

APPORT DE LA FIBRE OPTIQUE POUR L'ETUDE DES ANCRAGES PASSIFS SCÉLÉS AU ROCHER EN MILIEU FRACTURE

BEHAVIOR OF PASSIVE ROCKBOLT IN FRACTURED ROCKS ASSESSED BY OPTICAL FIBER METHOD

Anna LUSHNIKOVA^{1,2}, Patrick JOFFRIN², Christophe PRUVOST², Marion BOST², Aghiad KHADOUR³, Wahiba SEDOUD⁴, Ombeline FOREST⁴, Philippe ROBIT⁵, Yannick FARGIER²

¹ *University Savoie Mont Blanc, LOCIE –CNRS UMR 5271, Chambéry, France*

² *Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, Bron, France*

³ *Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, Marne La Vallée, France*

⁴ *SNCF Réseau, Saint-Denis, France*

⁵ *NGE Fondations, Saint-Priest, France*

RÉSUMÉ – La fracturation des massifs rocheux impacte le comportement des ancrages passifs scellés au rocher utilisés pour la gestion du risque rocheux. Nous présentons les résultats d'essais d'arrachement instrumentés par fibre optique réalisés sur trois sites présentant des niveaux de fracturation variables. Ces résultats couplés avec de l'endoscopie permettent de mieux comprendre les sollicitations en profondeur.

ABSTRACT – Rock fracturing impacts the behaviour of passive anchors sealed to the rock increasing the associated hazard. We present the results of pullout tests instrumented with optical fiber sensors and performed at three sites with varying fissuring levels. These results, coupled with endoscopy and photogrammetry results, provide a better understanding of the actual stresses with depth.

1. Introduction

Les ancrages passifs scellés au rocher représentent une technologie pertinente (économiquement et techniquement) dans la lutte contre le risque rocheux (Figure 1) (Ravel, 2017). Ce type d'ouvrage se retrouve ainsi particulièrement utilisé pour l'aménagement en domaine montagneux (Pollet, 2009 ; Assali, 2014). La justification de tels ouvrages est souvent réalisée de manière sécuritaire engageant des coûts supérieurs (Durville, 2010). Ainsi, améliorer notre compréhension de ces ouvrages en lien avec la fracturation est un enjeu important pour les gestionnaires. L'objectif à terme est de garantir un dimensionnement optimisé en fonction de la roche support et de son état de fracturation permettant de diminuer significativement les coûts directs (matériaux et mise en œuvre) et indirects (liés à la durée du chantier) en particulier pour un gestionnaire d'ouvrage tel que la SNCF.



Figure 1. Ancrages passifs scellés au rocher utilisés pour la stabilisation d'une paroi rocheuse

Pour évaluer le comportement à l'arrachement d'ancrages passifs scellés au rocher, plusieurs campagnes d'essais d'arrachement ont été réalisées au sein de massifs rocheux présentant plusieurs niveaux de fracturation. Nous introduisons pour ces essais des mesures par fibre optique permettant de suivre l'évolution de la contrainte de cisaillement le long de l'armature ainsi qu'une chaîne d'acquisition détaillée dans l'article. Pour évaluer la fracturation, des mesures à la fois endoscopiques et photogrammétriques sont réalisées. Pour chaque site, un minimum de six ancrages est étudié.

Dans un premier temps nous présentons le principe de l'essai et les techniques de mesures l'accompagnant, ensuite nous présentons les résultats issus de trois sites tests. Les résultats obtenus montrent que la contrainte de cisaillement mesurée le long de la barre est affectée par le niveau de fracturation variable suivant les sites étudiés.

2. Matériel et méthode

2.1. Principe

Pour améliorer notre compréhension du comportement à l'interface barre scellement lors d'un effort axial sur un ancrage nous exploitons la norme XP P 94-444 (2002) permettant de tester la résistance à l'arrachement d'un ancrage à différents paliers maintenus à charge constante. Cet essai consiste à tirer sur un ancrage à l'aide d'un vérin creux actionné par une pompe (Figure 2). Des paliers de traction sont maintenus constant selon un programme défini par la norme. Lors de cet essai le déplacement en tête d'ancrage et la force appliquée doivent être mesurés. Chaque essai a été mené jusqu'à la limite de rupture théorique de la barre d'acier. Un bâti a été conçu pour pouvoir réaliser les essais d'arrachement sans confiner le massif rocheux en tête (Figure 2).

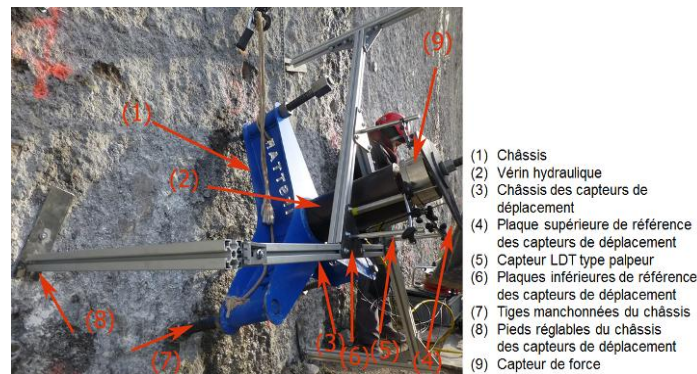


Figure 2. Matériel d'essai d'arrachement d'ancrage, d'après Bost et al. (2018)

2.2. Instrumentation

Pour accompagner l'essai d'arrachement une chaîne d'acquisition est mise en place. Elle comprend un capteur de force de capacité 450kN fixé entre un écrou (fixe sur la barre) et l'amont du vérin pour mesurer la force appliquée en tête de l'ancrage.

Pour suivre les déplacements en tête deux technologies de capteur sont employées. La 1^{ère}, plus conventionnelle, concerne trois capteurs/palpeurs LVDT placés sur une base fixe externe au vérin. Ce capteur devient inutilisable lorsqu'une flexion de la barre est observée lors de l'arrachement ; le capteur sort du support.

La seconde, plus innovante, concerne un capteur magnetostrictif présenté Figure 3.a (Chen et al., 2017). Le principe physique de cette famille de codeurs linéaires se base sur

une mesure du temps de propagation. Un fil magnétostrictif est tendu dans un guide et une impulsion électrique est créée en amont traversant le guide créant un champ magnétique annulaire autour du fil. Un aimant est positionné sur la tige générant un second champ magnétique. Les deux champs magnétiques orientés différemment se croisent au point de mesure, ce qui déclenche une impulsion de torsion. La différence de temps entre l'émission de l'impulsion de courant et l'arrivée de l'impulsion de torsion est enfin convertie en un signal de position. Dans notre cas, ce capteur dont le corps et la tige sont maintenus fixes par rapport à la référence sol, permet, avec deux aimants, de mesurer précisément (0.1 mm) le déplacement en tête de la barre (aimant fixé sur la barre) et l'enfoncement du vérin dans le sol (aimant fixé sur le vérin).

Afin de suivre la contrainte de cisaillement le long de la barre lors de l'essai d'arrachement deux techniques sont employées. La 1^{ère} concerne l'utilisation assez commune de jauges de déformations (Figure 3.b). Cependant, du fait de l'encombrement des câbles, un nombre limité de jauges (< 5) peut être installé offrant une faible résolution en profondeur.

La seconde technique repose sur les capteurs distribués à fibre optique. Cette technologie est aujourd'hui employée dans de nombreux domaines tel que le médical (Taffoni et al., 2013) ou le génie civil (Merzbacher et al., 1996). Dans notre étude, nous utilisons une fibre optique monomode installée dans une engravure au long de la barre d'acier. L'interrogation est basée sur la rétrodiffusion Rayleigh en utilisant un système commercial ; Optical Backscatter Reflectometer (OBR)[®] développé par la société Luna (Figure 3.c). Cette technique permet d'obtenir une mesure précise à haute résolution de la déformation axiale de la barre (Bost et al., 2019 ; Khadour et al., 2013 ; Khadour and Waeytens, 2018).

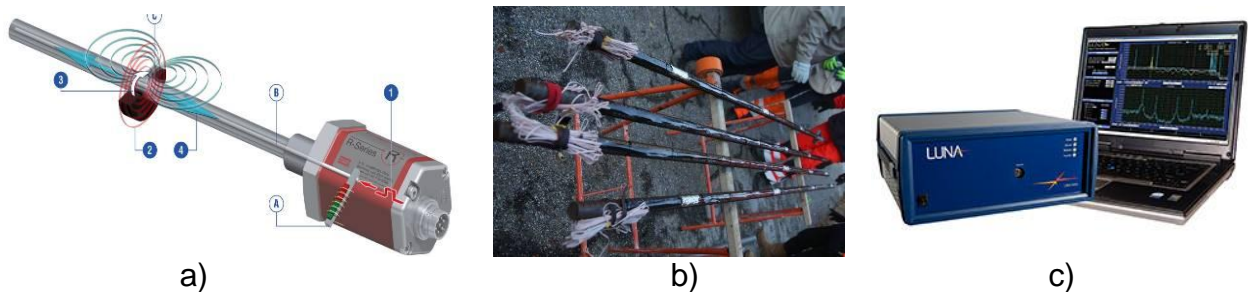


Figure 3. a) description du capteur magnétostrictif b) barres équipées de jauges et c) interrogateur de fibre optique OBR de Luna.

3. Sites test et résultats

Pour chaque site d'étude plusieurs essais d'arrachement sont réalisés pour tester l'effet de différents paramètres liés à l'ancrage (diamètre de forage et diamètre de barre principalement). Pour tous ces essais les barres sont instrumentées de fibre optique. Cependant, pour plus de clarté un seul essai issu de chaque site sera présenté afin d'étudier sur ce dernier l'effet de la fracturation. Les ancrages testés respectent tous les dimensions proposées en Figure 4, soit 1 m de scellement, 1 m de longueur libre dans la roche et 1 m dépassant de la roche, avec une barre diamètre 25 mm (FE500) dans un forage diamètre 64 mm. Le scellement utilisé est toujours contrôlé avec une densité d'environ 1.8 et une résistance à la compression comprise entre 38 et 42 MPa.

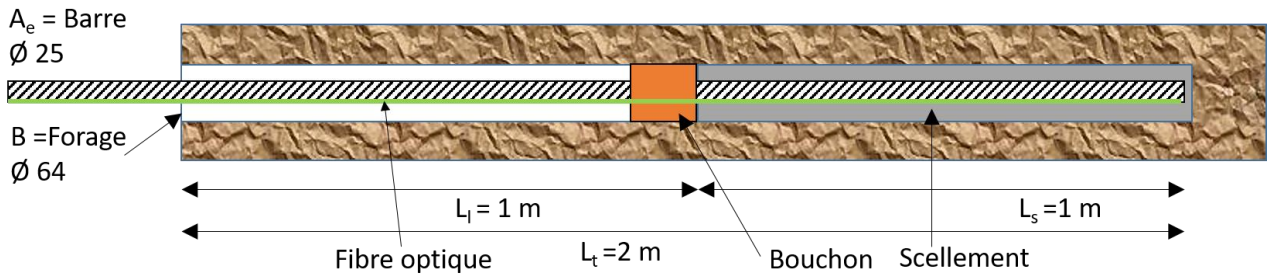


Figure 4. Schéma des caractéristiques des ancrages testés avec l'instrumentation de suivi.

3.1. Calcaire massif

Le 1^{er} site testé pour cette étude se situe dans la carrière de Montagnole (73). Ce site présente une falaise de calcaire massif très peu fracturée de 70 m de haut avec une densité de discontinuité (ID) faible à très faible. Ce site a abrité les essais d'arrachement de la thèse de Duc An Ho (Ho, 2017 ; Ho et al., 2019). Plus de 20 ancrages ont été testés dans ce cadre afin d'évaluer l'effet de caractéristiques élémentaires d'un ancrage telles que le diamètre de forage, le diamètre de la barre, la longueur de scellement et certains paramètres de mise en œuvre. La Figure 5.a) présente plusieurs courbes effort-déplacement obtenues pour différents diamètres de barres (Essai 6=25 mm ; Essai 12=28 mm ; Essai 13 =32mm) (Bost et al., 2018 ; 2019). La Figure 5.b) présente les résultats pour l'essai 6.3 équipé de fibre optique lors des différents paliers de chargement. La Figure 5.a) présente pour l'essai 6.3 une courbe assez classique révélant une première phase élastique entre 0 et 3 mm de déplacement et une seconde phase avec un comportement plus plastique (240 kN étant la limite élastique de la barre d'acier). Dans la Figure 5.b), chaque ligne de couleur correspond à la déformation enregistrée par la fibre optique le long de la barre (voir schéma en transparence en haut de la figure) pour chaque palier de chargement. Entre -0.2 et 0.9 m, la fibre est libre et n'enregistre pas de signal. La fibre est engravée dans la barre à partir de 0.9 m. Entre 0.9 et 1.3 m le signal correspond à la déformation le long de la barre non scellée puis la déformation au niveau du bouchon en tête du scellement. L'information importante démarre à partir de 1.3 m avec une décroissance exponentielle de la déformation représentative d'un collage parfait assuré par le scellement. A noter, hormis un bruit haute fréquence pour les plus hauts paliers, il n'y a pas de « rebond » observé lors de la décroissance. Une longueur de scellement efficace d'environ 50 cm peut être déduite de cet essai.

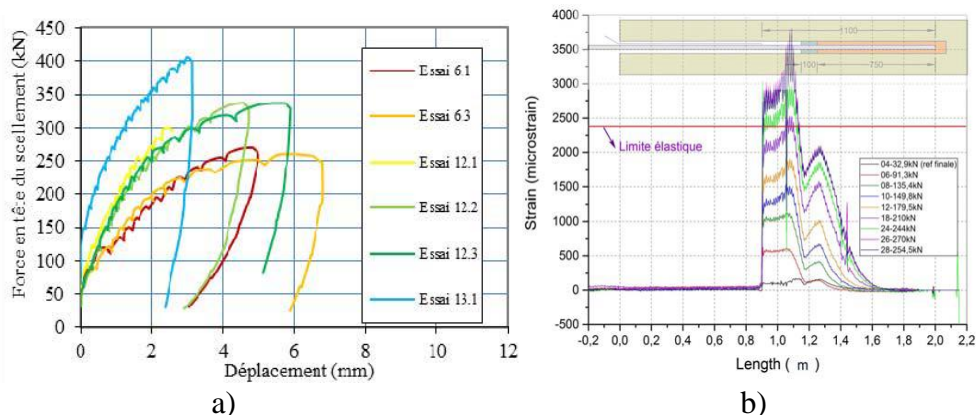


Figure 5. a) Courbes effort-déplacement obtenus pour plusieurs essais d'arrachement, b) déformation mesurées par fibre optique pour l'essai 6.3 avec correspondance sur l'ancrage schématisée en transparence.

3.2. Calcaire faiblement fracturé

Le 2^{ème} site étudié situé à proximité de Bourg d'Oisans est constitué d'un calcaire franc traversé par une discontinuité principale assez importante avec une ID moyenne. La Figure 6.a) issue d'un modèle photogrammétrique de la zone présente la discontinuité et la position de trois des ancrages testés. Un calcul simple visant à déterminer le point d'intersection entre le plan de fracturation et l'ancrage a permis de déterminer une position de fracture à environ 1.5 m de profondeur dans le forage. Au préalable de la campagne photogrammétrique une caméra endoscopique (0.2 Mpx) avait été insérée dans les forages F4 et F5 afin de visualiser l'état de fracturation du massif. La Figure 6.b) présente un cliché obtenu à environ 1.55 m de profondeur montrant la probable fracture corrélée avec la discontinuité visible en surface.

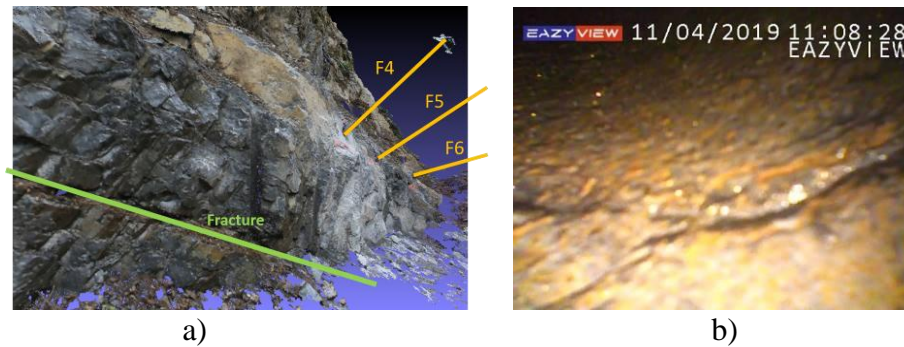


Figure 6. Résultats a) photogrammétrique et b) endoscopique au niveau du forage F4.

La Figure 7 présente les résultats obtenus lors de l'essai d'arrachement sur le forage F4. La Figure 7.a présente la courbe effort-déplacement obtenue avec un comportement assez similaire à ce qui avait été observé dans l'étude précédente. A noter qu'au travers de ce seul résultat, l'effet de la fracturation n'est pas visible. La Figure 7.b présente le résultat par fibre optique pour différents paliers de chargement. A la différence du site précédent, la fibre est cette fois engravée dans la barre sur toute sa longueur pour éviter son endommagement sur le terrain : cela explique le signal mesuré entre 1150 et 1330 cm (longueur non scellée). Entre 1330 et 1370 cm, nous observons une augmentation en lien avec l'effet du bouchon en tête de scellement. Le scellement démarre à partir de 1370 cm avec une décroissance exponentielle de la déformation telle que prévue théoriquement pour un collage parfait. A noter, un rebond est observé à 1410 cm soit environ à 1.6 m après le début du forage. Cette reprise des efforts peut être corrélée à la fracturation observée par les résultats endoscopiques et photogrammétriques. A partir de ce résultat il est possible de déduire une longueur de scellement efficace d'environ 60 cm, légèrement supérieure au résultat précédent.

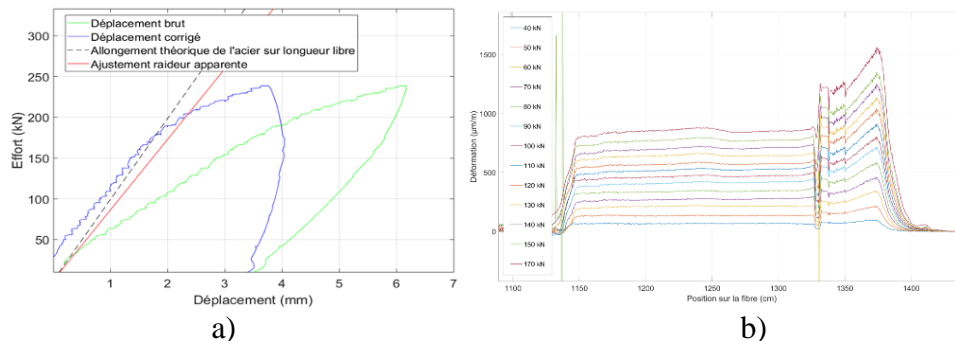


Figure 7. Résultats d'arrachement de l'ancrage F4 avec a) la courbe effort-déplacement et b) les déformations mesurées par l'OBR à différents chargements.

3.3. Calcaire fracturé

Le dernier site étudié situé à proximité de Moutiers présente un calcaire plus fracturé tel qu'en atteste l'extrait du modèle photogrammétrique du site (Figure 8.a). Sur ce site, six ancrages sont testés (F1 à F6). Ce chapitre présente les résultats issus du forage F4. Les forages sont réalisés de manière quasi orthogonale au plan de fracturation. Les discontinuités les plus visibles en surface laissent présager des fractures assez importantes vers 100 cm de profondeur dans les forages. Une campagne endoscopique avec une caméra haute résolution (8 Mpx) est réalisée dans les forages. Ces résultats mettent en lumière la présence de nombreuses discontinuités plus ou moins importantes le long du forage (Figures 8.b et c) avec une densité de discontinuité (ID) forte.

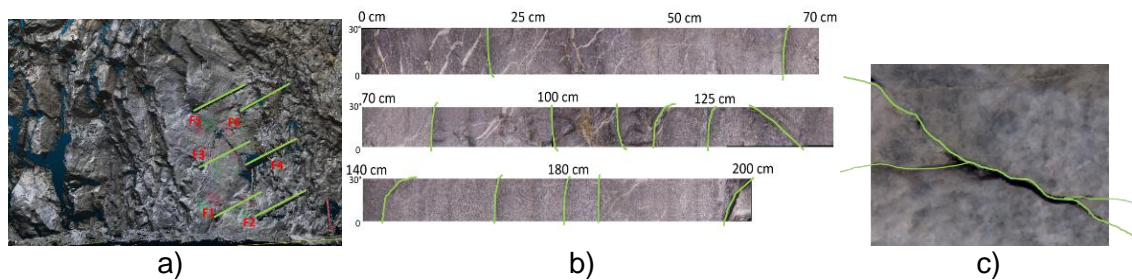


Figure 8. Résultats a) photogrammétrique des six ancrages testés avec les barres surlignées en vert et b) endoscopique au niveau du forage F4. c) Exemple de photographie extraite de l'endoscopie avec une fracture surlignée en vert.

La Figure 9 présente les résultats obtenus lors de l'essai d'arrachement sur le forage F4. La Figure 9.a) présente une allure courbe effort-déplacement assez classique telle que présentée précédemment avec un déplacement maximum de 6 mm atteint au palier à 240 kN. A noter, ce résultat ne permet en aucun cas de témoigner seul de la fracturation du milieu. La Figure 9.b) présente le résultat des mesures par fibre optique à différents paliers de chargement. Le bouchon, symbolisé en orange sur le schéma de correspondance (Figure 9.b en haut), engendre une baisse des déformations mesurées. Ensuite, à partir de 100 cm une décroissance quasi exponentielle est observée jusqu'à 190 cm. La décroissance globale semble être composée d'une succession de plusieurs décroissances exponentielles liées à la fracturation du massif. Il est important de noter que ces « rebonds » engendrent une reprise des efforts sur une longueur supérieure que précédemment avec 90 cm de scellement mobilisé.

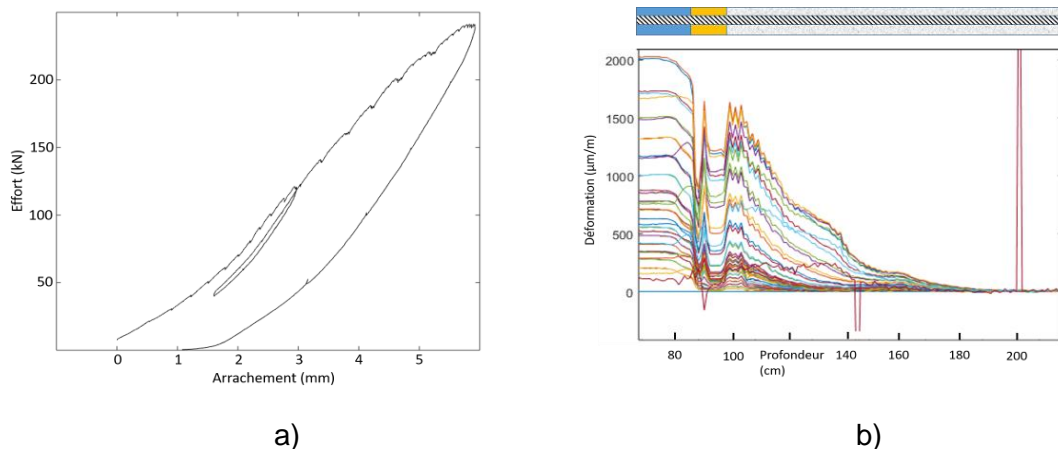


Figure 9. Courbe type effort-déplacement issue de l'essai d'arrachement de l'ancrage F4. b) Déformation mesurée le long de l'ancrage F4 par fibre optique.

4. Conclusions

Les ancrages passifs scellés au rocher proposent une technologie pertinente dans la lutte contre le risque rocheux. L'état de fracturation du massif rocheux traité impacte fortement les sollicitations transmises aux ancrages installés. Des essais d'arrachement sont réalisés sur des sites proposant une fracturation variable (ID faible à forte). Nos résultats montrent tout d'abord la qualité de la chaîne d'acquisition créée spécifiquement pour ces essais. Cela intègre notamment le capteur magnétostrictif, les méthodes photogrammétriques et endoscopiques mais également la méthode de fibre optique permettant de suivre avec une grande résolution l'évolution des sollicitations le long de l'ancrage (interface barre-scellement) jusqu'en profondeur. Les résultats montrent que la fibre optique permet la détection de fractures dans le massif le long de l'ancrage. Le second résultat important concerne les différences de longueurs de scellement efficace observées sur ces ancrages en lien avec la fracturation. Bien que la roche diffère pour les trois sites étudiés, les résultats montrent que la longueur de scellement efficace est augmentée par la fracturation. Ces résultats, qui doivent être complétés par une analyse précise de la fracturation des massifs (canevas, RMR...), nous permettent d'envisager la possibilité d'optimiser le dimensionnement de ces ouvrages dans un objectif de garantie d'efficacité et de sûreté mais aussi de diminution significative des coûts de réalisation. A court terme, l'effet de plusieurs faciès rocheux sur le comportement des ancrages sera étudié dans un objectif de généralisation de cette procédure.

5. Références bibliographiques

Assali, P., 2014. Modélisation géostructurale 3D de parois rocheuses en milieu ferroviaire - Application aux Ouvrages en Terre. Thèse de doctorat de l'université de Strasbourg.

Billon, A., Hénault, J.-M., Quiertant, M., Taillade, F., Khadour, A., Martin, R.-P., Benzarti K. (2015). Qualification of a distributed optical fiber sensor bonded to the surface of a concrete structure: a methodology to obtain quantitative strain measurements. *Smart Materials and Structures*, 24(11). Doi:10.1088/0964-1726/24/11/115001.

Bost, M., Ho, D.A, Pruvost, C., Khadour, A., Joffrin, P., Huteau, M., Robit, P. (2018) Etude paramétrique de la résistance à l'arrachement d'un ancrage passif scellé au rocher. Journées Nationales de Géotechniques et de Géologie de l'ingénieur, Marne la Vallée, France.

Bost, M., Ho, D.-A., Khadour, A. (2019). Experimental investigation of the grout-bolt interface behaviour by optical fiber. 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM, Iguassu, Brazil.

Chen, L., Kim, Y., Bae, Y. (2017). Long Range Displacement Measurements Systems Using Guided Wave. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*. 17. 154-161. 10.5391/IJFIS.2017.17.3.154.

Durville, J.-L., Guillemin, P., Berthet-Rambaud, P., Subrin, D. (2010). Etat de l'art sur le dimensionnement des dispositifs de protection contre les chutes de blocs. Collection LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, 82 p.

Ho, D.A. (2017). Comportement axial des ancrages passifs scellés au rocher : étude de l'interface barre scellement et modélisation. Thèse de doctorat de l'Université de Lyon 1.

Ho, D.A., Bost, M., Rajot, R.-P. (2019). Numerical study of the bolt-grout interface for fully grouted rockbolt under different confining conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 119, 168-179.

Khadour, A., Baby, F., Herrera, A., Taillade, F., Marchand, P., Rivillon, P., Simon, A., Quiertant, M., Toutlemonde, F. (2013) Distributed strain monitoring of reinforcement bars using optical fibers for SHM. 7th International Conference on Concrete under Severe Conditions (CONSEC13) – Environment and Loading, Nanjing, China, pp. 1620–1629.

Khadour, A., Waeytens, J. (2018) Monitoring of concrete structures with optical fiber sensors, In: *Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*, Chapitre 5, Woodhead Publishing.

Merzbacher, Cl, Kersey AD, Friebele E.J (2013). Fiber optic sensors in concrete structures: a review, *Smart Materials and Structures*, Volume 5, Number 2

Pollet, N., 2009. Gestion du risque rocheux sur le réseau ferré français Contexte des ouvrages en terre. *Géologues*, 169, pp.35–40.

Ravanel, L., Magnin, F., Deline, P. (2017). Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif. *Science of the Total Environment*, 609, 132-143.

Rolland, A., Quiertant, M., Khadour, A., Chataigner, S., Benzarti, K., Argoul, P., 2018, Experimental investigations on the bond behavior between concrete and FRP reinforcing bars, *Construction and Building materials*, 173, Elsevier, pp.136-148, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.169

Taffoni, F., Formica, D., Saccomandi, P., Di Pino, G., Schena, E. (2013) Optical Fiber-Based MR-Compatible Sensors for Medical Applications: An Overview. *Sensors*, 13, 14105-14120; doi:10.3390/s131014105.

XF P 94-444, 2002. Essai statique d'arrachement, sous un effort axial de traction, d'un ancrage scellé dans un massifs rocheux, AFNOR.