

Contrôle de la géométrie d'alvéoles de stockage de déchets radioactifs par fibres optiques

Arianna Piccolo¹⁻², Yann Lecieux¹, Sylvie Delepine-Lesoille² and Dominique Leduc¹

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 vise à démontrer la faisabilité de la mesure de variation de section d'alvéoles destinées au stockage de déchets radioactifs avec des capteurs de déformations à fibres optiques, en exploitant la diffusion Rayleigh. La solution proposée ne restreint pas la section utile des alvéoles et est compatible avec un usage en environnement sévère. La diffusion Rayleigh permet d'effectuer des mesures réparties permettant d'obtenir plus de données que les méthodes classiques de mesure de déformation basées la plupart du temps sur des mesures ponctuelles. 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 ensuite évaluées grâce à des essais menés sur un démonstrateur réalisé à l'échelle une.

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

I. INTRODUCTION

La production d'électricité via le réseau des centrales nucléaires génère des déchets radioactifs qui ne peuvent être stockés définitivement en surface en raison de leur niveau élevé de radioactivité et de leur durée de vie. L'approche française consiste à étudier la possibilité d'un stockage réversible de ces déchets en profondeur dans des tunnels dédiés appelés alvéoles. L'Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs (Andra) s'est ainsi vu confier la gestion du projet Cigéo (Centre industriel de stockage géologique) pour le dépôt en couches géologiques profondes des déchets les plus dangereux. Dans le cadre de ce projet, il appartient à l'Andra de proposer un dispositif de surveillance pour contrôler la sécurité du site et de ses environs, mais également pour confirmer la réversibilité du stockage lors des premières décennies d'exploitation du centre. C'est ce second point qui sera traité dans cette étude. En effet, L'Andra évalue actuellement les méthodes de surveillance des tunnels dans son laboratoire de recherche souterrain, où des capteurs de différents types sont exploités sur des démonstrateurs d'alvéoles de stockage de déchets (Armand et al. 2013). Ils se trouvent à 500 m de profondeur sous terre, dans des excavations souterraines horizontales. Ces cellules sont similaires aux véritables alvéoles de stockage et sont conçues pour héberger des conteneurs cylindriques. Pour le gestionnaire du centre, l'instrumentation doit permettre de vérifier sa capacité d'accès aux conteneurs stockés dans chaque cellule. Le paramètre à surveiller est ainsi son changement de diamètre. En effet, la section des alvéoles peut être réduite du fait de la pression qu'exercent les roches environnantes.

Or si le diamètre passe en dessous d'une valeur limite, les déchets ne sont plus accessibles. Physiquement, le problème revient à 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 la surface de ce cylindre selon une section donnée, puisque c'est le seul endroit où des capteurs peuvent être installés sans limiter l'espace utile.

II. ESSAIS EN LABORATOIRE : STRUCTURE TESTÉE, CAPTEURS ET CAS DE CHARGEMENT

La structure testée a été conçue pour être aussi représentative que possible de la cellule de stockage réelle, notamment au regard de son comportement en réponse à un chargement externe. Dans le cas réel, on s'attend à un total de 10 mm de variation de diamètre pendant la phase d'exploitation du fait de la pression de la roche sur la cellule. Le dispositif d'essai est un anneau d'acier de 762 mm de diamètre extérieur, de 10 mm d'épaisseur et de 200 mm de largeur. L'acier a un module d'Young de $210\,000\text{ N/mm}^2$ et un coefficient de Poisson de 0,28. Le changement de diamètre de 0 à 10 mm est obtenu par la mise en charge de l'anneau sur une pièce de réaction (en vert sur la figure 1) avec un patin fixé sur une tige vissée dans la pièce support.

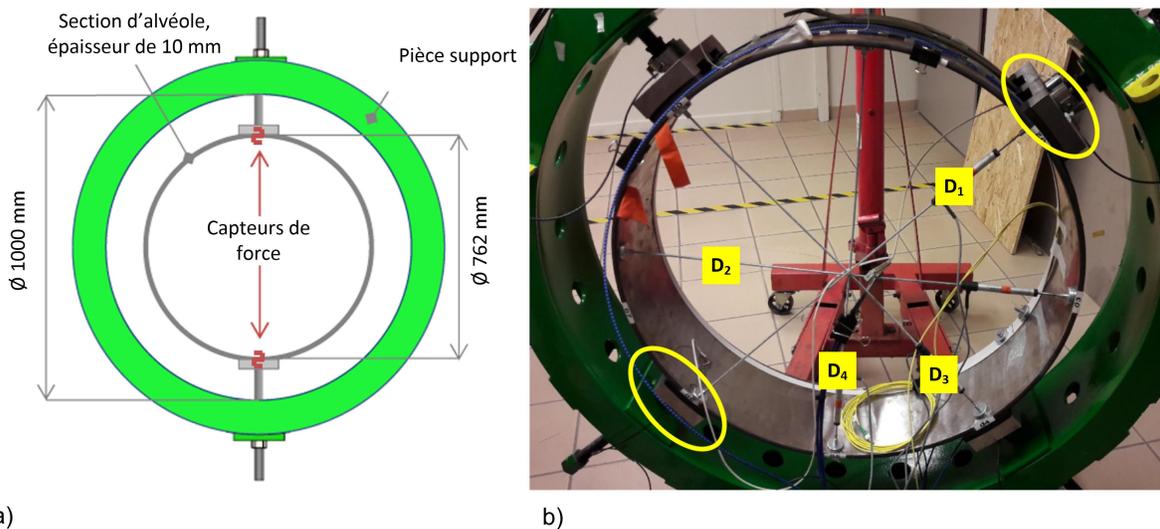


FIGURE 1 – (a) Schéma du dispositif expérimental, (b) Photographie du démonstrateur : l'anneau métallique instrumenté se trouve à l'intérieur de la pièce support (en vert). Les quatre capteurs de déplacement " D_i " et le dispositif d'application de la charge sont en jaune.

La section d'alvéole est équipée d'un câble optique BRUsens V9 de 3.2 mm de diamètre. Ce dernier visible en bleu sur la figure 1 est collé tout le long de la section avec de l'époxy (Araldite 2021). Les mesures indirectes de changement de section obtenues grâce aux fibres optiques sont comparées aux mesures directes de quatre capteurs de déplacement qui sont positionnés sur les diamètres D_1 à D_4 (voir figure 1). Ils sont utilisés comme capteurs de référence car ils sont similaires à ceux utilisés pour la surveillance des micro-tunnels. Ce sont des capteurs linéaires de position de résolution inférieure à 0,01 mm. Enfin, des capteurs de force sont installés en série sur chaque patin permettant de mettre en charge l'alvéole (portée de 10 kN et résolution de 0,1 %). Le câble est interrogé avec un appareil commercial, le Neubrescope NBX-7020F exploitant la diffusion Rayleigh. Cette technique fournit une mesure du décalage de fréquence $\Delta\nu$ entre l'état actuel et l'état de référence de la fibre (Delepine-Lesoille et al. 2013) qui est lié à la température et au niveau de contrainte 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).

Afin d'analyser la faisabilité de la surveillance des variations de section par mesures de déformation, divers cas de chargement sont envisagés. La charge principale résulte du poids de la roche. Un effort sur le démonstrateur est appliqué à une position donnée alors que le point opposé est fixe. Ainsi, une charge verticale, et l'effort de réaction sont simulés. La cellule est entourée de roche, de sorte que deux autres appuis sont positionnés à 90 degrés de la ligne formée par les deux premiers appuis afin de simuler l'effort de réaction de la roche sur le chemisage métallique dans la direction perpendiculaire. Ces derniers sont fixés à 2 mm de la structure, afin de simuler le placement réel du chemisage à l'intérieur de l'excavation. Ce cas est illustré par la figure 2 (a). Le second cas de chargement, représenté sur la figure 2 (b), correspond à une version simplifiée du cas précédent. Il ne présente que deux appuis diamétralement opposés et a été conçu pour démontrer la faisabilité de la mesure inverse. C'est le cas de chargement qui sera présenté dans ce résumé. La déformation mesurée sera représentée en fonction de la position angulaire sur la structure. Sur ce repère, en (c) les positions des capteurs de déplacement sont indiquées.

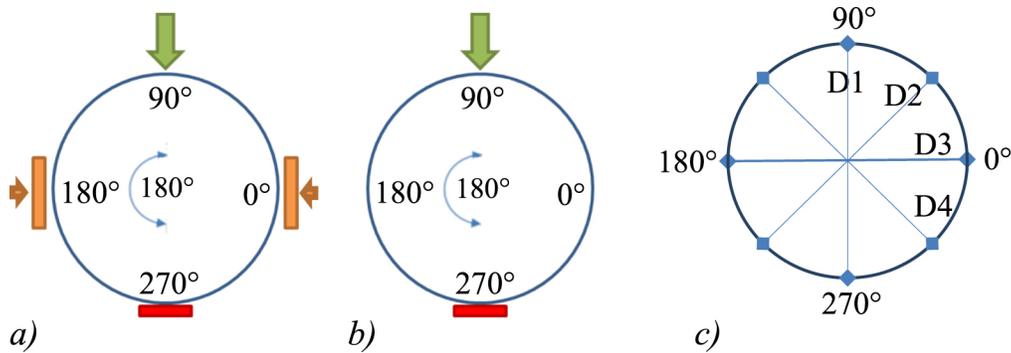


FIGURE 2 – Position des efforts : (a) Cas réel (b) Cas simplifié (c) Position des capteurs de déplacement

III. ANALYSE

Le comportement de la structure est élastique linéaire, le modèle *a priori* bien connu (géométrie, conditions aux limites, matériaux). Seule l'amplitude de l'effort, modélisé par une charge ponctuelle, qui a induit le niveau de déformation mesuré le long de la fibre optique ne l'est pas. En revanche, l'orientation de la charge et son point d'application sont connus. Le problème est donc de trouver le paramètre de chargement F qui minimise une fonction objectif Φ telle que :

$$\Phi(F) = \|\tilde{\epsilon} - \epsilon(F)\|^2 \quad (2)$$

où $\tilde{\epsilon}$ est la contrainte orthoradiale mesurée et $\epsilon(F)$ la contrainte calculée par éléments finis. F est la force appliquée à la position $\theta = 90^\circ$. Puisqu'il est possible de résoudre le problème selon le principe de superposition, si $F^u \rightarrow (u^u, \epsilon^u)$ alors $\alpha F^u \rightarrow (\alpha u^u, \alpha \epsilon^u)$ où l'exposant u signifie "unitaire". Le problème se ramène à la recherche du paramètre scalaire α qui minimise la fonction objectif Φ :

$$\Phi(\alpha) = \|\tilde{\epsilon} - \alpha \epsilon(F^u)\|^2 \quad (3)$$

IV. RÉSULTATS ET CONCLUSION

La figure 3 (a) montre que les profils représentant la déformation expérimentale et la déformation simulée 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 le paramètre de chargement est obtenu, il est possible de déterminer par post-traitement la valeur du changement de diamètre sur le modèle optimal. La comparaison entre cette variation mesurée (par le capteur de déplacement) et celle calculée avec le modèle est donnée sur la figure 3 (b). La mesure par fibre optique permet après analyse inverse d'obtenir un déplacement radial proche de la valeur de référence des capteurs. La méthode est capable de discriminer les différents niveaux de chargement avec une précision inférieure au millimètre ce qui constituait l'objectif de performance à atteindre.

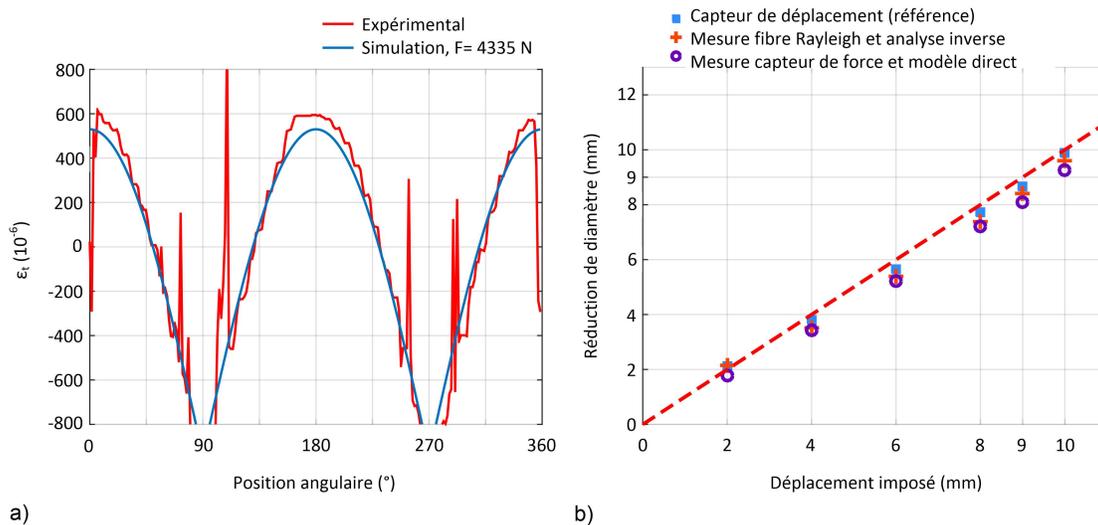


FIGURE 3 – (a) Déformation mesurée et modélisée (b) Changement de section pour un chargement variable

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 radioactif. La méthode est une avancée dans le domaine puisque (i) elle est compatible avec une utilisation en environnement sévère, (ii) l'intérieur des tunnels 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. & Seyed, 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.