
Dispositif de mesure de convergence de tunnel sans réduction de diamètre utile

A. Piccolo^{1,2}, S. Delepine-Lesoille¹, Y. Lecieux², D. Leduc²

¹ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (Andra), 92298 Chatenay-Malabry, FR, arianna.piccolo@andra.fr

² Université de Nantes, Laboratoire GeM UMR 6183, 44000 Nantes, FR

RÉSUMÉ. Dans le cadre du projet Cigéo, centre de stockage géologique de déchets radioactifs à vie longue, la convergence des alvéoles (autrement dit le diamètre intérieur disponible, l'évolution des jeux de manutention) doit être surveillée pour contribuer à affirmer la réversibilité du stockage. Les méthodes standard ne semblent pas adaptées aux spécificités de cette application hors-norme car elles utilisent l'espace utile de la section. Nous avons développé une méthode utilisant des capteurs extensométriques à fibre optique, placés sur le revêtement du tunnel, associés à une méthode inverse de traitement de données par éléments finis. Nous démontrons la faisabilité sur un démonstrateur de surface à l'échelle 1. Les deux méthodes optiques testées, mesures de rétrodiffusions Brillouin ou Rayleigh, fournissent des résultats similaires, avec une sensibilité de 1 mm dans les deux cas. Le choix de la rétrodiffusion pourra ainsi s'adapter aux spécificités de l'application visée.

ABSTRACT. In the framework of the French underground radioactive waste repository center Cigéo, repository cells' convergence (i.e. the evolution of the diameter of the structure) must be monitored to ensure the reversibility of the repository. Standard methods that rely on sensors placed inside the cells section are not suitable, therefore another method based on optical fiber sensors has been developed. Sensors are placed inside the tunnel liner or at its surface, while combined with an inverse analysis finite element method. They are able to provide distributed convergence measurements all around the structure. We show here the results obtained on a mock-up of the high level (HL) radioactive waste repository cell, employing two different backscattering-based techniques (Rayleigh and Brillouin scattering). Results are in line with standard convergence measurements, confirming the feasibility of the method with 1 mm of sensitivity. Moreover, the results obtained with the two techniques are similar, leaving the choice to other requirements (resolution, accuracy, sensitivity, approachability).

MOTS-CLÉS : convergence, tunnel, capteur, fibre optique, monitoring.

KEY WORDS: convergence, tunnel, sensor, optical fiber, monitoring.

1. Introduction

Avec l'essor du contrôle de santé structurale (démarche plus connue sous l'acronyme SHM, pour Structural Health Monitoring), les capteurs à fibre optique font l'objet de toutes les attentions. Leur immunité électromagnétique est très importante lorsqu'il s'agit d'instrumenter des structures exposées à la foudre. La silice est très résistante aux radiations et ces capteurs sont a priori compatibles avec des environnements radiatifs, même sévères. Leur capacité de multiplexage, avec un seul câble reliant des dizaines de points de mesure, réduit l'intrusivité de l'instrumentation et le coût de l'implémentation. Surtout, ces systèmes optiques fournissent des mesures de température et de déformations de manière continue, tout le long de la fibre optique, sans zone morte [BAO 12]. L'évolution thermo-mécanique de l'ouvrage peut ainsi être mesurée en 3D.

L'Andra, agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, est en charge du projet de stockage des déchets à vie longue en couche géologique profonde, dénommé Cigéo. Les capteurs à fibres optiques sont envisagés pour caractériser les alvéoles de stockage. Ces structures seront des tunnels en béton de l'ordre de 10 m de diamètre et quelques centaines de mètres de long pour les déchets de moyenne activité. Les déchets les plus actifs seront stockés dans des tunnels horizontaux, borgnes, avec un chemisage métallique, d'environ 70 cm de diamètre et 100 m de long. Comme toute installation nucléaire, Cigéo fera l'objet d'une surveillance. Un des paramètres de surveillance identifiés concerne les jeux de manutention des colis. Or, les systèmes de mesure de jeu ou de convergence (diamètre interne utile) des ouvrages ne semblent pas adaptés aux spécificités de cette installation hors-norme. En effet, les fils invar [DUN 93] utilisent l'espace interne à la section des alvéoles de stockage. Les fibres optiques sont, quant à elles, installées sur la circonférence des alvéoles, libérant l'espace pour le stockage des colis. La problématique est alors d'évaluer la faisabilité de relier des mesures de déformations orthoradiales avec les variations de diamètre des sections circulaires des tunnels.

La méthode inverse développée est fondée sur la minimisation des écarts entre les mesures expérimentales et des modélisations réalisées par éléments finis. Cette démarche a été expérimentalement évaluée sur une maquette d'alvéole HA, en laboratoire [PIC 19]. Ce démonstrateur était sollicité par différents types de chargements, et instrumenté par différentes méthodes de mesure de convergence, dont une utilise des capteurs à fibre optique répartis.

2. Méthodes

Le démonstrateur est une portion de tube en acier, de diamètre 76 cm et d'épaisseur 1 cm, équipée de différents capteurs. Nous comparons ainsi différentes technologies de mesure de convergence : cannes extensométriques, capteurs à fibre optique ponctuels et répartis [PIC 18T]. Nous quantifions aussi l'influence de la méthode de fixation au chemisage métallique : le câble optique est soit collé, soit soudé. En détail, il s'agit d'un unique câble à fibre optique, placé sur deux circonférences, avec deux méthodes de fixation (Figure 1); pour faciliter les comparaisons, les lieux de ces deux morceaux de câbles sont ramenés sur la même référence, la position angulaire entre 0 et 180°C.

En plus des capteurs de déplacements et de déformations (mis en évidence avec étiquettes « D# » dans la Figure 1), la maquette d'alvéole est équipée de capteurs de forces. Nous avons augmenté la charge pour atteindre une réduction du diamètre de 10 mm, dans l'axe du chargement (flèche jaune en Figure 1). Cette valeur est représentative des évolutions constatées sur les démonstrateurs d'alvéole réalisés au laboratoire souterrain de Meuse Haute-Marne de l'Andra, dans le milieu géologique de référence de Cigéo (couche d'argilite de 100m d'épaisseur à 500m de profondeur) [GUA 16].

Le câble est interrogé par un système de mesure commercial (le Neubrex NBX-7020, par Neubrescope Co., Ltd.) qui exploite les rétrodiffusions Rayleigh et Brillouin dans les fibres optiques en silice [NEU]. Le câble contenant au moins une fibre optique est attaché à la structure et connecté à l'instrument. Une impulsion laser est injectée à une extrémité de la fibre optique. Une partie de la lumière est naturellement rétrodiffusée ; le système de mesure caractérise la longueur d'onde du signal retour (la fréquence Rayleigh ν_R ou une nouvelle fréquence générée, dénommée Brillouin ν_B) et le temps de vol. Comme dans un système radar, le temps de vol permet d'obtenir des mesures continues tout le long de la fibre optique, avec une résolution spatiale centimétrique. Une première mesure de ces rétrodiffusions est acquise, puis la structure est déformée par un chargement uni-axial de type vertical ponctuel (Figure 1). Une seconde mesure est alors réalisée. Les décalages de fréquence Rayleigh ν_R ou Brillouin ν_B sont proportionnels à la déformation ε (en faisant l'hypothèse que la température est stable lors des essais) suivant la formule suivante :

$$\nu = C_\varepsilon \cdot \varepsilon \quad [1]$$

où C_e est le coefficient de sensibilité du câble pour Rayleigh ou Brillouin, selon le cas [BAO 12].

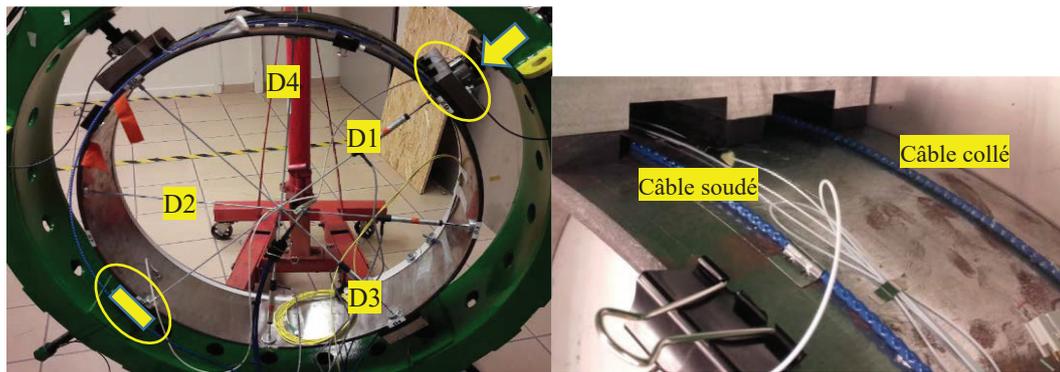


Figure 1. Maquette HA utilisée pour l'essai avec en détail la disposition des cannes de convergence (étiquettes « D# ») et câbles à fibre optique à droite.

Ces mesures seront utilisées comme données d'entrée d'un calcul par éléments finis inverse permettant d'évaluer la réduction du diamètre des alvéoles et la distribution des déformations à la surface de la paroi. Les mesures de force sont données en entrée du même calcul direct. Les calculs par éléments finis sont effectués avec un code développé sous MATLAB, pour différents cas de chargement et niveaux de charge. Les mesures de déformations ont alors pu être transformées en mesures de convergence via la méthode inverse décrite en détails dans [PIC 19].

3. Résultats

La convergence obtenue par les capteurs à fibre optique et les cannes de convergence (capteurs de référence) est comparée sur la Figure 2. La faisabilité de la méthode innovante proposée est clairement établie. Les niveaux de convergence déterminés sont en très bon accord avec la référence : l'écart entre les deux méthodes est inférieur à 0.5 mm (pour le cas extrême de 10 mm de convergence illustré, moins dans pour les valeurs de convergence inférieures). La différence est mise en évidence dans le zoom en Figure 2, focalisée sur la direction du chargement. De plus, comme illustré sur la Figure 3, la sensibilité obtenue est de l'ordre de 1 mm : la distinction entre les cas de 8, 9 et 10 mm est possible.

Sur les mesures de convergence, les mesures optiques acquises par rétrodiffusions Rayleigh et Brillouin, par les câbles soudés et collés sont similaires. Pourtant les mesures brutes révélaient des écarts. Par exemple, les mesures Rayleigh détectent des déformations plus faibles : quelques microdéformations versus quelques dizaines pour la rétrodiffusion Brillouin. L'impact de la méthode de fixation est davantage visible sur la rétrodiffusion Brillouin tout en restant de l'ordre de la sensibilité.

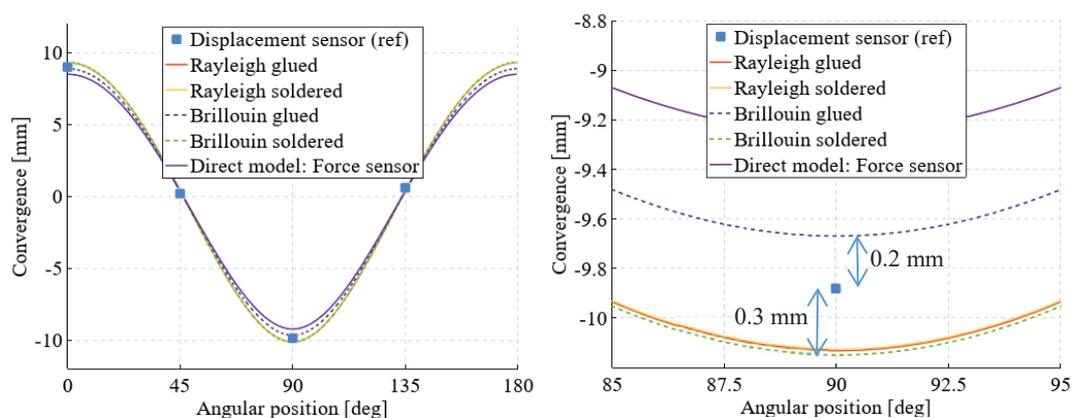


Figure 2. Mesure de la convergence en fonction de la position sur le pourtour du chemisage (droite : zoom sur la direction du chargement, permettant d'évaluer l'écart maximal entre méthodes de mesure).

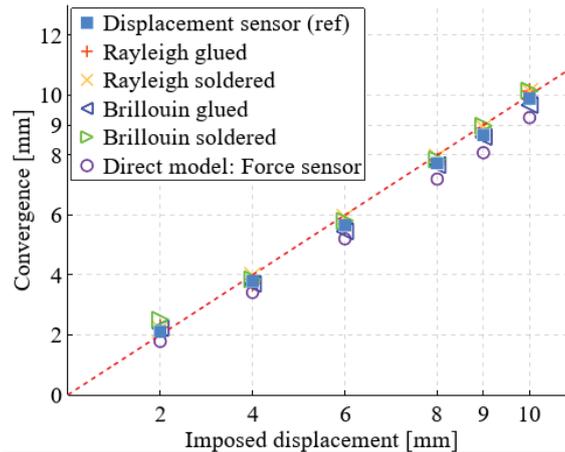


Figure 3. Convergence dans la direction de charge.

4. Conclusion

Nous avons démontré l'intérêt et la faisabilité d'une mesure de convergence de tunnel, effectuée grâce à un câble optique placé sur une circonférence de l'ouvrage, libérant ainsi l'espace interne de l'ouvrage. Les rétrodiffusions Brillouin ou bien Rayleigh fournissent des déformations orthoradiales tout autour de la structure. La comparaison calcul-mesure et l'identification des paramètres de chargement permettent ensuite de déduire la convergence. Les mesures de convergence sont satisfaisantes quelle que soit la méthode de fixation utilisée.

Les deux méthodes optiques testées, mesures de rétrodiffusions Brillouin ou Rayleigh, fournissent des résultats similaires, avec une sensibilité de 1 mm dans les deux cas. Le choix de la méthode pourra donc s'effectuer en considérant les spécificités de l'application. Ainsi, la rétrodiffusion Rayleigh assure une plus grande sensibilité (1 $\mu\text{m}/\text{m}$ versus 20 $\mu\text{m}/\text{m}$ que la rétrodiffusion Brillouin). En revanche quand les variations en déformation sont importantes, les mesures Rayleigh sont plus bruitées. De plus, suivant l'instrument optoélectronique de mesure, la résolution spatiale n'est pas identique : par exemple on peut atteindre 1 mm en rétrodiffusion Rayleigh grâce à l'instrument OBR de la société Luna sur une portée de 70 m, quand la majorité des instruments Brillouin ont des résolutions spatiales métriques et des portées de plusieurs dizaines de km. Il faudra donc choisir la technique la plus adaptée, en considérant le diamètre de l'ouvrage, la portée nécessaire des mesures (la distance entre la section instrumentée et le local de mesure), la sensibilité recherchée, la plage de variation attendue pour les déformations.

5. Bibliographie

- [BAO 12] BAO X, CHEN L, BAO X, CHEN L. « Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors ». *Sensors* 2012; 12:8601–39. doi:10.3390/s12070860
- [DUN 93] DUNNICLIFF J. « Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance ». *John Wiley & Sons*; 1993
- [GUA 16] GUAYACÁN-CARRILLO L-M., SULEM J., SEYEDI D.M., GHABEZLOO S., NOIRET A., ARMAND G. « Analysis of Long-Term Anisotropic Convergence in Drifts Excavated in Callovo-Oxfordian Claystone ». *Rock Mech Rock Eng* 2016; 49:97–114. doi:10.1007/s00603-015-0737-7
- [NEU] Neubrex Co., Ltd. - NEUBRESCOPE NBX-7020 (Specs) n.d. <http://www.neubrex.com/html/products/pro-nbx7020.htm>.
- [PIC 18T] PICCOLO A., DELEPINE-LESOILLE S., BUMBIELER F., ZGHONDI J., LECIEUX Y., LEDUC D., TEIXEIRA P., GAY O., « Tunnel monitoring: Performances of several innovative shape sensing systems ». *International conference on Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering (TINCE2018)*, Paris-Saclay, France, aout 2018.
- [PIC 19] PICCOLO A., LECIEUX Y., DELEPINE-LESOILLE S., LEDUC D., « Non-invasive tunnel convergence measurement based on distributed optical fiber strain sensing » *Smart Mater. Struct.*, 2019 <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab04cc>