

SYSTÈME D'AUSCULTATION ET D'ALERTE PAR UN GÉOSYNTHÉTIQUE BI-RAIDEUR POUR LE RENFORCEMENT DE SOLS COHÉSIFS SUR CAVITÉS

AUSCULTATION AND WARNING SYSTEM OF COHESIVE SOILS OVER CAVITIES BY THE USE OF DOUBLE-STIFFNESS GEOSYNTHETIC REINFORCEMENT

Mathilde RIOT¹, Thomas MONNET¹, Cyrille BALLAND², Marwan AL HEIB², Philippe DELMAS³, Fabrice EMERIAULT⁴, Pascal VILLARD⁴, Laurent BRIANCON⁵

1 AFITEXINOV, 28300 Champhol, France.

2 INERIS, 54042 Nancy, France.

3 Expert géotechnicien, 75000 Paris, France.

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

5 INSA Lyon, Laboratoire GEOMAS, 69621 Villeurbanne, France.

RÉSUMÉ – L'utilisation de géosynthétiques de renforcement pour prévenir les effondrements localisés sur cavités est aujourd'hui relativement courante. La communication présente une solution de surveillance développée dans le cadre du projet de recherche REGIC (REnforcement par Géosynthétique Intelligent sur Cavités naturelles ou anthropiques). Celle-ci est basée sur un géosynthétique instrumenté bi-raideur innovant et son système d'acquisition autonome intégré, spécialement conçu pour l'utilisation par un non spécialiste. Adaptée à la réduction et la gestion du risque d'effondrement localisé, elle permet la détection précoce du développement du phénomène d'effondrement.

Mots-clés : Auscultation, alerte, renforcement, géosynthétique, cohésif, cavité.

ABSTRACT – The use of reinforcement geosynthetics to prevent localized collapses over cavities is now relatively common. The communication presents a monitoring solution which has been developed as part of the REGIC research project (Reinforcement using Intelligent Geosynthetic over Natural or Anthropogenic Cavities). It is based on an innovative double-stiffness instrumented geosynthetic and its integrated autonomous acquisition system, specially designed for use by non-specialist. It is adapted to the mitigation and management of the risk of localized collapse and allows the early detection of the development of the phenomenon of collapse.

Keywords: Auscultation, alert, reinforcement, geosynthetic, cohesive, cavity.

1. Introduction

L'utilisation de nappes géosynthétiques de renforcement pour prévenir les effondrements dans les zones à risque de cavités, localisées ou non, est aujourd'hui relativement courante. De nombreuses études expérimentales et numériques ont permis de comprendre le comportement de ces structures renforcées ainsi que celui des géosynthétiques ; on peut citer par exemple les projets Rafael (Villard et al. 2002) ou Geolnov (Delmas et al., 2015). L'ensemble de ces études a permis, entre autres, la publication de la norme française sur la conception et le dimensionnement du renforcement par géosynthétiques de la base de remblais sur zones à risques d'effondrements (XP G38065, 2020) dans le cas des remblais en sol pulvérulent.

Récemment le projet de recherche sur le Renforcement par Géosynthétique Intelligent sur Cavités naturelles ou anthropiques a abordé l'utilisation de sols cohérents en remblai renforcé par géosynthétiques au-dessus de cavités (Delli Carpini et al., 2021). D'autre part, il a permis la conception et le développement d'un système de suivi spécifique au renforcement par géosynthétiques au-dessus de cavités.

Ce dernier est constitué d'un module de détection, d'auscultation et d'alerte spécifique associé à un géosynthétique de conception innovante permettant de détecter et de mesurer les déformations dues à l'évolution de cavités souterraines. Ce système complet qui intègre à la fois les capteurs, le géosynthétique et le système de suivi sera dénommé dans la suite système de « géo-auscultation » ; en détectant de très faibles déformations, il permet une surveillance assurant une détection précoce de l'effondrement. Il peut ensuite assurer le suivi de l'ouvrage qui peut se prolonger jusqu'à la fin de la durée de service, tout en maintenant un haut degré de sécurité de la structure.

2. Contexte et bases de la conception du système d'auscultation et d'alerte sur cavités

2.1. Dégradations liées aux cavités et emploi de géosynthétiques

La conception d'un système opérationnel d'auscultation et d'alerte associé au renforcement par géosynthétique des zones à risque de cavités naturelles ou anthropiques, doit prendre en compte les différentes possibilités d'évolution des cavités. En effet, les cavités naturelles et/ou anthropiques évoluent avec le temps et se dégradent en fonction de conditions intrinsèques au massif et de facteurs extérieurs.

Les vides souterrains peuvent ainsi s'effondrer progressivement ou brutalement en fonction de la configuration du vide et de la nature du sol sus-jacent. Ils produisent différents mouvements de terrain plus ou moins prévisibles en surface qui endommagent les structures situées dans la zone de mouvement. On peut distinguer principalement (Al Heib et al. 2021) :

- les affaissements, dépression continue du sol au-dessus de la cavité qui entraîne une déformation progressive des terrains sans rupture franche ; l'extension et l'amplitude de la cuvette sont liées aux dimensions de la cavité, à sa profondeur et à la qualité de foisonnement des terrains du recouvrement ; l'extension des affaissements peut atteindre plusieurs dizaines de mètres, voire plus, pour des amplitudes qui peuvent devenir métriques ;
- les effondrements localisés ou fontis qui s'observent 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) ; la taille et la forme de ces derniers varient suivant la configuration; ainsi par exemple, les auteurs montrent que pour des carrières de gypse et calcaire grossier de la région parisienne, près de 90% des cavités ont un diamètre inférieur à 5 m.

Le renforcement par géosynthétique est une solution reconnue pour traiter les effondrements localisés (fontis) de petit diamètre inférieur à 4 m et exceptionnellement 5 m que ce soit pour des cavités naturelles ou anthropiques. En revanche, dans le cas de risque d'affaissement de plus grand diamètre, l'emploi d'un géosynthétique de renfort ne peut être motivé compte tenu des très faibles déformations engendrées sur le géosynthétique, et donc de la très faible mobilisation d'effort possible dans ce dernier. Cependant, l'utilisation d'un géosynthétique instrumenté associé au système de surveillance adéquat peut s'avérer une solution intéressante pour détecter, voire surveiller une remontée de la cavité qui engendre l'affaissement.

2.2. Comportement des ouvrages renforcés par géosynthétiques sur cavités

Le principe de fonctionnement d'une structure renforcée par géosynthétique lors de la remontée d'une cavité au niveau du terrain naturel puis lorsque la cavité s'ouvre sous le géosynthétique, a été présentée dans la norme XP G38065 ; on peut ainsi décrire le phasage dans le temps des efforts dans le géosynthétique et celui des déplacements de la structure. Suivant le même principe, il est possible d'analyser le fonctionnement de la même structure dans le temps, en intégrant l'évolution des déformations en vue de faciliter la conception d'un système de détection, d'auscultation et d'alerte lié au géosynthétique.

Par souci de simplification dans la suite de ce paragraphe, on considèrera les mêmes hypothèses que dans la norme (sol de remblai pulvérulent et foisonnant, cavité cylindrique, ouverture de la cavité au niveau du terrain naturel progressive dans le temps).

A titre d'exemple une hypothèse simplifiée de l'évolution de la cavité a été prise en compte : remontée puis ouverture progressive. Cette démarche vise uniquement à montrer comment il est possible de définir les paramètres nécessaires à la conception du système de détection, d'auscultation et d'alerte lié au géosynthétique. On supposera que les hypothèses de dimensionnement sont vérifiées jusqu'à la fin de durée de service de l'ouvrage et que le dimensionnement du renforcement est correct. En revanche pour l'exercice, on supposera que l'utilisation de l'ouvrage est poursuivie au-delà de la durée de service et que pendant cette prolongation on assiste à une reprise de l'ouverture de la cavité. Plusieurs périodes de temps sont distinguées : la période (I) correspond à la phase de mise en place du géosynthétique sur le terrain naturel et à la construction d'un remblai ; pendant la période (II) la cavité remonte progressivement en surface et un affaissement se produit ; la période (III) correspond à l'ouverture de la cavité jusqu'à la dimension nominale au niveau du géosynthétique, soit la plage de mesure de déformation du géosynthétique ; en période (IV) la cavité qui a atteint son diamètre nominal

reste inchangée jusqu'à la fin de la durée de service de l'ouvrage avant une reprise de l'ouverture progressive (période V).

La figure 1 montre un exemple d'évolution possible de la déformation horizontale maximale du sol au niveau du TN lors de la remontée de la cavité, supposée linéaire dans le temps. L'estimation de cette évolution de la déformation a été réalisée à partir de valeurs obtenues par la méthode empirique de NCB (Al Heib et al. 2021) qui prend en compte la profondeur de la cavité (P), l'affaissement maximal du sol au niveau du TN (pris ici égal au maximum à 1 cm) et d'un coefficient empirique k, fonction de la nature du terrain de recouvrement, pris ici égal à 1 (hypothèse majorante).

L'absence de glissement entre le géosynthétique et le sol est hypothèse réaliste compte tenu des faibles niveaux de déformation observés. Il est alors possible de préciser l'ordre de grandeur de la déformation minimale à mesurer pour permettre la détection précoce de la présence d'une cavité. Cela fournit un critère important pour la conception adéquate du géosynthétique instrumenté. On notera l'absence de tassement en surface de remblai sur toute cette période qui empêche toute détection de la cavité à partir d'une mesure de surface.

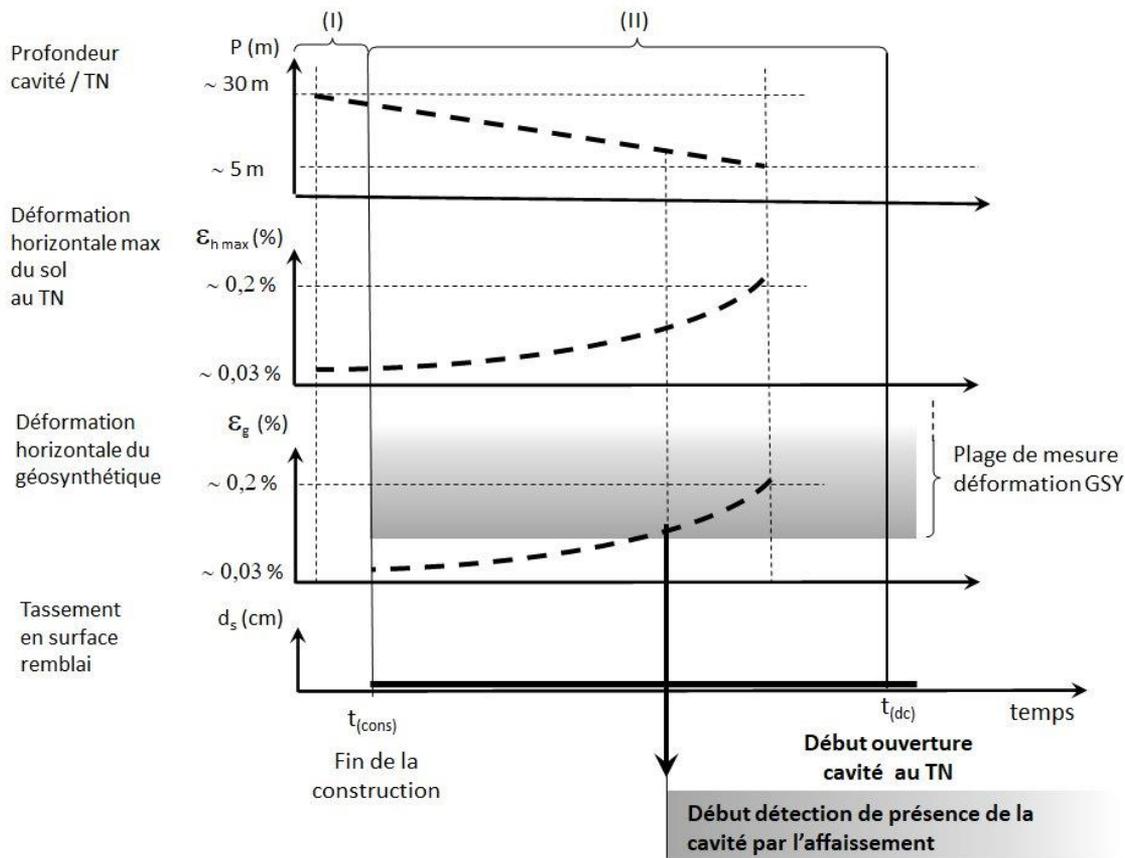


Figure 1. Schéma de principe de l'évolution des déformations horizontales (sol & géosynthétique) et du tassement de surface du remblai lors de la remontée de cavité avant son ouverture au niveau du TN.

La figure 2 montre la suite de l'évolution des déformations et des déplacements lorsque la cavité est remontée au niveau du géosynthétique et s'ouvre progressivement jusqu'à l'ouverture nominale prévue dans le dimensionnement. Normalement cette ouverture nominale est censée être inférieure ou égale au diamètre maximum que peut atteindre la cavité jusqu'à la fin de la durée de service de l'ouvrage. Toutefois pour l'exposé on considèrera, à titre d'exemple, qu'après une certaine période de temps où le diamètre de la cavité n'évolue plus, celui-ci recommence à s'élargir (phase V).

Les méthodes de dimensionnement (XP G38065), voire les outils de modélisation (Villard et al., 2017), permettent d'évaluer l'évolution des déformations du géosynthétique ainsi que celle du tassement observé en tête de remblai au cours des différentes phases (III, IV et V). Si le géosynthétique est instrumenté et sa déformation mesurée, il est possible d'en déduire le diamètre de la cavité et de vérifier le niveau de sécurité de l'ouvrage dans le temps. On remarque cependant qu'au-delà du seuil maximum de mesure du géosynthétique instrumenté (limite des capteurs), le suivi de l'ouvrage ne peut être poursuivi par cette technique. Ceci correspond à un second critère de la conception du système de suivi

par géosynthétique instrumenté. On notera cependant que dans cette phase V, le tassement en surface de remblai est relativement important et permet, le cas échéant, de poursuivre le suivi et la surveillance de l'ouvrage à partir de mesures de surface.

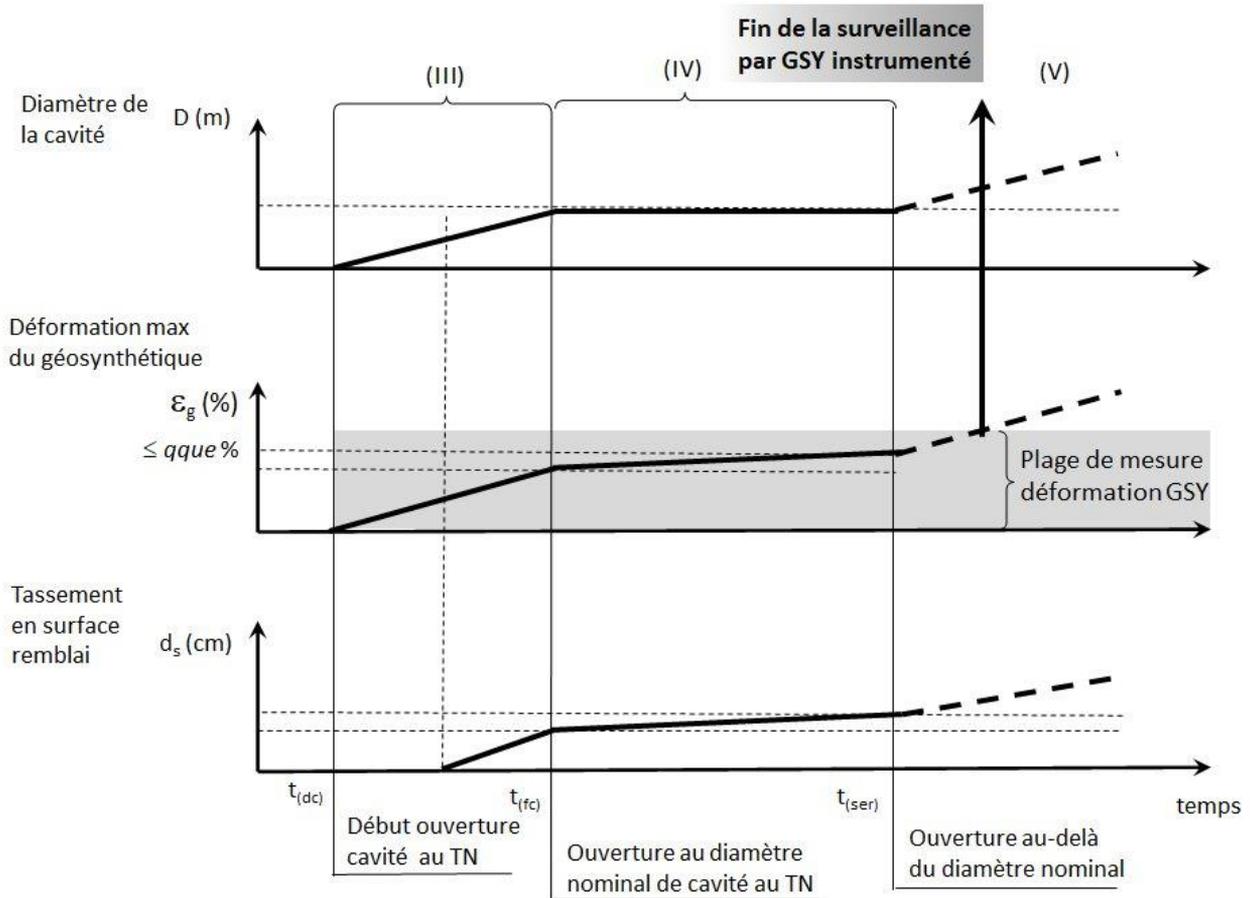


Figure 2. Schéma de principe de l'évolution des déformations du géosynthétique et du tassement de surface du remblai lorsque la cavité s'ouvre au niveau du TN jusqu'à atteindre le diamètre nominal, puis, après une période sans évolution, que l'ouverture progressive reprend.

Évidemment, d'autres analyses avec des hypothèses différentes peuvent être envisagées et étudiées : formes de la cavité, types et vitesses d'évolution des phénomènes, types de sols, géométrie de l'ouvrage, etc. Outre le dimensionnement proprement dit du renforcement par géosynthétique, elles permettront d'affiner l'étude et la conception du système de détection, de surveillance et d'alerte.

2.3. Illustration de la démarche de conception de la « géo-auscultation » pour les zones à risque de cavités traitées par renforcement géosynthétique

Comme cela a pu être aperçu dans le paragraphe 2.2, la conception d'un système de détection, d'auscultation et d'alerte (appelé dans la suite « système de suivi ») associé au renforcement par géosynthétique nécessite une démarche spécifique qui complète la simple approche de dimensionnement du géosynthétique de renforcement. On pourra retenir que le « système de suivi » et le renforcement par géosynthétiques sont intimement liés et doivent être conçus conjointement pour permettre une bonne optimisation.

La conception de la solution commence par l'évaluation et la caractérisation du type d'effondrement potentiel auquel le site est confronté. Cela suppose de préciser si la localisation de la cavité est connue ou non, s'il y a risque d'affaissement, avec ou non remontée de cavité, voire de fontis et enfin d'évaluer la taille et la forme de l'affaissement, ou du fontis en cas de remontée, et de définir la taille nominale de la cavité.

Une fois ces paramètres connus et l'étude géotechnique du site finalisée, il reviendra au Maître d'Ouvrage (éventuellement Maître d'Œuvre) de choisir les objectifs temporels de la solution de renforcement instrumenté de l'infrastructure :

- soit un « renfort temporaire par géosynthétique instrumenté » en prévoyant un traitement définitif à court terme après détection de la remontée de la cavité ;
- soit un « renfort à long terme par géosynthétique instrumenté » : avec un dimensionnement du renforcement à long terme (en général 100 ans) associé à un « système de suivi » de l'évolution de la cavité approprié pour permettre le maintien de l'exploitation de l'ouvrage grâce à la maîtrise de l'affaissement maximum admissible en surface.

Ces objectifs précisés, il est alors possible de procéder à la conception et au dimensionnement du géosynthétique instrumenté. Celui-ci devra répondre aux exigences de stabilité de l'infrastructure : stabilité mécanique, affaissement maximum admissible en surface (XP G38065) ainsi qu'aux exigences du système de suivi envisagé.

2.4. Proposition d'un système de « géo-auscultation » innovant associant le système de suivi et le renforcement

Il convient de noter que les critères liés à la conception du système de suivi de l'ouvrage, en particulier ceux liés à la détection en cas d'affaissement, peuvent interférer avec le choix du géosynthétique de renforcement.

En effet l'exigence de détecter de manière précoce les affaissements, voire la présence de la cavité sous le géosynthétique au tout début de son ouverture, suppose que le géosynthétique instrumenté puisse se déformer sous de très faibles sollicitations en traction, ce qui est très souvent antagoniste avec le choix d'une raideur élevée (voire très élevée) pour répondre aux exigences de dimensionnement du renfort (faibles déformations à long terme). En effet, même si les niveaux de précision de mesures des géosynthétiques instrumentés par fibres optiques utilisés sont élevés, ils restent souvent peu propices à la détection précoce des affaissements lors de la remontée de cavité.

Pour répondre à cet antagonisme, le projet a développé un procédé de renforcement novateur breveté construit sur la base d'un géosynthétique « bi-raideur inversée » qui assure à la nappe de renforcement deux raideurs en traction qui s'activent l'une après l'autre, la première étant plus faible que la seconde (contrairement au « bi-raideur » pour lequel la première est plus élevée que la seconde). Associé à un dispositif d'alerte adapté, ce nouveau type de géosynthétique « bi-raideur inversée » (Figure 3) permet de détecter de faibles déformations du sol (grâce à sa première raideur plus faible du géosynthétique) tout en garantissant le même niveau de sécurité final qu'apporterait un géosynthétique avec une seule raideur (la deuxième raideur plus importante après le seuil de déformation nécessaire à la détection des mouvements assurant ce rôle).



Figure 3. Géosynthétique « bi-raideur inversée » avec les deux raideurs en traction.

3. Détection, auscultation et alerte des ouvrages sur cavité par géosynthétique instrumenté par système de « géo-auscultation »

Une fois l'étude préliminaire du site réalisée, avec la définition du type de cavité, de sa localisation éventuelle ou non, du type de désordres attendus, de leur extension en surface et de leurs vitesses, il est possible de finaliser la conception de la solution.

Celle-ci doit prendre en compte les objectifs temporels du Maître d'Ouvrage (paragraphe 2.3), renfort temporaire, ou à long terme, par le géosynthétique instrumenté. Afin de finaliser le cahier des charges du système de suivi associé, il est judicieux de suivre le cheminement suivant :

- a. Évaluation du type d'effondrement :
pour être détecté et suivi, un affaissement, tout comme l'ouverture très progressive d'un fontis, pourra nécessiter un géosynthétique spécifique permettant des mesures de déformation très faibles (par ex. « bi-raideur inversée »), alors qu'un fontis avec ouverture brutale sera moins exigeant ; la vitesse et l'amplitude des déformations attendues seront aussi nécessaires pour définir le type et la fréquence des mesures ainsi que le système de traitement et d'alerte.
- b. Localisation spatiale de l'effondrement dans la géométrie de l'ouvrage d'infrastructure :
l'extension de la zone à traiter aura une incidence primordiale sur le choix du type de fibre optique qui sera différent suivant que l'on souhaite surveiller une zone où la cavité est localisée, comme une catiche, ou une infrastructure linéaire de transport où les cavités potentielles ne sont pas localisées ; de même, l'extension en surface des affaissements, ou des fontis, que l'on souhaite détecter, influera sur le calepinage et l'espacement des fibres optiques.
- c. Choix de la technologie de fibre optique adaptée à l'ouvrage :
il découle directement des points précédents et les types de fibres optiques sont présentés en 3.1.
- d. Choix du produit géosynthétique adapté à la technologie de fibre optique choisie et au type d'effondrement :
il découle des points précédents a et b.
- e. Choix du système d'auscultation (détection/acquisition) adapté au type d'infrastructure, au géosynthétique choisi et au type d'effondrement :
il dépend évidemment de la technologie de fibre optique choisie, mais aussi du type d'auscultation et d'alerte envisagé ; un système intégré permettant le paramétrage simple des différentes options d'auscultation, d'acquisition et d'alerte pour le suivi des cavités est présenté en 3.2.

3.1. Capteurs à fibre optique utilisés dans la surveillance des cavités

On distingue les capteurs à mesures réparties (continues), Brillouin ou Rayleigh, pour lesquelles la mesure est faite par analyse fréquentielle du signal rétro diffusé et les capteurs à mesures distribuées (locales), réseaux de Bragg où la mesure est faite sur la longueur réfléchi par le réseau de Bragg. On notera que les fibres optiques sont sensibles simultanément à la température et à la déformation, quelle que soit la technologie employée. Pour obtenir la déformation, on associe donc systématiquement aux capteurs une fibre non soumise à déformation et placée à la même profondeur que le géosynthétique pour mesurer la température et permettre les corrections de mesures.

3.1.1. Technologie Brillouin

Les figures 4 et 5 présentent les schémas de principe des capteurs et du système de mesure de la technologie Brillouin. Les caractéristiques de la fibre en font une fibre particulièrement adaptée à la détection, l'auscultation et la surveillance d'infrastructures où l'existence (ou la présomption) de cavités est connue même si celles-ci ne sont pas localisées. En raison de sa portée, elle convient particulièrement aux infrastructures linéaires de grandes dimensions. Elle peut cependant être aussi utilisée pour les ouvrages plus ponctuels.

3.1.2. Technologie Rayleigh

Bien que moins utilisée dans les ouvrages réels que la technologie Brillouin, cette technologie peut être utilisée pour la détection, l'auscultation et la surveillance d'infrastructures en la limitant, en raison de sa faible portée, aux cas où la localisation de la cavité est connue ou pour des infrastructures de dimensions réduites (Figure 5).

3.1.3. Technologie à réseau de Bragg

Le principe de fonctionnement des réseaux de Bragg ainsi que système associé avec analyseur sont présentés figures 6 et 7. On notera (Figure 6) que sous l'effet de la déformation de la fibre, la longueur d'onde réfléchi par le réseau de Bragg λ_{B3} varie de manière proportionnelle à la déformation et passe par exemple d'orange à orange foncé. Ceci implique que les longueurs d'onde de chaque capteur doivent être choisies de manière suffisamment espacée pour éviter qu'elles ne se chevauchent lors des déformations que la fibre va subir. Il s'ensuit que le nombre de capteurs le long d'une même fibre optique est limité en général à une petite dizaine. Ces caractéristiques en font une fibre particulièrement adaptée à la détection, l'auscultation et la surveillance d'infrastructures où la localisation de la cavité est connue ou de structures « ponctuelles » (de dimensions réduites). L'augmentation de la taille de la zone auscultée est cependant possible en multipliant les lignes de fibre optique.

Une comparaison des caractéristiques techniques est présentée dans le tableau 1. Il synthétise à la fois les caractéristiques de résolution qui dépendent de la fibre et de l'analyseur (résolution spatiale, précision de la mesure, temps d'acquisition et portée) et les caractéristiques mécaniques de la fibre optique (allongement à la rupture et allongement maximum de la mesure). Economiquement on notera que si les fibres optiques reviennent à une dizaine d'euros le mètre pour les systèmes à diffusion Brillouin ou Rayleigh, elles coûtent plus de six fois plus chères équipées de réseaux de Bragg. A contrario l'analyseur pour réseaux de Bragg est environ sept fois moins cher que les analyseurs Brillouin ou Rayleigh.

Tableau 1. Comparaison des caractéristiques techniques des capteurs à fibre optique utilisés dans la surveillance des cavités

Caractéristiques	Diffusion Brillouin	Diffusion Rayleigh	Réseaux de Bragg
Résolution spatiale	1 m	1 m	8 mm et distance entre réseaux
Précision de la mesure	10 $\mu\epsilon$	1 $\mu\epsilon$	1 $\mu\epsilon$
Temps d'acquisition	10 min	1 ms	1 ms
Portée	30 km	70 m	50 km
Allongement à la rupture	5 %	(-)	5 %
Allongement maximum de mesure	3 %	(-)	3 %

En conclusion, on perçoit ainsi comment, suivant les mécanismes en jeu, les objectifs de traitement et le type de surveillance envisagé (Figures 1 & 2 du paragraphe 2.2), le concepteur dispose, en fonction de ses objectifs et des moyens à disposition, d'une gamme complète de solutions grâce aux possibilités de choix de différentes technologies de fibre optique associées, éventuellement si nécessaire, à un géosynthétique de renforcement à « raideur inversée » pour permettre une détection précoce.



Figure 4. Schéma de principe des capteurs à diffusion Brillouin le long d'une fibre optique.

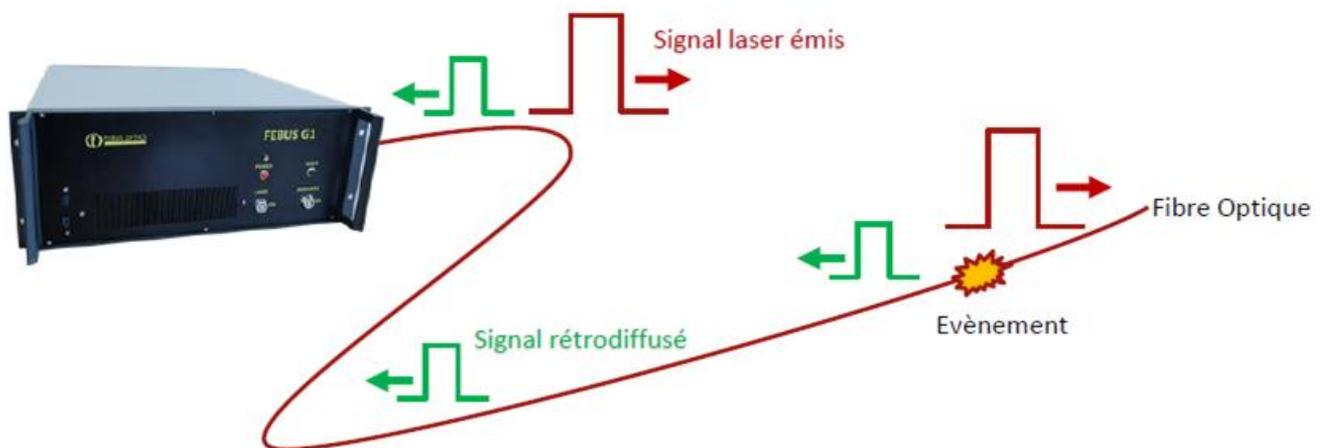


Figure 5. Principe de fonctionnement des fibres à mesure répartie Brillouin ou Rayleigh.

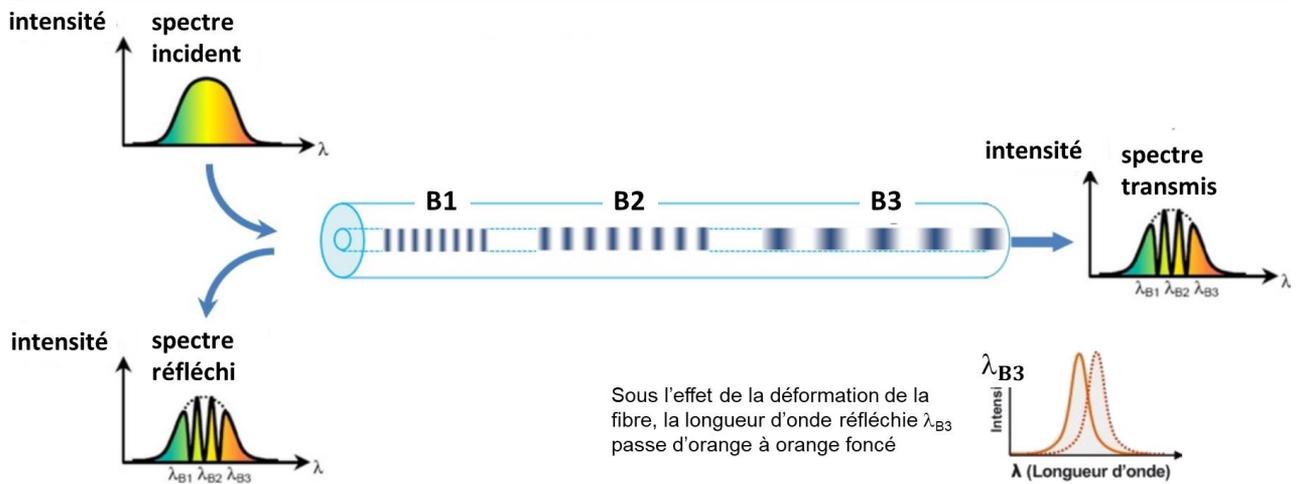


Figure 6. Principe de fonctionnement des fibres à réseaux de Bragg : exemple d'une fibre à 3 réseaux de Bragg ; la longueur d'onde réfléchie par le réseau varie selon la déformation (la température, etc.) ; par exemple pour le réseau de Bragg 3 la longueur d'onde réfléchie λ_{B3} passe d'orange à orange foncé.

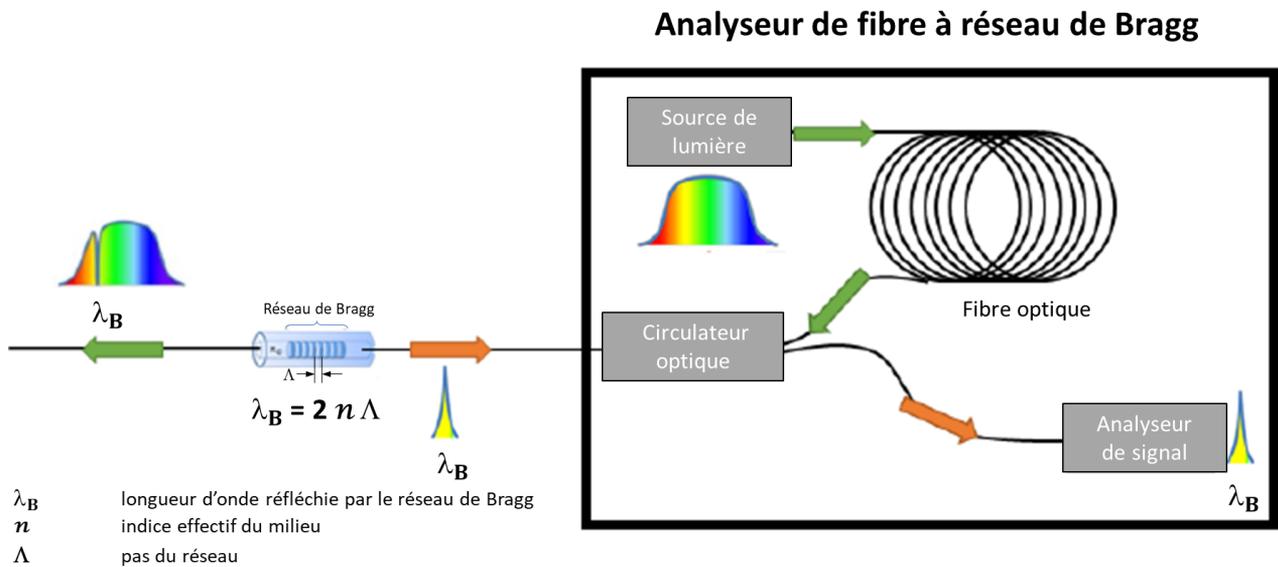


Figure 7 Principe de fonctionnement du système à réseaux de Bragg avec analyseur.

4. Système de suivi

Une fois la technologie de capteur à fibre optique, le type de géosynthétique et le calepinage précisés, il convient de concevoir le système de suivi approprié pour acquérir les mesures des capteurs, les traiter les comparer aux seuils définis et le cas échéant déclencher des alertes, voire des alarmes.

Le système de suivi devra évidemment pouvoir se connecter au réseau de capteurs à fibres optiques du site via un multiplexeur optique par exemple.

Il permettra :

- a. de réaliser l'acquisition des données (mesures brutes) :
 - soit en acquisition périodique (avec sauvegarde manuelle par la passage d'un technicien) ;
 - soit en acquisition continue avec échantillonnage des données, filtrage et transfert pour traitement ; en parallèle un contrôle de fonctionnement est réalisé avec alarme automatique.
- b. de traiter les données de manière préliminaire avec concaténation des fichiers, correction instrumentale, calcul d'amplitude ; cette phase permet de différencier les anomalies non qualifiées (divers) des anomalies qualifiées (mouvements du géosynthétique) ;

- c. les données correspondant à des anomalies qualifiées (mouvements du géosynthétique) font alors l'objet d'un traitement avancé :
localisation, extension des mouvements, dépassement de seuils, etc.
ce traitement permet de déclencher le cas échéant :
- d. des alertes au Maître d'Ouvrage avec rapport d'anomalie qui pourra entraîner ;
un changement de mode de surveillance, une intervention sur site, etc.

En parallèle le système devra prévoir le stockage du catalogue des anomalies détectées, des rapports et graphiques de surveillance ainsi que des rapports de maintenance et d'évolution des équipements.

Afin de faciliter l'utilisation de cette nouvelle technologie de « géo-auscultation » qui peut sembler relativement sophistiquée pour les néophytes, AfiteXinov a développé et mis au point le système de suivi intégré dénommé PREDITECT® présenté sur les figures 8 & 9.



Figure 8. Principe de fonctionnement de la chaîne de mesure et de surveillance du système de suivi intégré.

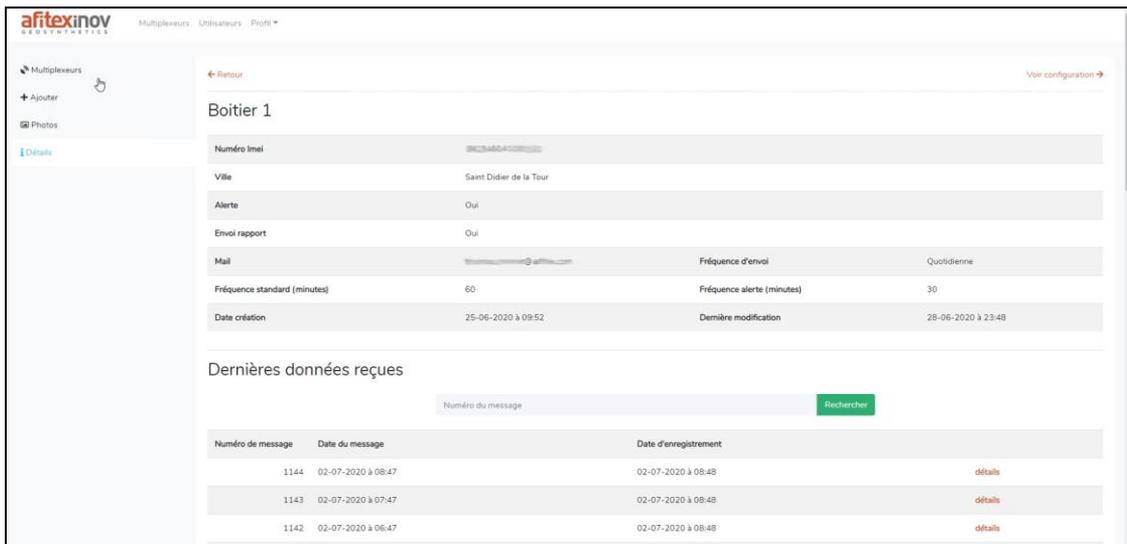


Figure 9. Exemple de vue de l'écran de contrôle du serveur du système de suivi intégré.

Dans sa version actuelle, celui-ci répond aux exigences ci-dessus dans le cas d'ouvrages suivis par capteurs à réseaux de Bragg. Doté d'un multiplexeur 16 voies, il permet de suivre 128 réseaux de Bragg. Son boîtier in situ permet de réaliser l'acquisition des données en continu et assure leur transfert vers un serveur distant spécifique. Son panneau solaire associé garantit une autonomie minimum de 6 mois.

Sur le serveur distant, le « système de suivi intégré » assure tous les traitements préliminaires et avancés et permet le cas échéant de déclencher des alertes paramétrables par le Maître d'Ouvrage.

Une fois le boîtier connecté sur le chantier, les mesures peuvent être effectuées soit sur place, en se connectant à l'aide d'un ordinateur soit à distance en paramétrant l'ensemble des données sur la plateforme numérique.

5. Conclusions

L'utilisation de nappes géosynthétiques de renforcement pour prévenir les effondrements localisés des cavités est aujourd'hui courante et il était important d'apporter à cette technique un système de mesures, de détection, d'auscultation et d'alerte fiable.

Ce développement, dans le cadre du projet de recherche sur le Renforcement par Géosynthétique Intelligent sur Cavités naturelles ou anthropiques, a permis, entre autres, la mise au point de la nouvelle technologie de « géo-auscultation » qui est supportée par son système de suivi intégré spécifique. Le développement d'un géosynthétique innovant bi-raideur inversé a permis d'élargir la plage de mesure vers les très faibles déformations autorisant la détection précoce des affaissements au-dessus de cavités.

Le système de suivi intégré, mis au point dans ce cadre, adapté spécifiquement à la problématique des suivis de déformations dans les zones à risque d'effondrement, offre aux Maîtres d'Ouvrages un outil facile d'emploi et aisément paramétrable en fonction des objectifs de surveillances visés.

6. Remerciements

Les partenaires du projet REGIC tiennent à remercier le Pôle de Compétitivité Techtera pour sa labellisation et l'Ademe pour son financement dans le cadre de l'appel à projets PIA « Route du futur ».

7. Références bibliographiques

- Al Heib M., Delmas Ph., Riot M., Emeriault F., Villard P. (2021). Recommandations pour l'utilisation de géosynthétique de renforcement dans la mitigation du risque d'effondrement localisé, *à paraître*.
- Delli Carpini M., Emeriault F., Villard P., Riot M., Briançon L., Delmas Ph., Al Heib M. (2021). Utilisation d'un géosynthétique à double raiseur pour le renforcement de sremblais cohésifs sur cavités. *CFG, 13^{ème} Rencontres Géosynthétiques, Saint-Malo, à paraître*.
- 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, *CFG, 10^{ème} Rencontres Géosynthétiques, La Rochelle*, pp 13-34.
- Villard P., Briançon L., Huckert A., Delmas Ph., (2017). Conséquences du mode d'effondrement sur les mécanismes de transfert de charge et sur le dimensionnement des géotextiles sur les cavités potentielles, *Rev. Fr. Geotech.*, (152.2), p. 15.
- Villard P., Gourc, J.-P., Blivet J.-C., (2002). Prévention des risques d'effondrement de surface liés à la présence de cavités souterraines : une solution de renforcement par géosynthétique des remblais routiers et ferroviaires, *Rev. Fr. Geotech.*, (99), pp. 23–34.
- XP G38065, (2020). Géosynthétiques – Géotextiles et produits apparentés, Renforcement de la base de remblais sur zones à risques d'effondrements, Justification du dimensionnement et éléments de conception, *Afnor*, p. 37.