

Auscultation et Instrumentation de démonstrateurs d'alvéoles de stockage au CMHM

Monitoring and Instrumentation of demonstrators storage cells (CMHM)

Gay O., Teixeira P.

EGIS Géotechnique, Département Instrumentation, Seyssins, France

Bumbieler F., Morel J.

ANDRA, Direction R&D, CMHM Bure, France

RÉSUMÉ : Le programme multidisciplinaire (géologique, hydrogéologique, géochimique et géomécanique) engagé par l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) dans le laboratoire souterrain de recherche situé à Bure (Centre Meuse / Haute-Marne : CMHM) comporte un certain nombre d'expérimentations destinées à évaluer la constructibilité, la sûreté et la réversibilité d'un éventuel stockage de déchets radioactifs dans les argilites du Callovo-Oxfordien. Dans le cadre de ces projets, EGIS Géotechnique a été chargé d'assurer des missions d'instrumentation sur des prototypes d'alvéoles de stockages (de diamètre 70cm et de 40 m de longueur). Des dispositifs spécifiques ont ainsi été développés par EGIS dans le cadre de ces expérimentations scientifiques afin d'analyser le comportement de ces ouvrages souterrains.

ABSTRACT: The multidisciplinary program (geological, geochemical, hydrogeological and geotechnical) hired by the National Agency for the management of radioactive waste (Andra) in the underground laboratory of research in Bure (CMHM) has a number of experiments designed to evaluate constructability, safety, and the reversibility of any storage of radioactive waste in the Callovian-Oxfordian clays. These projects EGIS geotechnical was responsible for ensuring the mission of instrumentation of the prototypes of cell preparations (40 m long and 70 cm diameter). Specific devices were developed by EGIS as part of these scientific experiments to analyze the behavior of these underground structures.

MOTS-CLÉS : Géotechnique, instrumentation, Laboratoire Souterrain, alvéole, stockage, capteurs.

KEYWORDS: Geotechnical, instrumentation, Underground laboratory, cell, storage, sensors.

1 INTRODUCTION

Dans un cadre législatif datant de 1991, l'Andra a construit sur la commune de Bure (Nord-Est de la France, limite Meuse / Haute-Marne) un laboratoire de recherche souterrain, dans lequel ont été mises en œuvre des expérimentations à caractère scientifique et technologique.

Les ouvrages souterrains de ce laboratoire comprennent :

- un puits d'accès de 5 m de diamètre fini, et de 500 m de profondeur,
- un puits auxiliaire de 4 m de diamètre fini, et de 500 m de profondeur, distant de 100 m du puits principal,
- une galerie d'expérimentations, située au niveau 445 m à partir du puits d'accès,
- un réseau de galeries accessible à partir du niveau -490 m.

Le schéma du laboratoire est présenté ci-dessous :

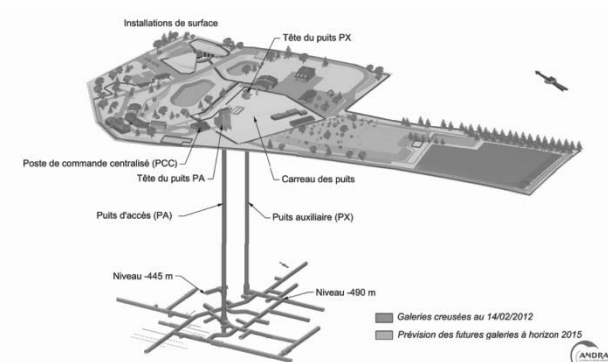


Figure 1. Schéma d'implantation du laboratoire (CMHM).

Le présent article concerne l'auscultation et instrumentation des alvéoles HA (nues ou avec chemisage acier) proposées par Egis Structures et Environnement (Egis Géotechnique) : Auscultation vidéo, mesures de section et trajectométrie géoréférencées puis instrumentation des alvéoles par mesures de convergence longue durée selon des sections instrumentées associées à des mesures de température et humidité relative, mesures d'humidité relative au sein des chemisages, mesures de déformation locale par jauges extensométriques et mesures réparties de température et déformation par technologie à fibre optique.

Nous rappelons ci-après le concept des alvéoles HA qui consiste en un tunnel horizontal borgne d'au moins 80 m de long et d'environ 700 mm de diamètre, équipé d'un chemisage métallique d'au moins 25 mm d'épaisseur sur toute sa longueur. La configuration horizontale de l'alvéole justifie la présence de ce chemisage pour contenir la convergence des argilites et

permettre la mise en place et le retrait éventuel des colis de stockage pendant la période séculaire de réversibilité. L'alvéole comporte une partie «utile» destinée au stockage des colis de déchets, et une tête d'alvéole destinée à la fermeture de l'alvéole. La figure 2 ci-après représente ces alvéoles.

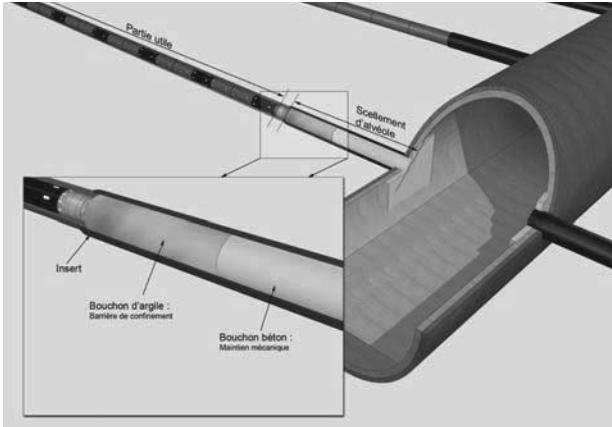


Figure 2. Schéma de principe des alvéoles HA.

2 AUSCULTATION VIDÉO

Un dispositif d'auscultation vidéo a été spécifiquement modifié et développé par Egis pour l'observation détaillée de ces alvéoles. Ce matériel permet de réaliser un relevé vidéo et photo précis ainsi que des mesures de trajectométrie et mesures de sections géoréférencées car couplé à un théodolite motorisé. La figure 3 ci-après représente ce robot.



Figure 3. Robot d'auscultation vidéo en tête d'alvéole chemisée.

Les mesures d'auscultation vidéo permettent d'obtenir des informations sur la trajectométrie de l'alvéole creusée avec une précision de ± 1 à 2mm. Les mesures de sections réalisées avec le télémètre laser associé à la caméra articulée sont réalisées avec une précision millimétrique sur le diamètre. D'autre part, le zoom optique de la caméra permet de détecter des fissures dont la dimension pourrait être de l'ordre du dixième de millimètre.

3 DISPOSITIF DE CONVERGENCE

Afin d'effectuer, en continu, les mesures de convergence des alvéoles HA, EGIS Géotechnique a conçu, réalisé et mis en place des dispositifs mécaniques (Cf. Figure 4 ci-après) dont les principaux éléments sont :

- 6 roues disposées à 120° (tripodes) afin d'assurer le centrage du dispositif de mesures.
- 8 couples vérin(2)/capteur(1) de déplacement : le vérin permettant de rétracter les tiges des capteurs de

déplacement, puis ces derniers permettant des mesures au 10^{ème} de mm.

- Contrôle de l'orientation par un capteur inclinométrique(3) embarqué
- Mesure de température et humidité(4)

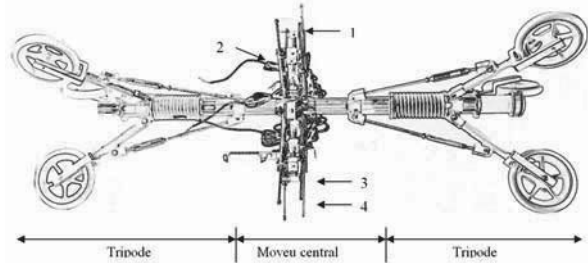


Figure 4. Vue d'ensemble d'une Section de Mesure de Convergence.

Ces dispositifs présentent l'avantage de pouvoir être couplés (par exemple, 4 sections de mesure ont été mises en place dans une alvéole de 20m), adaptés aux sections des alvéoles (prises en compte des hors-profils, breakouts,...) et ils demeurent amovibles.

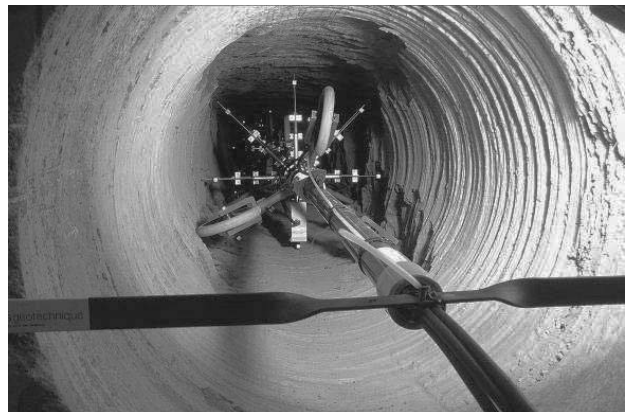


Figure 5. Dispositif de Mesure de convergence en tête d'alvéole nue.

La figure suivante représente l'évolution des convergences les plus significatives sur trois rayons sur une période de 5 mois après le creusement. On observe des valeurs entre 6 et 10mm (pour un diamètre d'alvéole de l'ordre de 70 cm) non stabilisées et illustrant le caractère anisotrope des convergences.

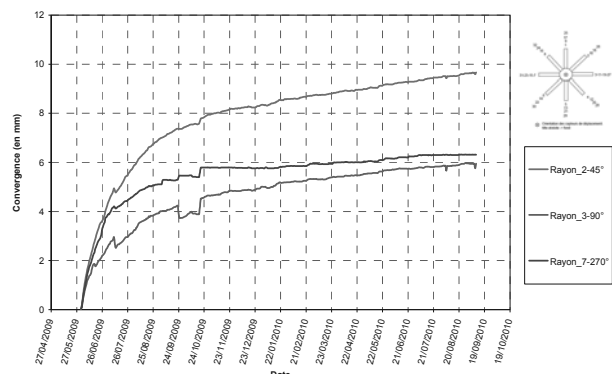


Figure 6. Evolution des convergences d'une alvéole nue, post creusement.

4 ALVÉOLES CHEMISÉES

Des alvéoles chemisées de 20 à 40 m (soutènement acier de 20mm d'épaisseur) ont également été réalisées par l'Andra. Afin d'étudier le comportement mécanique et thermique de ces ouvrages, des instrumentations ont été spécifiquement développées. Les capteurs suivants ont été mis en œuvre :

- jauges de déformations dans les 3 directions, en parties interne ou externe du chemisage,
- capteurs d'humidité relative de l'espace annulaire,
- cannes de convergences horizontales et verticales,
- capteurs de pression d'eau dans l'espace annulaire,
- capteurs de pression totale appliquée au chemisage,
- capteurs de déplacement, reprise de jeu chemise / roche,
- ligne de capteurs de température (pour les sollicitations thermiques des alvéoles),

La figure suivante représente un lamage interne du chemisage dans lequel des jauges de déformations (et électronique intégrée) ont été micro soudées pour mesurer les déformations locales des chemises engendrées par les contraintes transmises par le massif d'argilites.

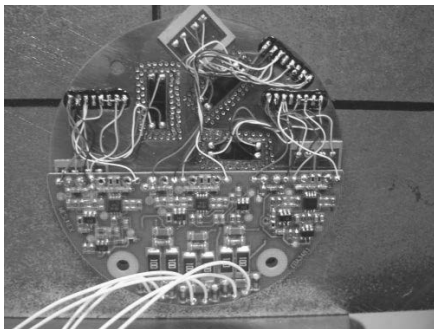


Figure 6. Photo de montage d'un clinquant équipé de jauges et électronique de lecture intégrée.

La figure suivante illustre l'instrumentation de 4 sections d'une alvéole chemisée de 40 m de longueur. Le graphe permet de visualiser l'évolution de l'humidité relative à différentes profondeurs, dans l'espace annulaire sur une période de l'ordre d'un an. On constate qu'à partir de 15m de profondeur l'humidité relative a rapidement atteint une valeur palier entre 95% et 100% tandis que la section de mesure située à 7m (à proximité de la tête de l'alvéole et par conséquent proche du système de ventilation des galeries) montre des valeurs plus fluctuante et parfois inférieures.

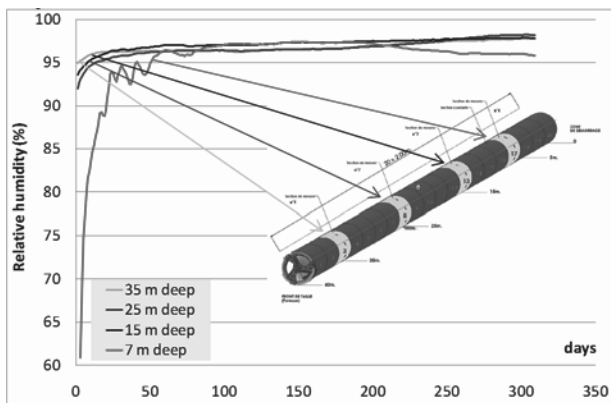


Figure 7. Evolution de l'humidité relative selon 4 sections de mesure, au sein d'une alvéole chemisée de 40m, pendant 1 an.

Des expérimentations sont en cours sur un démonstrateur d'alvéole chemisée qui sera sollicitée thermiquement jusqu'à 90°C afin de simuler la présence de colis de déchets HAVL (Haute Activité et Vie Longue). Des capteurs de pression totale ont été développés spécifiquement pour le projet pour déterminer l'impact du comportement thermo-hydro-mécanique du massif avoisinant sur le chargement mécanique du chemisage. Le schéma ci-après représente ce capteur intégré au chemisage. Une modélisation numérique de ce capteur a également été conduite pour contrôler son dimensionnement.

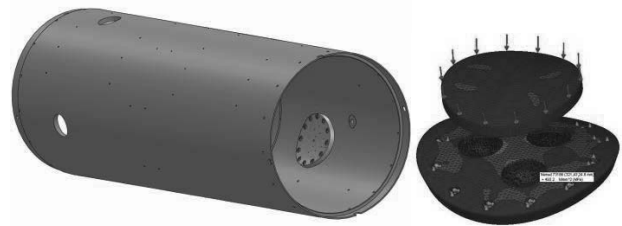


Figure 8. Simulation 3D d'une chemise (Ø 70 cm, l=2m) et d'un capteur d'effort intégré dans le chemisage.

Nous précisons que l'ensemble de ces dispositifs a été testé en vraie grandeur au sein du laboratoire d'Egis Géotechnique. A l'aide d'un packer cylindrique creux et d'un tube de réaction, des tests mécaniques de contraintes jusqu'à 50 bars ont été menés sur ces chemises instrumentées de 2m de longueur. Ces essais nous ont permis de valider nos chaînes d'acquisition avant de les mettre en œuvre dans le laboratoire souterrain de l'Andra.

5 INSTRUMENTATION PAR FIBRE OPTIQUE

En parallèle des instrumentations dites « classiques » dans le domaine de la géotechnique, des capteurs plus innovants utilisant la technologie à fibre optique ont été mis en place.

Il s'agissait de mettre en place plusieurs fibres optiques le long du chemisage de 40m (en externe et en interne) pour mesurer le comportement thermomécanique « global » du chemisage. Une fibre optique pour acquisition d'un profil de déformation (dont la résolution spatiale est entre 50 cm et 1m) a été fixée sur la génératrice intérieure haute du chemisage ainsi qu'une fibre relative à un profil de température. Une fibre optique renforcée a été positionnée à l'extérieur sur la partie haute de l'alvéole pour la détection de chutes de blocs / breakouts.

Les mesures ont été effectuées avec des interrogateurs permettant les analyses des rétrodiffusions Brillouin pour la mesure de déformation et l'analyse de la rétrodiffusion Raman pour la mesure de température.

La figure suivante synthétise l'ensemble de la chaîne de mesure au sein du laboratoire souterrain de recherche (depuis l'alvéole jusqu'à une distance déportée de 200 m de galerie et une baie spécifique fibre optique contenant l'enregistreur de type BOTDA (Brillouin based Optical Time Domain Analysis) qui est basée sur le principe de rétrodiffusion stimulée. L'avantage de ce type d'analyseur est qu'il permet d'obtenir un meilleur signal sur bruit et une meilleure précision de mesure. En revanche le système doit être bouclé.

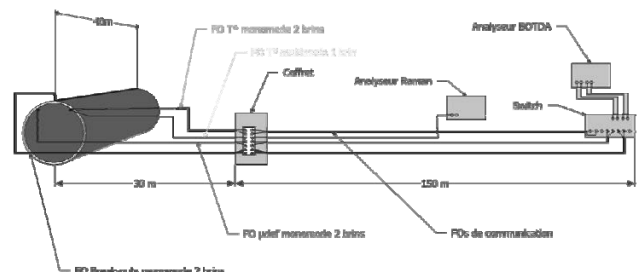


Figure 9. Schéma conceptuel de la chaîne d'acquisition Fibre optique, de l'alvéole chemisée instrumentée jusqu'à l'enregistreur BOTDA.

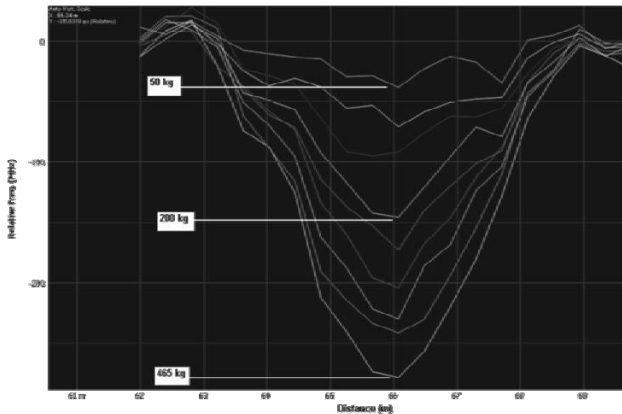


Figure 10 Essais de chargement de 50 à 465 kg sur banc de test constitué d'un tube métallique et d'une fibre optique fixée par brides inox courtes espacées de 50 cm.

Une série de tests en laboratoire à Egis a été conduite afin de contrôler le comportement des différentes fibres optiques sous sollicitations mécaniques et thermiques. D'autre part les différentes méthodes de fixation des fibres ont été étudiées (collage, brides, gaine résinée intégrant les fibres, ...). Le graphe (figure 10) précédent regroupe des essais de chargement sur un tube métallique équipé d'une fibre optique. Chaque courbe de couleur représente le décalage de la fréquence Brillouin le long de la fibre optique pour une charge donnée.

6 CONCLUSION

L'auscultation des alvéoles nues ou chemisées permet d'apporter des informations complémentaires sur le comportement des argilites du Callovo oxfordien et sur l'état de surface de la paroi du massif.

Les relevés photos et vidéos géoréférencés fournissent des indications qualitatives précises sur l'état de surface du massif creusé ainsi que sur le résultat de la technique de creusement retenue pour les essais de démonstration. Les mesures de sections (au télémètre laser) et la trajectométrie complètent cette analyse.

En complément, les dispositifs de convergence permettent d'effectuer un suivi de longue durée de l'évolution des convergences (ainsi que température et hygrométrie). On a ainsi pu constater que le massif converge principalement suite à l'excavation et la libération des contraintes. Par la suite, les vitesses de convergence diminuent et évoluent plus lentement (fluage) pour tendre vers une stabilisation. D'autre part, les zones de breakouts au niveau de la génératrice haute et des reins droits et gauches des alvéoles sont également observées et mesurées.

L'instrumentation complémentaire en alvéoles chemisées intégrant des mesures de déformations du chemisage, des mesures de conditions hydriques à l'interface acier/roche et des mesures réparties de température et déformations à l'aide de fibres optiques permettent d'apporter des informations supplémentaires quant aux modalités de mise en charge mécanique du chemisage par le massif.

Les expérimentations en cours démontrent l'intérêt et l'avantage de l'utilisation de la technologie fibre optique dans le domaine de la géotechnique particulière (ouvrage souterrain à grande profondeur et éventuels ouvrages futurs de génie civil non accessibles à moyens termes).

7 RÉFÉRENCES

- Georges Asch et Coll. (2006). Les capteurs en instrumentation Industrielle, Editions Dunod.
 ARUFOG. (2012). Conférence sur les capteurs à fibre optiques.
 EGIS, Rapport Interne de recherche Andra, (2011) Rapport d'Etude de Conception des instrumentations des Démonstrateurs d'alvéoles de stockage HA.
 INERIS – ANDRA (V.Renaud – J.Morel) (2010) – « Calculs 3D prédictifs pour la conception d'alvéoles de stockage de déchets radioactifs HAVL », (JNGG Juillet 2010).