

Contrôle par fibres optiques de la géométrie d'alvéoles de stockage de déchets radioactifs sur le site du laboratoire de recherche souterrain de Meuse, Haute-Marne

Arianna Piccolo^{1,2}, Yann Lecieux¹, Sylvie Delepine-Lesoille², Dominique Leduc¹, Frédéric Bumbieler², Julien Cotton² et Béatrice Yven²

¹ Laboratoire GeM (UMR CNRS 6183), Université de Nantes, CNRS, École Centrale de Nantes, 2, rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 3, France

² Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs (Andra), 92298 Chatenay-Malabry, France

RESUME Cette étude démontre la faisabilité de la mesure de variation de section d'alvéoles destinées au stockage de déchets radioactifs de haute activité avec des capteurs de déformations à fibres optiques. La solution proposée ne restreint pas la section utile des alvéoles et est compatible avec un usage en environnement sévère. La mesure répartie permet d'obtenir plus de données que les méthodes classiques de mesure de déformation. Les mesures de déformations circonférentielles des alvéoles sont exploitées par analyse inverse, grâce à un modèle éléments finis, pour calculer la variation de section. Les performances de la méthode proposée sont évaluées grâce à des essais *in situ* menés sur un démonstrateur à l'échelle d'une alvéole en acier située dans les galeries souterraines du laboratoire de recherche souterrain de Meuse, Haute-Marne.

Mot-clefs Capteurs à fibre optique, Détection de forme, Micro-tunnel, Mesure répartie, Analyse inverse

I. INTRODUCTION

Le laboratoire de recherche souterrain de Meuse, Haute-Marne, est un ensemble de galeries souterraines exploitées par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs afin d'appréhender la faisabilité du stockage des déchets radioactifs et d'estimer l'évolution des structures les abritant au cours du temps. Parmi les différents verrous scientifiques et technologiques liés au stockage de déchets présentant une longue durée de vie et un niveau de radioactivité élevé se pose la question de sa réversibilité lors des premières décennies d'exploitation du site. Pour la garantir, il est nécessaire de qualifier les méthodes de surveillance des alvéoles destinées au stockage sur des démonstrateurs situés à 500 m de profondeur dans des excavations souterraines horizontales (Armand et al. 2013) où des capteurs de différents types sont mis en œuvre. Ces démonstrateurs (voir figure 1) sont représentatifs des véritables structures de stockage de déchets de haute activité (HA). Ce sont des micro-tunnels chemisés conçus pour héberger des conteneurs cylindriques. L'instrumentation vise notamment à surveiller la capacité d'accès à ces conteneurs pendant la durée d'exploitation du site (environ 100 ans). En dessous d'une valeur diamétrale limite, ils ne sont plus

accessibles. Ainsi, la grandeur à contrôler est la variation de diamètre des alvéoles dont les sections peuvent être restreintes du fait de la pression de la roche. Concrètement, l'instrumentation a pour but de contrôler la géométrie d'un cylindre, en connaissant sa configuration d'origine et le niveau de déformation mesuré grâce à une fibre optique fixée à sa surface selon une section donnée, puisque c'est le seul endroit où des capteurs peuvent être installés sans limiter l'espace utile.

II. STRUCTURE TESTÉE, CAPTEURS ET ACQUISITION DES DONNÉES

La structure testée est un microtunnel à l'intérieur duquel est placé un tube en acier de 762 mm de diamètre extérieur, de 25 mm d'épaisseur (voir figure 1). Il est constitué de tronçons de 2 m de longueur dont dont l'un est équipé d'un câble à fibre optique destiné à la surveillance de la variation de section ainsi que de capteurs de déplacements utilisés pour fournir des mesures de référence.

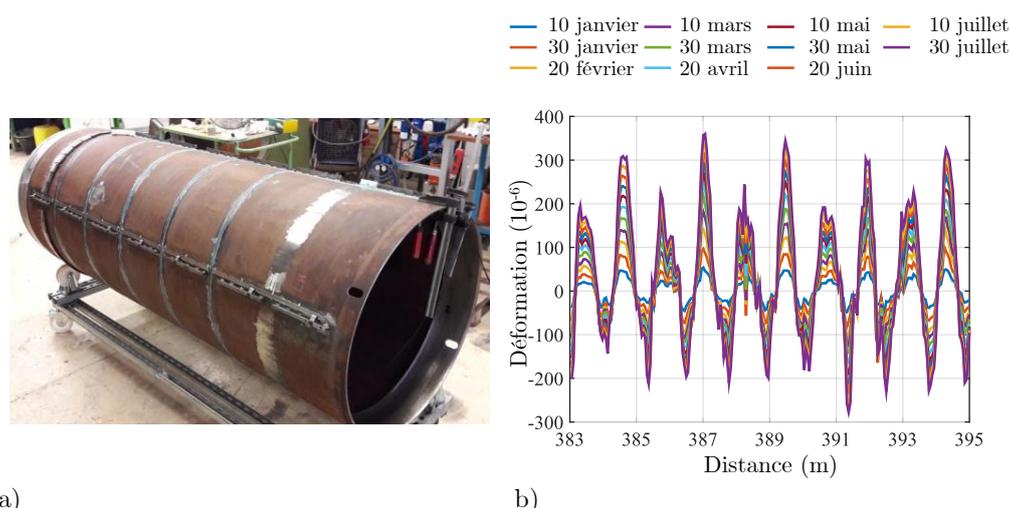


FIGURE 1 – a) Élément de chemisage d'alvéole HA instrumenté b) Déformation le long des 12 m de fibres optiques dans la zone de mesure utile

Un câble de mesure de déformation à fibre optique commercialisé par la société NEUBREX a été spécifiquement développé pour cette application à partir du modèle FN-SILL-3. C'est un câble plat comprenant une fibre monomode et une fibre multimode, afin de pouvoir discriminer les effets de déformation et de température. Il est collé (avec de la colle Araldite 2021-1) en forme d'hélice autour de la structure. La zone de mesure utile de la fibre est constituée de 5 spires avec un pas de 38 cm situées sur la surface externe dans la partie instrumentée de la maquette. La ligne optique totale, de l'instrument à la maquette incluant la fibre de retour est de 719 m de long, tandis que la zone utile est d'environ 12 m. Les mesures sont acquises avec le Neubrescope NBX-7020 de la société Neubrex Co. Ltd, mettant en œuvre la technique TW-COTDR. Elle fournit une mesure du décalage de fréquence $\Delta\nu$ entre l'état actuel et l'état de référence de la fibre qui est lié à la température et au niveau de déformation dans le câble optique :

$$\Delta\nu = C_T\Delta T + C_\epsilon\Delta\epsilon \quad (1)$$

où C_T , C_ϵ sont les coefficients de conversion du décalage de fréquence en déformation et température (Delepine-Lesoille et al. 2013). La résolution spatiale de la mesure est de 10 cm, et la périodicité des mesures

de décalages de fréquence Rayleigh analysés pour le suivi de la structure est de 20 jours. La déformation mesurée peut être divisée en cinq parties selon les cinq spires (voir figure 1). Le profil de déformations sur chacune d'entre elles présente la même allure qu'une sinusoïde, comme sur la figure 2.

III. ANALYSE

On suppose que le comportement du chemisage est élastique linéaire et le modèle *a priori* bien connu (géométrie, conditions aux limites, matériaux). Le chargement est modélisé par deux distributions sinusoïdales, de type "palier" suivant les directions principales de chargement horizontale σ_h et verticale σ_v . Le modèle de chargement utilisé est représenté sur la figure 2, où $\sigma_h = \alpha \cos(\theta)$ et $\sigma_v = \beta \sin(\theta)$, α et β étant les amplitudes de la pression distribuée à trouver et θ l'angle autour de la structure. L'amplitude de l'effort qui a induit le niveau de déformation mesuré le long de la fibre optique est inconnu. Le problème est donc de

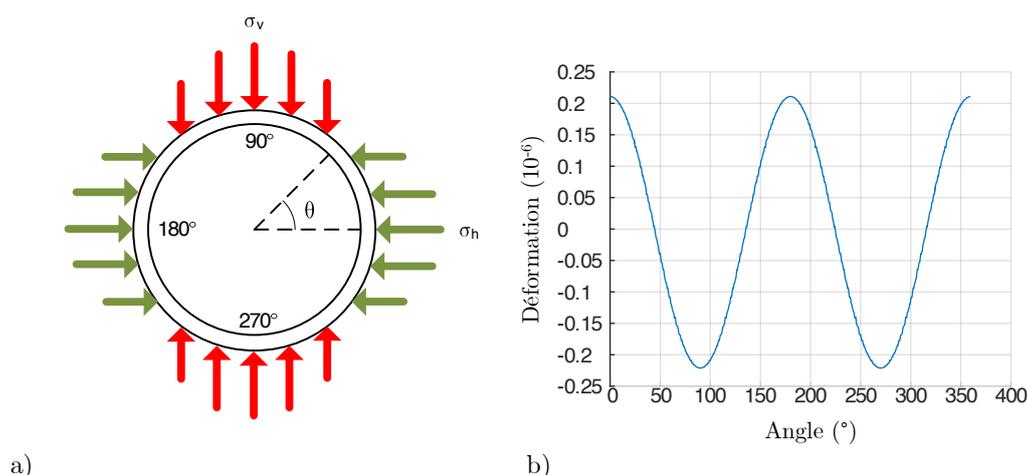


FIGURE 2 – a) modélisation du chargement suivant les directions principales de chargement horizontale σ_h et verticale σ_v , b) modélisation de la déformation orthoradiale sur une spire pour $\alpha = 0$ et $\beta = 1$.

trouver les paramètres de chargement α, β qui minimisent une fonction objectif Φ telle que :

$$\Phi(\alpha, \beta) = \|\tilde{\varepsilon} - \varepsilon(\alpha, \beta)\|^2 \quad (2)$$

où $\tilde{\varepsilon}$ est la déformation mesurée le long de la fibre et $\varepsilon(\alpha, \beta)$ la déformation calculée par éléments finis. La déformation simulée en tenant compte de la fonction de transfert du câble est interpolée sur les différentes spires de l'hélice et sur les points de mesure expérimentaux afin de minimiser la fonction objectif. Un exemple de déformation simulée le long d'une spire pour $\alpha = 0$ et $\beta = 1$ est visible sur la figure 2.

IV. RÉSULTATS ET CONCLUSION

La figure 3 (a) montre que les profils représentant la déformation expérimentale et la déformation simulée à température constante sont globalement en adéquation. On peut également noter que le modèle par éléments finis permet de filtrer les valeurs aberrantes qui résultent de la corrélation croisée des mesures Rayleigh. Une fois que les paramètres de chargement sont obtenus, il est possible de déterminer par post-traitement la valeur du changement de diamètre sur le modèle optimal. L'analyse des mesures montre que

L'amplitude α du chargement horizontal σ_h reste nulle tandis que celle du chargement vertical σ_v croît au cours du temps. L'alvéole est mise en compression dans la direction verticale tandis qu'un allongement est observé dans la direction horizontale, ce qui donne lieu à une réduction du diamètre vertical. La comparaison entre les variations mesurées par les capteurs de déplacements verticaux et horizontaux positionnés à l'intérieur de la structure et celles calculées avec le modèle est donnée sur la figure 3 (b). La mesure par fibre optique permet après analyse inverse d'obtenir une variation de diamètre proche (avec une sous-estimation inférieure à 15%) de la valeur de référence des capteurs. La méthode est capable de discriminer les différents niveaux de chargement avec une résolution inférieure au millimètre.

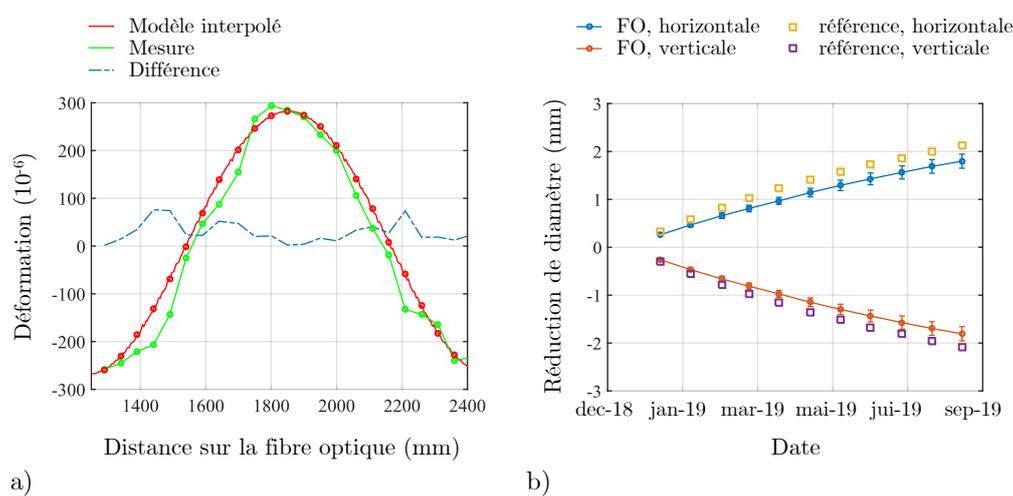


FIGURE 3 – a) Comparaison entre les déformations mesurées et simulées avec une interpolation au niveau des points de mesure pour une demi-spire. b) Suivi de la réduction de diamètre de l'alvéole de stockage au cours du temps effectuée avec la mesure de déformation par fibre optique et des capteurs LVDT (référence). La barre d'erreur représente la dispersion des valeurs obtenues grâce aux mesures par fibre optique effectuées sur les différentes spires

Cette étude démontre la possibilité d'utiliser des câbles optiques, et de mesurer une déformation répartie pour *in fine* contrôler la géométrie d'alvéoles de stockage de déchets radioactifs. La méthode est une avancée dans le domaine puisque (i) elle est compatible avec une utilisation en environnement sévère, (ii) l'intérieur des excavations reste exempt d'instrumentation (iii) elle convient aux grandes structures, car la portée des fibres optiques peut facilement atteindre des kilomètres. Enfin, il est possible de contrôler la géométrie de la structure étudiée en tout point avec un seul capteur.

RÉFÉRENCES

- Armand, G., Noiret, A., Zghondi, J. & Seyedi, D. M. (2013), 'Short- and long-term behaviors of drifts in the Callovo-Oxfordian claystone at the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory', *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 5(3), 221–230.
- Delepine-Lesoille, S., Guzik, A., Bertrand, J., Henault, J.-M. & Kishida, K. (2013), Validation of TW-COTDR method for 25km distributed optical fiber sensing, *in* 'Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors', Vol. 8794, International Society for Optics and Photonics, p. 879438.