

# INSTRUMENTATION ET MESURES DE CONVERGENCES DE MICRO-TUNNELS CHEMISES

## ***INSTRUMENTATION FOR CONVERGENCE MEASUREMENTS OF CASED MICRO-TUNNELS***

Pierre TEIXEIRA <sup>(1)</sup>, Olivier GAY <sup>(2)</sup>, Frédéric BUMBIELER <sup>(3)</sup>, Sylvie LESOILLE <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Egis Géotechnique ; [pierre.teixeira@egis.fr](mailto:pierre.teixeira@egis.fr) , Seyssins (38), France

<sup>(2)</sup> Egis Géotechnique ; [olivier.gay@egis.fr](mailto:olivier.gay@egis.fr) , Seyssins (38), France

<sup>(3)</sup> Andra ; [frédéric.bumbielier@andra.fr](mailto:frédéric.bumbielier@andra.fr) , Bure (55), France

<sup>(4)</sup> Andra ; [sylvie.lesoille@andra.fr](mailto:sylvie.lesoille@andra.fr) / [arianna.piccolo@andra.fr](mailto:arianna.piccolo@andra.fr) , Châtenay-Malabry (92), France

**RÉSUMÉ** – Dans le cadre de reconnaissances et auscultations de sites et plus spécifiquement d'ouvrages souterrains Egis collabore avec l'Andra sur des expérimentations scientifiques à grande profondeur. Des instrumentations ont été envisagées pour suivre des micro-tunnels horizontaux équipés d'un chemisage en acier. Un des besoins de mesure est le suivi de la convergence de ce chemisage. Le présent article expose le benchmark mené par Egis sur différentes technologies de capteurs.

**ABSTRACT** – In the framework of recognitions and monitoring of sites and more specifically of underground structures, Egis collaborates with Andra on scientific experiments at great depth. Instrumentation has been envisaged to follow horizontal cased micro-tunnels. One of the measurement needs is the monitoring of the convergence of the casing. This article presents the Egis benchmark on different sensor technologies.

### 1. Introduction

L'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (Andra) a construit sur la commune de Bure (Meuse / Haute-Marne) un laboratoire de recherche souterrain, dans lequel ont été mises en œuvre des expérimentations à caractères scientifiques et technologiques (Laboratoire Souterrain de Centre Meuse Haute-Marne).

Le programme multidisciplinaire (géologique, hydrogéologique, géochimique et géomécanique) en Laboratoire Souterrain (situé à 490m de profondeur) 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 (projet Cigéo : Centre industriel de stockage géologique).

Dans les concepts de surveillance des ouvrages souterrains, des instrumentations ont été envisagées pour suivre les alvéoles de stockage de déchets radioactifs de Haute Activité (HA) qui consistent en des micro-tunnels horizontaux équipés d'un chemisage en acier qui a pour fonction principale de garantir la mise en place et le retrait éventuel des colis de déchets pendant la période séculaire d'exploitation réversible de Cigéo. La convergence de ce chemisage, sous l'effet du chargement mécanique du massif, est donc un paramètre clé à suivre sur cette période.

Egis a proposé puis mis en œuvre (in situ et sur maquette en laboratoire) différentes technologies soit par mesures directes de variations de diamètres soit par mesures indirectes de déformations ou de variations du périmètre. Il a notamment été mis en place des fibres optiques suivant une circonférence pour évaluer cette convergence. Des

nouvelles technologies de nœuds de mesures proposées par la société Morphosense (startup issue du CEA LETI basée à Grenoble) ont été également mises en œuvre.

Le présent article expose le benchmark mené par Egis sur ces différents capteurs et différentes technologies ainsi que l'exploitation des premières mesures (directes et indirectes) de convergence.

Ainsi, l'instrumentation, l'observation et la surveillance de ces ouvrages sont des outils du processus d'exploitation de stockage. Elles contribuent à répondre aux besoins de connaissances nécessaires à l'exploitation du stockage à long terme et à la mise en œuvre potentielle de sa réversibilité.

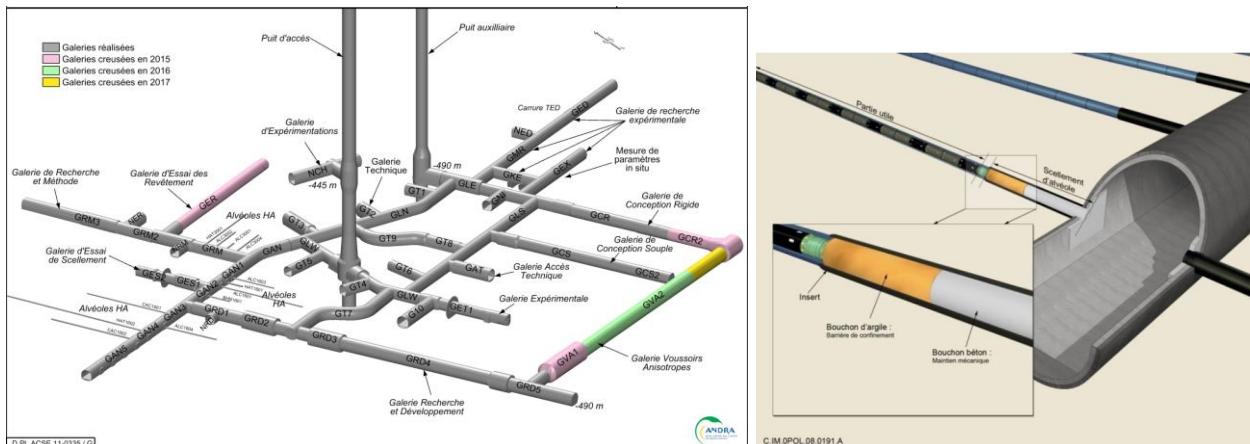


Figure 1. Implantation des galeries du laboratoire souterrain de l'Andra et Schéma de principe d'une alvéole de stockage de déchets HA (concept 2009).

## 2. Instrumentation de micro-tunnel chemisé au sein du CMHM

Egis intervient au sein du laboratoire souterrain de recherche de l'Andra depuis 2001 dans le cadre d'instrumentations géomécaniques. Le projet actuel d'auscultation s'intitule « Instrumentation classique de chemisages d'alvéoles HA » et fait partie du programme d'expérimentations « alvéoles HA » ayant pour objectif d'étudier le comportement thermo-hydro-mécanique de ces ouvrages.

Au cours de l'été 2016, l'instrumentation du chemisage d'une alvéole test de 10 m de longueur a été réalisée, ce micro-tunnel étant destinée à valider la méthode de creusement développée par l'entreprise Bessac. Ce démonstrateur d'alvéole, nommé AHA1601 a été creusé dans la galerie GAN.

La figure 2 présente la section de l'alvéole, puis le nombre de chemises posées dont celle (de couleur rouge) qui a été instrumentée :

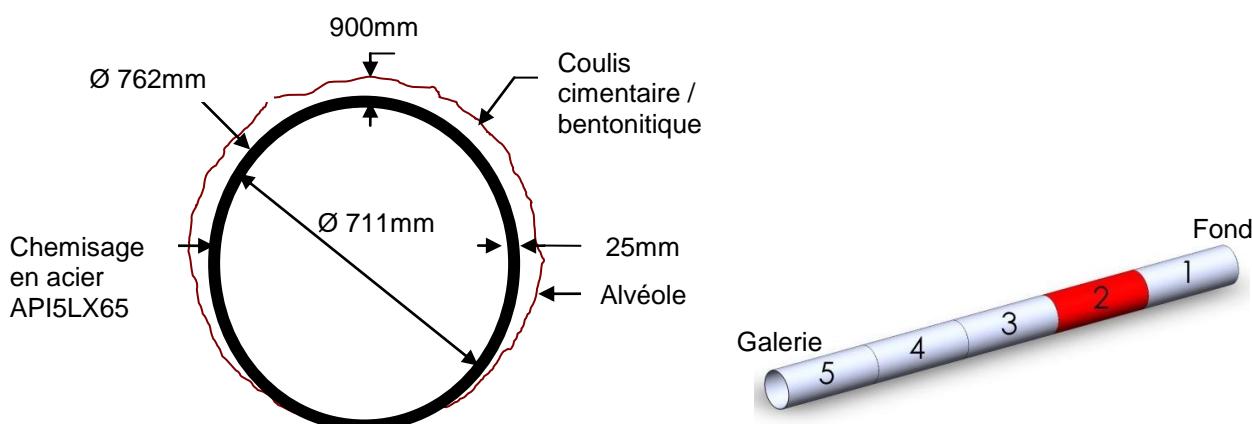


Figure 2 – Représentation d'une section de l'alvéole AHA1601 et localisation de la chemise instrumentée à proximité du fond.

Le tableau de synthèse suivant regroupe l'ensemble des capteurs qui a été testé :

Tableau 1. Synthèse des capteurs

Type de mesure	Type de capteur	Nombre de capteurs
Cannes de convergence Déplacement	Potentiométrique	4
Jauge extensométrique Déformation orthoradiale	Résistances métallique en pont de Wheatstone sur intrados chemisage	8*
Jauge extensométrique Déformation orthoradiale	Résistances métallique en pont de Wheatstone sur intrados lame acier	4
Réseau de Bragg Déformation orthoradiale	Fibre optique (marque HBM) sur intrados lame acier	2 lignes de 7 points
Réseau de Bragg Déformation orthoradiale	Fibre optique (marque LGS) sur extrados lame acier	2 lignes de 7 points
Inclinaison 3D	Accéléromètres de type MEMS de Morphosense (mesures de déformée 3D et vibrations 3D)	6

\* : option testée sur d'autres démonstrateurs du programme « Alvéoles HA » mais non mise en œuvre sur AHA1601

Les différents types de capteurs et technologies sont présentés brièvement ci-dessous.

## 2.1. Cannes de convergence

Une section de mesures de convergences comprend quatre capteurs de déplacements (horizontal, vertical et deux à 45°). Les capteurs de déplacement sont de type potentiométriques de 50mm de course. Le schéma de principe et la photo ci-après illustrent ce type de montage sur l'intérieur du chemisage métallique des micro-tunnels.

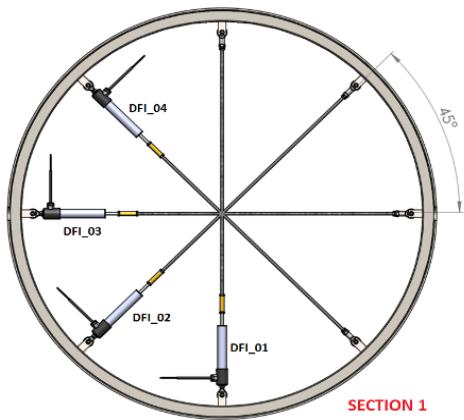


Figure 3 – Position des capteurs numérotés au sein d'une section instrumentée d'alvéole et photo correspondante.

Ces capteurs mesurent directement la variation de diamètre du chemisage sous l'effet du chargement mécanique du terrain. Le principal inconvénient de cette technique de mesure est son encombrement non compatible avec la présence de colis de déchets. Des méthodes de mesure non intrusives (et indirectes) de convergence ont donc également été testées.

## 2.2. Jauge de déformation sur chemisage

Les mesures de déformations locales sont effectuées par des jauge de déformations. Celles-ci sont directement collées à l'intérieur de lames usinées en intrados des chemises.

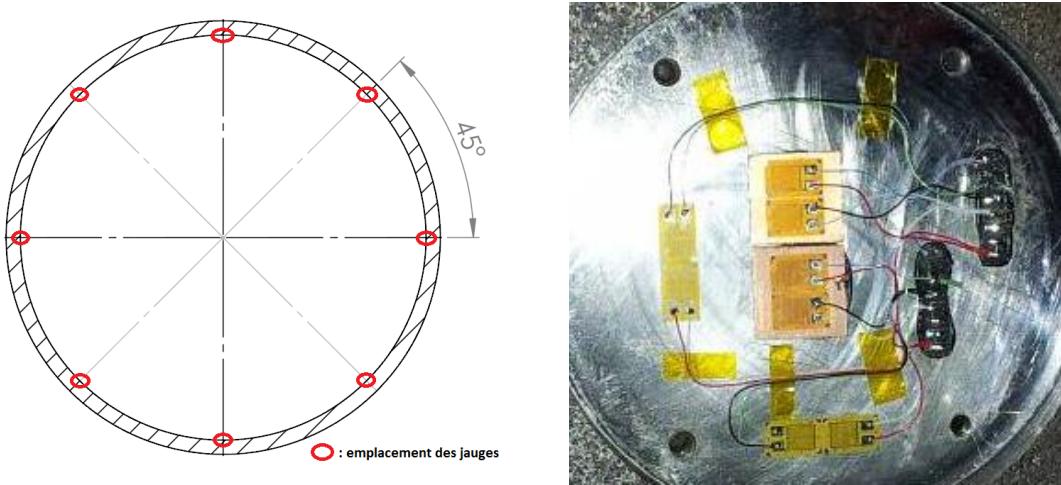


Figure 4 - Position des mesures de déformations locales et photo de montage

La mesure de déformation orthoradiale (en microdéformations :  $\mu\epsilon$ ) demeure une mesure indirecte de convergence. Cette instrumentation n'a pas été mise en œuvre sur l'alvéole AHA 1601.

### 2.3. Mesures de déformation sur lame d'acier

L'ensemble de l'instrumentation additionnelle au chemisage comprenant des jauge de déformation métalliques et différents capteurs à fibre optique (2 fibres à l'intrados et 2 fibres à l'extrados en technologie réseau de Bragg) est positionné sur une lame d'acier de diamètre extérieur 711mm et d'épaisseur 2mm vissée en intrados du chemisage.

Le schéma ci-dessous indique la position des différents capteurs sur la lame circulaire :

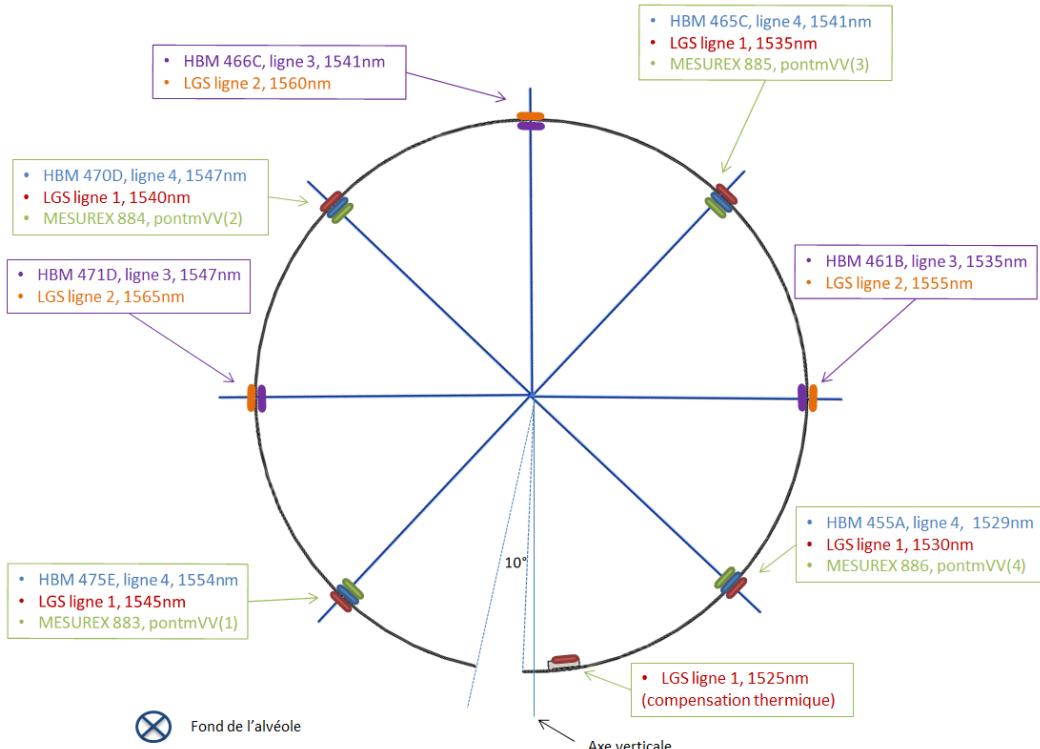


Figure 5 – Implantation des capteurs sur la lame d'acier

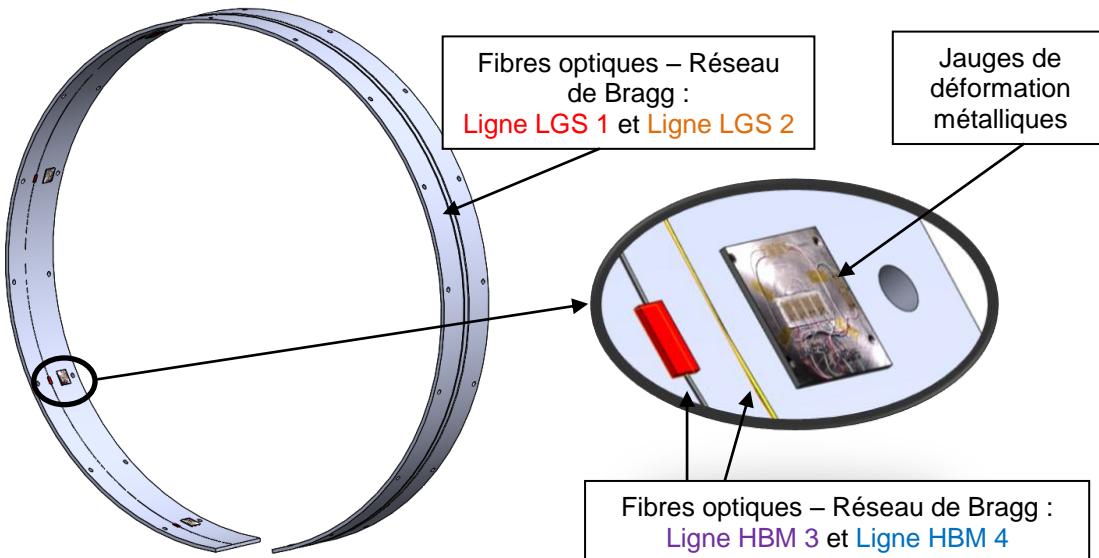


Figure 6 - Lame d'acier pré-instrumentée avec fibres optique et jauge de déformation

Deux engravures circulaires de 4mm de largeur et de 0.5mm de profond ont été usinées en extrados afin d'accueillir 2 fibres optiques dotées de réseaux de Bragg décalés en fréquence (permettant de les associer sur une fibre optique unique afin de réduire l'encombrement). Des réseaux de Bragg (HBM3&4) sont aussi présents sur la face interne de la lame d'acier, au niveau des jauge de déformation.

#### 2.4. Mesures de variation géométrique par capteurs accélérométriques

Une instrumentation avec des capteurs MorphoSense® basés sur la technologie des centrales inertielles (Mesure simultanée de la déformée en 3D et des vibrations dans les 3 directions) a été mise en place sur la même lame d'acier que les jauge de déformation et les fibres optiques. Les huit boîtiers de mesure ont été positionnés aux mêmes emplacements que les jauge de déformation et que les engravures du réseau de Bragg positionnées sur la lame (Figure 8).

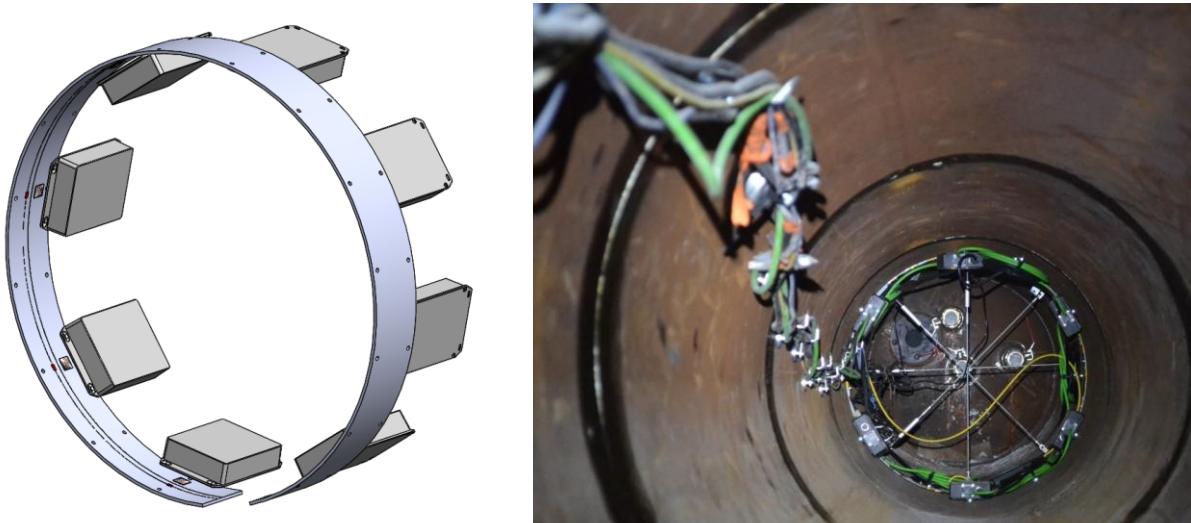


Figure 7 - Lame d'acier pré-instrumenté avec boîtiers Morphosense et photo dans le micro-tunnel.

## 2.4. Acquisition

Les mesures des FBG ont été réalisées à l'aide d'interrogateur de chez LGS et les capteurs analogiques par une centrale d'acquisition de marque Campbell. Ces mesures ont été effectuées pendant une durée de 16 mois.

## 3. Instrumentation d'un banc de tests Egis en laboratoire

En complément, Egis a conçu un banc de tests au sein de son laboratoire d'essais permettant de répondre à un cahier des charges de l'Andra visant à appliquer des cas de chargements conventionnels sur un élément acier représentant une partie de chemise d'alvéole HA. L'objectif de ces essais est de tester les méthodes de mesure indirecte de convergence d'une structure tubulaire à partir de mesures directes de déformations orthoradielles.

Le dimensionnement de la maquette (tronçon de chemisage) et les moyens de chargement ont intégré les contraintes et sujétions relatives aux essais, à savoir :

- Maquette représentative d'un élément de chemisage HA de 762 mm de diamètre extérieur.
- Ovalisation (convergence) maximale de 10 mm au diamètre.
- Réalisation d'essais dans le domaine de déformation élastique de la maquette.

Des simulations numériques (Plaxis et SolidWorks) ont été conduites afin de dimensionner le banc de tests. Deux cas de chargement (2 points et 3 points) ont été pris en compte pour les simulations numériques et ont permis de retenir les dimensions suivantes sur le tronçon de chemisage représentant une partie d'élément d'alvéole.

- Diamètre extérieur : 762 mm
- Largeur : 200 mm
- Epaisseur : 10 mm

La figure 8 représente le principe du banc de tests avec jusqu'à 4 systèmes d'appuis pour appliquer les modes de chargement 2 points et 3 points (voire 4 espacés de 15°).

L'instrumentation testée sur le corps d'épreuve en acier est la suivante :

- 10 ponts de jauge résistifs auto-compensés en température (8 en extrados et 2 en intrados)
- 8 capteurs optiques de type réseaux de Bragg (FBG) en extrados (appairés aux ponts de jauge)
- 4 cannes de convergence en intrados
- 2 câbles optiques en mesure réparties en extrados (1 collé et 1 maintenu par clinquants soudés), en technologie de mesure Brillouin et Rayleigh
- 7 capteurs Morphosense en intrados

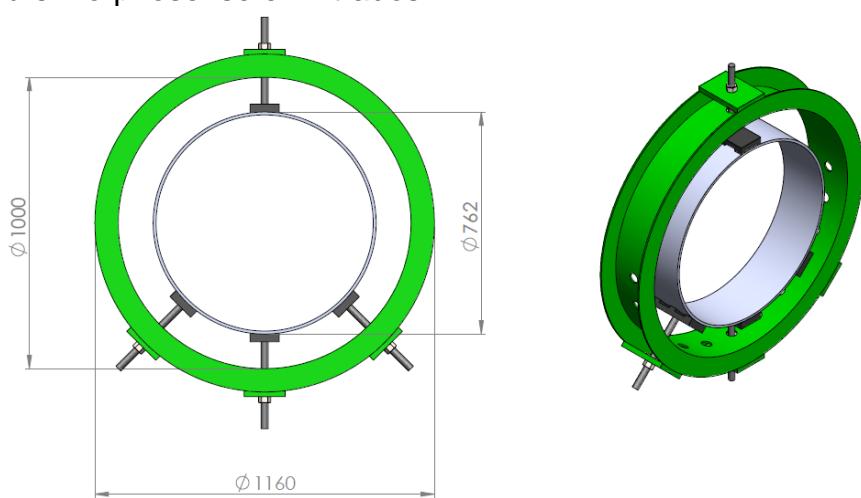


Figure 8: Schéma du banc de test permettant des appuis tous les 15°.

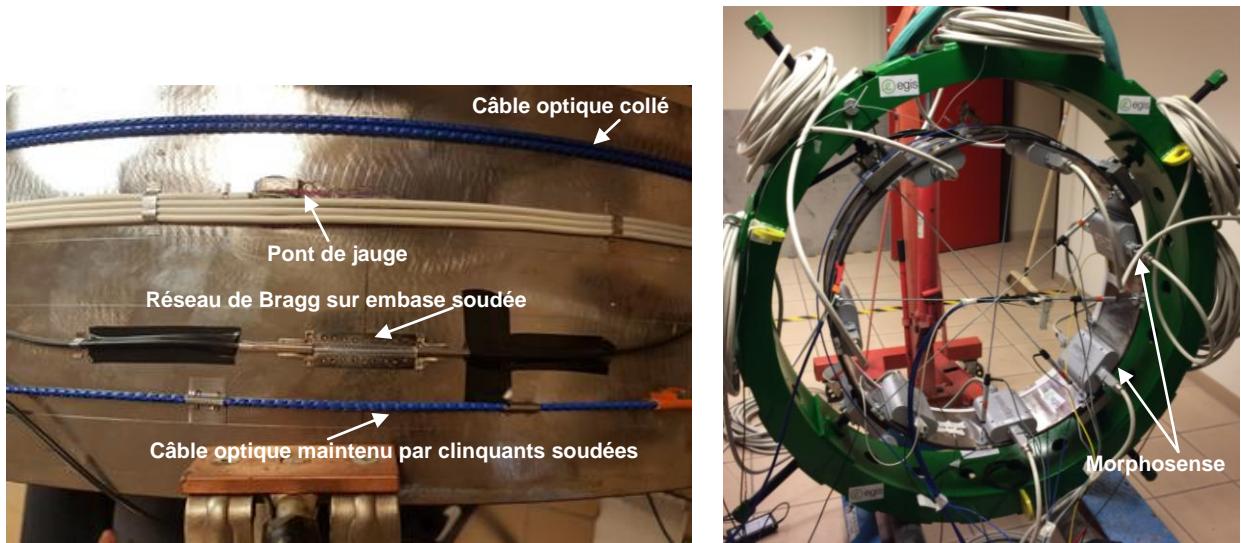
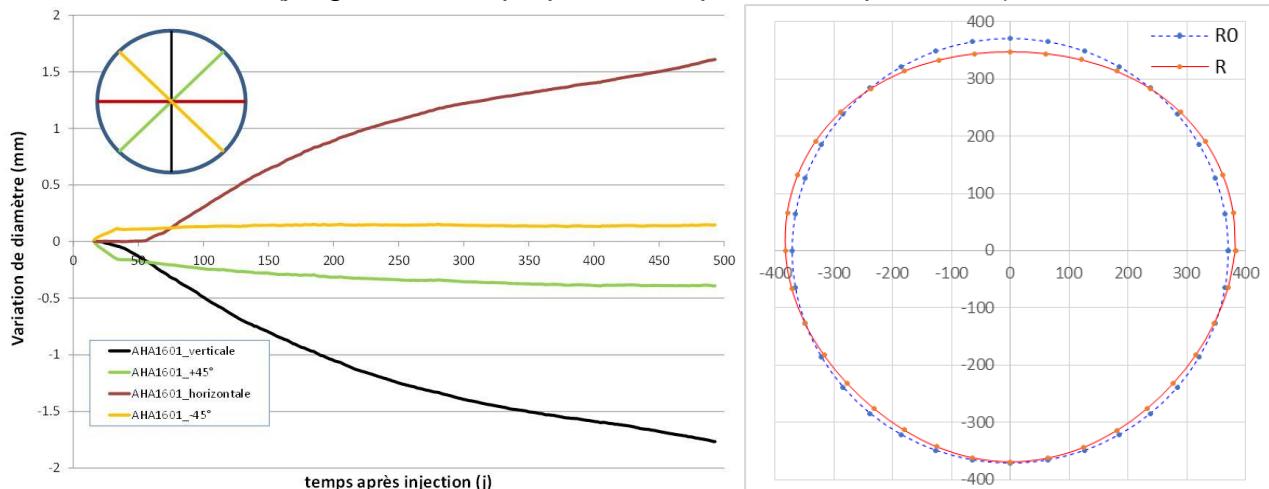


Figure 9: Photos du banc de test et de l'instrumentation mise en œuvre.

#### 4. Premiers résultats

Concernant les essais in situ au laboratoire souterrain de l'Andra, les valeurs de convergences maximales observées après environ 16 mois de suivi sont de l'ordre de 1.5 mm, non stabilisées, (Figure 10) à ramener au diamètre intérieur de 711 mm (épaisseur chemisage 25 mm). Des algorithmes de résolution ont été développés pour interpréter les mesures indirectes (jauges, fibres optiques, et dispositifs Morphosense).



Figures 10&11: Variation de diamètres (cannes de convergences) dans AHA1601 et recalcul des variations de déformée sur banc Egis à partir des valeurs des capteurs FO de type Bragg.

Concernant les essais sur banc en laboratoire, les tests ont permis d'étudier deux configurations de cas de chargement en deux ou trois appuis (2P, 3P) par paliers jusqu'à une convergence maximale supérieure à 10 mm ( $\varnothing$  extérieur 762 mm).

Concernant les résultats des essais sous 2 points de chargement, en comparant les valeurs entre les déformations orthoradielles issues des jauge résistives exprimées en microdéformations ( $\mu\epsilon$ ) aux mesures de diamètres obtenues par cannes de convergence, on observe :

- Une similitude quasi parfaite des réponses par paires de capteurs, en accord avec la symétrie de chargement.
- Une similitude des valeurs aux incertitudes de mesures près (typiquement  $\pm 5\mu\epsilon$  et  $\pm 0.5\text{mm}$ ).
- Une répétabilité et réversibilité des mesures grâce à la conception même du banc.

- Les patins modifient par leur présence le comportement local du corps d'épreuve et créent une anisotropie de répartition des contraintes/déformations, générant des différences de valeurs sur les capteurs à proximité.

Les réponses comparées des jauge résistives, CFO Bragg et capteurs Morphosense (déformée 3D) restent cohérentes aux incertitudes de mesures près (de l'ordre de  $\pm 5\mu\epsilon$ ) et en prenant en considération les différences de positionnement des capteurs. Il est à noter que les écarts de mesures sont favorisés lorsque les sollicitations en charge ou déplacement (réduction du diamètre) sont plus faibles. Les mesures sont également comparées de manières satisfaisantes aux valeurs issues des simulations numériques (Figure 11).

Les essais sous chargement 3 points sont également homogènes en termes de résultats obtenus avec les différents capteurs. A noter que la mise en position verticale du banc et la perte de symétrie génèrent une dispersion plus significative dans la répétabilité et réversibilité des mesures.

## 5. Conclusions et perspectives

Un benchmark de capteurs sur chemisage de micro-tunnels au CMHM a été réalisé afin de mesurer la convergence de ces structures sous sollicitations mécaniques. L'objectif était de comparer plusieurs technologies de mesures indirectes de la convergence afin de s'affranchir de l'encombrement intrinsèque aux mesures directes incompatibles avec la présence de colis de déchets.

Ces essais ont permis de lancer une étude sur la faisabilité de mesure des convergences sur des tubes par différentes technologies (classiques et innovantes) de capteurs (Fibre optique, Morphosense®).

Sur la base de simulations numériques, un banc de test spécifique Egis a été développé pour permettre d'étudier le comportement sous charge anisotrope de tubes (métalliques) représentatifs d'éléments de chemisage pour alvéoles de stockage de déchets HA.

Concernant les essais mécaniques, des déformations significatives ont été atteintes (tout en restant dans le domaine élastique de la structure testée) en bon accord avec les mesures des différents capteurs utilisés, sous deux ou trois appuis.

Concernant les mesures optiques, différents type de câbles optiques et différentes techniques de fixations sur le corps d'épreuve ont été testées par l'Andra.

Les perspectives concernent la poursuite d'essais sur le banc Egis en vue d'optimiser les algorithmes de calculs de convergence à partir des mesures indirectes.

**Remerciements :** Les contributeurs expérimentations Egis sont : Andra, Morphosense, Cedia Innovations (Marc Turpin), LGS.

## 6. Références bibliographiques

- Teixeira P., Cassarino J., Turpin M. (2017). Rapports de conception et de synthèse. Faisabilité d'une mesure de convergence de tube métallique par capteurs à fibre optique. Rapports internes Andra.
- Paléologue A., Carmona M. (2017) Restitution des essais Morphosense sur banc de tests. Rapport interne Egis.
- Teixeira P., Cassarino J., Gay O. (2016). Rapport préliminaire et rapport Installation Mesures. Lot I66 Andra. Instrumentation classique de chemisage d'alvéoles HA. Alvéole AHA1601. Rapports internes Andra.