

# SOUTÈNEMENT SOUPLE POUR LE CREUSEMENT DE GALERIES DANS LES ARGILITES DU CMHM

## FLEXIBLE SUPPORTING FOR EXCAVATION IN CMHM "ARGILITE"

Congres AFTES, Lyon 17–19 octobre 2011

Tancrede BONNET-EYMARD, Eiffage TP, France, [tancrede.bonnet-eynard@eiffage.com](mailto:tancrede.bonnet-eynard@eiffage.com)

Florence THIRIAT, Eiffage TP, France, [thiriat.eiffage@gmail.com](mailto:thiriat.eiffage@gmail.com)

Médéric PIEDEVACHE, Solexperts France, France, [mederic.piedevache@solexperts.fr](mailto:mederic.piedevache@solexperts.fr)

Julien PROUVOT, Solexperts France, France, [julien.prouvot@solexperts.fr](mailto:julien.prouvot@solexperts.fr)

Laurence RICHARD-PANOT, ANDRA, France, [Laurence.richard-panot@andra.fr](mailto:Laurence.richard-panot@andra.fr)

Gilles ARMAND, ANDRA, France, [gilles.armand@andra.fr](mailto:gilles.armand@andra.fr)

Roland LAVIGUERIE, ANTEA, France, [raoland.laviguerie@anteagroup.com](mailto:raoland.laviguerie@anteagroup.com)

François MARTIN, BG Ingénieurs Conseils, France, [francois.martin@bg-21.com](mailto:francois.martin@bg-21.com)

## 1. PRESENTATION DU PROJET

### 1.1 L'Andra

Dans le cadre de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991, l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) a réalisé la construction d'un laboratoire de recherche souterrain, situé dans le département de la Meuse, sur la commune de Bure, dans lequel sont mises en œuvre des expérimentations à caractère scientifique et technologique (Delay et al 2007). Ces expérimentations ont pour but l'étude des possibilités de stockage de déchets radioactifs en formation géologique profonde.

Préalablement à sa construction, le site a fait l'objet, d'une part, d'une campagne d'investigations géologiques, d'autre part, d'une étude de conception préliminaire. Cette phase d'investigation et de conception préliminaire s'est terminée à la mi-96 par le dépôt auprès de l'administration d'un dossier de "Demande d'Autorisation d'Installation et d'Exploitation" (D.A.I.E.) du laboratoire.

Un Décret pris en Conseil d'Etat le 3 août 1999 a autorisé l'installation et l'exploitation du laboratoire. La construction du laboratoire souterrain a été effectuée de 1999 à 2007 par le Groupement Fond Est (GFE).

La loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 demande à l'Andra d'approfondir ses connaissances en vue de proposer un site de stockage d'ici 2015.

Préalablement à cette décision, un débat public devra être organisé en 2012 / 2013. Ensuite, l'Andra devra déposer une demande d'autorisation de création, qui sera soumise pour avis à l'Autorité de Sûreté Nucléaire, à la CNE et aux collectivités locales, d'une zone de stockage.

Le Parlement aura alors à se prononcer sur un projet de loi déposé par le Gouvernement en 2015 / 2016, précisant les conditions de réversibilité du stockage. Ce stockage pourrait alors ouvrir à l'horizon 2025.

### 1.2 Objectifs du laboratoire de Meuse/Haute-Marne

Le laboratoire est un outil de recherche avec deux puits et un ensemble de galeries implantées dans la couche d'argilite du Callovo-Oxfordien à étudier. Les objectifs des investigations conduites dans les installations souterraines sont les suivants :

- confirmer que la portée des perturbations engendrées par un éventuel stockage dans cette formation est limitée ;
- confirmer les propriétés de confinement de cette formation ;
- vérifier sa continuité géologique ;
- vérifier la constructibilité et les possibilités de réversibilité d'un éventuel stockage dans la formation du Callovo-Oxfordien ;
- vérifier la capacité à sceller les ouvrages.

Ces investigations comportent :

- des observations géologiques et des mesures réalisées au fur et à mesure de l'avancement du creusement des ouvrages souterrains ;
- des prélèvements d'échantillons géologiques ;
- des expérimentations en forages, en puits et dans des tronçons de galeries ;
- des essais pour vérifier l'adéquation des procédés de creusement et de soutènement de cavités avec un concept de stockage réversible ;
- des essais éventuels de mise en place et de retrait de colis factices et de matériaux de remplissage.

### 1.3 Description générale du laboratoire

L'ensemble du laboratoire dans sa configuration actuelle est constitué de 3 unités :

- les installations de surface ;
- deux puits de liaison entre la surface et les installations souterraines ;
- les installations souterraines.

Les installations de surface sont réparties sur une superficie d'environ 17 ha et comprennent principalement :

- un ensemble de bâtiments à vocation scientifique et technique dont les superstructures des deux puits de liaison sont les éléments les plus notables ;
- une zone d'une superficie de l'ordre de 4 ha sur laquelle sont stockés les matériaux issus des travaux de creusement ;
- un bassin d'orage de 10 000 m<sup>3</sup> associé à un ensemble de collecte et de traitement des eaux (bassins de décantation et station d'épuration) ;
- un ensemble de réseaux (électrique, eau, air comprimé) permettant l'approvisionnement et le fonctionnement des installations de surface et souterraines.

Les deux puits, d'environ 500 m de profondeur, assurent la liaison avec les installations souterraines du laboratoire :

- le puits d'accès (PA), de 5 m de diamètre, permet l'accès au fond des personnes et du matériel, l'extraction des matériaux et il assure l'entrée d'air pour la ventilation ;
- le puits auxiliaire (PX), de 4 m de diamètre, assure la sortie d'air et constitue également une issue de secours pour les personnes.

Les installations souterraines sont constituées d'un ensemble de galeries localisées dans la couche du Callovo-Oxfordien avec un niveau principal situé à 490 m de profondeur et un niveau secondaire à 445 m de profondeur. Cet ensemble comporte, d'une part des galeries affectées aux investigations scientifiques, d'autre part des galeries à caractère technique.

#### 1.4 Contexte géologique et géotechnique

L'argilite du Callovo-Oxfordien est une roche composée principalement de trois types de minéraux : argile, quartz et calcite dont les teneurs massiques moyennes sont respectivement de 41%, 25% et 31% au niveau principal du laboratoire.

L'état de contrainte initial au niveau du laboratoire souterrain (- 490 m) a été déterminé par des essais de fracturation hydraulique en forage et analyse des break out (Wileveau *et al* 2007) :

- $\sigma_v = 12,7$  MPa
- $\sigma_h = 12,4$  MPa
- $\sigma_H \leq 16$  Mpa, orientée suivant N155°E.

La valeur de la contrainte majeure horizontale correspond à une anisotropie marquée :  $1 < \sigma_H / \sigma_v < 1,3$ .

La valeur du module de déformation tangent est de l'ordre de 4000 MPa (zone de déformation élastique) avec une anisotropie de l'ordre de 1,2 par rapport à la stratification et un coefficient de Poisson de l'ordre de 0,3.

Les valeurs moyennes de la résistance à la compression uniaxiale et à la traction sont respectivement de 21 MPa et 2,7 MPa.

Les paramètres du critère de rupture de Hoek & Brown, sont :

- $\sigma_c = 33,5$  MPa
- $s = 0,128$
- $m = 2,0$

La valeur moyenne de la déformation à la rupture est de 1,5% (essai triaxiaux à pression de confinement comprise entre 6 et 20 MPa).

## 2. CONCEPTION SOUPLE

### 2.1 Concept de soutènement

Le concept général de soutènement adopté au laboratoire souterrain depuis le creusement des premiers mètres de galerie n'a pas évolué : soutènement souple et déformable pour accompagner le déconfinement du terrain. En effet, même si les convergences à court terme sont faibles – de l'ordre de 10 à 20 mm – il est prévu qu'elles atteignent 15 à plus de 20 cm à 20 ans. Le soutènement apporte un léger confinement qui limite l'extension de la zone endommagée tout en maîtrisant la convergence.

Jusqu'au démarrage du creusement de la galerie GCS en mai 2010, ce concept a consisté à projeter du béton sur 5 cm d'épaisseur, boulonner le terrain par des barres HA25 et caler des cintres coulissants TH au terrain tous les mètres.

### 2.2 Description du soutènement GCS

En 2007 l'ANDRA décide de tester au sein de son laboratoire un nouveau type de soutènement souple, utilisant un minimum d'acier. Après plusieurs stades d'études, le soutènement n°2bis – ou GCS du nom de la première galerie où il est appliqué – voit le jour tel qu'il est représenté sur la Figure 1.

Il faut rappeler que dans un premier temps, ce soutènement est uniquement prévu dans les galeries parallèles à la contrainte  $\sigma_H$ , où l'état de contrainte dans la section est quasi-isotrope.

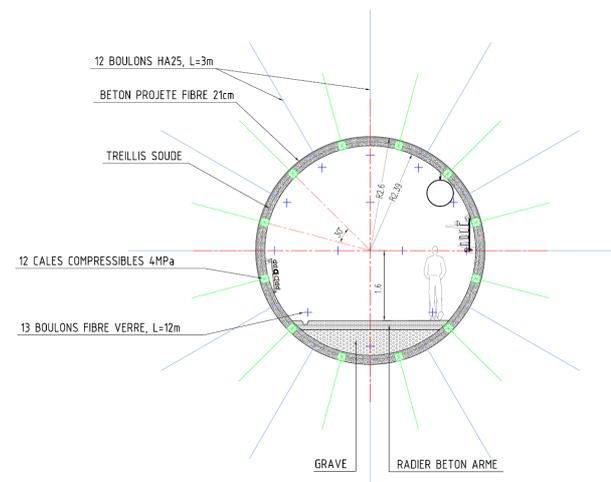


Figure 1 : coupe de la section GCS (n° 2bis)

Le boulonnage radial est maintenu, et étendu à la partie inférieure de la section.

Le choix s'est orienté vers la conception d'une coque en béton projeté circulaire de 21 cm d'épaisseur, et de diamètre extrados 5,20 m. La souplesse est obtenue par l'insertion de 12 éléments compressibles qui s'écrasent à partir d'une valeur de contrainte seuil fixée a priori. Ce seuil est important car c'est sa valeur qui fixe le niveau de confinement appliqué par la coque en béton sur le terrain. La longueur du palier de déformations plastiques à contrainte de compression constante est également un critère important (cf. Figure 2).

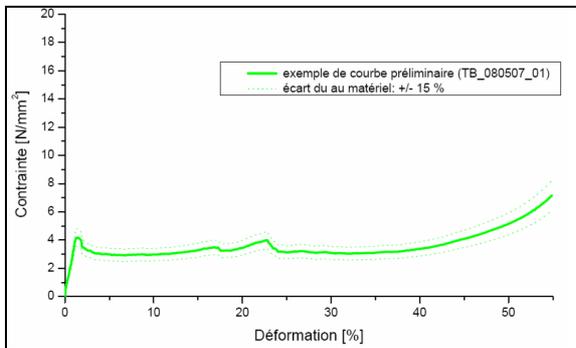


Figure 2 : courbe d'écrasement d'une cale type HidCon

En l'occurrence pour les premiers essais en galerie GCS, la valeur d'écrasement limite a été fixée à 4 MPa, avec un taux de déformation d'environ 50% avant l'arrêt de l'écrasement.

A titre de comparaison, le confinement appliqué sur l'argilite par les cintres coulissants a été estimé à partir de mesures autour de 0,17 MPa. Les cales compressibles de 4MPa permettent à la coque en béton d'appliquer un confinement d'environ 0,32 MPa, soit presque deux fois plus que pour les soutènements cintrés.

### 3. TRAVAUX

L'entreprise Eiffage TP est titulaire du marché de travaux d'extension du laboratoire (Phase 3 de 2009 à 2015).

#### 3.1 Excavation

Les techniques utilisées lors des creusements précédant au Centre de Meuse Hautes Marnes sont rappelées dans Martin et al 2010.

##### 3.1.1 Matériel

Pour l'excavation de la galerie GCS, l'entreprise a utilisé une machine à attaque ponctuelle. Il s'agit du modèle ET-170Q de la marque Eickhoff. Cette machine, dont le poids total est de 35t est équipée d'une tête transversale. Son utilisation est tout à fait adaptée à l'argilite de Bure : matériau tendre et parfaitement homogène.

##### 3.1.2 Traitement de la poussière

Il a fallu faire face à une contrainte particulière : lutter contre la poussière sans utiliser la brumisation (l'eau modifiant les propriétés des argiles). Eiffage TP a retenu l'entreprise allemande Compact Filter Technic (CFT) comme partenaire pour y

parvenir. CFT a mis au point une unité de dépoussiérage de 600 m<sup>3</sup>/min capable de fonctionner avec 100 m de conduites d'air empoussiéré (diamètre 800). Cette installation donne satisfaction puisque le nuage de poussière est capté rapidement à l'avant de la machine et le pilote se trouve dans une ambiance saine et dispose d'une bonne visibilité du front d'attaque.

#### 3.1.3 Méthodologie

La section d'excavation étant circulaire de diamètre 5.3m, l'attaque se fait en pleine section en démarquant par la contre-voûte. Les 1.2m de longueur de travée se font en trois passes de 40cm de profondeur.



Photo n°1 : Machine à attaque ponctuelle à front

Un système de guidage a été prévu sur la machine. Celui-ci s'étant montré difficilement exploitable compte tenu de la mauvaise visibilité de la station totale. En effet, la section de la galerie est de faible dimension et celle-ci est particulièrement encombrée par les conduites de ventilations et d'autres réseaux.

Les opérateurs ont donc adopté une conduite visuelle, ce qui n'a pas posé de problème compte tenu du caractère rectiligne du tracé et du repérage donné par les cales compressibles de la travée précédente.

Il faut noter qu'un décousu d'au moins 60cm a été nécessaire pour éviter l'endommagement des cales compressibles de la travée précédente.

#### 3.2 Soutènement

La mise en œuvre du soutènement se déroule de la façon suivante :

- Mise en œuvre d'une couche de béton projeté fibré en voûte
- Mise en place des boulons radiaux en voûte
- Mise en place des cales compressibles en voute
- Marinage de la contre-voûte
- Mise en place des cales en contre-voûte
- Mise en œuvre de béton projeté en contre-voûte
- Mise en place du treillis soudé sur la première couche de béton projeté de la travée N-1

- Mise en œuvre du béton projeté en voûte : première couche de la travée N et couche finale sur la travée N-1



Photo n°2: Front de taille

### 3.2.1 Protection de la voûte

Immédiatement après la phase d'excavation, une couche de béton projeté fibré de faible épaisseur (3 cm sur pointes) est mise en œuvre au moyen d'un robot de projection (lance de gunitage montée sur Brokk). Cette coque de béton est destinée à protéger les travailleurs pendant l'ensemble des phases suivantes.

### 3.2.2 Boulonnage radial en voûte

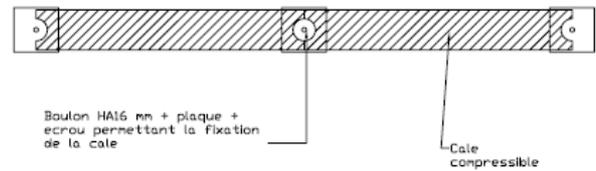
La foration et la mise en place des boulons s'effectuent au moyen d'un jumbo 1 bras. Le scellement des boulons HA25 de longueur 3m est obtenu par l'utilisation de cartouches de résine (scellement sur toute la longueur du boulon).

### 3.2.3 Pose des cales compressibles

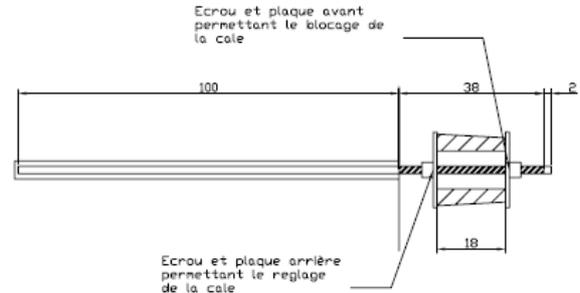
Les cales compressibles ont une forme en trapèze, s'élargissant vers l'extrados. Ainsi, le béton de remplissage entre cales est prévu pour tenir les cales en phase définitive.

Cependant, l'entreprise a du trouver une solution pour maintenir et surtout régler les cales en phase provisoire. Nous avons opté pour l'utilisation de boulons de diamètre 16mm disposant de 40cm de filetage. Par la mise en place d'écrous et de plaques, il est possible de régler la cale radialement. Ces boulons traversent les cales dans des réservations (à cheval sur deux cales) de diamètre 100mm. Avant serrage, il est donc possible de régler l'alignement des cales.

La pose des cales se fait à la main par deux compagnons depuis une nacelle.



VUE DE DEUX CALES COMPRESSIBLES ET DE LEUR SYSTEME DE FIXATION



COUPE TRANSVERSALE SUR BOULON HA 16 mm SCELLE A LA RESINE

Figure n°3: Principe de fixation des cales compressibles hiDCon®)

### 3.2.4 Béton projeté entre cales

La coque de béton entre cales est mise en place en deux étapes :

- première couche de 11cm d'épaisseur.
- deuxième couche de béton de 7cm d'épaisseur (béton de finition)

Entre ces deux couches, une nappe de treillis soudé est fixée aux boulons radiaux



Photo n°3: Caes compressible (hiDCon®) et béton projeté avec treillis

## 4. COMPORTEMENT

### 4.1 Instrumentation

La galerie GCS a fait l'objet d'une instrumentation complète de la part de l'Andra afin d'étudier le comportement du soutènement et celui du massif pendant et après le creusement.

Pour suivre l'évolution du soutènement, trois sections de galerie ont été instrumentées en cours de creusement.

- Deux sections situées aux Points Métriques (PM) 29.5 et 47.5 comprennent des mesures de contrainte à l'interface cales / béton projeté et des mesures d'écrasement des cales.
- Une section au PM 34 comprend des mesures de contrainte par corde vibrante dans le béton projeté et des mesures d'écrasement des cales associées.
- Des mesures manuelles de convergence de la galerie sont effectuées aux PM 57.7 et 58.6.
- Des essais réguliers au vérin plat fournissent l'état de contrainte du béton projeté au PM 35.



Photos n°4-5 : Cellule de pression totale et capteur de déplacement sur cale compressible (hiDCon®)

Le massif est également ausculté en cours de creusement (Armand et al 2011):

- Une section au PM 39.7 comprend des mesures de déformation du massif avec quatre extensomètres radiaux de 30m de long à 7 points.
- Des mesures d'extrusion dans l'axe de la GCS sont réalisées automatiquement en cours de creusement par une sonde RH-Extensomètre®.
- Deux extensomètres longs et deux chaînes inclinométriques réalisés depuis une galerie existante avant creusement recoupent l'axe de la GCS.

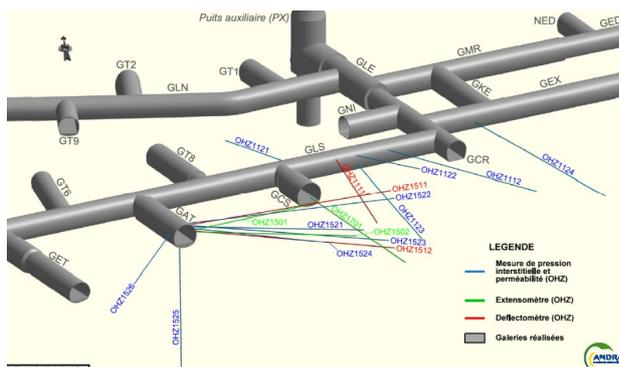


Figure n°4 : Implantation des forages d'auscultation

- Des mesures de pression hydrostatique et de perméabilité sont conduites dans 12 forages. Quatre forages longs à 5 intervalles réalisés avant creusement depuis une autre galerie permettent de suivre l'effet du creusement directement à proximité et dans l'axe de la GCS. Huit forages radiaux de 6 m à 6 intervalles réalisés après creusement depuis la GCS permettent de suivre l'évolution de l'EDZ (zone perturbée autour du tunnel).

## 4.2 Résultats

### 4.2.1 Données

Les mesures dans le soutènement montrent un comportement en déformation/contrainte cohérent avec les modèles.

Après 100 jours, les convergences restent inférieures à 50 mm (moins de 1 % du diamètre) avec plus de 75% de la convergence totale au bout de 20 jours. La convergence est légèrement anisotrope avec des valeurs maximales dans le plan horizontal.

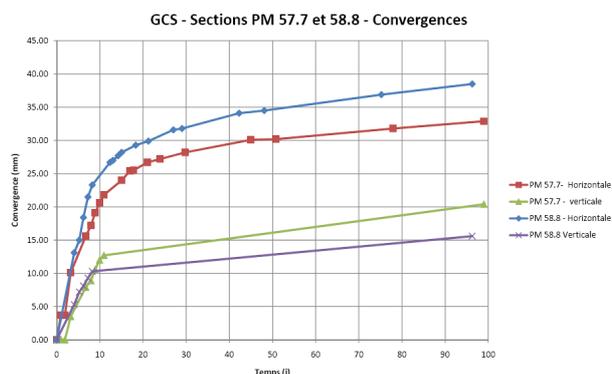


Figure n°5: Mesures de convergence GCS

L'écrasement des cales est du même ordre de grandeur que la convergence de la galerie avec un écrasement maximal dans le plan vertical. Le chargement du soutènement se stabilise rapidement dès sa mise en place et reste ensuite relativement constant. Les cales compressibles jouent donc parfaitement leur rôle en autorisant la déformation du soutènement uniquement lorsque la contrainte normale dans la coque béton dépasse la valeur seuil de 4 MPa. Les valeurs maximales d'écrasement des cales observées restent largement inférieures à 20% de l'écrasement maximum.

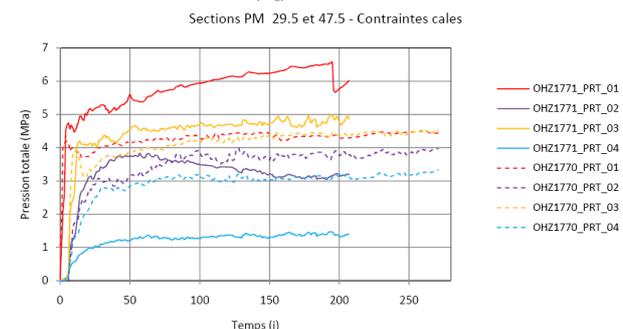
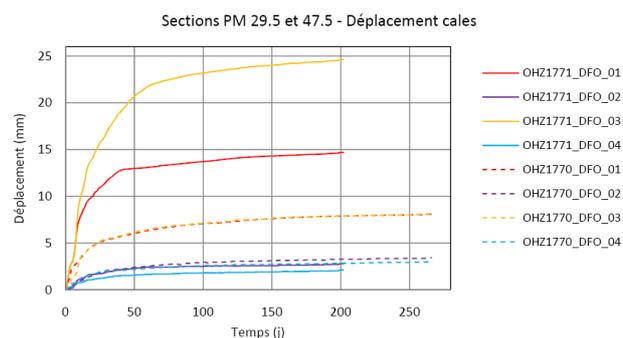


Figure n°6 : Mesures d'écrasement et de contraintes des cales en GCS

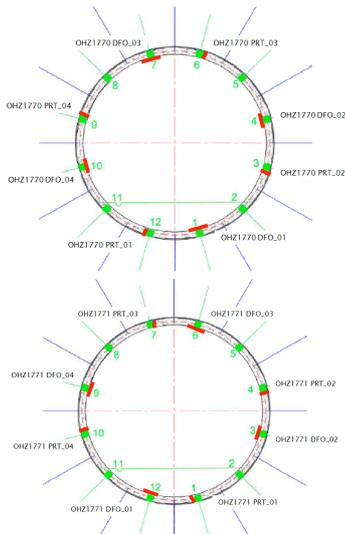


Figure n°7: Implantation des capteurs

Les mesures effectuées dans le massif sont actuellement en cours de traitement et feront l'objet d'une publication ultérieure de la part de l'Andra (Armand *et al*, 2011). A titre d'exemple, les mesures d'extrusion réalisées en avant du front de taille sont présentées à la figure 8.

L'extrusion intéresse les 10 premiers mètres, avec un maximum dans les 5 premiers mètres en avant du front, et une amplitude ne dépassant pas les 5 mm.

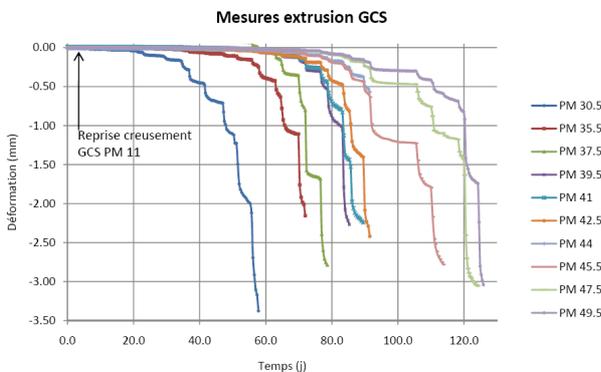


Figure n°8: Mesures d'extrusion GCS

#### 4.2.2 Bilan

L'axe de la galerie GCS est orienté parallèlement à la contrainte principale horizontale. Une section transversale de cette galerie se trouve donc dans un champ de contraintes considéré dans une première approche comme isotrope :  $\sigma_v = 12,7$  MPa et  $\sigma_h = 12,4$  MPa.

Les convergences mesurées au cours de l'excavation montrent néanmoins une anisotropie de convergence : convergences horizontales comprises entre 40 et 55 mm et convergences verticales comprises entre 15 et 25 mm en 200 jours et suivant l'éloignement des sections de mesure par rapport au fond de la galerie.

Ce comportement est également mis en évidence :

- par les mesures d'écrasement des cales compressibles qui montrent que les 4 cales situées en voûte et contre-voûte sont beaucoup plus sollicitées que les cales situées en parement : la déformation de ces cales se situe entre 8 et 25 mm suivant leur position pour une déformation moyenne de 0 à 4 mm pour les autres cales. La déformation principale se situe sur la partie gauche de la voûte.

- par les mesures d'efforts sur les boulons d'ancrage qui montrent que les boulons de voûte (pseudo-verticaux) sont plus sollicités que les boulons de parement (pseudo-horizontaux) dans un rapport minimum de 1 à 5,

- par la vitesse de mise en charge des cellules de pression totale (intercalées entre les cales compressibles et la coque de béton) beaucoup plus rapide pour celles situées en voûte et contre-voûte.

Les mesures de contrainte par extensomètres dans les coques béton sont plus difficilement interprétables car apparaissent des efforts de flexion en voûte et contre-voûte.

Bien entendu, l'impact à long terme du fluage du terrain sur le soutènement n'a pas été encore quantifié mais le comportement général de celui-ci ne devrait pas être sensiblement modifié.

Les extensomètres subhorizontaux du mine-by test permettent d'estimer le déconfinement total du massif. Au passage du front le taux de déconfinement est estimé à environ 15%.

Ces premiers résultats permettent d'estimer les distances d'influence mécanique et hydraulique pendant le creusement de la GCS. Ainsi, la réponse mécanique est détectée à environ 10 m en amont du front pour les déplacements axiaux (extension vers le front de taille) et à 2,4 m du front sur l'extensomètre radial.

La réponse hydraulique au creusement est mise en évidence jusqu'à 20 m en amont du front, montrant l'importance du couplage hydromécanique, notamment de la mécanique sur l'hydraulique.

## 5. CONCLUSIONS

Ce soutènement original à base de boulon radiaux, de béton projeté et de cales compressibles a été mis en place dans le cadre d'une expérimentation au Centre de Meuse/Haute-Marne afin d'étudier le comportement HM de l'argilite du Callovo-Oxfordien.

Le seuil d'écrasement des cales compressibles fixé à 4 MPa est relativement bien vérifié puisque les valeurs de contraintes normales mesurées varient entre 3,5 et 5 MPa à l'exception d'une seule qui se situe autour de 6 MPa.

L'ensemble des mesures réalisées a permis également d'appréhender qualitativement et quantitativement le comportement à court terme du terrain permettant d'envisager une optimisation du soutènement : seuil d'écrasement des cales plus élevé, diminution du nombre de cales...

Le suivi long terme des mesures autour de la galerie GCS apportera des données importantes sur le

comportement des ouvrages (déformation différées, champ de pression interstitielle autour de l'ouvrage, évolution EDZ,...) orientés suivant la contrainte horizontale majeure. Ces mesures forment un ensemble cohérent permettant la compréhension des phénomènes hydro-mécaniques et la validation de modèles rhéologiques. De plus, ces résultats serviront de base de comparaison pour voir l'impact de la mise en place d'un revêtement plus rigide dans le cadre du suivi du creusement de la GCR et permettront d'appréhender la relation entre les déformations du terrain et le chargement d'un revêtement rigide.

## 6. REFERENCES

Armand G., Noiret A., Cruchaudet M. and Conil N., (2011), Mine by experiment performed in the Callovo-Oxfordian claystone at the Meuse Haute Marne Underground Research Laboratory (France), ISRM2011 Benjin, China, to be published.

Bonnet-Eymard T., Ceccaldi F. and Richard L., (2011), Extension of the Andra underground laboratory: methods and equipment used for dry, dust-free works, World Tunnel Congress 2011, Helsinki.

Delay J., Vinsot A., Krieguer J.M., Rebours H. and Armand G. (2007), Making of the underground scientific experimental programme at the Meuse/Haute Marne URL, North Eastern France, Phys. & Chem. of the Earth, 32, 2-18.

Martin F., Lavignerie R. and Armand G., (2010), Geotechnical feedback of the new galleries excavation at the ANDRA underground research laboratory - Bure (France), Eurock 2010, Lausanne.

Martin F., Lavignerie R., Richard L. et Bonnet-Eymard T., (2011), Laboratoire Souterrain de Recherche de Meuse/Haute-Marne première phase d'extension, Tunnels et Ouvrages Souterrains, janvier 2011, p 79-83.

Wileveau Y., Cornet F.H., Desroches J. and Blumling P., (2007), Complete in situ stress determination in an argillite sedimentary formation, Physics and Chemistry of the Earth, vol. 32, 866-878.