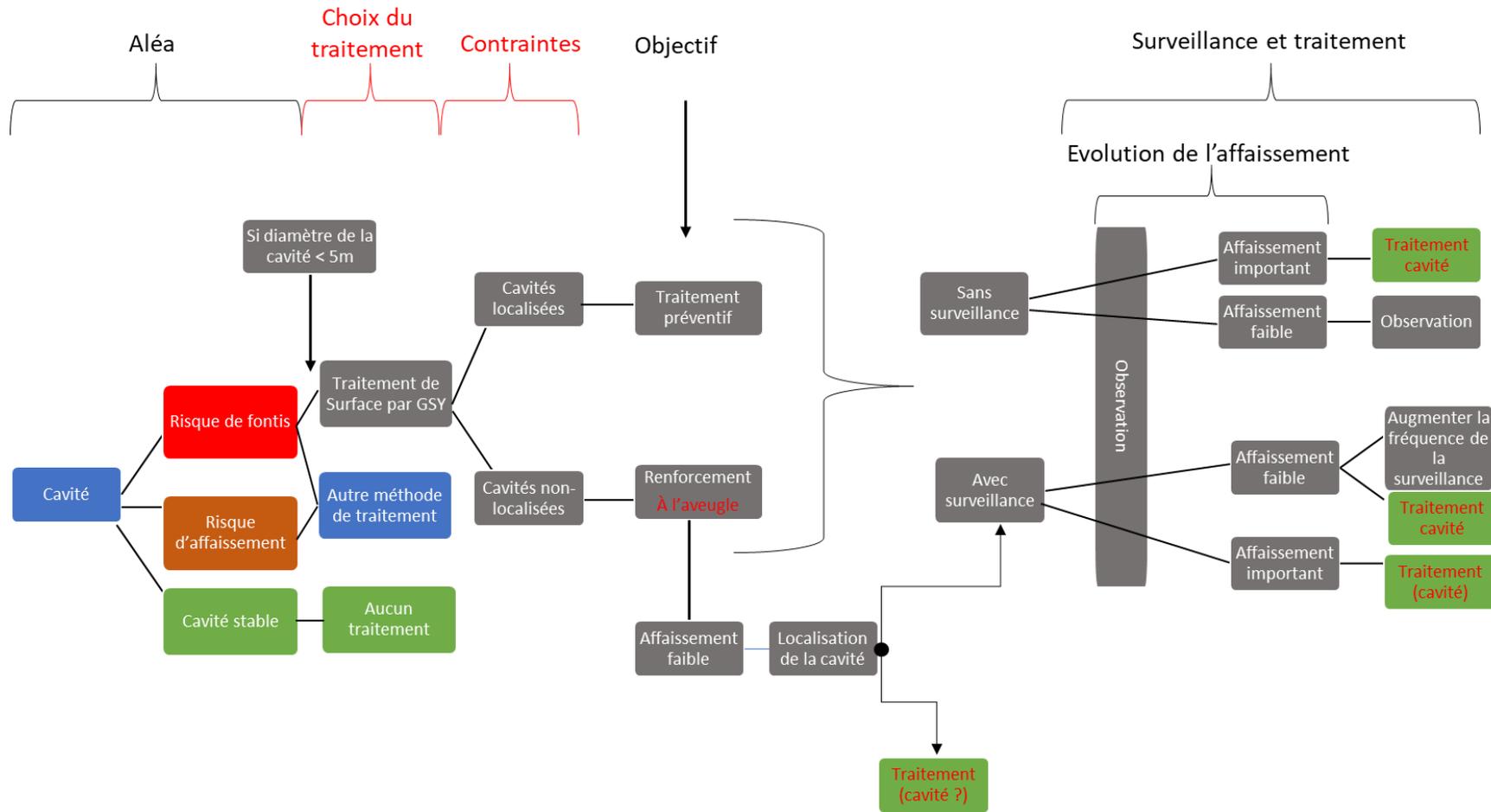


Figure 23 : Démarche pour choisir un mode de traitement adapté – Source : Ineris

Tableau 4 : Utilisation de GSY en fonction des enjeux et du caractère instrumenté ou non du GSY

Enjeux et risque		Type de GSY et objectifs		Traitement	
Type	Exemples	Type	Objectifs	Actions à court-terme	Actions à long-terme
Limités	Forêts, zones peu fréquentées, chemins, etc.	Instrumenté	Suivre les déformations	Renforcement de la surveillance du GSY	Revoir si besoin le renforcement par GSY Comblement partiel ou total de la cavité si besoin
		Non instrumenté	Observations de MVT en surface Vérification de calcul	Mise en place d'un système de surveillance de l'ouvrage	Revoir si besoin le renforcement par GSY Comblement partiel ou total de la cavité si besoin
Élevés	Infrastructures de transport	Instrumenté	Suivre les déformations de GSY	Renforcement de la surveillance du GSY	Revoir si besoin le renforcement par GSY Comblement partiel ou total de la cavité si besoin
		Non instrumenté	Suivre les déformations de la structure ou infrastructure	Mise en place d'un système de surveillance de la structure ou de l'infrastructure Comblement de la cavité si besoin	Comblement de la cavité si besoin

5.5. Principe de fonctionnement d'un sol renforcé par GSY

La Figure 24 présente le principe de fonctionnement d'un sol renforcé par un géosynthétique depuis son installation jusqu'après la formation d'un fontis. Les principales périodes de fonctionnement sont les suivantes (Delmas et al., 2015) :

- **la période (I)** : mise en place du géosynthétique sur le terrain naturel et construction de la structure ; le géosynthétique ne subit que les contraintes et les dégradations éventuelles liées à la mise en œuvre ;
- **la période (II)** : la cavité n'est pas encore remontée en surface et la structure repose sur la couche de recouvrement ;
- **la période (III)** correspond à la phase d'ouverture de la cavité au niveau du géosynthétique jusqu'à atteindre la dimension nominale ; cette phase peut être brutale, mais aussi s'étendre sur une période plus ou moins longue au cours de laquelle les éboulements latéraux des parois de la cavité se produisent ; le géosynthétique se met en tension au-dessus de la cavité et latéralement dans les zones d'ancrage ; qu'en raison des propriétés de foisonnement du sol de remblai, le tassement de la structure en surface n'apparaît que lorsque le diamètre de la cavité a atteint une certaine ampleur, auparavant la cavité n'est pas détectable en surface ;
- **enfin au début de la période (IV)**, la cavité a atteint sa géométrie définitive jusqu'à la fin de la durée de service de l'infrastructure ; celle-ci peut correspondre soit à la durée de vie prévue pour l'infrastructure (par exemple 100 ans) soit à la durée nécessaire au confortement et à la réparation de l'infrastructure une fois la cavité remontée en surface (en général quelques mois, au maximum quelques années) ; sous l'effet du chargement de la structure et du trafic, le géotextile est maintenu en tension ; il est alors soumis au fluage en plus des actions liées à l'environnement chimique du sol ; il s'en suit une déformation du géotextile qui entraîne une augmentation de sa flèche et donc du tassement en surface de la structure.

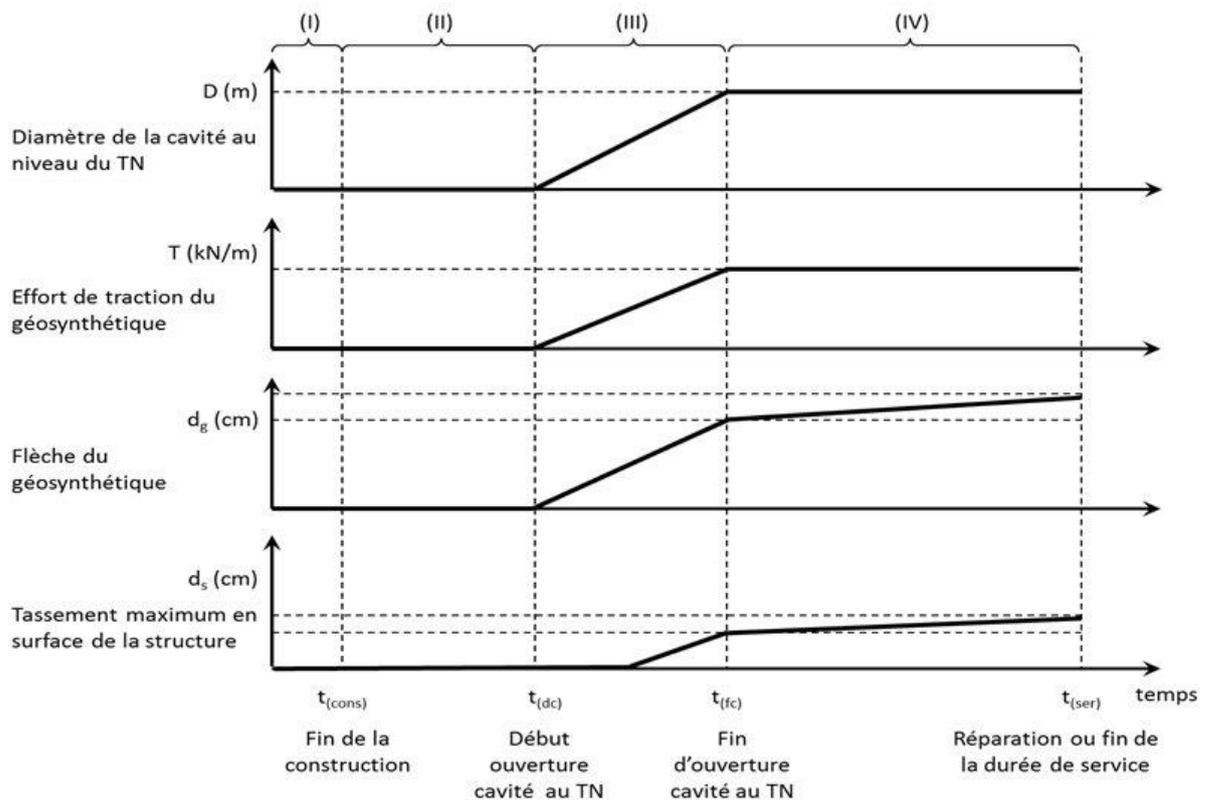


Figure 24 : Principe de fonctionnement d'un sol renforcé par géosynthétique, avant et après la remontée de la cavité - Source : Delmas et al. 2015

Lorsque l'effondrement se trouve en contact avec le géosynthétique, il commence à se mettre en tension au-dessus de la cavité et latéralement dans les zones d'ancrage. Le tassement de la structure en surface n'apparaît que lorsque le diamètre de l'effondrement atteint une certaine ampleur, auparavant la cavité n'est pas détectable en surface. Lorsque la cavité a atteint sa géométrie définitive et sous l'effet du chargement de la structure et du trafic, le géosynthétique est maintenu en tension et soumis à une déformation qui entraîne une augmentation de sa flèche et donc du tassement en surface de la structure.

5.6. Mécanismes de base du renforcement

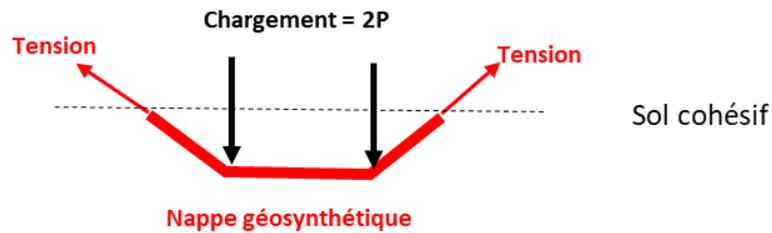
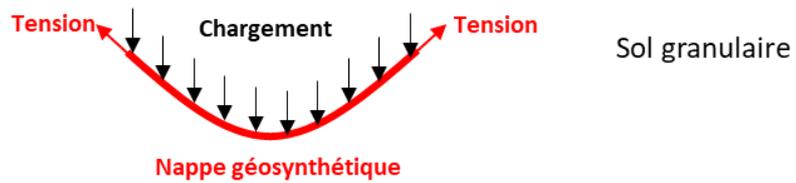
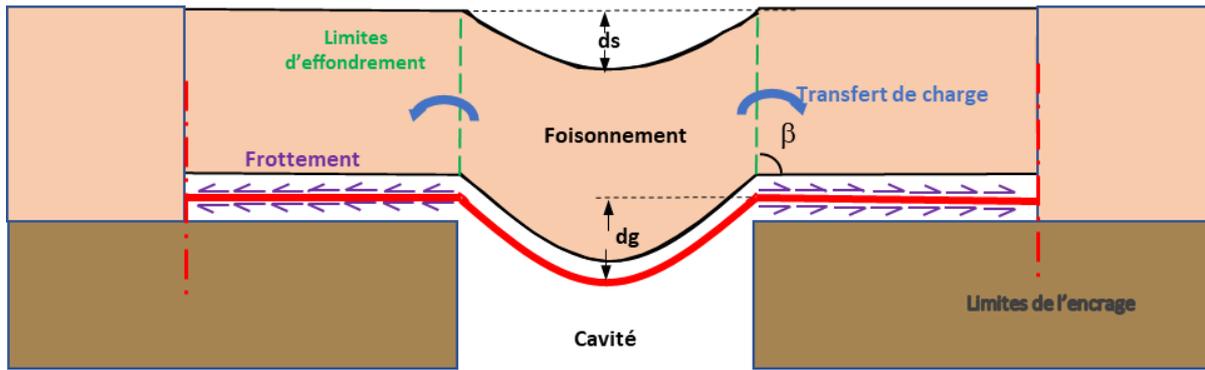
La Figure 25 illustre les principes de base du renforcement par géosynthétique sur cavité qui permettent sa mise en tension après la formation d'une cavité sous-jacente et La Figure 26 la mise en tension de géosynthétique suite à sa mise en charge par le remblai au-dessus de la cavité.

Lorsque la cavité remonte jusqu'à la base du géosynthétique (correspondant aux périodes II et III de la Figure 24, le géosynthétique empêche l'effondrement du sol et des structures et infrastructures dans la cavité. Sous l'effet de charges (poids du remblai, de la chaussée, voire charges liées au trafic), le géosynthétique va se déformer comme une membrane au-dessus de la cavité (Figure 25). L'effet membrane correspond au mécanisme de déformation de la nappe qui s'incurve pour équilibrer les efforts qu'elle supporte au-dessus du vide grâce à sa mise en tension.

Deux comportements sont observés en fonction de la nature du sol au-dessus du géosynthétique : celui d'un sol granulaire où la charge est répartie plus ou moins uniformément sur le géosynthétique et celui d'un sol cohésif où la charge est plutôt concentrée et localisée (2P) suite à l'effondrement de blocs de sol sur la nappe géosynthétique.

Pour les sols granulaires, la zone de sol effondrée sur la nappe est proche d'un cylindrique, l'angle β varie entre 85° et 95° selon la nature du remblai. Il est généralement pris égal à 90° dans les méthodes du dimensionnement. Au cours de ce phénomène d'affaissement contenu au-dessus de la cavité, le sol subjacent va se déformer entraînant un tassement de la structure en surface (d_s). Le remblai foisonne, le tassement en surface (d_s) est égal ou inférieur à la déflexion de géosynthétique (d_g). Dans le cas d'un sol cohésif, la rupture du sol correspond à des blocs dont la forme et les dimensions dépendent de la nature du sol, de l'épaisseur du remblai et du mode de chargement.

Deux méthodes de dimensionnement sont disponibles, celle adaptée pour un sol granulaire basée sur les résultats de projet RAFAEL et celle adaptée pour un sol cohésif ou traité basée sur les travaux du projet REGIC.



d_g : déflexion du géosynthétique ; d_s : tassement en surface ; β : angle de la limite de l'effondrement.

$2P$: deux forces verticales linéiques agissant sur la bande centrale du géosynthétique

Figure 25 : Schéma de principe du renforcement par géosynthétique d'une cavité et de l'effet membrane – Source : Hassoun et al. 2018 modifié

Les efforts de traction nécessaires à la stabilité du géosynthétique en membrane sont équilibrés grâce à une mobilisation progressive des ancrages de part et d'autre de la cavité (Figure 25). Le frottement sol-géosynthétique est alors décisif pour assurer le bon fonctionnement du renforcement, dans la mesure où ce sont les déplacements relatifs des sols de recouvrement et du remblai qui permettent la mobilisation des efforts tangentiels et qui entraînent finalement sa mise en tension et assurent son ancrage.

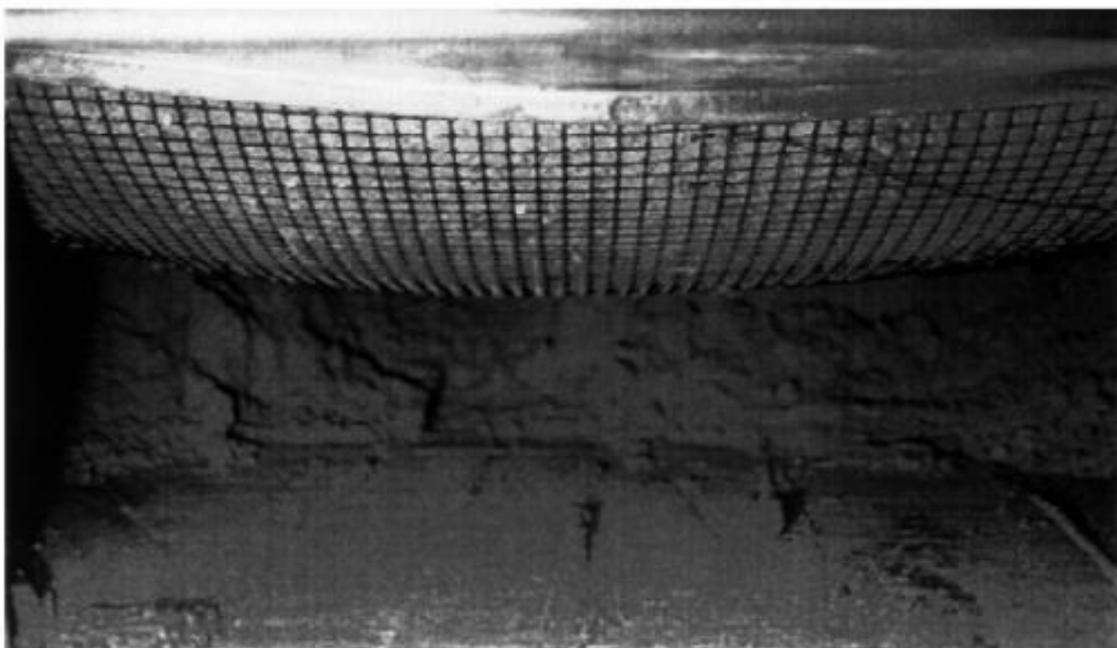


Figure 26 : Mise en tension du géosynthétique après l'effondrement du sol au-dessus de la cavité - Source : Bridle and Jenner, 1997

6. Principe des méthodes de dimensionnement du géosynthétique

En France, les méthodes de dimensionnement d'un renforcement à l'aide d'un géosynthétique sont définies par rapport à la norme NF EN 1990, en particulier en termes de combinaisons d'actions (AC), de classes de sécurité (SC), et de cas de chargement (LC). Le renforcement doit être sélectionné pour s'assurer que l'aptitude au service est maintenue et que l'état limite ultime ne se produit pas. Ainsi, la présence du renforcement doit remplir les critères d'états limites de service (ELS)⁴ et d'états limites de rupture ou ultime (ELU)⁵ de la structure. La vérification aux états limites de service vise à s'assurer que le tassement en surface reste admissible après l'ouverture de la cavité et la mise en tension de géosynthétique.

La norme XP G38065 dédiée à la conception et au dimensionnement du renforcement de la base de remblai (sol granulaire) sur zones à risques d'effondrements par géosynthétique prenant en compte les développements récents dans ce domaine, vient d'être adoptée (Nancey et Delmas, 2019). Le dimensionnement d'un géosynthétique de renforcement sur cavités utilise l'approche des états limites ultime et de service telle que définie dans les Eurocodes (NF EN1997-1).

Les méthodes proposées pour le dimensionnement d'un géosynthétique sont issues de celles développées pour un sol granulaire lors du programme de recherche RAFAEL (Gourc et al., 1999) et améliorées par (Villard et Briançon, 2008), et des travaux menés dans le cadre du projet de recherche GEO-INNOV (Huckert et al., 2016) pour un sol cohésif. Des améliorations ont été apportées à ces deux méthodes grâce au projet REGIC (Hassoun, 2018).

Le renforcement par le géosynthétique doit être sélectionné pour s'assurer que l'aptitude au service des ouvrages en surface est maintenue et que l'état limite ultime ne se produit pas.

6.1. Démarche de conception d'une solution de renforcement par géosynthétique avec détection/auscultation

La démarche proposée pour la conception d'une solution de renforcement par géosynthétique avec détection/auscultation sur les zones à risque de cavités naturelles ou anthropiques est présentée dans la Figure 23. Elle peut se résumer par les étapes suivantes :

⁴ Les états-limites ultimes correspondent à la limite de résistance mécanique au-delà de laquelle il y a ruine de l'ouvrage.

⁵ Etats-limites de service correspondent à des critères dont le non-respect ne permet pas à l'élément d'être exploité dans des conditions satisfaisantes ou compromet sa durabilité.

1. Évaluation et caractérisation du type d’effondrement potentiel :

- risque d’affaissement, de fontis, cavité stable ;
- taille et forme de l’affaissement ou du fontis en cas de remontée ;
- localisation de la cavité connue ou non.

2. Choix de l’objectif de renforcement de l’infrastructure par géosynthétique :

- « temporaire » après remontée de la cavité en attendant le traitement définitif (court terme) ;
- « définitif » (long terme), en général pour une durée de vie de 100 ans après l’installation du géosynthétique.

3. Définition de l’affaissement maximum admissible en surface permettant de maintenir l’exploitation de l’infrastructure ;

4. Définition et dimensionnement du géosynthétique instrumenté :

- pour répondre aux exigences de stabilité aux ELU et ELS de l’infrastructure : stabilité mécanique, affaissement maximum admissible en surface ;
- pour répondre aux exigences de l’instrumentation par fibres optiques (type et espacement des fibres, éventuellement choix bi-raideur, calepinage, connexions) ;

5. Conception du système de surveillance (détection/acquisition) adapté aux exigences de l’infrastructure, au type d’effondrement et au géosynthétique choisi.

Le point 1 est un préalable aux points suivants, les points 1, 2 à 3 sont de la responsabilité du Maître d’Œuvre (d’Ouvrage) et ils doivent faire l’objet d’une étude géotechnique appropriée, selon la norme NFP 94500 et doivent être finalisés avant que soient abordés les points 4 et 5.

6.2. Mécanisme de la remontée de la cavité vers la surface

La cavité existe dans le sous-sol, elle peut devenir instable et elle progresse jusqu’à entrer en contact avec le GSY. La remontée de fontis vers la surface dépend de la forme géométrique de la cavité et de la nature des terrains de recouvrement au-dessus et en dessous du géosynthétique. On peut distinguer deux types de terrains de recouvrement (Figure 27). Le premier type (a) correspond à des terrains résistants et fracturés, la forme de la cloche est plutôt parabolique, avec un diamètre (D) en contact avec le géosynthétique inférieur à celui de la cavité (D_{cav}). Le deuxième type est celui des terrains meubles (Figure 27b) avec faible cohésion, la forme de la cloche est généralement cylindrique. Le diamètre de la cavité (D_{cav}) est généralement égal à son diamètre à la base du géosynthétique (D). La forme de la rupture peut être modifiée et dissymétrique en fonction de la pente des terrains, de la présence de discontinuités importantes et des charges en surface appliquées sur une partie de la surface de la cavité. Les données géométriques et géologiques doivent être prises en compte pour évaluer la géométrie de la remontée de la cloche de fontis. Le diamètre de fontis en surface (D_s) est généralement égal ou légèrement supérieur au diamètre de la cavité (D) en contact avec le géosynthétique. Il est souvent pris égal au diamètre de la cavité (D).

Il faut rappeler que les méthodes de dimensionnement actuelles considèrent que la cavité se trouve dans une couche horizontale et que la remontée de fontis se développe à la verticale de la cavité. Pour d'autres configurations, il est nécessaire de réaliser une étude spécifique pour tenir compte des particularités de chaque configuration.

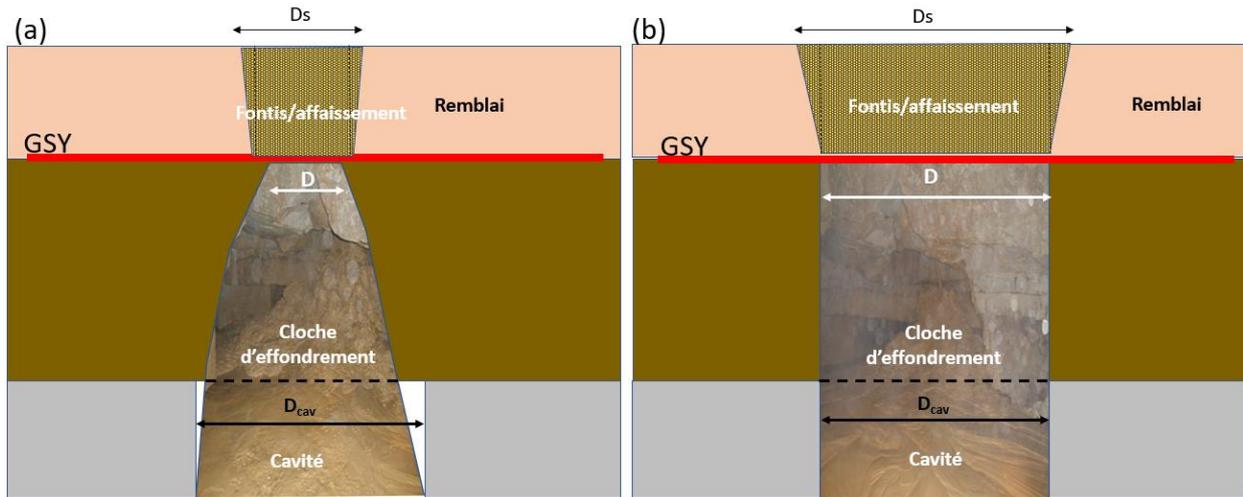
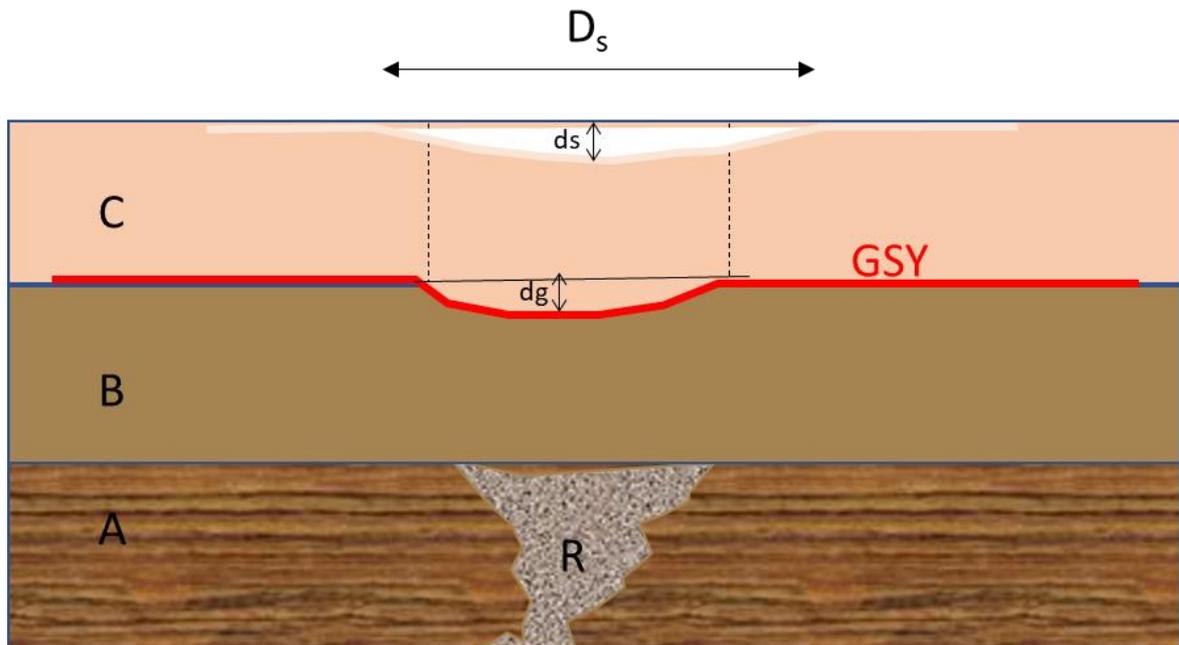


Figure 27 : Types de remontées de fontis (cloche d'effondrement) et formation de cratère en surface en fonction de la nature du terrain de recouvrement (a : résistant et fracturé, b : meuble) – Source : Ineris

Pour le cas des cavités naturelles (cavités dans le gypse ou karstique), il est souvent difficile de connaître avec précision la localisation et les dimensions de cavités par rapport à la structure ou infrastructure à protéger en surface. Dans ce cas, il est nécessaire de faire appel aux investigations géologiques et géotechniques de la zone concernée (guide dissolution naturelle du gypse, Ineris, 2017). La Figure 28 correspond typiquement au cas d'un réseau karstique. La remontée de la cheminée karstique se développe dans le terrain karstique jusqu'au sol de surface ou jusqu'au remblai.



A : terrains karstiques
B : recouvrement

C : terrain ou remblai
R : remontée d'une cheminée karstique

Figure 28 : Remontées de fontis dans le cas des réseaux karstiques – Source : Ineris

6.3. Paramètres de dimensionnement du renforcement

Les méthodes de dimensionnement analytiques actuelles sont basées sur les observations, les expérimentations (in situ et en laboratoire) et les simulations numériques. Elles utilisent le plus souvent la même procédure d'analyse du comportement du géosynthétique sur cavité. Le dimensionnement est effectué sur la bande centrale de la nappe la plus sollicitée (le géosynthétique est alors considéré comme monodirectionnel). Selon le cas considéré (sol granulaire ou cohésif), il faut estimer au mieux l'intensité et la géométrie de la charge (uniforme, ponctuelle, etc.). Le renforcement par géosynthétique sur cavité peut atteindre la ruine soit :

- par la rupture du géosynthétique,
- soit par la rupture ou le glissement de l'ancrage,

qui interviennent :

- par insuffisance de la résistance à la traction du géosynthétique,
- par insuffisance de la résistance au cisaillement de l'ancrage,
- par une dégradation dû à la présence des blocs anguleux,
- ou encore par un dépassement excessif de la déformation du géosynthétique.

Pour appliquer ces méthodes il convient de déterminer successivement :

- le diamètre de la cavité et le mécanisme de remontée de la cavité vers la surface,
- l'affaissement admissible en surface,
- la charge (q) agissant sur le géosynthétique,
- les tensions (T_{max}) induites et la flèche maximale du géosynthétique (d_g),
- le tassement correspondant en surface (d_s), ce tassement peut être déterminant pour évaluer les caractéristiques du GSY,
- et le type et la longueur d'ancrage nécessaire pour assurer la stabilité de la structure renforcée.

Elles nécessitent des itérations successives sur la raideur du géosynthétique pour respecter le tassement de surface (d_s) souhaité.

La méthode de dimensionnement doit préciser :

- **le diamètre de la cavité et le mécanisme de remontée de la cavité vers la surface,**
- **l'affaissement admissible en surface,**
- **la charge (q) agissant sur le géosynthétique et les tensions (T_{max}) induites et la flèche maximale du géosynthétique (d_g),**
- **et le type et la longueur d'ancrage.**

6.3.1. Affaissement admissible

Un paramètre important du dimensionnement d'un géosynthétique est la valeur de l'affaissement admissible en surface (d_s) en cas d'effondrement d'une cavité. Cette valeur est fixée en fonction des contraintes d'exploitation de l'infrastructure : le tassement maximum admissible est le tassement permettant de maintenir l'exploitation, même réduite, de l'infrastructure. La valeur du tassement calculé doit être inférieure ou égale au tassement admissible. Le

Tableau 5 donne des exemples d'ordre de grandeur du rapport d_s/D_s de l'affaissement maximal (d_s) en fonction du diamètre de la cuvette d'affaissement D_s . L'affaissement en surface est calculé en fonction de l'épaisseur et du coefficient de foisonnement du sol au-dessus du géosynthétique ainsi que de la flèche maximale du géosynthétique.

Tableau 5 : Déplacement admissible $d_{s,adm}$ en fonction de la nature du projet – Source : Norme –XP G38065 (D_s est diamètre de la cavité)

Nature de projet	Exemples de valeurs de d_s/D_s .	d_s (cm) pour $D_s = 5$ m
Voies ferrées	0 %	0
Autoroutes (vitesses élevées)	$1,0\% \leq d_s/D_s \leq 1,7\%$	5 à 8,5
Routes secondaires (vitesses faibles)	$1,7\% \leq d_s/D_s \leq 2,5\%$	8,5 à 12,5
Autres routes urbaines, parking, etc.	$2,5\% \leq d_s/D_s \leq 7\%$	12,5 à 35
Parcs et zones piétonnes	$d_s/D_s \leq 10,0\%$	< 50

Le Tableau 6 donne des exemples d'ordre de grandeur du tassement admissible et tassement différentiel admissible, à titre indicatif, pour différente infrastructure. Le tassement à prendre en compte est le déplacement $d_{s, adm}$ au centre de la cuvette de tassement (Tableau 5).

Tableau 6 : Tassement et tassement différentiel admissible pour différents types de constructions d'après la norme NF P94-261

Nature de bâtiment	Tassement admissible (mm)	Tassement différentiel admissible
Pour la plupart des structures (ELS)	50	1/500
Pour un cadre ouvert (ELS)	50	1/300 à 1/2000
Pour la plupart des structures (ELU)	100	1/150

Il est à noter que la méthode empirique de NCB (National Coal Board) permet d'estimer en premier lieu la valeur de la déformation que risque de subir le géosynthétique. Le tableau de l'annexe A, fournit une première estimation des déformations liées à l'affaissement, en fonction de la profondeur de la cavité et de l'amplitude de l'affaissement du sol en surface.

Les valeurs de la profondeur et de l'affaissement ont été retenues en se basant sur les caractéristiques de cavités susceptibles de s'effondrer.

6.3.2. Charge agissant sur le géosynthétique

L'action du sol de remblai sur le géosynthétique dépend grandement du type de sol de remblai et du mode d'ouverture de la cavité. La charge prise en compte dans le dimensionnement, correspondant aux actions du sol effondré et de la surcharge, agit sur la bande centrale du géosynthétique. Il correspond, selon cette hypothèse, à un dimensionnement en 2D. On distingue deux cas de sol au-dessus du GSY, sol granulaire et sol cohésif :

Pour les sols granulaires (sans cohésion) : au vu des observations sur sites expérimentaux de taille réelle (Gourc et al., 1999 ; Huckert et al., 2013 ; Huckert, 2014) et des méthodes couramment utilisées en France et dans certains pays (Projet RAFAEL (Blivet et al., 2001), EBGEO (2011) et NF P G38065), il est admis de considérer que la zone d'effondrement dans le remblai est approximativement un cylindre vertical ($D_s = D$). Le modèle proposé par Terzaghi (1943) est représentatif du comportement des sols granulaires au-dessus des cavités renforcées, moyennant une prise en compte correcte des poussées latérales. Celui-ci suppose un report d'une partie des charges du massif de sol situé au-dessus de la cavité vers les bords latéraux par des mécanismes de cisaillement de sol ou d'effets voûte. Le modèle de Terzaghi (1943) permet ainsi d'évaluer la contrainte au-dessus du géosynthétique. Ce modèle prend en compte la géométrie de la cavité, l'épaisseur du remblai, l'angle de frottement du sol et le coefficient de poussée du sol. La norme XP G38065 considère, au vu des résultats expérimentaux observés, que la déformée de la nappe est parabolique lors de sa mise en tension, ce qui conduit à considérer une répartition des contraintes verticales sur la nappe uniforme (Figure 25).

Pour les sols cohérents : dans le cas d'un remblai cohésif (argile, limon), correspondant à un sol naturel ou traité (à la chaux ou au ciment⁶), et dont le comportement dépend des teneurs en eau, de l'épaisseur de la couche, de la surcharge en surface. A l'heure actuelle, l'approche analytique proposée par Huckert et al. (2016) permet de proposer un dimensionnement du géosynthétique dans le cas d'un sol cohésif. Ce modèle a été développé par Huckert dans le cadre du projet Geolnov et validé par des essais sur modèle réduit dans le cadre du projet REGIC (Hassoun, 2018). Les sols utilisés dans les projets REGIC et Geolnov sont caractérisés par une cohésion suffisante pour assurer la stabilité du remblai en l'absence d'une charge extérieure. La rupture du sol est obtenue en appliquant une surcharge (q) à la surface du remblai. La géométrie des mécanismes de rupture dépend de la forme de la cavité (2D et 3D). Dans le cas d'une cavité linéaire (tranchée), on suppose que le sol au-dessus du géosynthétique s'effondre en blocs, notamment dans le cas où la surcharge est localisée en surface. Les blocs effondrés sont considérés rigides et indéformables. Le poids des blocs de

⁶ Pour plus d'informations, se référer par exemple au Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques-Centre de Recherches Routières - Recommandations 81/10 - 2009

sol effondré et de la surcharge en surface du géosynthétique sont remplacés par deux forces verticales linéiques ($2P$) définies par mètre de largeur de géosynthétique (Figure 29). Pour une cavité circulaire, des forces ponctuelles équivalentes, agissant sur la bande centrale du géosynthétique au-dessus de la cavité, doivent être déterminées.

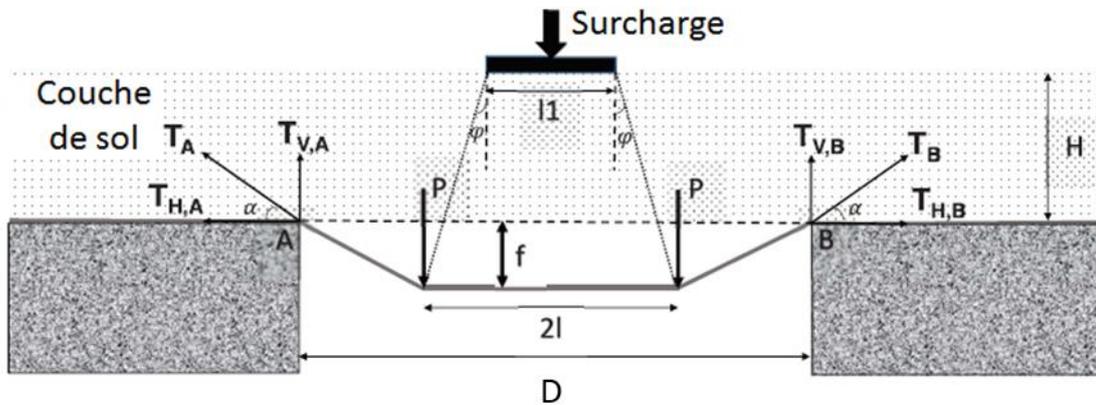


Figure 29 : Équilibre des efforts exercés sur le géosynthétique au droit de la cavité dans le cas d'un sol cohésif – Source : Huckert et al. 2016

Pour pouvoir utiliser le modèle de Huckert, pour un sol cohésif, il est nécessaire de déterminer le poids du(des) bloc(s) effondré(s) sur le géosynthétique. La détermination de la géométrie de ces blocs se base essentiellement sur les résultats des essais in situ effectués par Huckert dans le cadre du projet Geolnov et de ceux effectués en laboratoire par Hassoun (2018) dans le cadre du projet REGIC.

La flèche maximale d_g et la tension maxi T_{max} , sont déterminées à partir d'une loi de comportement du géosynthétique (Figure 17). Le calcul de la flèche maximale du géosynthétique est en relation avec le tassement maximal admissible, l'épaisseur de la couche du sol au-dessus de la nappe de géosynthétique et du foisonnement. La déformation admissible maximale est déterminée sur la base de la forme de la déformée du GSY.

6.3.3. Dimensionnement de l'ancrage et des recouvrements

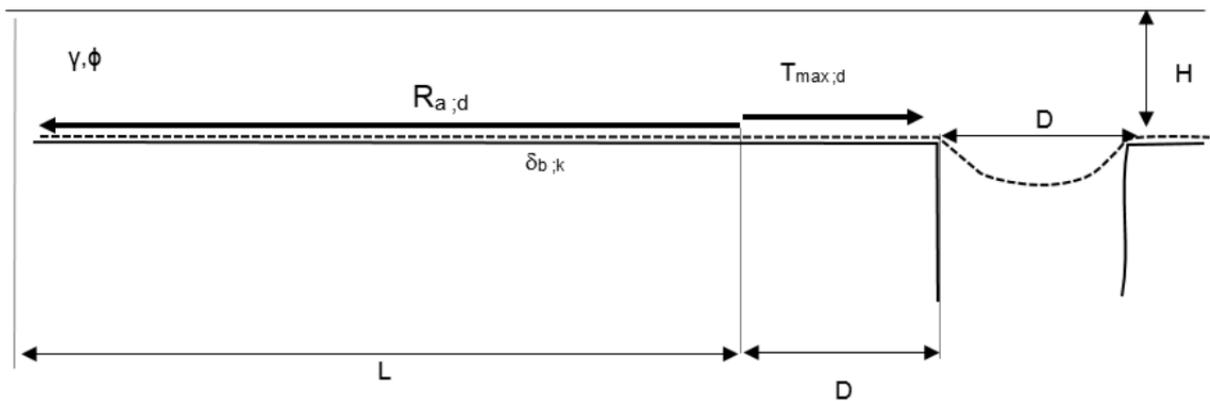
Les efforts de traction nécessaires à la stabilité du géosynthétique en membrane sont équilibrés grâce à une mobilisation progressive des ancrages de part et d'autre de la cavité. Deux principes d'ancrage peuvent être envisagés (Figure 30-a et 30-b) : ancrage à plat ou ancrage en tranchée (présentés dans l'annexe C de la norme XP G38-065). Le choix du type d'ancrage dépend de la nature des interfaces sol-géosynthétique ainsi que de la géométrie du site et des surfaces disponibles. La longueur d'ancrage du géosynthétique est limitée à l'emprise disponible, qui dépend de la géométrie du remblai.

La longueur d'ancrage à chaque extrémité de la nappe (cas renforcement monodirectionnel) ou des nappes croisées devra être à l'extérieur de la zone d'effondrements

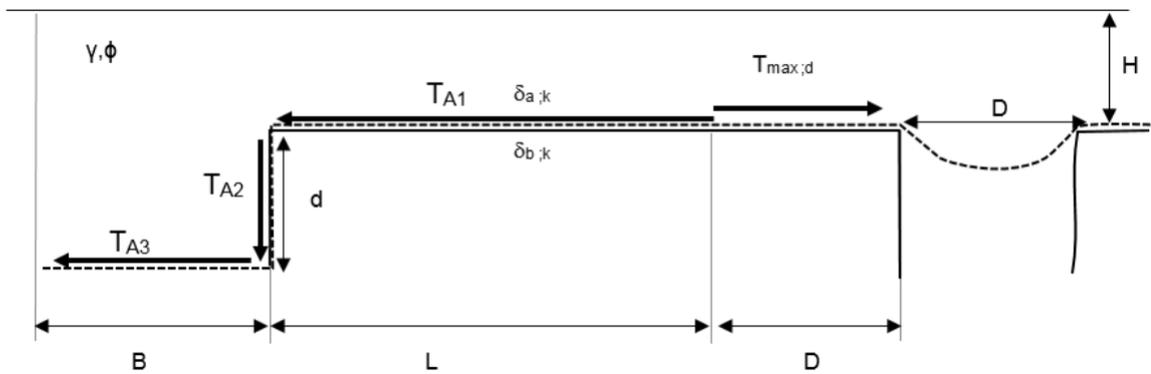
potentiels. Pour cela, le dispositif d’ancrage est disposé à une distance D du bord de l’effondrement potentiel, ce qui permet de distinguer la zone d’effondrements potentiels de la zone d’ancrage périphérique.

Dans le cas où l’emprise disponible ne permet pas de réaliser un ancrage à plat suffisant, il convient d’adopter un dispositif d’ancrage de type tranchée.

La résistance au cisaillement de l’interface peut être mesurée suivant les normes (NF EN ISO 12957-1 et NF EN 13738). Des valeurs par défaut des différents angles de frottement d’interface sont proposées dans la norme XP G38-065.



a) principe de l’ancrage à plat



b) principe de l’ancrage en tranchée

Figure 30 : Principes de l’ancrage à plat ou ancrage en tranchée (présentés dans l’annexe C de la norme XP G38-065).

6.3.3.1. Ancrages à plat

Le calcul de l'effort d'ancrage mobilisable se fait :

- **pour la zone courante**, en considérant le frottement géosynthétique/sol au-dessus du géosynthétique additionné du frottement géosynthétique/sol au-dessous du géosynthétique ;
- **pour les zones de superposition des géosynthétiques**, en considérant le frottement de l'interface sol-géosynthétique le plus défavorable additionné du frottement géosynthétique/géosynthétique. Le recouvrement longitudinal (sens de production du géosynthétique) s'effectue dans la direction de l'effort T_{max} .

6.3.3.2. Ancrages en tranchées

La méthode de calcul proposée dans la norme est basée sur l'hypothèse que les efforts au niveau de l'ancrage sont repris uniquement par frottement sur les parties linéaires sans aucun effet d'angle. En considérant qu'il n'y a pas d'adhérence entre le géosynthétique et les sols étudiés, la force résistante d'ancrage est égale à la somme des trois forces T_{A1} sur le recouvrement horizontal (L), T_{A2} sur la facette verticale de la tranchée (d) et T_{A3} sur le fond de tranchée (B) (Figure 30).

On notera que la méthode Villard et Chareyre (2004) qui permet de prendre en compte l'effet d'angle en haut et en bas de la tranchée permet une approche plus précise de l'effort mobilisable.

6.3.3.3. Recouvrements longitudinal et latéral des nappes

Le recouvrement longitudinal s'effectue dans le sens des efforts. Pour sa justification, on se reportera au paragraphe 6.3.3.1.

Le recouvrement latéral (sens travers de la production du géosynthétique) s'effectue perpendiculairement aux efforts principaux. Pour assurer la continuité de la surface renforcée, en évitant l'ouverture entre deux nappes disposées côte à côte au niveau de la cavité, la largeur de recouvrement latéral doit être calculée en fonction de la valeur du déplacement vertical de la nappe au centre de la cavité (recouvrement minimum recommandé de 50 cm).

Les méthodes existantes permettent de dimensionner le géosynthétique et la zone d'ancrage pour une cavité isolée. Pour des cavités multiples (ex. chambres et piliers, catiches, réseaux des cavités karstiques proches, etc.), il est nécessaire de tenir compte de la distance entre les cavités et de la comparer à la longueur d'ancrage. Dans le cas où la distance entre deux cavités voisines est supérieure à la longueur d'ancrage, les cavités sont traitées en tant que cavités isolées. Dans les autres cas, l'ancrage du géosynthétique se fait au-delà de la zone de cavités.

On notera aussi que le choix du type d'ancrage peut aussi souvent être orienté par la disposition du projet, les emprises et la position de la cavité. Le choix de la solution d'ancrage en tranchée permet souvent de résoudre le problème, quitte à remplir la tranchée par

exemple par un matériau cohérent type grave traitée comme au chantier Trois Luc à La Valentine (Tableau 3).

Note : il n'est pas conseillé de réaliser des coutures entre les géosynthétiques car la résistance en traction des coutures est en général bien inférieure à la résistance nominale du géosynthétique ; à noter le contreexemple du site Trois Lucs à la Valentine pour lequel la liaison réalisée entre les grilles permet de mobiliser 100% de la résistance nominale.

7. Mise en œuvre

Une fois le dimensionnement finalisé, et avant de réaliser la mise en œuvre et l'installation du géosynthétique, il est impératif de réaliser un plan de calepinage détaillé qui précise :

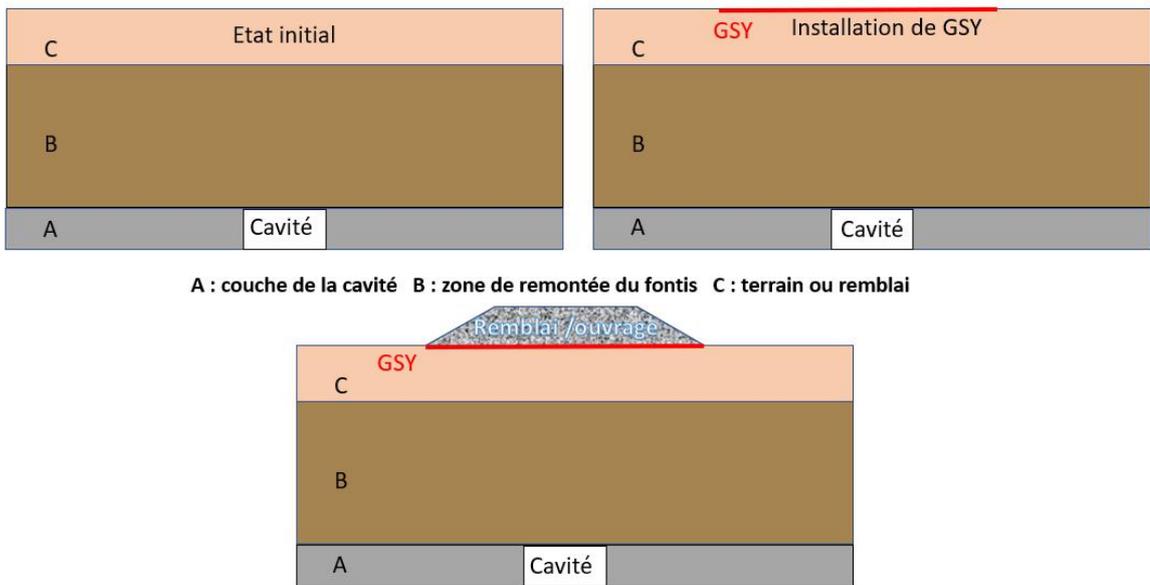
- les longueurs et les largeurs des lés de géosynthétiques,
- le sens de pose par rapport à l'ouvrage et aux cavités (si elles sont connues),
- les différents recouvrements longitudinaux et latéraux,
- les modalités de pose (ancrage, déversement des couches de remblai, compactage, couches de protection éventuellement)
- la mise en place éventuelle de système d'instrumentation, etc.

Celui-ci est en général finalisé avec l'entreprise en fonction du type de géosynthétique retenu pour le projet.

La mise en œuvre et l'installation d'un géosynthétique doivent être réalisées selon les normes de sécurité et les règles en vigueur (recommandations de mise en œuvre CFG ou/et norme NF G 38060). On présente ci-après très sommairement son exécution qui peut présenter deux configurations :

- Mise en place sur le sol naturel et couvert par un remblai (Figure 31).
- Excavation du sol, mise en place du géosynthétique et remblaiement avec le sol initial (Figure 32).

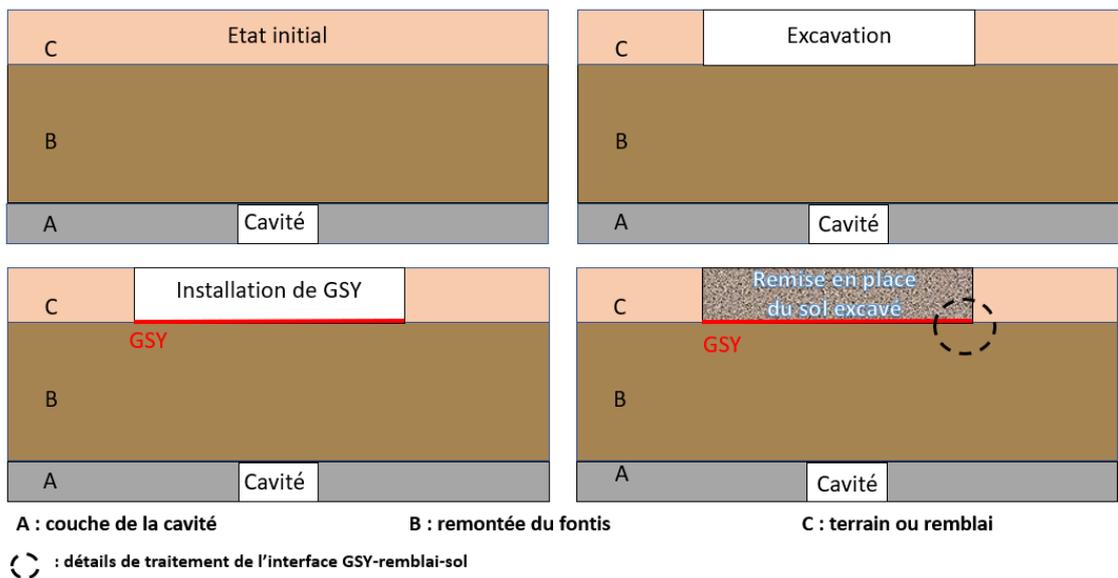
Dans le cas où le géosynthétique est installé sous un remblai ou une structure ou infrastructure, le renforcement est mis directement sur la surface du sol (après un éventuel décapage de la couche de terre végétale) avant la mise en place et le compactage du remblai (Figure 31).



A : couche de la cavité B : zone de remontée du fontis C : terrain ou remblai

Figure 31 : Étapes d'installation d'un géosynthétique sans excaver le sol initial –
Source : Ineris

La deuxième configuration correspondant à une installation sous une couche de sol en place (Figure 32), on effectue un décaissement (excavation) du sol jusqu'à la profondeur souhaitée ou au niveau des terrains résistants, tête de catiche, etc. Le géosynthétique est mis en place, suivi par le remblaiement et le compactage progressif et peu énergétique de sol.



A : couche de la cavité B : remontée du fontis C : terrain ou remblai

⊙ : détails de traitement de l'interface GSY-remblai-sol

Figure 32 : Étapes d'installation d'un géosynthétique sous une infrastructure ou un remblai – Source : Ineris

Il est également recommandé d'ajouter une couche de sol frottant aux interfaces sol-géosynthétique de part et d'autre au droit des zones d'ancrage afin d'augmenter la résistance au cisaillement et réduire le glissement du géosynthétique lors de sa mise en tension (Figure 33).



Figure 33 : Ajout d'un sol frottant pour augmenter la résistance des interfaces GSY-remblai et GSY – recouvrement

Dans le cas de l'installation du géosynthétique instrumenté, avant tout remblaiement, il est important de porter attention aux points suivants :

- La concordance du sens de pose géosynthétique instrumenté avec les calculs établis pour le renforcement sera impérativement vérifiée. La position des différents capteurs doit être ajustée aux positions de mesure. Les capteurs seront identifiés par des zones colorées sur le géosynthétique et les positions de mesures devront être identifiées sur le chantier.
- Un technicien devra effectuer les connections optiques du géosynthétique avec des rallonges renforcées jusqu'au boîtier de récupération de mesures.
- Les fibres seront protégées par un géotextile non-tissé et du sable fin afin de ne pas être endommagées. (Figure 34).



Figure 34 : Exemple d'installation d'un géosynthétique instrumenté – Source : Afitexinov

Au moment du remblaiement des nappes par les matériaux, il est parfois conseillé de réaliser une pré-tension des nappes manuelle pour limiter au maximum les plis et autres ondulations qui risqueraient d'engendrer des déformations lors de la mise en service de l'ouvrage.

Il faudra bien veiller à ce que les rallonges optiques ne soient pas recouvertes lors du remblai.

Après la mise en place du renforcement, le sol existant ou importé doit être compacté suivant les règles de l'art (NF P11-300, GTR 1992 et 2000). Le compactage est un procédé mécanique permettant d'augmenter la densité en place du sol. Le compactage permet d'assurer le confinement, limiter le glissement à l'interface et les risques de tassements interne de la couche du remblai.

Comme pour toute opération de compactage, une attention particulière doit être apportée à l'évaluation de l'aptitude du sol à être compacté (nature, teneur en eau, ...), à la définition de l'épaisseur de chaque couche, au type de compacteur (taille et mode de compactage), à l'énergie totale de compactage appliquée ainsi qu'à la procédure utilisée (nombre de passes, vitesse, ...).

Dans le contexte spécifique des zones à risque d'effondrement de cavité, des couches de faible épaisseur et des engins de compactage de petites dimensions et générant des vibrations d'ampleur très réduite sont recommandés afin de ne pas dégrader les terrains de recouvrement au-dessus de la cavité. Une étude spécifique doit donc être réalisée afin de dimensionner le compactage du sol au-dessus de la zone de cavité.

Pendant la phase de compactage, il peut s'avérer nécessaire de vérifier l'état de la stabilité de la cavité à partir de la cavité elle-même si elle est accessible ou à partir de la surface si elle n'est pas accessible. Cette vérification peut être visuelle ou instrumentale (Figure 35), le type

d'instrumentation devant être adapté au type de compactage mis en œuvre. Les critères ou seuils d'alerte doivent être précisés ainsi que la conduite à tenir en cas de dépassement.

A la réception des travaux, une vérification de la qualité de compactage est obligatoire ou recommandée, suivant l'utilisation ultérieure de la couche de sol remblayée.



Figure 35 : Exemple de remblaiement – Source : Afitexinov

8. Surveillance des cavités à l'aide d'un géosynthétique instrumenté

8.1. Introduction

La surveillance des risques associés aux mouvements de terrain induits par l'effondrement des cavités souterraines est l'une des solutions permettant d'assurer la sécurité des personnes et des biens situés à proximité en l'absence d'un traitement définitif comme le comblement intégral (guide surveillance des cavités souterraines, Ineris, 2016b). La surveillance est dans ce cas une solution palliative, dans l'attente de travaux de mise en sécurité ou d'autres moyens de remédiation. Elle peut toutefois se prolonger dans le temps lorsqu'elle est jugée avantageuse, au regard d'autres solutions peu envisageables techniquement ou économiquement.

La surveillance repose sur des données qualitatives ou quantitatives acquises pendant une période de temps suffisante permettant de prévoir et anticiper le comportement de l'ouvrage. Il s'agit dans un premier temps d'identifier la ou les grandeurs physiques qui caractérisent le mieux le mécanisme d'instabilité de la cavité souterraine pouvant mener, au stade ultime, au phénomène redouté. Il convient notamment de s'attacher autant que possible aux signes précurseurs de cette évolution. Ceux-ci peuvent s'exprimer par nombre de paramètres, mesurables mais pas forcément visibles, dont les principaux sont :

- les déplacements ou déformations ;
- les variations de pression et de contrainte ;
- les vibrations induites par une rupture ou un mouvement rocheux.

La surveillance peut concerner la cavité elle-même, son toit ou les mouvements en surface. La mobilisation et l'équipement d'une cavité dépend essentiellement des enjeux en surface. Une cavité sur une autoroute nécessite sans doute plus de vigilance car une cavité dans un champ.

Parmi les méthodes est l'inspection visuelle périodique d'un site est la surveillance la plus déployée pour des cas peu complexes et localisés, lorsque les cavités sont localisées et elles sont accessibles, avec des conditions de sécurité acceptables. Cette inspection visuelle est à privilégier dans ces conditions.

La surveillance géotechnique a pour but d'évaluer, dans les secteurs clés des cavités définis par l'étude géotechnique, l'amplitude et la vitesse des mouvements engendrés par la dégradation et d'apprécier leur évolution, afin d'anticiper la rupture. Il existe de nombreux dispositifs pour mesurer les déplacements verticaux, horizontaux, voire angulaires, des terrains (convergence-mètre, extensomètre, fissuromètre, etc.).

La surveillance microsismique, à l'aide de géophones ou accéléromètres, de terrain au voisinage de la cavité est employée dans le cas des cavités non accessible. La méthode se base sur l'analyse de nombre d'événements, leur énergie, leur localisation, etc. Cette surveillance permettrait de disposer des signes précurseurs très utile à la gestion des zones à risque.

La surveillance des cavités souterraines présentant exposés aux mouvements de terrain a pour objectif d'assurer la sécurité des personnes et des biens situés à proximité en l'absence d'un traitement définitif comme le comblement intégral.

8.2. Surveillance à l'aide de géosynthétique instrumenté

Le géosynthétique « bi-raideur inversé » permet de faciliter la détection de tassements de faibles amplitudes même pour des infrastructures ou des structures nécessitant des raideurs très élevées (par exemple pour des infrastructures ou des structures à tassement toléré en surface faible, voire nul, sur des cavités de grand diamètre).

L'intégration de fibres optiques permet de suivre l'évolution de la déformation du géosynthétique et de la température dans l'environnement immédiat de la cavité instable. La densité et la localisation des fibres optiques et des capteurs dépendent de la localisation de la cavité et des enjeux en surface. La mesure par fibre optique permet également de fournir un indicateur, grâce à la corrélation entre la température et l'humidité du sol, de l'état hydrique du recouvrement, notamment en cas de fuite de canalisation ou de la remontée de la nappe phréatique.

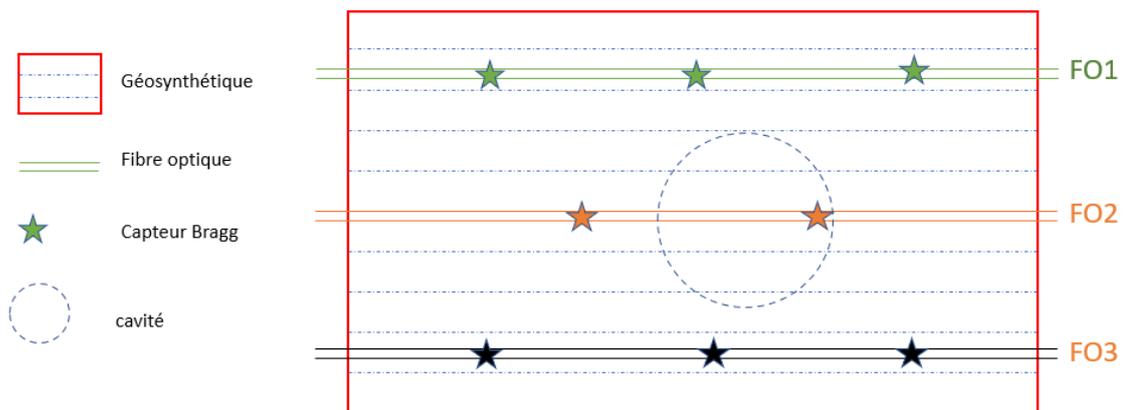


Figure 36 : Géosynthétique de renforcement équipé par système de mesures par fibre optique et capteurs Bragg - Source : Ineris.

Trois technologies de mesure par fibres optiques peuvent être utilisées pour les mesures de déformation et température au-dessus des cavités :

- Une technologie utilisant un système de mesures ponctuelles multiples et distribuées le long de la fibre, elles créent des réseaux de Bragg. Le principe du fonctionnement est décrit en Figure 37.
- Une technologie utilisant un système de mesures réparties le long de la fibre, appelée Brillouin.

- La technologie de type Rayleigh, bien que moins utilisée dans les ouvrages réels, mais dont les caractéristiques en font un outil qui peut être utilisé pour la détection, l'auscultation et la surveillance d'infrastructures où la localisation de la cavité est connue ou d'infrastructures « ponctuelles » (de dimensions réduites). Le principe du fonctionnement est décrit en Figure 38.

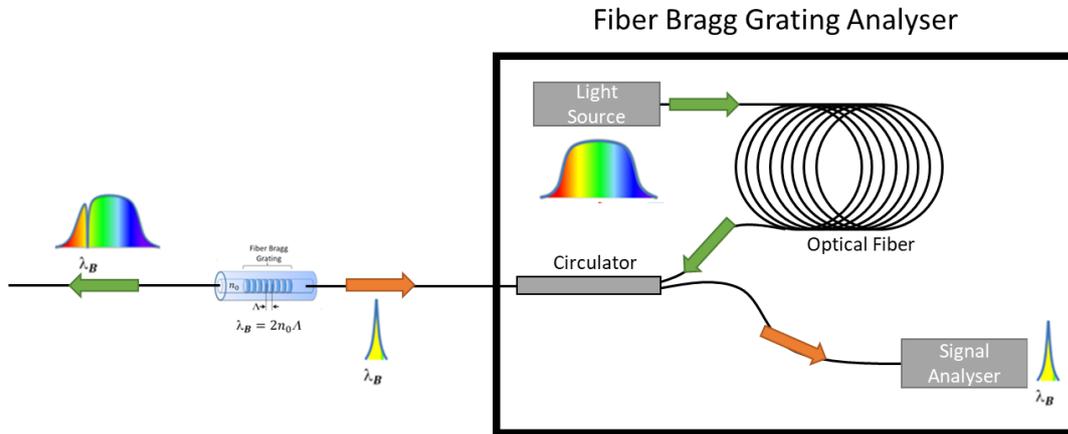


Figure 37 : Principe de mesure par fibre optique type Bragg - Source : Afitexinov

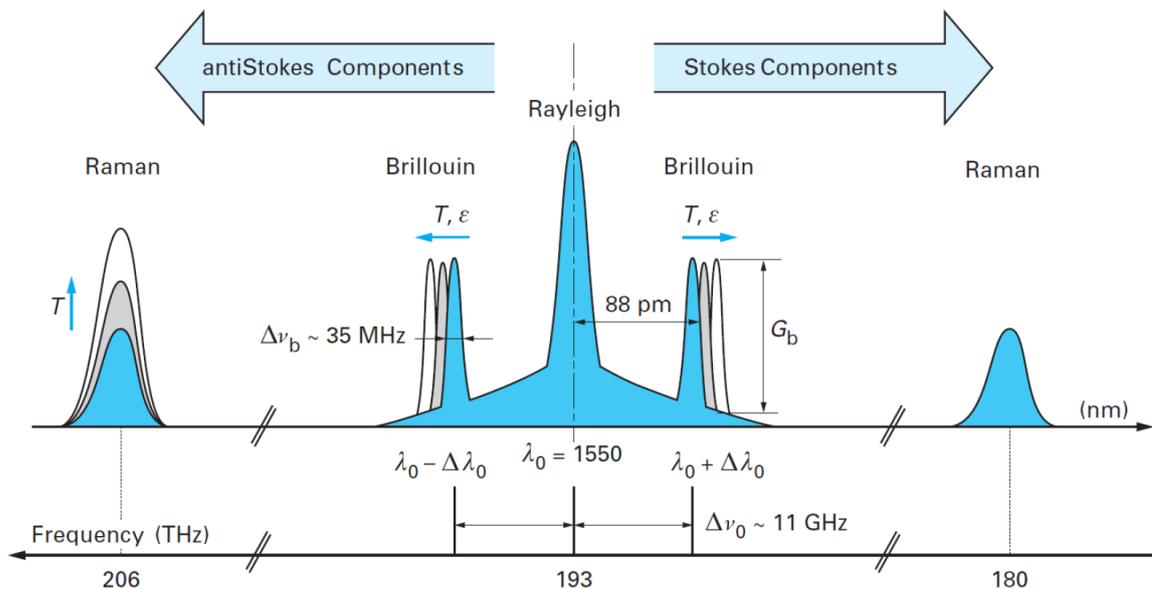


Figure 38 : Variation des spectres de diffusion des ondes diffusées pour les méthodes dites Raman, Brillouin et Rayleigh avec une source de 1,55mm de longueur d'onde (Ferdinand, 2014).

Dans ce cas, les capteurs de réseau de Bragg sont disposés principalement au-dessus de la cavité (Figure 39). La source lumineuse envoie un signal à l'intérieur de la fibre. Chaque capteur, répondant à une longueur d'onde unique, renvoie celle-ci dans le sens inverse, jusqu'à l'analyseur. Cet analyseur procède ensuite à la conversion de la longueur d'onde en

μdéformations. Lors d'un évènement (effondrement), le capteur va subir une déformation (traction ou compression), qui va modifier la longueur d'onde. Ce changement va être analysé et converti en μdéformation positive dans le cas d'une traction, négative pour une compression. Les réseaux de Bragg sont particulièrement adaptés pour l'instrumentation d'une zone limitée correspondant à une cavité localisée ou des enjeux ponctuels de dimensions réduites.

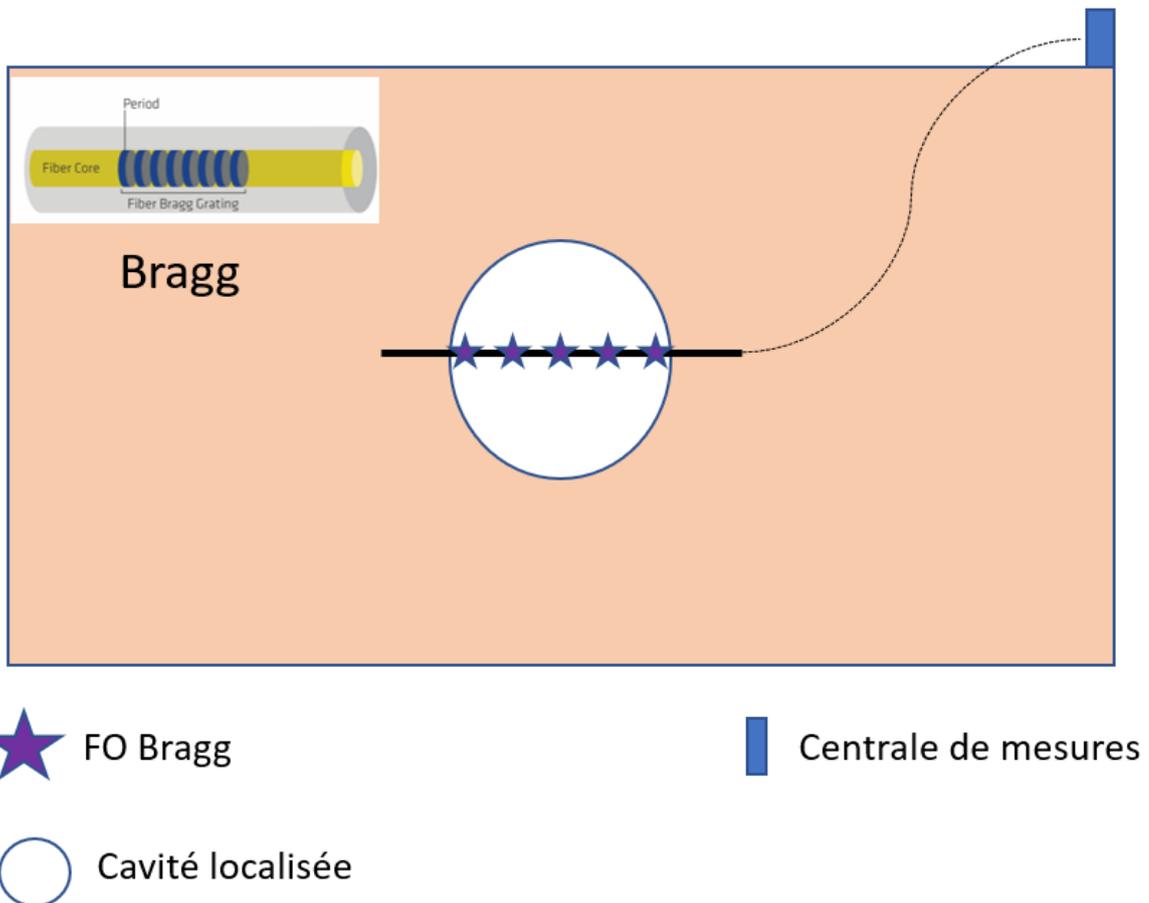


Figure 39 : Schéma de principe (vue en plan) pour la surveillance d'une cavité à l'aide d'un géosynthétique instrumenté par Fibre Optique de type Bragg - Source : Ineris

Le principe de l'analyse Brillouin repose sur le temps de parcours d'une onde laser à travers la fibre. Pour utiliser cette technologie, on doit donc pouvoir avoir accès aux deux extrémités de la fibre, car le temps de parcours de l'onde permet alors de retrouver l'emplacement (à 1m près) de l'évènement.

Les fibres optiques de type Brillouin sont particulièrement adaptées à la détection, l'auscultation et la surveillance de cavités non localisées et/ou connues, pour les infrastructures linéaires de grandes dimensions. Elles peuvent aussi être utilisées lorsqu'il y a plusieurs cavités localisées (Figure 39).

La densité des capteurs ou des lignes de mesures dépend principalement des enjeux en surface (ex. faible densité pour des terrains peu fréquentés et une densité importante pour des infrastructures : routes et voies ferrées) et des dimensions de la cavité ou des cavités. Il est également possible d'adapter la fréquence de mesures en fonction du phénomène redouté et/ou de la sensibilité des infrastructures ou des structures à surveiller.

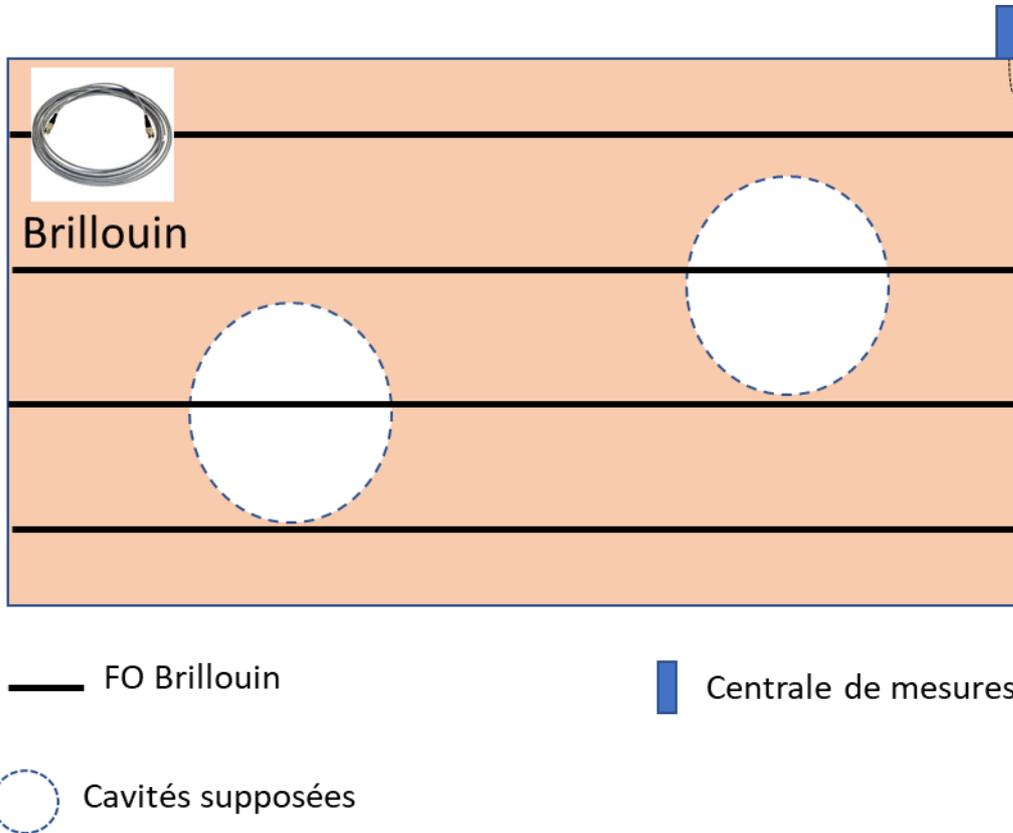


Figure 40 : Schéma de principe (vue en plan) pour la détection et la surveillance de plusieurs cavités (localisées ou non) à l'aide d'un géosynthétique instrumenté par Fibre Optique et des capteurs Brillouin - Source : Ineris

Le Tableau 7 présente les principales caractéristiques de mesures de déformations de géosynthétique en utilisant trois technologies : Bragg, Brillouin et Rayleigh.

Tableau 7 : Caractéristiques principales des méthodes de mesures des déformations par fibre optique (d'après Ferdinand, 2014)

Méthode/déformation	Bragg	Brillouin	Rayleigh
Résolution spatiale (cm)	0,2	5-50	3
Longueur max (km)	10 (ponctuelle)	>30	2
Fréquence de mesure (kHz)	10-1000	0,01-0,5	0,1
Précision ($\pm\mu\text{m}/\text{m}$)	0,1	10	1
Fenêtre (%)	1-4	2	0,1

Le Tableau 8 présente le domaine d'utilisation des mesures de déformation par fibre optique en fonction du nombre et de la localisation des cavités.

Tableau 8 : Caractéristiques principales des méthodes de mesures des déformations par fibre optique (d'après Ferdinand, 2014)

Type de cavité(s)	Bragg	Brillouin	Rayleigh
Isolée et localisée	x		
Isolée et non-localisée		x	x
Plusieurs cavités localisées	x	x	x
Plusieurs cavités non-localisées		x	x

Le géosynthétique « bi-raideur inversé » équipé par des capteurs de fibre optique permet de faciliter la détection de tassements de faibles amplitudes. Il permet également suivre l'évolution de la déformation du géosynthétique et de la température dans l'environnement immédiat de la cavité instable. Les capteurs de type Bragg sont adaptés aux cavités localisées, les capteurs de type Brillouin sont adaptés pour des cavités non-localisées.

9. Synthèse – avantages et limites

9.1. Avantages et limites

Les géosynthétiques peuvent être utilisés en tant que solution de renforcement dans différents contextes de zones à risques d'effondrement localisé de type fontis. Ils possèdent plusieurs avantages, notamment une facilité de mise en œuvre, un faible coût par rapport aux autres méthodes de traitement (e.g. comblement des cavités) et des impacts environnementaux limités, appuyés par une étude de cycle de vie réalisée dans le cadre du projet REGIC, par rapport à d'autres solutions traditionnelles (ex. dalle en béton armé). Ces impacts concernent l'énergie nécessaire pour la fabrication et la mise en place de la méthode de traitement ainsi que son empreinte carbone.

L'utilisation d'un géosynthétique, en tant que système de protection, s'appuie sur sa capacité à résister aux efforts liés au poids et aux charges exercées. Ces efforts sont repris grâce au frottement mobilisé latéralement entre le sol et le géosynthétique. Les déformations et les tassements de surface sont ainsi réduits. S'il est instrumenté, le géosynthétique permet également la détection en zone inconnue la présence des cavités et la surveillance de la remontée d'un fontis grâce aux déformations enregistrées par les capteurs de déformations à l'aide de fibre optique.

Dans un certain nombre de cas, il permet de maintenir un fonctionnement acceptable des enjeux en surface (infrastructures de transport) même après l'ouverture de la cavité, et ce, en attendant le déclenchement des opérations de traitement et de mise en sécurité définitive de la cavité par un comblement par exemple.

En évitant le comblement de la cavité, l'utilisation de géosynthétique permet de préserver les ressources naturelles, notamment en réduisant les quantités de matériaux prélevés dans le milieu naturel (granulats, sable) pour combler les cavités souterraines.

Il permet également une meilleure planification des interventions sur des fontis en cours de développement grâce à la prise en charge du sol de la surface et l'évitement de la formation d'un cratère.

Il existe néanmoins des facteurs limitant sa performance et sa capacité de renforcement. Rappelons que cette technique n'est efficace que sur des effondrements localisés de dimensions limitées d'un diamètre inférieur à 5 m et dans le cas d'un terrain horizontal. Afin de garantir la performance requise de géosynthétique, il est nécessaire de disposer des données et des informations nécessaires au dimensionnement concernant la cavité et le géosynthétique, ainsi les conditions de mise en œuvre et les contraintes associées du site.

Ces facteurs peuvent être associés à la méconnaissance de l'aléa mouvements de terrains – fontis, au changement de conditions d'utilisation de la surface par rapport à l'état initial (lors de la création de la cavité) et après la mise en place de renforcement par géosynthétique qui pourrait modifier la nature des surcharges.

Le Tableau 9 présente les principaux facteurs à prendre en compte dans le dimensionnement et la gestion du renforcement. Il est possible aujourd'hui de tenir compte de ces différents facteurs dans le dimensionnement du géosynthétique et de proposer le produit le plus adapté au type de structure ou d'infrastructure en fonction de contexte local. Le Tableau 9 mentionne les principales normes qui doivent être maîtrisées afin de réaliser un dimensionnement précis et une mise en œuvre garantissant le bon fonctionnement en cas de formation de fontis au-dessus de la cavité.

Les principaux avantages de géosynthétique sont son comportement, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût par rapport aux autres méthodes de traitement et des impacts environnementaux limités. Son utilisation est limitée à des cavités ayant un diamètre inférieur à 5 m. Cette limitation est surmontée par la capacité de géosynthétique instrumentée à détecter la remontée de fontis en temps réel.

Tableau 9 : Facteurs à prendre en compte dans le dimensionnement afin de garantir une performance du renforcement par un géosynthétique

	Facteurs	Commentaires / actions
Cavité	Géométrie	Forme de la remontée de fontis
	Diamètre/largeur	Paramètres à la base de GSY
	Profondeur de la cavité	Pas de fontis pour des cavités > à 50 m de profondeur
	Mécanisme de remontée	Brutal ou progressif
	Remontée de fontis dissymétrique	Étude de dimensionnement spécifique
	Durabilité	En référence à la norme XP G38065
	Fluage	En référence à la norme XP G38065
Renforcement	Chimique	En référence à la norme XP G38065
	Ancrage / limite de propriétés	Vérification de sol dans la zone d’ancrage, demander l’autorisation en cas de dépassement de limite de propriété ou adopter la solution de tranchée S’assurer de l’orientation de GSY en fonction de remontée de fontis
	Positionnement Orientation	
	Pendage	Étude de dimensionnement spécifique
	Nature de sol	Utiliser la méthode de dimensionnement appropriée

Sol/structure/ infrastructure	Gel – dégel	A prendre en compte en fonction de la profondeur adoptée pour les fondations, cf. carte réglementaire
	Variation de teneur en eau du sol	Prévoir un système de drainage associé au renforcement par GSY pour assurer un frottement suffisant entre le sol et le GSY, le drainage permet également à réduire l'occurrence de l'aléa.
	Charge exceptionnelle /permanente	En référence à la norme XP G38065
	Mise en place de renforcement	En référence à la norme XP G38065
	Liaison entre géosynthétiques	En référence à la norme XP G38065
Mise en œuvre	Recouvrement des géosynthétiques	En référence à la norme XP G38065 A combler et à compacter afin d'assurer un ancrage durable
	Tranchée	Un compactage sous contrôle notamment pour les cavités à faible profondeur
	Compactage	Mise en place d'une procédure de vérification de l'état de la cavité ou la surface
	Mise en place de système de surveillance	Protection de capteurs et de fibre optique pendant et après l'installation de GSY Alimentation électrique des capteurs Vérifications de bon fonctionnement du système Assurer l'acquisition et le transfert des données au centre de traitement durant toute la durée de service Mettre au point une procédure d'alerte et d'intervention en cas de déformations mesurées (seuil à définir)

9.2. Synthèse des données et des résultats

La solution de renforcement par géosynthétique de zones à risques d’effondrements est une méthode adaptée pour des cavités naturelles ou anthropiques de petit diamètre, inférieur à 4 m et exceptionnellement 5 m. L’aléa traité est un effondrement localisé (fontis).

Notons que dans le cas de risque d’affaissement de plus grand diamètre, si l’emploi d’un géosynthétique de renfort n’est, à ce jour pas adaptée, celui d’un géosynthétique instrumenté associé au système de surveillance adéquat peut s’avérer une solution intéressante pour détecter, voire surveiller une remontée de fontis.

Les méthodes de dimensionnement actuelles s’appliquent à des cavités et à des terrains horizontaux.

Pour réaliser le dimensionnement d’un géosynthétique au-dessus d’une cavité ou d’une zone à risque d’effondrement localisé où un fontis est probable, il est nécessaire de disposer des données géométriques et géomécaniques. Ces informations ont été présentées dans ce document (Figure 16 et Tableau 10). Nous avons distingué 6 périodes couvrant un projet de renforcement à l’aide de géosynthétique instrumenté.

Il s’agit de :

- **avant-projet** : dans cette phase, il est nécessaire de disposer des données concernant la cavité elle-même ;
- **conception** : dans cette phase, les données nécessaires sont celles du projet, généralement fournies par le Maître d’Ouvrage ;
- **réalisation du calcul de dimensionnement du géosynthétique**: il s’agit de réaliser les calculs selon les approches en déformation et à la rupture ; ils incluent le calcul des ancrages et des recouvrements
- **choix du produit** : dans cette phase, on sélectionne le produit le plus adapté au dimensionnement ;
- **réalisation** : cette phase correspond à la phase de mise en œuvre du géosynthétique et d’exécution de la construction de l’ouvrage. Elle peut comporter éventuellement la mise en place d’un système de surveillance intégré au géosynthétique ;
- **suivi** : après la mise en place du géosynthétique de renforcement, le Maître d’Ouvrage ou son représentant assure le suivi et les observations de l’évolution des mouvements en surface ainsi qu’éventuellement l’analyse des mesures de déformation du géosynthétique si celui-ci est instrumenté.

Le calcul analytique à l’aide de méthodes de dimensionnement existantes permet de déterminer les caractéristiques du renforcement (nature, raideurs, résistances admissible et ultime). Il est également important d’analyser le retour d’expérience afin d’améliorer les méthodes de dimensionnement.

Tableau 10 : Étapes pour le dimensionnement d'un géosynthétique – données et résultats selon la norme XP G38065

Période	Étape	Description
Avant – projet	Données de la cavité	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nature de la cavité : isolé ou multi cavités ▪ Localisation de la cavité connue ou supposée ▪ Nature des enjeux ▪ Caractéristiques de la cavité à renforcer (diamètre au contact du GSY) ▪ Profondeur de positionnement du géosynthétique
Dimensionnement	Données du projet	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Déplacement maximal admissible en surface ▪ Charges en surface (trafic, remblai, etc.) ▪ Type et caractéristique du GSY

<p>Calcul</p>	<p>Calcul et résultats</p>	<p>1- Calcul à la rupture (ELU)</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Calcul de la charge verticale sur le géosynthétique en prenant en compte les coefficients de pondération b. Déduire la résistance à la traction du géosynthétique à long terme c. Déterminer la résistance ultime en traction du géosynthétique (résistance minimum du géosynthétique avant la mise en œuvre en prenant en compte l'endommagement et le comportement du fluage et l'action du vieillissement chimique) <p>2- Calcul en déformation</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Calcul de la charge verticale sur le géosynthétique b. Déduire le module à la traction du géosynthétique à long terme pour garantir le déplacement en surface c. Déterminer le module du produit en traction du géosynthétique en prenant en compte l'endommagement et l'action chimique
<p>Choix du produit</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Choix du type de géosynthétique par rapport aux résultats de calculs (8 et 9) ▪ Dimensionnement des ancrages ▪ Contrôles et vérification du calcul et du choix par un bureau d'étude agréé
<p>Réalisation</p>	<p>Mise en œuvre (Contrôle et vérification)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vérification du produit livré ▪ Vérification de l'exécution ▪ Installation un système de surveillance (option)

Suivi		<ul style="list-style-type: none">▪ Observation et mesures :<ul style="list-style-type: none">a. Déformation de GSYb. Tassement en surfacec. Comportement des infrastructures ou des structures▪ Circuit de décisions et gestion des interventions en cas de sinistre
--------------	--	--

10. Conclusion

Ce document a été réalisé en s'appuyant sur l'expérience acquise depuis plusieurs années au travers de différents projets nationaux (RAFAEL, Géolnov, etc.) et du projet REGIC. Le géosynthétique est une solution passive pour réduire les conséquences en surface lorsqu'un effondrement localisé (fontis) se produit au-dessus des cavités souterraines naturelles ou anthropiques à faible profondeur ou des crevasses.

A partir de la connaissance de l'aléa et des caractéristiques des géosynthétiques, ce document fournit des recommandations pour l'utilisation de géosynthétiques en tant que système de renforcement et de surveillance au-dessus de cavités. L'objet de ces recommandations est de fournir aux différents intervenants (Maître d'Ouvrage, Maître d'Œuvre, entreprise, etc.) :

- la connaissance nécessaire des phénomènes qui peuvent se produire en fonction de la nature et des dimensions des cavités ainsi les caractéristiques du recouvrement les dimensions, etc.
- une synthèse des méthodes de traitement de l'aléa « effondrement localisé » ;
- les principes généraux indispensables pour établir les bases de la conception et du dimensionnement de ces structures et infrastructures renforcés et/ou instrumentés :
- les éléments nécessaires à l'élaboration de leurs projets :
 - que ce soit pour le renforcement par géosynthétique
 - ou pour l'auscultation et le suivi par géosynthétique instrumenté.

Dans la première partie du document, sont présentés les différents types de cavités souterraines et les différents aléas « mouvements de terrain » associés à leur effondrement, notamment l'aléa « fontis ». Les différentes méthodes de réduction de l'aléa « mouvements de terrain » sont également présentées et en particulier la solution de renforcement par un géosynthétique instrumenté grâce aux capteurs de type fibre optique intégrés à la nappe de géosynthétique.

Le document décrit aussi la méthodologie et les principes pour le choix d'un géosynthétique traditionnel ou instrumenté. Ce choix est basé sur les caractéristiques de la cavité, de l'aléa et des enjeux. Il est également précisé que le géosynthétique est utilisable pour des cavités inférieures à 5 m en tant que système de renforcement et au-delà en tant que système de surveillance.

Un tableau de cas d'application permet aux maîtres d'ouvrages de comparer leur propre cas aux exemples cités afin de pouvoir juger des avantages de l'utilisation de géosynthétique.

En deuxième partie, le document présente les étapes et les données nécessaires au dimensionnement d'un géosynthétique, notamment celles qui concernent la cavité, le sol de recouvrement et le sol au-dessus de la nappe. Il discute les principes des méthodes de dimensionnement pour un sol cohésif et pour un sol granulaire en présence de surcharge extérieure. L'intégration de fibre optique, notamment le géosynthétique (bi-raideur) permet de réaliser la surveillance de la cavité. Le principe de cette surveillance est décrit également

dans le document. Finalement, les étapes de mise en place du géosynthétique sont présentées.

Il est également à rappeler que le dimensionnement du géosynthétique doit faire appel aux différentes normes établies et validées. Ce dimensionnement sera réalisé par un bureau d'étude spécialisé.

11. Références bibliographiques et normatives

Abdelouhab A. Pinon C. et AL Heib M. (2018). Sécurisation d'un secteur d'une ancienne carrière souterraine par géosynthétique de très haute résistance (1800 kN/m). Journée Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Marne-la-Vallée.

Auray G., Garcin P. (2010). Cas d'autoroute E20 – bilan carbone et terrassement d'une autoroute sur cavités potentielles avec géotextile de renforcement. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG -Grenoble.

Blivet J.C., Khay M., Gourc J.P., Giraud H. (2001). Design considerations of geosynthetic for reinforced embankments subjected to localised subsidence. Proc. Geosynthetics'2001 Conference, February 12-14, Portland, Oregon, USA, pp 741-754.

Blivet J-C. Garcin P., Hirschauer A., Nancey A. Villard P. (2006). Renforcement par géosynthétique sur cavités potentielles, exemple de la déviation sud-ouest de Meaux (77). 6^{ème} Rencontres Géosynthétiques, Montpellier, pp 281-288.

Bridle R.J. and Jenner, C.G. (1997). Polymer Geogrids for Bridging Mining Voids, Geosynthetics International, Vol. 4, pp 33-50.

Delmas Ph., Villard P., Huckert A. (2015). Dimensionnement à court terme et à long terme de structure renforcée par géosynthétique sur cavités potentielles : prise en compte de la sécurité. 1 10^{ème} Rencontres Géosynthétiques, La Rochelle, pp 13-34.

Delmas Ph., Gourc J.P. (2017). Geosynthetics in transport infrastructures, the positive input of old case histories. Cas de Trois Lucs à la Valentine : GeoAfrica 2017 Conference.

Dubreucq F., Bruhier, Guillaud O. (2006). Une géogrille dans un parc paysager du Conseil Général du Val de Marne pour se protéger contre les fontis. Rencontres Géosynthétiques-Montpellier.

EBGEO (2011). Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements (EBGEO). German Geotechnical Society, 265p.

Exbrayat L., Garcin P. (2006). LGV Est – Renforcement par géotextile sur cavités. Rencontres géosynthétiques. Montpellier. pp. 313-319.

Ferdinand P. (2014). The Evolution of Optical Fiber Sensors Technologies During the 35 Last Years and Their Applications in Structure Health Monitoring. Le Cam, Vincent and Mevel, Laurent and Schoefs, Franck. EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Jul 2014, Nantes, France.

Géo-Inov (2010). Programme de R&D GEO-INOV a pour but d'initier des techniques nouvelles pour le renforcement et le drainage des sols atypiques cf. Thèse Huckert, 2014.

Hassoun M., Villard P., Al Heib M., Emeriault F. (2017). Limitation par renforcements géosynthétiques des risques liés aux effondrements des toits de catiches. 11èmes Rencontres Géosynthétiques, Lille. pp 239-249.

Huckert A., Briançon L., Villard P., Garcin P., Delmas P., Auray G. (2013). Mécanismes de transfert de charges dans les remblais sur cavités renforcés par géotextiles : approches expérimentales et numériques. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2 au 6 septembre 2013, Paris, France.

Huckert A. (2014). Approches expérimentale et numérique du dimensionnement de renforcements géosynthétiques sur cavités et inclusions rigides. Thèse de doctorat, 26 mai 2014, Université de Grenoble Alpes, 224p.

Huckert A., Briançon L., Villard P., Garcin P. (2016). Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: Experimental and analytical approaches. Geotextiles and Geomembranes 44 : 442-456.

Ineris (2017). Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol Analyse et gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement. 17-164710-03375A-Guide Ineris-Cerema.

Ineris (2016a). Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines abandonnées d'origine anthropique - DRS-15-149564-02401A.

Ineris (2016b). Guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique. DRS-16-156834-00810B.

Jaffrot S., Garcin P. et Nancey A. (2009). RN 174 – renforcement par géosynthétique sur cavités. Rencontres Géosynthétiques. pp. 95-101- Nantes.

Gourc J.P., Villard P., Giraud H., Blivet J.C., Khay M., Imbert B., Morbois A., Delmas Ph. (1999). Expérimentation en vraie grandeur d'effondrements localisés sous remblais ferroviaires et routiers, XII Congrès Européen de Mécanique des Sols et de la Géotechnique "La Géotechnique dans les infrastructures de transport", Amsterdam, 7-9 juin 1999

Kaytech (2006). Road rehabilitation – sinkhole repaire N14/P158-1 -South Africa. <https://kaytech.co.za/wp-content/uploads/2013/12/Case-Study-Reinforcement-+-Rockgrid-PC-N14-Sinkhole.pdf>

Le Moniteur (2015). Définition, mise en œuvre et dimensionnement des géosynthétiques. N°5811 www.lemoniteur.fr.

Martin R., Mathon C. (2000). Ville de Marseille (13) : Route des Trois à La Valentine – Avis sur la cartographie existante des zones instables. Rapport BRGM RC-50300-FR. 18 p.

National Coal Board, NCB. (1975). Subsidence Engineer's Handbook, London, 111pp.

Nancey A., Delmas Ph. (2019). Renforcement de base de remblais sur zone à risque d'effondrement – nouvelle norme XP G 38063-2, 12^{ème} Rencontres Géosynthétiques, Nancy. pp. 233-240.

Nichol D. (1998). Sinkholes at Glan Llyn on the A55 – North Wales Coast Road, UK. Engineering Geology (1998) 101-109.

Comité français des géosynthétiques (1995). Recommandations générales pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets, Fascicule 11.

Riot M., Rouffiac M. et Auray G. (2013). Chantier de l'autoroute A36 : Etude de cas de renforcement par géocomposite sur zones à risques de cavités karstiques. 9^{èmes} Rencontres Géosynthétiques. Dijon. pp. 123-129.

Riot M, Delmas Ph., Monet T. (2022). Life Cycle Analysis of an innovative reinforcement geosynthetic coupled with a detection and monitoring warning system. 12th IGC – 18-22 September 2022, Roma

Salvati R., Sasowsky IR. (2002). Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge. J. of Hydro, 264:1-11.

Tencate (2012). Embankments over voids – Habeath Park and Choose – UK. Fail safe geotextile reinforcement to support car park should old mine workings collapse.

Terzaghi K. (1943). Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons, New York.

Toulemont M. (1981). « Évolution actuelle des massifs gypseux par lessivage, cas des gypses lutétiens de la région parisienne », bulletin de liaison du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de l'est parisien, pp. 35-47.

Villard P., Briançon L. (2008). Design of geosynthetic-reinforcements for platforms subjected to localized sinkholes. Can. Geotech. J. 45-196-209 (2008).

Villard P., Chareyre B. (2004). Design methods for geosynthetic anchor trenches, Can. Geotech. J. Vol. 41 N° 6, pp. 1193-1205.

Zaghouani K. (2009). Les géosynthétiques, quelques applications en Tunisie. Association Tunisienne de Mécanique des sols.

Zaghouani K. (2017). Technical Risk Management Linked to Underground Cavities: Gypsum Dissolution Phenomenon and Geotextile Reinforcement. GeoAfrica.

Normes

NF EN 1990, Eurocode 0. Bases de calcul des structures (indice de classement P 06-100-1) avec son Annexe nationale (NF P 06-100-2).

NF EN 1997-1, Eurocode 7. Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales. (indice de classement P 94251-1) avec son Annexe nationale NF P 94-251-1/AN.

NF EN 1997-2, Eurocode 7. Calcul géotechnique – Partie 2 : Reconnaissance et essais géotechniques. (indice de classement P 94-251-2).

NF EN ISO 10318, Géosynthétiques – Termes et définitions.

NF EN ISO 10319, Géotextiles – Essai de traction des bandes larges.

NF P 11 300, Exécution des terrassements – Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

NF EN ISO 13431, Géotextiles et produits apparentés – Détermination du comportement au fluage en traction et de la rupture au fluage en traction.

NF EN ISO 12957-1, Géosynthétiques - Détermination des caractéristiques de frottement - Partie 1 : essai de cisaillement direct.

NF EN 13738, Géotextiles et produits apparentés aux géotextiles - Détermination de la résistance à l'arrachement du sol.

NF EN 14 475, Exécution de travaux géotechniques spéciaux – Remblais renforcés.

NF XP G38065 « Renforcement de la base de remblais » Géosynthétiques – Géotextiles et produits apparentés Renforcement de la base de remblais sur zones à risques d'effondrements Justification du dimensionnement et éléments de conception.

NF EN ISO 12957-1, Géosynthétiques - Détermination des caractéristiques de frottement - Partie 1 : essai de cisaillement direct.

NF EN 13738, Géotextiles et produits apparentés aux géotextiles - Détermination de la résistance à l'arrachement du sol.

NF P94-261, Justification des ouvrages géotechniques – Norme d'application national de l'Eurocode 7 – fondations superficielles.

12. Liste des illustrations

12.1. Liste des figures

<i>Figure 1 : Inventaire des cavités souterraines naturelles et anthropiques (hors mines) – source : BRGM (2019).....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 2 : Localisation des carrières souterraines abandonnées en Ile de France, par type de matériau extrait (hors 77) – Source : IGC.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3 : Carte de probabilité de karst français - Source : © DR.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4 : Dégradations observées dans une carrière souterraine - Source : Ineris</i>	<i>12</i>
<i>Figure 5 : Effondrement localisé au droit d'une ancienne mine de fer de Lorraine (à gauche) et d'une ancienne carrière de craie (à droite) - Source Ineris.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 6 : Exemple d'une cuvette d'affaissement - Source : Ineris</i>	<i>13</i>
<i>Figure 7 : Remontée de fontis – Source : Ineris</i>	<i>14</i>
<i>Figure 8 : Évolution du diamètre d'effondrement et emprise finale en surface – Source : Ineris.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 9 : Exemples d'effondrements localisés au droit de cavités d'origine anthropique – source : Ineris ..</i>	<i>16</i>
<i>Figure 10 : Distribution du diamètre du fontis (en surface) et en l'absence du traitement pour des carrières de gypse et calcaire de la région parisienne – Population de 420 cas de fontis (données de l'IGC, traitées par l'Ineris).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 11 : Diamètre du fontis (en surface) et en fonction de la profondeur pour des carrières de gypse et calcaire de la région parisienne – (données de l'IGC, traitées par l'Ineris).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 12 : Différents types de cavités de dissolution et leur conséquence en surface (d'après Salvati et Sasowsky, 2002).....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 13 : Exemples de débouillage de différents puits d'exploitation - Sources : Ineris et ORRNA</i>	<i>19</i>
<i>Figure 14 : Exemple d'un effondrement généralisé - Source : Ineris</i>	<i>20</i>
<i>Figure 15 : Formation (A, B) et évolution d'une crevasse d'origine minière – Source : Guide Ineris 2017</i>	<i>21</i>
<i>Figure 16 : Logigramme décisionnel du choix de la méthode de traitement d'une cavité souterraine présentées dans le Tableau 2</i>	<i>24</i>
<i>Figure 17 : Comportement de GSY – effort-déformation, exemple d'évaluation des raideurs sécantes pour deux plages de déformations définies pour une courbe de traction de GSY en polyester – allongement. Source : Afitexinov</i>	<i>28</i>
<i>Figure 18 : Insertion de fibre optique (en vert) dans un géosynthétique de renforcement lors de la production par la technologie de tricotage - Source : Afitexinov.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 19 : Application d'un géosynthétique de renforcement sur cavités – Source : CFG, Le Moniteur, 2015</i>	<i>30</i>
<i>Figure 20 : Vue transversale - Illustration d'un géosynthétique implanté au-dessus d'une cavité – Source : Ineris.....</i>	<i>31</i>

Figure 21 : Affaissement obtenu en 2015 au-dessus d'une zone renforcée par un géosynthétique – Source : Trois Luc à La Valentine, Delmas et Gourc, 2017	32
Figure 22 : Principaux paramètres collectés pour l'analyse des cas d'applications - Source : Ineris.....	33
Figure 23 : Démarche pour choisir un mode de traitement adapté – Source : Ineris.....	37
Figure 24 : Principe de fonctionnement d'un sol renforcé par géosynthétique, avant et après la remontée de la cavité - Source : Delmas et al. 2015	40
Figure 25 : Schéma de principe du renforcement par géosynthétique d'une cavité et de l'effet membrane – Source : Hassoun et al. 2018 modifié	42
Figure 26 : Mise en tension du géosynthétique après l'effondrement du sol au-dessus de la cavité - Source : Bridle and Jenner, 1997.....	43
Figure 27 : Types de remontées de fontis (cloche d'effondrement) et formation de cratère en surface en fonction de la nature du terrain de recouvrement (a : résistant et fracturé, b : meuble) – Source : Ineris.....	46
Figure 28 : Remontées de fontis dans le cas des réseaux karstiques – Source : Ineris.....	47
Figure 29 : Équilibre des efforts exercés sur le géosynthétique au droit de la cavité dans le cas d'un sol cohésif – Source : Huckert et al. 2016	51
Figure 30 : Principes de l'ancrage à plat ou ancrage en tranchée (présentés dans l'annexe C de la norme XP G38-065).	52
Figure 31 : Étapes d'installation d'un géosynthétique sans excaver le sol initial – Source : Ineris	56
Figure 32 : Étapes d'installation d'un géosynthétique sous une infrastructure ou un remblai – Source : Ineris	56
Figure 33 : Ajout d'un sol frottant pour augmenter la résistance des interfaces GSY-remblai et GSY – recouvrement	57
Figure 34 : Exemple d'installation d'un géosynthétique instrumenté – Source : Afitexinov	58
Figure 35 : Exemple de remblaiement – Source : Afitexinov	59
Figure 36 : Géosynthétique de renforcement équipé par système de mesures par fibre optique et capteurs Bragg - Source : Ineris.	61
Figure 37 : Principe de mesure par fibre optique type Bragg - Source : Afitexinov.....	62
Figure 38 : Variation des spectres de diffusion des ondes diffusées pour les méthodes dites Raman, Brillouin et Rayleigh avec une source de 1,55mm de longueur d'onde (Ferdinand, 2014).	62
Figure 39 : Schéma de principe (vue en plan) pour la surveillance d'une cavité à l'aide d'un géosynthétique instrumenté par Fibre Optique de type Bragg - Source : Ineris	63
Figure 40 : Schéma de principe (vue en plan) pour la détection et la surveillance de plusieurs cavités (localisées ou non) à l'aide d'un géosynthétique instrumenté par Fibre Optique et des capteurs Brillouin - Source : Ineris.....	64

12.2. Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemples de classes d'intensité de dommages potentiels en fonction du diamètre de l'effondrement	16
Tableau 2 : Aide pour le choix des méthodes de réduction de l'aléa « fontis » (adapté et complété du guide Ineris, 2016a).....	25
Tableau 3 : Exemples de cas d'application du géosynthétique au-dessus de cavités naturelles et anthropiques (NF : donnée non fournie)	34
Tableau 4 : Utilisation de GSY en fonction des enjeux et du caractère instrumenté ou non du GSY.....	38
Tableau 5 : Déplacement admissible d_s , adm en fonction de la nature du projet – Source : Norme –XP G38065 (D_s est diamètre de la cavité)	49
Tableau 6 : Tassement et tassement différentiel admissible pour différents types de constructions d'après la norme NF P94-261	49
Tableau 7 : Caractéristiques principales des méthodes de mesures des déformations par fibre optique (d'après Ferdinand, 2014)	65
Tableau 8 : Caractéristiques principales des méthodes de mesures des déformations par fibre optique (d'après Ferdinand, 2014)	65
Tableau 9 : Facteurs à prendre en compte dans le dimensionnement afin de garantir une performance du renforcement par un géosynthétique.....	68
Tableau 10 : Étapes pour le dimensionnement d'un géosynthétique – données et résultats selon la norme XP G38065.....	71

12.3. Glossaire

Aléa : Évènement menaçant ou probabilité d'occurrence dans une région et au cours d'une période données d'un phénomène pouvant engendrer des dommages.

Affaissement : déformation de surface sans rupture apparente consécutive à l'effondrement d'une cavité.

Anthropique : Qui a une origine humaine ; qui est causé par l'homme.

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...).

Crevasse minière : les crevasses sont des cassures visibles ou cachées en surface, elles sont généralement associées à l'affaissement induit lors de l'exploitation ou l'effondrement des travaux miniers.

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.

Débouillage : le débouillage est l'instabilité d'un remblai qui s'écoule au sein des ouvrages souterrains auxquels il est raccordé, avec pour conséquence la formation en surface d'un fontis ayant des dimensions en fonction du diamètre du puits.

Doline : Dépression circulaire des cavités karstiques, elle est caractéristique d'érosion des terrains carbonatés en contexte karstique. Cette dépression peut mesurer de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres de diamètre.

Effondrement : mouvement gravitaire à composante essentiellement verticale, qui se produit de façon plus ou moins brutale. Il résulte de la rupture des appuis ou du toit d'une cavité souterraine préexistante.

Effondrement localisé ou Fontis : Cratère formé en surface par l'effondrement brutal et inopiné des terrains à l'arrivée au jour d'une cloche de fontis.

Enjeux : Personnes, biens, activités, infrastructures, patrimoine, etc... susceptibles d'être affectés par un phénomène redouté (dans le cas présent un mouvement de terrain)

Étude géotechnique : Elle est définie et codifiée par la norme NF-P-94 500 version 2013 (Étude 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, évaluation des mécanismes d'instabilité, analyse de stabilité de l'ouvrage, préconisations de solutions de mise en sécurité.

Érosion interne (suffusion) : ce terme se réfère au détachement et au transport de particules les plus fines à travers une matrice de sol poreuse plus grossière en raison d'un écoulement hydraulique. L'évolution temporelle de la suffusion peut modifier les propriétés hydrauliques et mécaniques des sols et peut entraîner des changements importants dans le comportement de telles structures pouvant aller jusqu'à leur effondrement.

Fibre optique : Technologie de transmission de plus en plus répandue, consistant à guider une onde optique de polarisation circulaire par l'intermédiaire d'un fil en verre ou plastique. Les avantages en sont notamment une vitesse de transmission très élevée, et une atténuation limitée du signal initial fourni par le capteur. Outre la transmission de l'information, les fibres optiques sont également utilisées comme capteur distribué de température, variation de pression et ou de déformation en utilisant une technique d'interférométrie de la lumière transmise. Les fibres optiques permettent de nombreuses mesures (thermiques, niveaux, déplacements), avec des applications de plus en plus développées en géosciences.

Foisonnement : Augmentation du volume apparent d'une roche (du fait de son extraction ou de son instabilité, par suite de son morcellement) ou d'un sol (du fait de son excavation ou d'un effondrement).

Géorisques : portail de Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.
<https://www.georisques.gouv.fr/>.

Karst, Karstification : forme d'érosion spécifique due à la dissolution des massifs calcaires ou dolomitiques par les eaux souterraines et caractérisée notamment par des vides souterrains.

Mouvements de terrain : Manifestations du déplacement gravitaire de masses de terrain déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles (fonte des neiges, pluviométrie anormalement forte, séismes, etc.) ou anthropiques (terrassement, vibration, déboisement, exploitation de matériaux ou de nappes aquifères, etc.).

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.

Recouvrement : ensemble des terrains rencontrés au-dessus d'une carrière.

Remédiation : Action qui consiste à corriger ou combattre un problème par des moyens et/ou mesures appropriés.

Risque : Grandeur qui s'évalue en croisant l'aléa (grandeur elle-même estimée à partir de deux dimensions : la probabilité d'occurrence d'un phénomène, et son intensité) et les enjeux (personnes, infrastructures, bâtiments, habitations, mais également enjeux économiques ou environnementaux...).

Suffusion : cf. Érosion interne

Surveillance : Somme d'actions qui consistent à observer avec attention, examiner, contrôler, afin de pouvoir alerter à temps et ainsi réduire ou éviter le risque.

Annexe A

Le Tableau présente les valeurs des déformations horizontales pour un affaissement (S) en surface, pour une profondeur de la cavité H et pour une valeur $k = 1$ (hypothèse majorante) d'après la méthode de National Coal Board (NCB).

Tableau A : Déformation horizontale (ε_{max} %) en fonction de la relation empirique de NCB en fonction de l'affaissement maximal (S) et de la profondeur du toit de la cavité (H)

S (cm)	Profondeur H (m)					
	5	10	15	20	25	30
1	0.20 %	0.10 %	0.07 %	0.05 %	0.04 %	0.03 %
5	1.00 %	0.50 %	0.35 %	0.25 %	0.20 %	0.15 %
10	2.00 %	1.00 %	0.66 %	0.50 %	0.40 %	0.33 %
20	4.00 %	2.00 %	1.20 %	1.00 %	0.80 %	0.66 %

afitexinov
GEOSYNTHETICS

13-15 rue Louis Blériot
28300 Champhol
Tél : +33 (0)2 37 18 01 51
afitex@afitex.com
www.afitex.com



Bâtiment Galilée
1270 rue de la piscine
38400 Saint Martin d'Hères
Tél : +33 (0)4 76 82 51 46
www.3sr.univ-grenoble-alpes.fr



Parc Technologique ALATA
BP2 60550 Verneuil-en-Halatte
Tél : +33 (0)3 44 55 66 77
ineris@ineris.fr
www.ineris.fr