

TRAITEMENT DE CAVITÉS KARSTIQUES PAR COMBLEMENT CONFINÉ DANS DES GÉOSYNTHÉTIQUES

KARSTIC CAVE'S PARTIAL FILLING WITH CONCRETE CONFINED IN GEOSYNTHETICS

Sylvain GARDET¹, Frédéric CLEMENT¹, Gilles LACASSY²

¹ Cerema/DTerSO, BORDEAUX, France

² DIRA/SIEER, BORDEAUX, France

RÉSUMÉ – En 2004, une cavité karstique a été découverte sous une chaussée à 2 × 2 voies sous circulation. Cette cavité, visitable par spéléologie, montre actuellement 1 000 m de développement dans des calcaires à silex très altérés. Les vides, dont plusieurs ont des volumes supérieurs à 100 m³, sont situés entre 4 et 10 m de profondeur sous la chaussée. Une opération innovante de comblement partiel a été menée avec succès en 2013. Ce dispositif vise, sans intervention de travailleurs dans la cavité, à réduire les conséquences en surface d'un événement brutal, tout en répondant aux contraintes environnementales, notamment de préservation de la ressource en eau.

Mots-clés : karst, comblement, géosynthétique, eau souterraine, forage.

ABSTRACT – In 2004, a karstic cave has been discovered under a main road. Speleologists have already inspected 1 000 m of this cavity that is developed in very altered calcareous rocks with silex. Several caves more voluminous than 100 m³ are situated between 4 and 10 m under the road. An innovative work that consists in a cave's partial filling has been managed with success in 2013. This operation aims to reduce the consequences for the road of a brutal collapse. It also meets the environmental expectations in particular for water resource's protection.

Keywords: karst, filling, geosynthetic, groundwater, drilling.

1. Introduction

Afin de limiter les conséquences en cas d'effondrement d'une cavité naturelle sous-jacente et l'affaissement d'une chaussée, le laboratoire de Bordeaux du Cerema a proposé le montage technique et assuré le suivi d'une opération innovante de renforcement de cette cavité.

Ce procédé spécifique baptisé "Cavibag", s'il vise à réduire les conséquences en surface d'un effondrement brutal, s'adapte dans le même temps aux contraintes particulières du site à traiter : nappe souterraine vulnérable, accès difficile et vides hétérogènes. Un comblement classique s'avèrerait impossible du fait des volumes particulièrement importants.

Cette communication présente la méthode de renforcement mise en place, le déroulement des travaux ainsi que le bilan géotechnique pour une opération test réalisée en octobre 2013 par l'entreprise TEMSOL, sous la maîtrise d'ouvrage de la DREAL Poitou-Charentes et sous la maîtrise d'œuvre de la DIR-Atlantique.

2. Contexte général et présentation du site

Les cavités souterraines d'origine karstique constituent une contribution importante à l'aléa effondrement de terrains, dans les régions où l'histoire géologique a favorisé leur formation. Bien qu'invisibles généralement, elles constituent notamment un élément du paysage à prendre en compte dans la sécurité des aménagements et des infrastructures.

Dans ce contexte, une opération spécifique a été menée avec pour objectif de conforter des cavités naturelles peu profondes (inférieures à 10 m de profondeur) sous l'emprise d'une route à 2 × 2 voies dans le département de la Charente (16).

La cavité naturelle ainsi traitée à titre expérimental, explorée et appelée "Grotte de la Fuie", est incluse dans un réseau karstique qui se développe au sein des calcaires fins dolomitiques à lits de silex, attribués au Bajocien (plateforme carbonatée du Jurassique moyen). Elle se situe sur la bordure Nord-Est du Bassin Aquitain, au contact d'un aquifère du Jurassique moyen et supérieur (lithologie variée des roches carbonatées). Elle présente actuellement 1 000 m de développement topographié, des

profondeurs sous le sol entre 4 et 10 m, des tailles de galeries très variables, plusieurs niveaux karstiques et est traversée par une nappe phréatique fonctionnant comme une rivière souterraine.

Sous les déblais de la voie rapide concernée, le karst est situé à moins d'une dizaine de mètres sous la surface (figure 1).

La maîtrise des aléas en termes de sécurité face aux risques naturels est un enjeu majeur. Il s'agit ici notamment de garantir la sécurité des biens et des personnes dans des secteurs exposés à des affaissements ou d'effondrement de terrain vers des cavités souterraines. Mais il s'agit, dans le même temps, de ne pas porter atteinte à la qualité environnementale des hydro-systèmes qui constituent, en particulier dans les sous-sols karstifiés, une ressource en eau de premier ordre et très vulnérable. En effet, la cavité traitée jouxte la bordure orientale du bassin d'alimentation de La Touvre, à environ 24 km de l'émergence principale et à moins d'un kilomètre de la vallée de La Bonnière. La Touvre, 2^{ème} résurgence de France en termes de débit (13 m³/s), est exploitée pour la production d'eau potable, en alimentant la ville d'Angoulême.

Cette cavité est suivie régulièrement depuis 10 ans. Son comblement partiel a été envisagé et étudié en fonction de l'aléa défini à partir des observations. Une technique de traitement de l'aléa a ainsi été développée de manière à pouvoir être appliquée plus généralement aux cavités souterraines visitables ou non et dans des secteurs vulnérables du point de vue environnemental et de la protection de la ressource en eau. Ce comblement partiel repose sur l'emploi d'un matériau confiné pour limiter le contact avec les eaux souterraines et éviter la propagation dans le milieu.

3. Caractéristiques techniques de l'opération de confortement

3.1. Particularités de l'opération

Le choix de la technique s'est inspiré de techniques actuelles, principalement utilisées dans le traitement des carrières souterraines et des mines : par exemple les « grout packs » (Grave, 2006) ou barrages en chaussettes (Piteux-Gardien, 2010). L'opération se heurtait en outre à des difficultés plus spécifiquement rencontrées lors du traitement des cavités souterraines naturelles, à savoir :

- présence d'une nappe souterraine vulnérable, nécessitant des mesures particulières de protection de la ressource en eau (présence d'une zone de captage AEP à proximité),
- un réseau karstique très étendu, avec des zones accessibles ou non par exploration spéléologique, parfois très étroites (plus de 1 000 m de développement pour les zones visitables), nécessitant une méthode reproductible un grand nombre de fois,
- plusieurs niveaux de cavités interconnectées, en zone noyée, épinoyée et vadose, demandant une technique de traitement généralisable,
- une géométrie des vides très hétérogènes avec des zones de remplissage argileux et éboulis rocheux, imposant une technique de comblement viable sur tout type de terrain,
- des accès à la cavité de taille réduite (puits forés), limitant tout traitement par le fond,
- des contraintes d'exploitation en surface (axe routier en circulation à 2 × 2 voies) nécessitant des travaux rapides (fermeture de la circulation interdite par le gestionnaire),
- impossibilité de "remplir" par le haut une cavité par un matériau de comblement.

Ces contraintes de site induisent tout particulièrement un risque très important de perte d'injection dans le sous-sol karstique pour des opérations de comblement "classique". Ces pertes peuvent avoir un impact fort sur le milieu naturel, notamment sur la transparence hydrogéologique du système karstique et la qualité de la ressource en eau (par une pollution directe des eaux souterraines). Le renforcement proposé doit permettre un comblement des vides sans pertes dans le milieu naturel.

Les travaux effectués associent les techniques classiques de micropieu foré (Ministère des transports, 1978 ; Afnor, 2005) à chemisage souple (chaussette de géotextile) à un comblement confiné dans un géosynthétique étanche de type big-bag en pointe du micropieu.

Les big-bags employés doivent présenter des caractéristiques de robustesse et d'étanchéité tels que peuvent en présenter les produits de type récipient pour vrac de construction ou démolition, en synthétiques souples. Dans cette catégorie de produits, la dimension des sacs a été choisie qualitativement en fonction de la hauteur de la cavité (comparable à celle d'un sac) et des modèles disponibles. Les big-bags utilisés sont réalisés en toile polypropylène, doublée de polyéthylène haute densité. L'ensemble de cette structure composé d'un tube métallique type micropieu équipé des

géosynthétiques forme le "Cavibag" (figure 2).

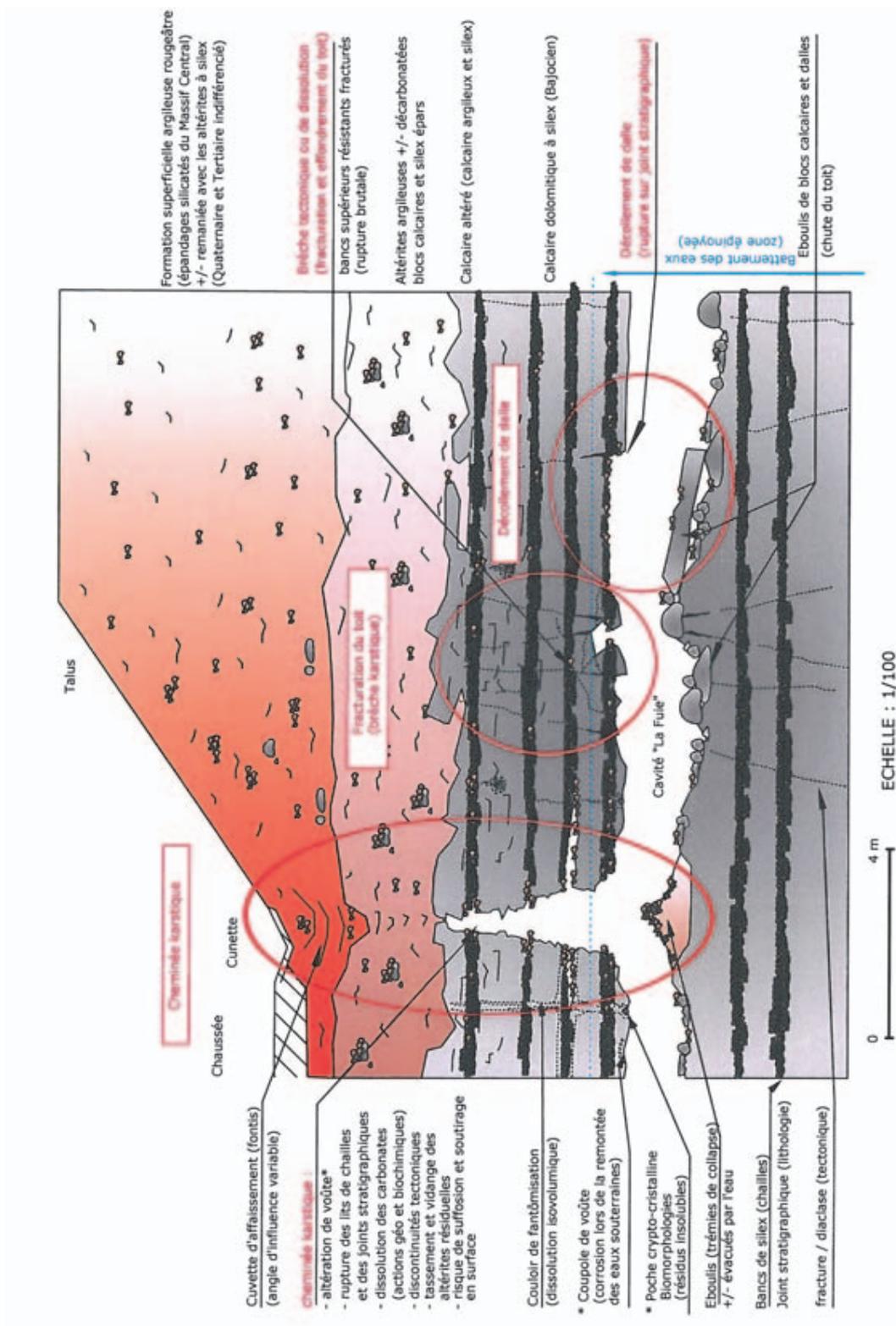


Figure 1. Coupe schématique des phénomènes karstiques dans la cavité de La Fuié.

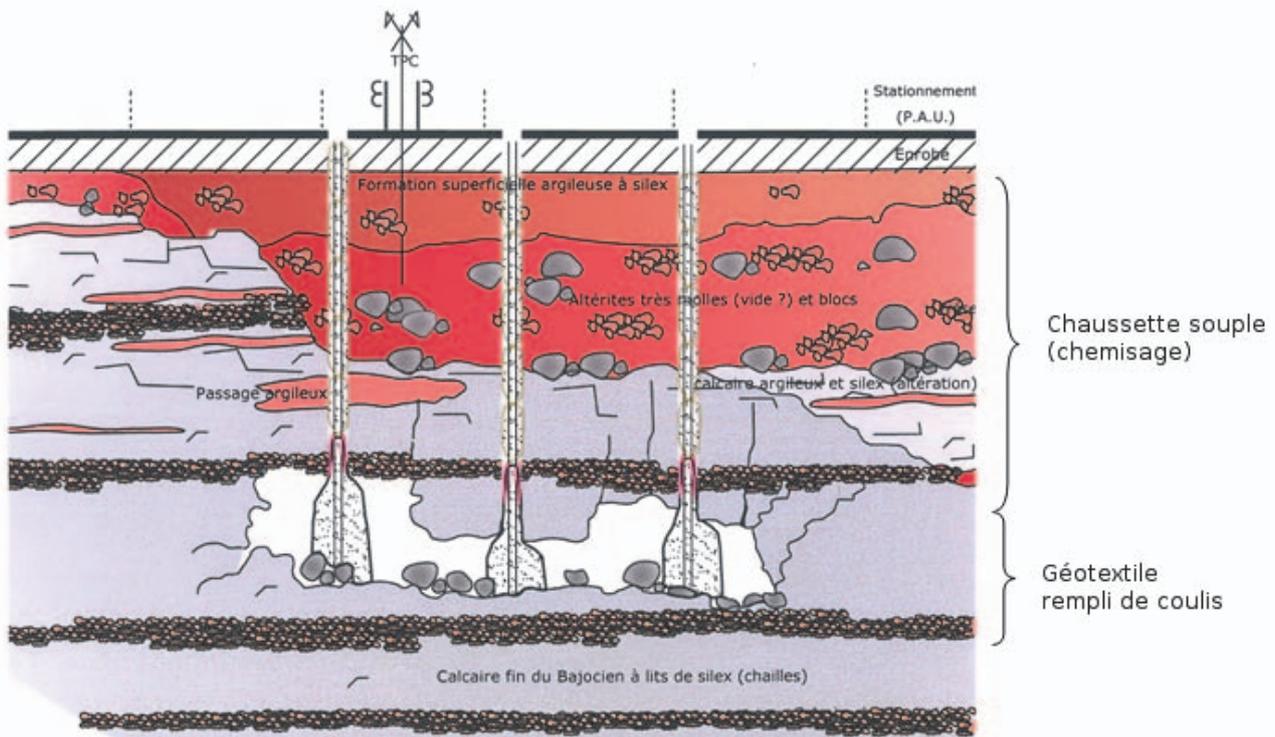


Figure 2. Schéma de principe du renforcement de cavité par containers géosynthétique.

3.2. Procédures de réalisation

Les principales étapes de cette opération innovante sont :

- la réalisation en atelier des têtes d'accrochage du sac géosynthétique (figure 3),
- la reconnaissance par sondages destructifs d'un diamètre \varnothing extérieur supérieur à 90 mm,
- les forages tubés d'un diamètre \varnothing intérieur supérieur à 200 mm. Le diamètre du forage est adapté pour permettre le passage ultérieur de l'armature et des équipements du sac géosynthétique : big-bag et chaussettes de géotextile (figure 4),
- la mise en place du tube de pose lisse \varnothing intérieur supérieur à 200 mm dans le trou de forage (tubage à l'avancement), jusqu'au toit de la cavité à traiter (y compris moyens de maintien du tube), afin d'éviter l'éboulement du trou de forage et faciliter la descente du sac sans déchirure,
- la préparation sur chantier des micropieux avec armature tubulaire 70 mm $< \varnothing$ extérieur < 90 mm, munie de trous cylindriques. Le micropieu est équipé de chaussettes géotextiles (chemisage souple à ligatures annulaires) pour injection type IGU (Injection Gravitaire et Unitaire) en partie supérieure et d'un big-bag étanche en partie inférieure,
- la mise en place du sac géosynthétique dans le trou de forage sans coulis de gaine (introduction par le tube de pose lisse), reposant en fond de cavité (figure 5), pose préalable d'un bouchon sous micropieu évitant la déchirure du big-bag,
- la remontée du tube de pose lisse,
- le comblement gravitaire au mortier du big-bag, en plusieurs phases, à l'aide d'un tube plongeur descendu dans le tube armature,
- l'injection de type IGU de coulis dans les chaussettes géotextiles jusqu'en surface, y compris complément éventuel (injections primaire et secondaire, non jointives),
- l'arasement du micropieu (15 cm minimum sous la couche de roulement).

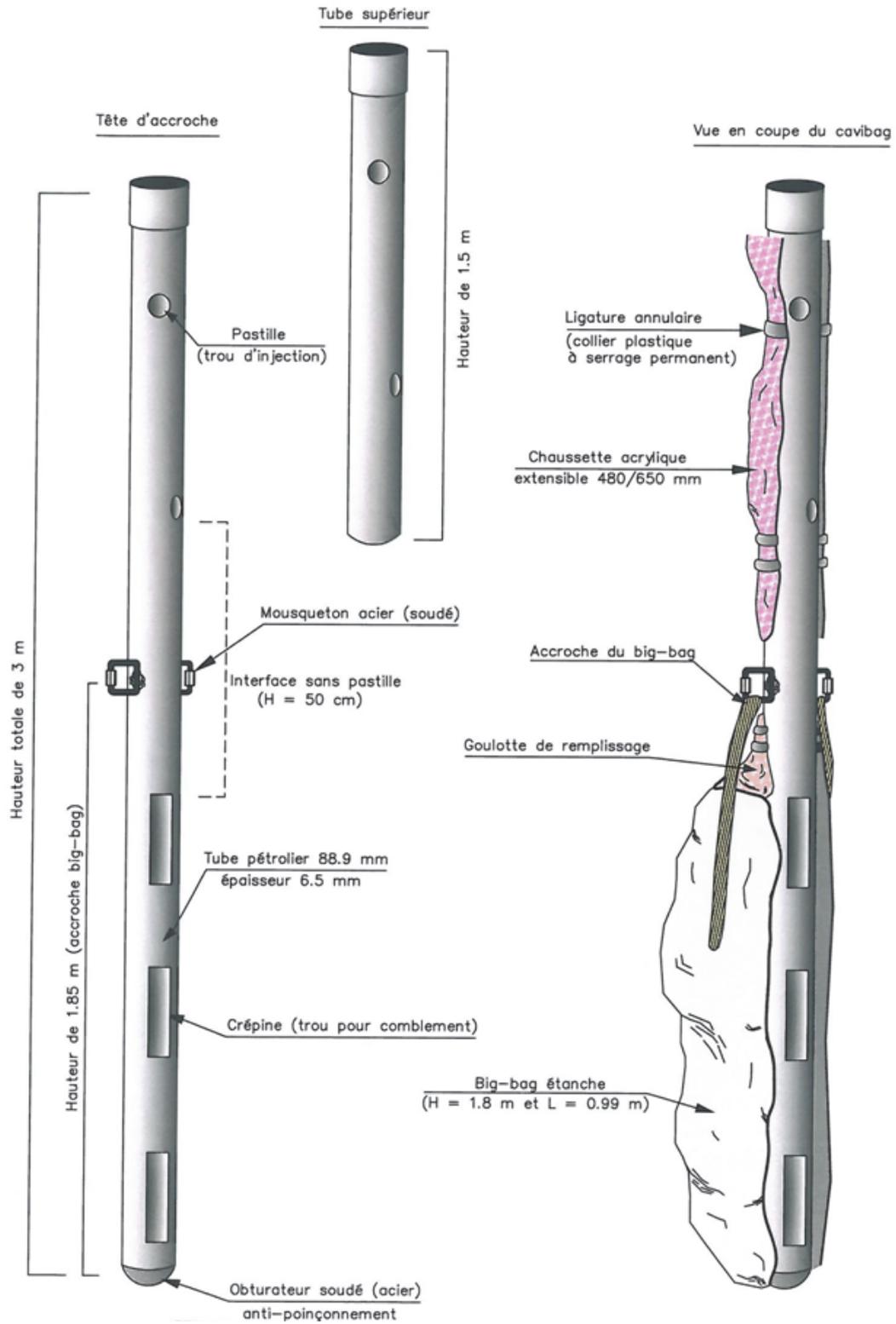


Figure 3. Schéma de détail du big-bag et du dispositif d'insertion - remplissage.

4. Déroulement des travaux

Les travaux de renforcement du réseau de La Géode dans la cavité de La Fuite, par 19 containers géosynthétique, ont débuté le 7 octobre 2013 et se sont terminés le 5 novembre 2013. La figure 6 présente leur localisation.

Les difficultés ont porté essentiellement sur la verticalité des forages, la procédure de remplissage des big-bags et sur les contraintes subies par ces derniers.

4.1. Verticalité des forages

Sur une hauteur de 6 m, des déviations d'environ 15 degrés du train de tige par rapport à la verticale ont été mesurées en raison des changements rapides de dureté des terrains rencontrés (argiles et calcaires à silex). Certains sondages destructifs se sont décalés de 1 à 1,8 m par rapport à la cavité, ce qui pose des problèmes dans le cas de cavités inaccessibles. Les sacs géosynthétique ont dû être repositionnés dans la salle 2 de La Géode le 21 octobre 2013 par mesures directes dans la cavité (topographie spéléologique à la boussole).

4.2. Remplissage des big-bags

La procédure de remplissage et de comblement retenue pour la suite du chantier afin de limiter les risques de déchirure tels qu'observés en cours de chantier, a été :

- levage du sac géosynthétique d'environ 20 cm au-dessus du terrain porteur reconnu par sondage et injection du coulis de pose (300 litres). Cette manipulation permet le dépliage du big-bag sans déchirure du fond sur les blocs tapissant le bas des vides,
- repose immédiate du sac géosynthétique après injection du coulis de pose et temps de séchage supérieur à 10 heures (prise du fond du big-bag limitant le risque de fuite),
- remplissage du big-bag par phase de 300 litres de microbéton et utilisation d'une canne d'injection, avec un temps de séchage entre chaque passe (figures 7 et 8),
- une fois le big-bag plein (mesure du niveau du béton avec remontée du niveau d'environ 1,5 m de hauteur), injection globale et unitaire (IGU) du coulis dans les chaussettes, par passes successives de 300 litres, en gravitaire (figures 9 et 10).



Figure 4. Descente d'un sac géosynthétique (21 octobre 2013).



Figure 5. Sac géosynthétique en fond de cavité avant remplissage (9 octobre 2013).



Figure 7. Conteneur relevé en cours de remplissage par le coulis de pose (10 octobre 2013).



Figure 8. Repose du conteneur après remplissage du coulis de pose (10 octobre 2013).

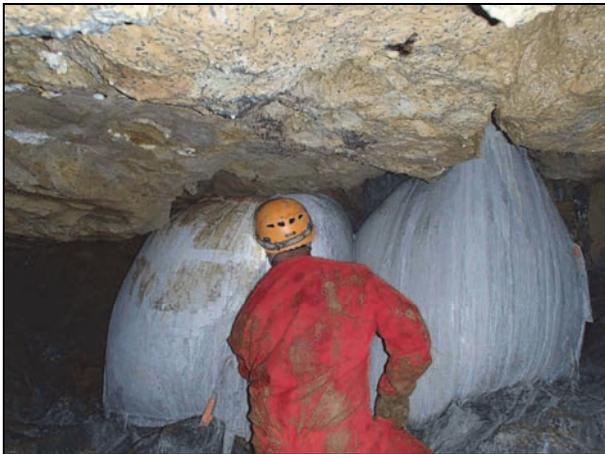


Figure 9. Conteneurs entièrement comblés n° N et O (17 octobre 2013).



Figure 10. Chaussette extensible remplie de coulis (7 novembre 2013).

5. Bilan de l'opération

La procédure d'exécution mise au point en cours du chantier a respecté les principes de la méthodologie envisagée initialement avec un comblement de l'ordre de 30 %. Des adaptations ont néanmoins été nécessaires afin de garantir l'efficacité du renforcement par conteneurs géosynthétique, à savoir :

- le recalage des points de forage des conteneurs par levés dans la cavité, dû au fort dévers du train de tiges en forages destructifs (décalage de plus d'1 m sur une hauteur de 6 m). Une coupe géologique du réseau de La Géode a été réalisée à partir des reconnaissances de terrain,
- le tubage à l'avancement par la méthode Odex est indispensable (tube lisse facilitant la descente du sac géosynthétique dans les sols) en raison d'un serrage important du trou de forage (remaniement des sols et effondrements de blocs en cours de forage). Ce serrage du terrain sur le tube permet le maintien de celui-ci sans dispositif de retenue en surface, malgré son poids (environ 5 tubes de 50 kg chacun),
- la remontée du tube est parfois délicate en raison du serrage du terrain dans le trou du forage,
- les opérations de comblement du big-bag et les injections IGU dans les chemisages souples ont montré des pertes plus ou moins importantes, tout particulièrement par rupture des chaussettes (problèmes de résistance du géotextile par rapport à la quantité de coulis injecté et de rupture des colliers COLSON utilisés en ligature annulaire).

Sur l'ensemble du chantier comportant la pose de 19 conteneurs et malgré un fond rocheux très abrasif en raison d'un éboulis anguleux, seuls les fonds des big-bags R3 et T1 se sont totalement déchirés. Les petites déchirures de certains big-bags se sont auto-colmatées lors de la prise du coulis.

- le comblement gravitaire du big-bag doit se faire en plusieurs phases, par passes de 300 litres avec un temps de séchage de plus de 10 heures entre chaque remplissage. Pour supprimer le risque important de bouchage des pastilles au droit des tubes supérieurs (chemisage souple par IGU) et éviter le lavage à l'eau, il est indispensable d'utiliser un tube plongeur descendant en fond de conteneur.

Pour le matériau de comblement et malgré la possibilité d'employer un mortier très liquide, l'utilisation d'un coulis d'injection avec C/E = 2 offre une meilleure mise en forme du big-bag, notamment au droit du clavage en toit de cavité (figures 11 et 12).



Figure 11. Conteneur N rempli au coulis (31 octobre 2013).



Figure 12. Conteneur M rempli au mortier (7 novembre 2013).

Pour réduire le risque de déchirure du chemisage souple, les injections IGU au coulis dans les chaussettes extensibles dans les terrains recouvrant les cavités peuvent être à réaliser par canne d'injection et par phases successives de 300 litres, avec temps de prise d'environ 10 heures entre chaque injection. La pression d'injection doit être très faible, voire nulle, afin d'éviter que les chaussettes n'éclatent sous le poids du coulis. La résistance de la chaussette pourra également être améliorée (figures 13 et 14).



Figure 13. Gonflement de la chaussette dans la cavité (7 novembre 2013).



Figure 14. Gonflement de la chaussette dans le trou de forage (28 octobre 2013).

6. Conclusion

Le renforcement de cavité souterraine sous une infrastructure linéaire nécessite une adaptation des techniques aux contraintes du site, notamment des travaux de surface sous circulation, une maîtrise des volumes d'injection et des contraintes environnementales associées.

Les travaux d'octobre 2013, réalisés sous une route à 2 × 2 voies, pour traiter les cavités naturelles peu profondes, répondent à ces contraintes spécifiques. Pour cela, le Cerema (en partenariat avec des entreprises privées et l'association de recherche spéléologique de la Rochefoucauld), a développé et appliqué une technique innovante de comblement partiel dans des géosynthétiques.

Malgré le succès de cette opération (validation de la méthode), des adaptations sont nécessaires afin de faciliter les prochains travaux. La qualité des big-bags de comblement dans les cavités et la fixation du chemisage souple en partie supérieure des armatures sont à améliorer et constituent des pistes de développement. Le choix du chemisage est également à faire évoluer pour une meilleure résistance.

Le remplissage du big-bag par mortier adapté paraît efficace sous réserve de l'emploi d'une canne d'injection, d'un renforcement du produit big-bag et des fixations du chemisage souple.

Cette opération test a conduit à des pertes limitées dans le milieu, qui pourront être évitées de manière sensible en mettant en œuvre les améliorations proposées.

Cette solution permet le comblement partiel de cavités visitables ou non.

Un suivi régulier est toujours réalisé au sein de la cavité afin de vérifier toute évolution au niveau des salles traitées.

7. Références bibliographiques

- Afnor (2005). Norme NF EN 14199 : Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Micropieux.
- Grave D. M. H. (2006). Determination of the factors affecting the performance of grout packs. *Mémoire de Master of Science in Engineering, Johannesburg*. 82 pages.
- Ministère des transports – Direction Générale des Transports Intérieurs (1978). Les pieux forés – *Recueil des règles de l'art*. LCPC-SETRA, 194 pages.
- Piteux-Gardien L. (2010). Techniques de barrage en galeries souterraines. *Note interne Botte Fondations*, juin 2010.