

RECOMMANDATIONS POUR L'UTILISATION DE GÉOSYNTHÉTIQUES DANS LA RÉDUCTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT LOCALISÉ

GUIDELINES FOR THE USE OF GEOSYNTHETICS FOR MITIGATING LOCALISED COLLAPSE

Marwan AL HEIB¹, Philippe DELMAS², Mathilde RIOT³, Pascal VILLARD⁴, Fabrice EMERIAULT⁴,

1 Ineris, 54042 Nancy, France.

2 Expert géotechnicien, 75000 Paris, France.

3. AFITEXINOV, 38110 Cessieu, France.

4 Univ, Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France.

RÉSUMÉ – Les aménagements routiers et urbains sont parfois confrontés à des effondrements localisés (fontis) de cavités naturelles ou anthropiques. Pour réduire leur impact, des méthodes de traitement sont utilisées, dont la méthode de renforcement par géosynthétiques. Cette communication présente des recommandations opérationnelles concernant l'emploi d'un géosynthétique instrumenté bi-raideur inversé pour un sol granulaire et/ou cohésif. Elles précisent les conditions de son emploi en tant que renforcement mais également système de surveillance en cas de remontée de fontis, grâce à l'intégration de fibre optique. Le guide établi dans ce cadre apporte également des éléments d'aide à la décision pour la sécurisation des terrains de surface.

Mots-clés : Effondrement localisé, réduction de l'aléa, renforcement, géosynthétique, surveillance.

ABSTRACT – Road and urban developments are sometimes confronted with localized collapses (sinkhole) of natural or anthropogenic cavities. To reduce their impact, treatment methods are generally used, including the reinforcement by using a geosynthetic. This communication presents operational recommendations concerning the use of inverted bi-stiffness instrumented geosynthetic for a granular and/or cohesive soil. These recommendations specify the conditions for its use as a reinforcement and as a monitoring system in the event of rising sinkholes, thanks to the integration of optical fibres. This document also provides decision-making aids for land security.

Keywords: Localised collapse, hazard mitigation, reinforcement, geosynthetic, monitoring.

1. Introduction

Le territoire français est largement exposé aux risques liés à la présence de cavités souterraines, situées à faible profondeur, d'origine naturelle ou anthropique (Le Plan National cavités, 2014). En France, on recense plus de 500 000 cavités souterraines (hors mines). Ces cavités constituent un risque majeur pour les ouvrages en surface (Cooper et Calow, 1998). 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 (collectivités, entreprises, propriétaires, etc.).

Les vides du sous-sol constituent une source de danger. Ils peuvent par conséquent 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 préoccupants lorsqu'ils affectent des zones fortement urbanisées et traversées par des infrastructures routières nationales ou internationales.

Des méthodes d'analyse de risques ont été développées afin d'identifier le niveau de l'aléa mouvement de terrain et de proposer des méthodes de réduction de cet aléa ou/et de ces conséquences. L'utilisation de géosynthétiques est l'une de ces méthodes permettant de protéger les enjeux en surface lorsqu'un effondrement d'une cavité souterraine.

Il existe en France et en Europe des recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques en tant que renforcement des ouvrages en terre et des cavités souterraines (British Standard, 2010, EBGeo, 2011, XP G38063, 1019). Deux projets nationaux ont eu pour objectif d'améliorer les méthodes de dimensionnement : il s'agit du projet RAFAEL (Blivet et al., 2000) et du projet Géo-Inov (2010). Ces

deux projets ont permis d'apporter des réponses scientifiques et opérationnelles au dimensionnement du renforcement de géosynthétiques au-dessus des cavités.

Dans le cadre du projet REGIC, REnforcement par Géosynthétique Intelligent pour le risque Cavités, financé par l'ADEME, un guide (disponible en français et en anglais, en version électronique sur le site de Afitexinov) a été rédigé dans l'objectif de fournir les principes généraux et les éléments nécessaires à la conception et le dimensionnement de ces sols renforcés par un géosynthétique et instrumentés. L'objet de ces recommandations est de fournir aux différents intervenants (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprise, etc.) la connaissance nécessaire des phénomènes, les principes généraux indispensables pour établir les bases de la conception et du dimensionnement de ces structures et infrastructures renforcés et/ou instrumentés, et finalement les éléments nécessaires à l'élaboration de leurs projets.

2. Cavité souterraine et aléa « effondrement localisé »

L'effondrement de cavités s'observe généralement à la suite de la rupture du toit de la cavité, naturelle ou anthropique, située à faible profondeur (Ifsttar, 2014, Ineris, 2017). La remontée de l'effondrement vers la surface dépend de la nature de la cavité, de sa forme géométrique et de la nature des terrains qui la recouvrent. Le terme de fontis désigne aussi bien le mécanisme d'effondrement que le cratère classiquement observé en surface. Deux situations peuvent être observées (Figure 1) : soit le processus s'arrête de lui-même à une hauteur correspondant à une voûte auto-stable (situation 2 sur la figure), soit il se développe verticalement jusqu'à atteindre les matériaux meubles de la couverture puis la surface (situation 3). 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.). Ce temps peut varier de quelques jours pour des terrains peu résistants à plusieurs années voire dizaines d'années pour des terrains résistants. La présence d'une nappe aquifère ou d'une circulation d'eau au sein de la cavité, pouvant déplacer ou étaler les éboulis dans les galeries, favorise le développement de la cloche de fontis vers la surface. La Figure 2 montre des exemples d'effondrements localisés (fontis) de cavités souterraines. 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, critère permettant de distinguer trois classes d'intensité (Tableau 1, Figure 2).

Tableau 1. Exemples de classes d'intensité de dommages potentiels en fonction du diamètre de l'effondrement (Ineris, 2016a)

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 ≥ à 5 m et < à 10 m	Modérée
Diamètre ≥ à 10 m	Élevée à très élevée

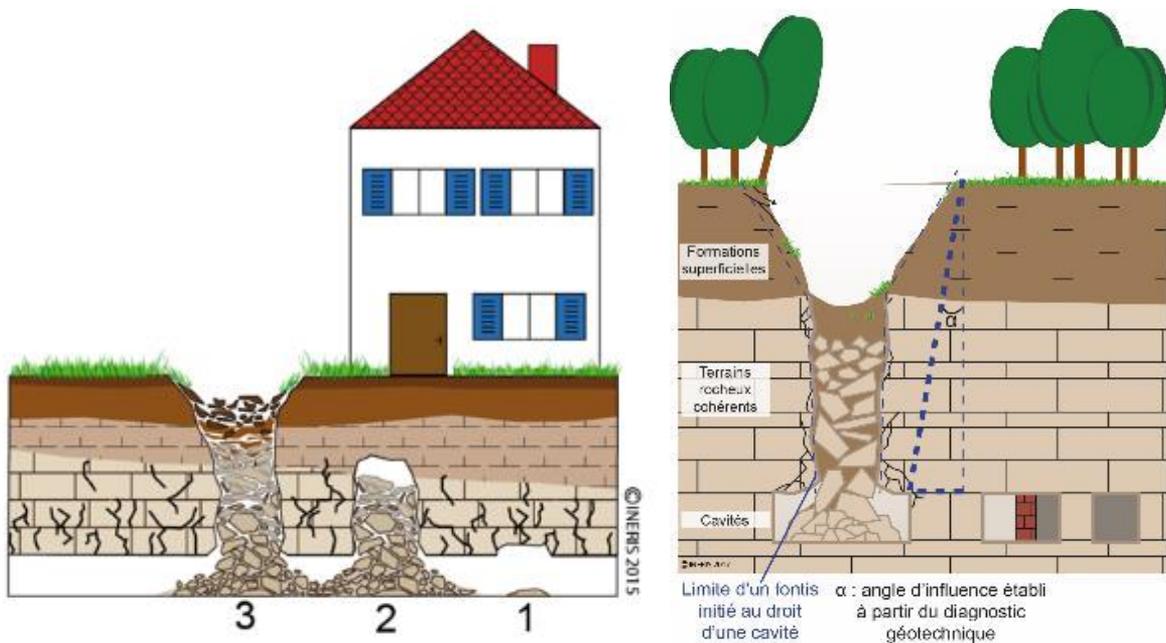


Figure 1. (a) Étapes de remontée de fontis et zone d'influence du fontis (b) – Source : Ineris



Figure 2. Exemples d'effondrements localisés au droit de cavités d'origine anthropique – source : Ineris

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

On distingue généralement les méthodes visant à réduire l'intensité de l'aléa de celles visant plutôt à réduire la vulnérabilité des structures ou infrastructures (Ineris, 2016a). Certaines méthodes permettent d'atténuer l'aléa ou ses conséquences ; d'autres permettent de le supprimer complètement. Le Tableau 2 synthétise ces méthodes en fonction de l'usage actuel ou futur du sol et les résultats attendus après la réalisation du traitement. Il précise également l'aléa résiduel (qui subsiste après l'emploi de la méthode). Le choix de la méthode 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 ; de l'occupation du sol en surface (enjeux) et des considérations techniques et économiques.

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 et 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 de clavage de la cavité)
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	À 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 	Réduction de la vulnérabilité des structures et infrastructures	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.

4. Renforcement par géosynthétiques

Le renforcement par géosynthétique (GSY), ou d'un produit apparenté aux géosynthétiques (cf. la norme NF EN ISO 10318), est généralement caractérisé par sa résistance à la traction et au poinçonnement. Le comportement en traction d'un géosynthétique 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) (Figure 3). Dans le cadre de projet REGIC, 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 », où deux raideurs en traction s'activent l'une après l'autre, la première étant plus faible que la seconde. De plus, grâce à une technologie de tricotage, des capteurs peuvent être intégrés au géotextile. Il s'agit ici de fibres optiques (FO), insérées dans le GSY dès la production. L'intégration des fibres optiques dans les géosynthétiques est un moyen de mesurer les déformations. Le géosynthétique « bi-raideur inversé » instrumenté permet de détecter le début d'une rupture de la couche de sol 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.

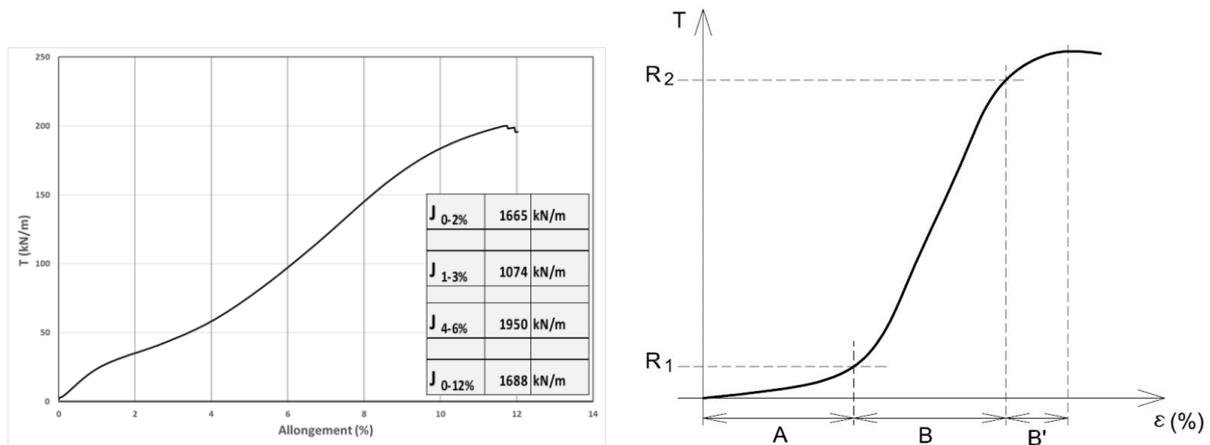


Figure 3. Comportement de GSY mono (a) et bi-raideur (b). Source : Afiteixinov

Le renforcement par un géosynthétique est l'une des solutions permettant d'améliorer la protection des enjeux en surface (Delmas et Gourc, 2017). Sous réserve de respecter les règles de l'art du dimensionnement, l'objectif premier de renforcement par le géosynthétique est d'assurer une sécurité temporaire ou pour une durée de service¹, avant la mise en place d'un traitement définitif correspondant au comblement des vides dans les zones où des effondrements se sont produits (Ineris, 2017). L'effondrement d'une cavité renforcée par géosynthétique d'un diamètre en surface inférieur à 5 m 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. Au-delà de cette valeur de 5 m, le géosynthétique « instrumenté », c'est-à-dire équipé d'un système de surveillance approprié, permettrait la détection de la propagation de fontis vers la surface, grâce aux mesures des déformations mesurées au niveau du GSY.

Des nombreux cas d'utilisation de géosynthétiques comme solution de réduction de l'aléa fontis ont été cités dans la bibliographie nationale et internationale (Auray et Garcin, 2010 ; Blivet et al., 2006 ; Bridle et Janner, 1997 ; Dubreucq et al., 2006 ; Jaffrot et al., 2009 ; Kaytech, 2006 ; Martin et Mathon, 2000 ; Nichol, 1998 ; Riot et al, 2013). Ces cas permettent d'illustrer les différentes possibilités de renforcement par géosynthétique des sols pour des cavités naturelles et anthropiques ; des différents enjeux (autoroutes, routes, voies ferrées) et des espaces publics (parcs et parkings).

4.1. Domaines d'application du renforcement par géosynthétique

La démarche proposée de la méthode de traitement est présentée sur la Figure 4, permettant de choisir entre deux configurations de méthodes de traitement par un géosynthétique ou par une autre méthode de traitement.

¹ Durée de service de l'ouvrage est définie par le maître d'ouvrage ou par les normes et les recommandations de l'Eurocode

Tableau 3 fournit le cadre de l'utilisation de GSY en fonction des enjeux et du caractère instrumenté ou non, et les actions à entreprendre sur le court et le long terme.

Tableau 3. 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

La Figure 4 fournit la démarche pour choisir un mode de traitement adapté en fonction du diamètre de la cavité, de l'amplitude des mouvements et des enjeux en surface. Cette démarche intègre également la mise en place d'une surveillance. Deux configurations sont proposées en fonction des objectifs de la mise en sécurité de la cavité : configuration 1 (sans ou avec surveillance) : traitement dans le cas où les cavités sont bien connues et d'un diamètre inférieur à 5 m et configuration 2 (avec surveillance) : 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.

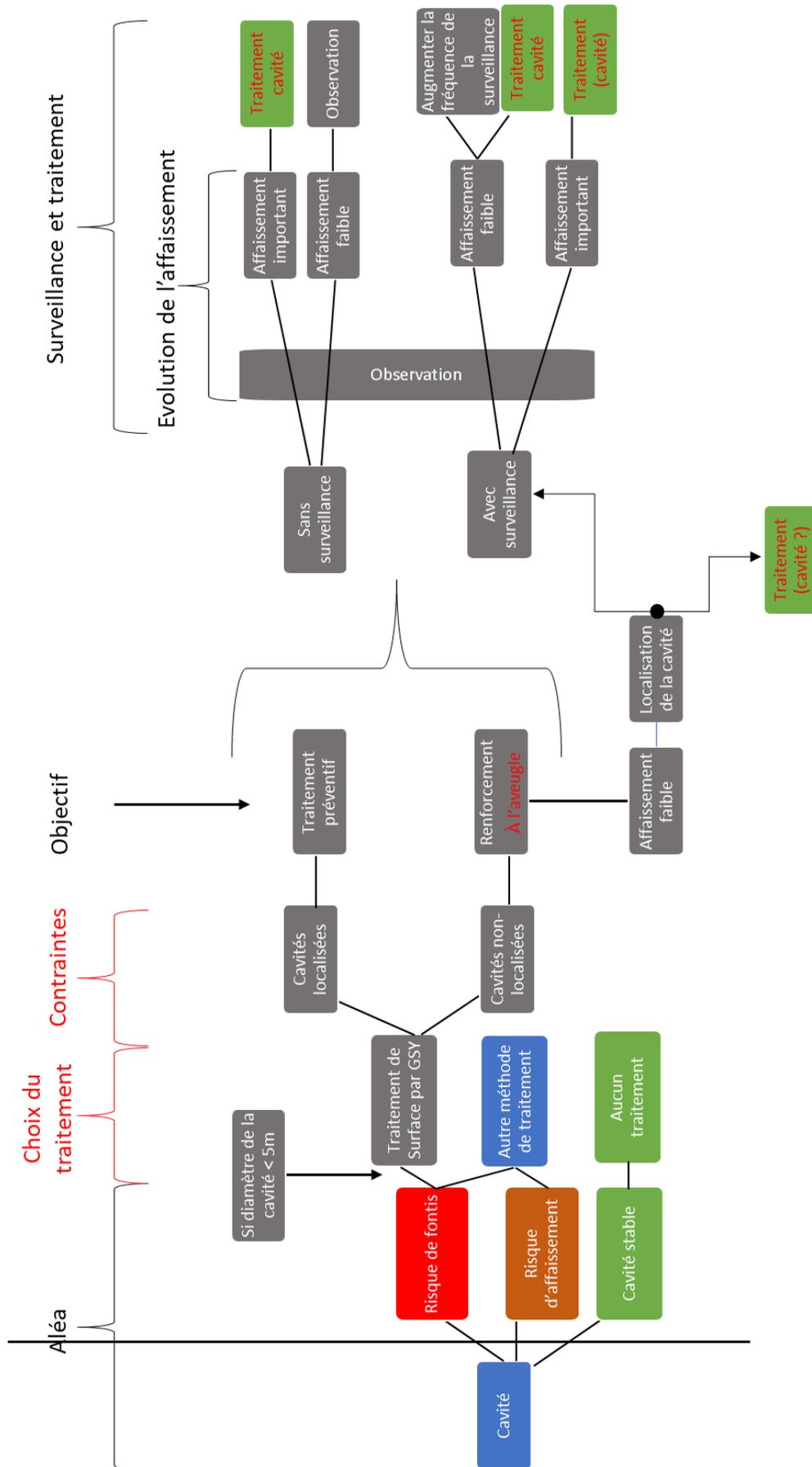


Figure 4. Démarche pour choisir un mode de traitement adapté – Source : Ineris

4.2 Conception et fonctionnement du renforcement par GSY

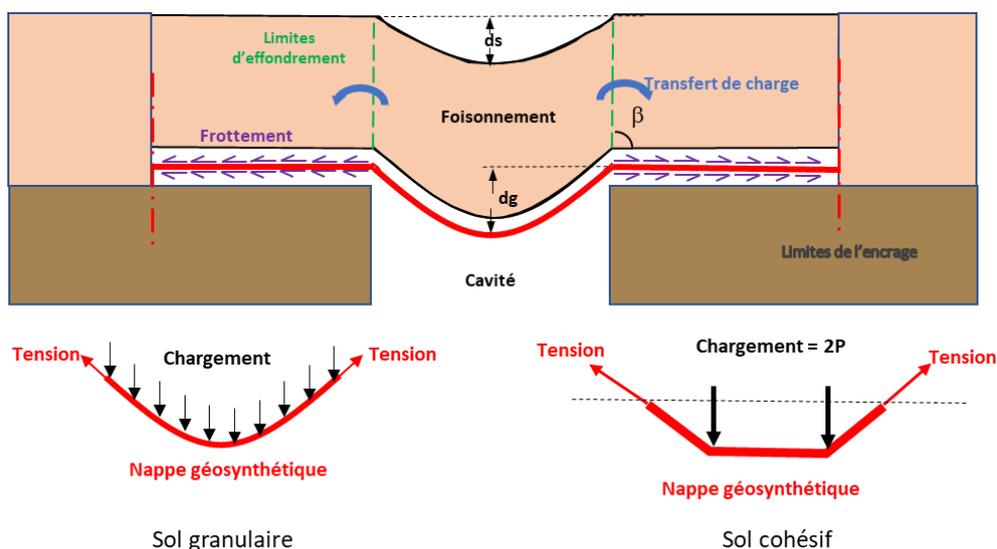
La démarche proposée pour la conception d'une solution de renforcement par géosynthétique, exposée de manière détaillée dans la Figure 4 et le Tableau 3, peut se résumer par les étapes suivantes (Le Moniteur, 2015, Delmas et al., 2015) :

- évaluation et caractérisation du type d'effondrement potentiel :
 - localisation de la cavité connue ou non ;
 - type et niveau de l'aléa mouvement de terrain : cavité stable, affaissement, fontis ;
 - diamètre et amplitude de l'affaissement ou du fontis en cas de remontée de la rupture vers la surface.
- choix de l'objectif de renforcement de l'ouvrage par géosynthétique :
 - « temporaire » après remontée de la cavité en attendant le traitement définitif (court terme) ;
 - « définitif », en général pour une durée de vie de 100 ans après l'installation du géosynthétique (long terme).
- définition de l'affaissement maximum admissible en surface permettant de maintenir l'exploitation de l'ouvrage notamment des infrastructures ;
- 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) ;
- 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.

4.2. Mécanismes de base du renforcement

La Figure 5 illustre le mécanisme du renforcement par géosynthétique après la formation d'une cavité sous-jacente et la mise en tension du géosynthétique liée au poids du remblai foisonné au-dessus de la cavité. Ce renforcement résulte ainsi de la mobilisation du comportement en résistance-déformation du géosynthétique.



d_g : déflexion du géosynthétique ; d_s : tassement en surface ; β : angle de la limite de l'effondrement et $2P$: deux forces verticales linéiques agissant sur la bande centrale du géosynthétique

Figure 5. Schéma de principe du renforcement par géosynthétique d'une cavité et de l'effet membrane – Source : Hassoun et al. (2018) modifié

Ce fonctionnement se divise en 4 périodes distincts :

- la période (I) : mise en place du géosynthétique sur le terrain naturel et construction de la structure ;
- 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 où la remontée de la cavité est au niveau du géosynthétique ; 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 ; 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.

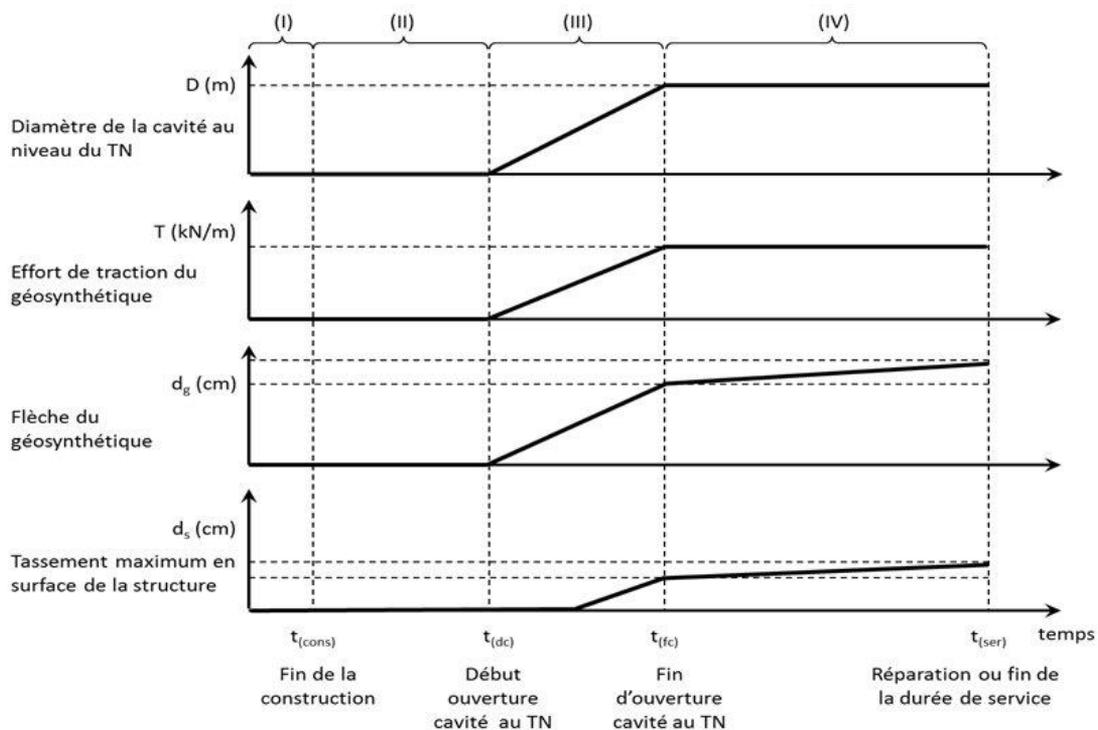


Figure 6. Principe de fonctionnement d'un sol renforcé par géosynthétique, avant et après la remontée

Lorsque la cavité remonte jusqu'à la base du géosynthétique (correspondant aux périodes II et III de la Figure 6), 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 5). 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 localisée 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 cylindre (Figure 5), l'angle β variant entre 85 et 95 degrés selon la nature du remblai. Il est généralement pris égal à 90 degrés dans les méthodes du dimensionnement. Au cours de ce phénomène d'affaissement contenu au-dessus de la cavité, le sol sus-jacent va se déformer, entraînant un tassement de la structure en

surface (d_s), inférieur à la déflexion de géosynthétique (d_g). Dans le cas d'un sol cohésif, la rupture du sol s'apparente davantage 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. 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 5). 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.

5. 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 soit pas atteint. 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, a été validée et adoptée par la profession (Nancey et Delmas, 2019). Le dimensionnement d'un géosynthétique de renforcement sur cavités utilise l'approche des états limites ultime (ELU) et de service (ELS) tels que définis dans les Eurocodes (NF EN1997-1). Ainsi, la présence du renforcement doit remplir les critères d'ELS² et d'ELU³ de la structure. La vérification aux ELS vise à s'assurer que le tassement en surface reste admissible après l'ouverture de la cavité et la mise en tension du géosynthétique. 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).

5.1. Paramètres de dimensionnement du renforcement

L'objectif du dimensionnement est de déterminer les caractéristiques du géosynthétique. 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.). Les données géométriques et géologiques doivent être prises en compte pour évaluer la géométrie de la remontée de fontis. Pour appliquer les méthodes du dimensionnement, il convient de déterminer successivement (Figure 7) :

- le diamètre de la cavité et le mécanisme de remontée de la cavité vers la surface,
- 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).
- 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 admissible 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.

² Les états-limites ultimes (ELU) correspondent à la limite de résistance mécanique au-delà de laquelle il y a ruine de l'ouvrage.

³ Les états-limites de service (ELS) 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.

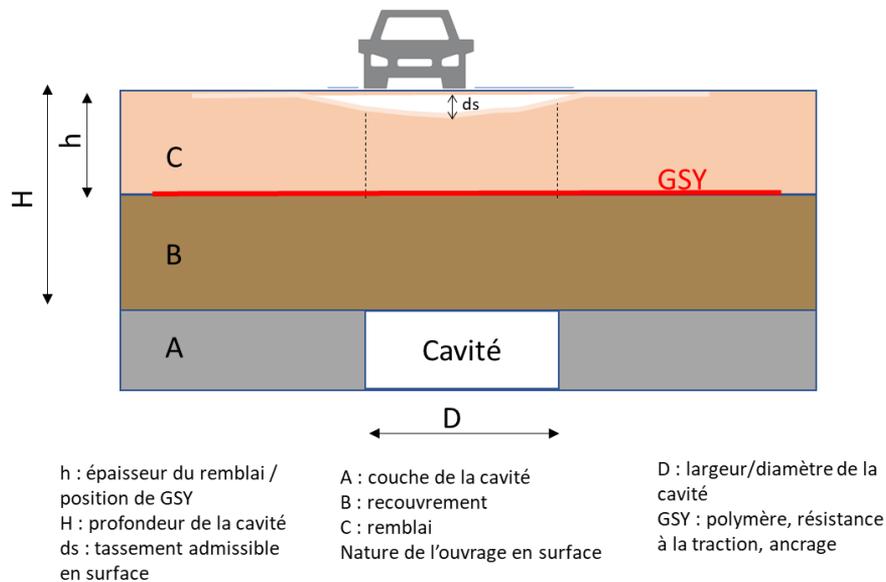


Figure 7. Principaux paramètres collectés pour l'analyse des cas d'applications - Source : Ineris

L'ajustement des paramètres nécessite des itérations successives sur la raideur du géosynthétique pour respecter le tassement de surface (d_s) souhaité.

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 4 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 4 : 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

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. 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) et des méthodes couramment utilisées en France (méthode développée dans le cadre du Projet RAFAEL, Blivet et al., 2000) et dans certains pays (EBGEO, 2011), il est admis 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. La norme XP G38065 considère, au vu des résultats expérimentaux observés, que la déformée de la

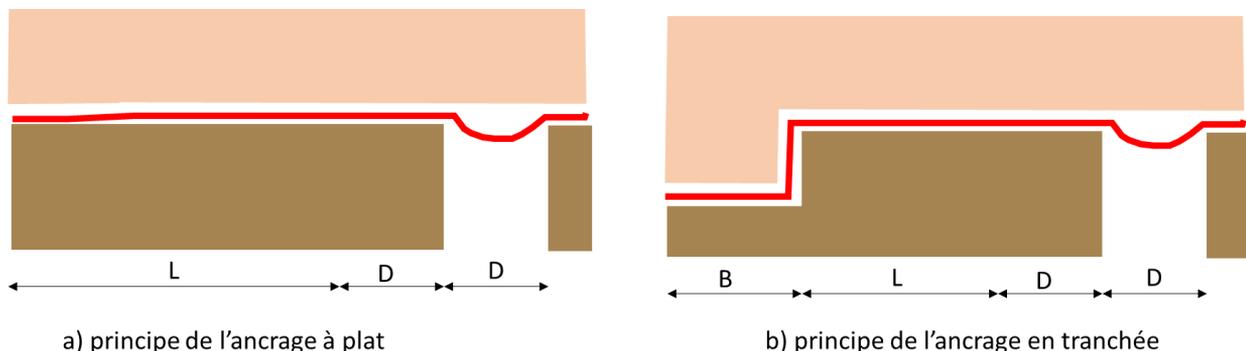
nappe est parabolique lors de sa mise en tension, ce qui conduit à considérer une répartition uniforme des contraintes verticales sur la nappe (Figure 5).

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 ciment⁴), et dont le comportement dépend des teneurs en eau, de l'épaisseur de la couche, de la surcharge en surface, à 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. *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 mobilisés sont considérés rigides et indéformables. Le poids des blocs de sol effondré et la surcharge en surface du géosynthétique sont remplacés par deux forces verticales linéiques (2P) définies par mètre de largeur de géosynthétique (Figure 5). Pour une cavité circulaire, des forces ponctuelles équivalentes, agissant sur la bande centrale du géosynthétique au-dessus de la cavité, doivent être déterminées. 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 3). 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, du foisonnement et de la forme supposée de la déformée du GSY.

5.2. Dimensionnement de l'ancrage et des recouvrements

Les efforts de traction nécessaires à la stabilité du géosynthétique sont équilibrés grâce à une mobilisation progressive des ancrages de part et d'autre de la cavité (Villard et Chareyre, 2004). Deux principes d'ancrage peuvent être proposés (Figure 8) : l'ancrage à plat ou l'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. On notera que le choix du type d'ancrage est souvent orienté par la disposition du projet, les emprises et la position de la cavité.

Dans le cas de l'ancrage à plat, la longueur d'ancrage du géosynthétique est limitée à l'emprise disponible, qui dépend de la géométrie du remblai. Le recouvrement longitudinal s'effectue dans le sens des efforts. 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).



L : Largeur d'encrage, B : Largeur de tranchée ; D : Diamètre de la cavité

Figure 8. Principes de l'ancrage à plat ou ancrage en tranchée (présentés dans l'annexe C de la norme XP G38-065)

⁴ 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

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.

6. Mise en œuvre

Dans le cadre de cette publication, nous proposons les principales étapes pour la mise en œuvre de géosynthétique au-dessus de cavité(s). Un plan de calepinage détaillé doit être proposé, celui-ci est en général finalisé avec l'entreprise en fonction du type de géosynthétique retenu pour le projet. En effet, une fois le dimensionnement finalisé, et avant de réaliser la mise en œuvre et l'installation du géosynthétique, il est impératif de préciser :

- 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.

D'autre part, 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 les deux configurations d'exécution :

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

Dans le cas où le géosynthétique est couvert par un remblai, ou encore 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 9, gauche). La deuxième configuration correspondant à une installation en profondeur (Figure 9, droite), on effectue dans ce cas un décaissement (excavation) du sol jusqu'à la profondeur souhaitée ou au niveau des terrains résistants, ou en se rapprochant de la tête de la cavité, etc. Le géosynthétique est mis en place, suivi par le remblaiement et le compactage progressif et peu énergétique de sol. 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.

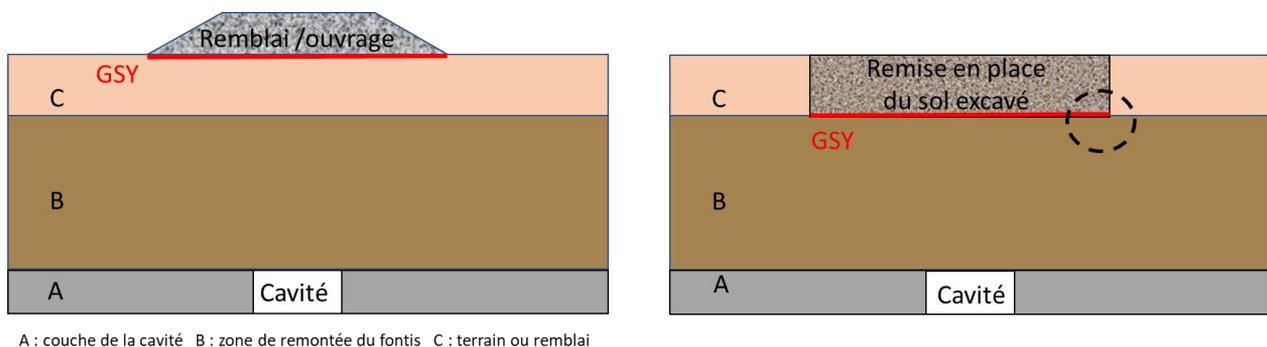


Figure 9. Étapes d'installation d'un géosynthétique en surface sous remblai ou en profondeur, Source : Ineris

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 du géosynthétique instrumenté avec les calculs établis pour le renforcement doit être impérativement vérifiée. La position des différents capteurs doit être ajustée aux positions de mesure. Les capteurs doivent être identifiés par des zones colorées sur le géosynthétique et les positions de mesures doivent être identifiées sur le chantier,
- les connections optiques du géosynthétique doivent être effectuées avec des rallonges renforcées jusqu'au boîtier de récupération de mesures,
- les fibres doivent être protégées par un géotextile non-tissé et du sable fin afin de ne pas être endommagées.

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.

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 cavités, des couches de faible épaisseur et des engins de compactage de petites dimensions et générant des vibrations d'amplitude 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, 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.

À 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.

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

7.1. Surveillance de la cavité et des terrains

La surveillance dans le cas d'un risque d'effondrement est une solution palliative, dans l'attente de travaux de mise en sécurité ou d'autres moyens de remédiation (Ineris, 2016b, Li et al., 2017). La nécessité de déploiement et l'équipement de la surveillance d'une cavité dépendent essentiellement des enjeux en surface. Parmi les méthodes de surveillance, l'inspection visuelle, à fréquence adaptée à l'évolution des désordres, est la surveillance la plus déployée pour des cas peu complexes et localisés, lorsque les cavités sont localisées et accessibles, avec des conditions de sécurité acceptables.

7.2. Surveillance à l'aide de géosynthétique instrumenté

Le géosynthétique « bi-raideur inversé » développé (Figure 10) 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). D'autre part, l'intégration de fibres optiques (Figure 10-b) permet de suivre l'évolution de la déformation du géosynthétique et de la température dans l'environnement immédiat de la cavité instable (Ferdinand, 2014). La mesure par fibre optique permet également de fournir un indicateur, par 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. 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, créant un réseau de Bragg,
- 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).

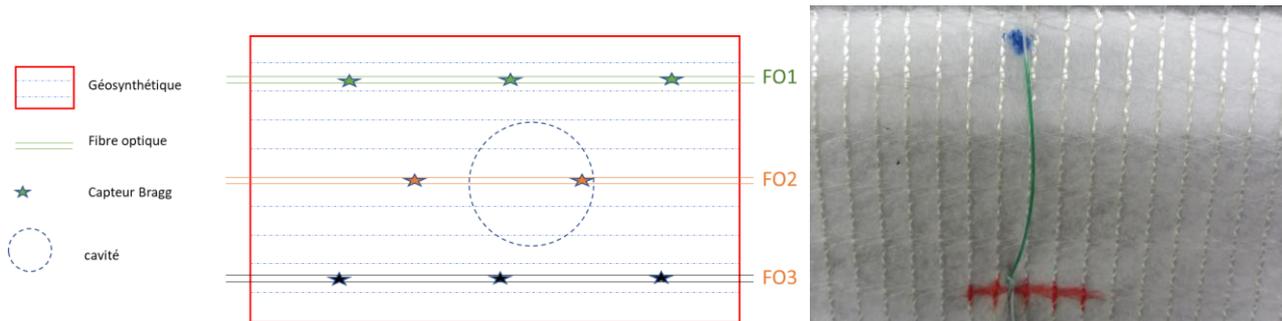


Figure 10. Géosynthétique de renforcement équipé par système de mesures par fibre optique et capteurs Bragg - Source : Ineris.

Les capteurs de réseau de Bragg sont disposés principalement au-dessus de la cavité (Figure 11). 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. Le principe de réseau de Bragg est que 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 microdéformations. Lors d'un événement (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 microdéformation positive dans le cas d'une traction, négative pour une compression.

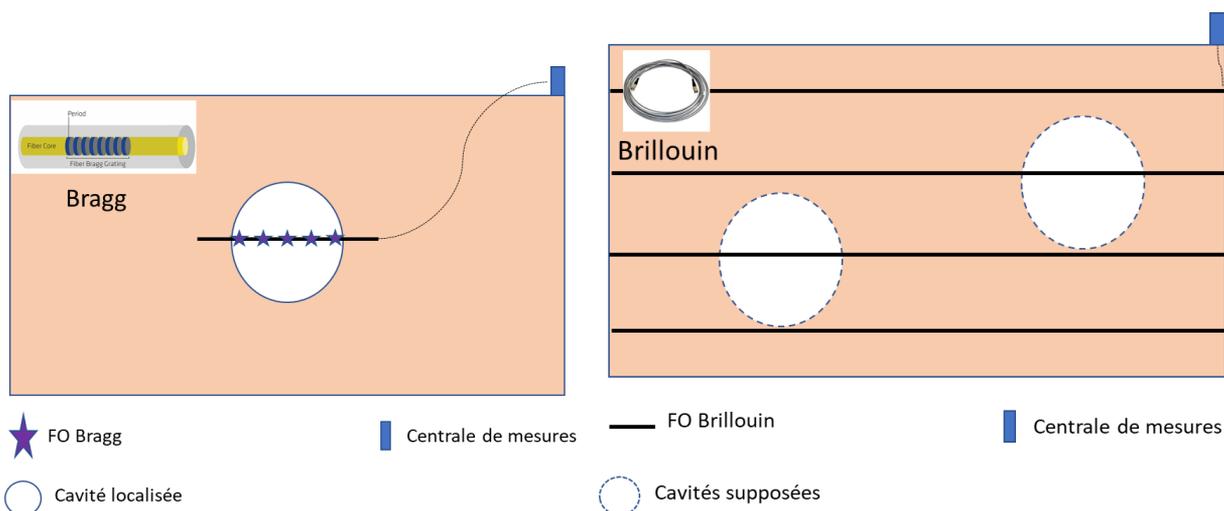


Figure 11. Schéma de principe (vue en plan) pour la surveillance d'une cavité à l'aide d'un géosynthétique instrumenté par Fibre Optique de type Bragg (a) et Brillouin (b) - Source : Ineris

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 (Figure 11). Elles peuvent aussi être utilisées lorsqu'il y a plusieurs cavités localisées. 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 1 m près) de l'évènement.

La densité des capteurs ou des lignes de mesures dépend principalement des enjeux en surface (par exemple une 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.

Le Tableau 5 présente les principales caractéristiques de mesures de déformations de géosynthétique en utilisant les trois technologies : Bragg, Brillouin et Rayleigh.

Tableau 5. 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 ($\pm\mu\text{m/m}$)	0,1	10	1
Fenêtre (%)	1-4	2	0,1
Type de cavité			
Isolée et localisée	x		
Isolée et non-localisée		x	x
Plusieurs cavités localisées	x	x	x
Plusieurs cavités non-localisées		x	x

7.3. Synthèse et conclusion

La solution de renforcement par géosynthétique de zones à risques d'effondrements localisés (fontis) est une méthode adaptée pour des cavités naturelles ou anthropiques de petit diamètre, inférieur à 4 m et exceptionnellement 5 m. Notons que dans le cas de risque d'affaissement de plus grand diamètre, si l'emploi d'un géosynthétique de renforcement 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.

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. Nous avons distingué six phases pour la réalisation d'un projet de renforcement à l'aide de géosynthétique instrumenté. Il s'agit de :

- l'avant-projet : dans cette phase, il est nécessaire de disposer des données concernant la cavité elle-même,
- la conception : dans cette phase, les données nécessaires sont celles du projet, généralement fournies par le maître d'ouvrage,
- la 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,
- le choix du produit : dans cette phase, on sélectionne le produit le plus adapté au dimensionnement,
- la 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,
- le 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. Les méthodes de dimensionnement actuelles s'appliquent à des cavités et à des terrains horizontaux.

À partir de la connaissance de l'aléa et des caractéristiques des géosynthétiques, le guide établi dans le cadre du projet REGIC fournit des recommandations pour l'utilisation de géosynthétiques en tant que système de renforcement et de surveillance au-dessus de cavités.

Tableau 6. Etapes pour le dimensionnement d'un géosynthétique – données et résultats selon la norme XP G38065

Période	Étape	Description
Avant – projet	Données de la cavité	1- Nature de la cavité : isolé ou multi cavités 2- Localisation de la cavité connue ou supposée 3- Nature des enjeux 4- Caractéristiques de la cavité à renforcer (diamètre au contact du GSY) 5- Profondeur de positionnement du géosynthétique
Dimensionnement	Données du projet	6- Déplacement maximal admissible en surface 7- Charges en surface (trafic, remblai, etc.) 8- Type et caractéristique du GSY
Calcul	Calcul et résultats	9- Calcul à la rupture (ELU) <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) 10- Calcul en déformation 11- Calcul de la charge verticale sur le géosynthétique <ul style="list-style-type: none"> a. Déduire le module à la traction du géosynthétique à long terme pour garantir le déplacement en surface b. Déterminer le module du produit en traction du géosynthétique en prenant en compte l'endommagement et l'action chimique

Choix du produit		12- Choix du type de géosynthétique par rapport aux résultats de calculs (8 et 9) 13- Dimensionnement des ancrages 14- Contrôles et vérification du calcul et du choix par un bureau d'étude agréé
Réalisation	Mise en œuvre (Contrôle et vérification)	15- Vérification du produit livré 16- Vérification de l'exécution 17- Installation un système de surveillance (option)
Suivi		18- Observation et mesures : <ul style="list-style-type: none"> a. Déformation de GSY b. Tassement en surface c. Comportement des infrastructures ou des structures 19- Circuit de décisions et gestion des interventions en cas de sinistre

8. Références

- 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, Grenoble.
- Blivet, J. C., Khay, M., Villard, P., Gourc, J. P., & others. (2000). Experiment and design of geosynthetic reinforcement to prevent localised sinkholes. In: GeoEng2000, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering 12-24 November 2000, Melbourne, Australia, pp. 1-6.
- 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). 6ème 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.
- Briançon L. and Villard P. (2008). Design of geosynthetic-reinforced platforms spanning localized sinkholes. Geotextiles and Geomembranes, 26 (2008) 416-428.
- British Standard, B. (2010). Standards Publication Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. ISBN, 940005429, 1-21.
- Cooper A.H., Calow R.C. (1998). Avoiding Gypsum Geohazards: Guidance for Planning and Construction. WC/98/5. British Geological Survey, Nottingham, UK.
- 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 10ème 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.
- 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
- 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.
- Ifstar, (2014). Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées, guide méthodologique. Ineris (2007): Collection Environment, les risques naturels. In french.
- Jaffrot S., Garcin P., Nancey A. (2009). RN 174 – renforcement par géosynthétique sur cavités. Rencontres Géosynthétiques. pp. 95-101- Nantes.
- 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.
- Le Moniteur (2015). Définition, mise en œuvre et dimensionnement des géosynthétiques. N°5811 www.lemoniteur.fr.
- Le Plan National Cavités pour la prévention des risques d'effondrements de cavités souterraines. 2014-DGPR.
- Li X., Xiao S., Tang H., Peng J. (2017). A GIS-based monitoring and early warning system for cover-collapse sinkholes in karst terrane in Wuhan, China. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., doi:10.5194/nhess-2017-22, 2017.
- 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>
- 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, 12ème 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.
- 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. 9èmes Rencontres Géosynthétiques. Dijon. pp. 123-129.
- Salvati R., Sasowsky IR. (2002). Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge. J. of Hydro, 264:1-11.
- Thornbush MJ, (2017). Part 1: Contemporary Challenges and Current Solutions in Sinkhole Occurrence and Mitigation. J Geol Geophys 2017, 6:3.
- Terzaghi K. (1943). Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons, New York.
- 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.
- Zaghouni 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