

# Laboratoire de recherche Meuse/Haute Marne

## Mesures hydromécaniques dans une roche argileuse profonde

**SOLEXPERTS**  
Swiss Precision Geomonitoring

Médéric Piedevache - Solexperts France  
Gilles Armand - Andra  
Martin Cruchaudet - Andra  
Yanick Letry - Solexperts SA

### Résumé :

Le creusement du puits principal du laboratoire souterrain de Meuse / Haute Marne, a été accompagné d'une campagne importante de suivi des paramètres géomécaniques. Cette expérimentation, nommée REP, a permis d'étudier les couplages hydro-mécaniques dans des formations argileuses profondes présentant une anisotropie des contraintes. L'article décrit les divers équipements de mesure mis en œuvre, et en particulier les équipements multi-obturbateurs, ainsi que les premiers résultats de mesure.

### Abstract:

Within the framework of the feasibility study for a radioactive waste repository in a geological formation, the National Radioactive Waste Management Agency of France is constructing an underground research laboratory within the Callovo-Oxfordian argillite formation located in eastern France. During the sinking of the laboratory's access shaft the mechanical and hydromechanical behavior of the argillite was monitored. A vertical mine-by test, called REP was carried out in the main shaft. This paper is devoted to the instrumentation, especially multi-packer system, and some first measurement results regarding the hydro-mechanical disturbance of the rock around the shaft.

### 1 - INTRODUCTION

Le site de Meuse/Haute-Marne, situé dans l'Est de la France à environ 300 km de Paris, est étudié par l'Andra dans le cadre d'une étude de faisabilité d'un site de stockage de déchets radioactifs en formation géologique profonde. La formation hôte, d'une épaisseur d'environ 130 m, est constituée d'argilites du Callovo-Oxfordien et est approximativement située à 500 m de profondeur. Ces argilites sont encadrées par des formations carbonatées relativement imperméables. Les argilites contiennent en moyenne 40 à 45% de minéraux argileux (illite, couche R1 illite-smectite régulière, chlorite et kaolinite dans la partie inférieure, illite et couche R0 illite-smectite irrégulière dans la partie supérieure), 20 à 30% de carbonate et 20 à 30% de quartz silts (Andra 2005a, 2005b). Le comportement mécanique de la roche étudiée est fonction des caractéristiques géologiques des argilites. La composition minéralogique et la sédimentation ont mené à un comportement légèrement anisotrope de celles-ci. Les effets combinés de la sédimentation, de la compaction et de la diagenèse ont réduit l'espace poreux interstitiel. Par conséquent,

les argilites du Callovo-Oxfordien sont considérées dans leur état naturel comme un milieu poreux saturé avec une très faible perméabilité. Leur comportement mécanique est étroitement lié avec la pression de pore et le degré de saturation. D'un point de vue géomécanique, la formation hôte est subdivisée en trois couches au comportement mécanique assez contrasté. Dans le but de démontrer la faisabilité d'un stockage de déchets radioactifs dans cette formation d'argilites, l'Andra a donc commencé en 2000 la construction d'un laboratoire de recherches souterrain sur la commune de Bure, près de la limite entre les départements de la Meuse et de la Haute-Marne.

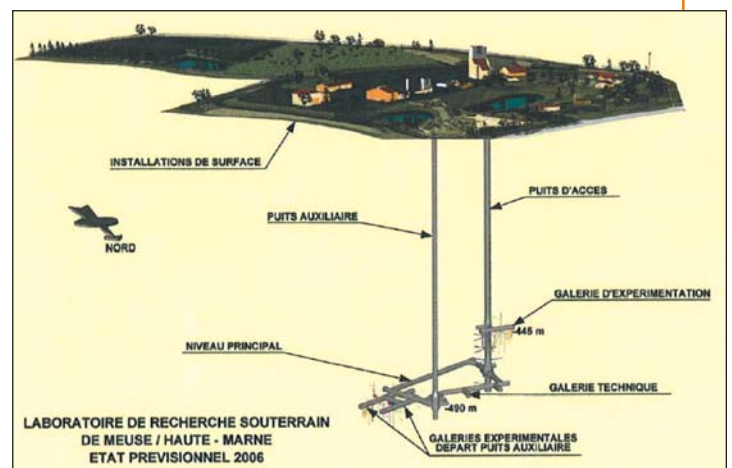


Figure 1 - Schéma général du laboratoire de recherche de Meuse Haute Marne

Dans le cadre des recherches effectuées au laboratoire de recherche de Meuse Haute Marne, l'expérience REP a eu pour but de caractériser le comportement hydro-mécanique des argilites lors du fonçage du puits d'accès de 5 m de diamètre fini.

Un certain nombre d'équipements spécifiques ont été conçus et installés pour mener à bien ces mesures. Le présent article décrit les différents équipements, en particulier ceux utilisés pour les mesures de pression interstitielle, et présente les premiers résultats.

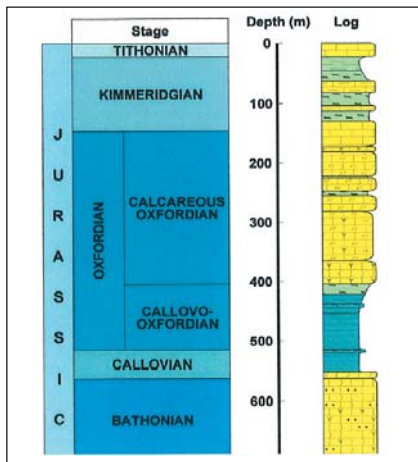


figure 2 - Série stratigraphique, Andra 2005a

## 2 - CONCEPT DE L'EXPÉRIENCE

L'expérience est organisée suivant quatre phases :

- Construction d'une niche à -445 m, point de départ de l'expérimentation.
- Instrumentation de forages depuis la niche, pour le suivi des caractéristiques géomécaniques de la matrice autour du futur puits. Attente de la stabilisation des mesures, en particulier de la pression hydrostatique.
- Reprise du creusement du puits, avec suivi en temps réel des paramètres géomécaniques de la matrice. Le creusement est effectué à l'explosif par sections de 2 à 3,1 m.
- Instrumentation depuis le puits en cours de creusement.

## 3 - ÉQUIPEMENTS

Les mesures de pression hydrostatique et de perméabilité dans des formations argileuses très peu perméables à des profondeurs de 500 m nécessitent de mettre en œuvre des

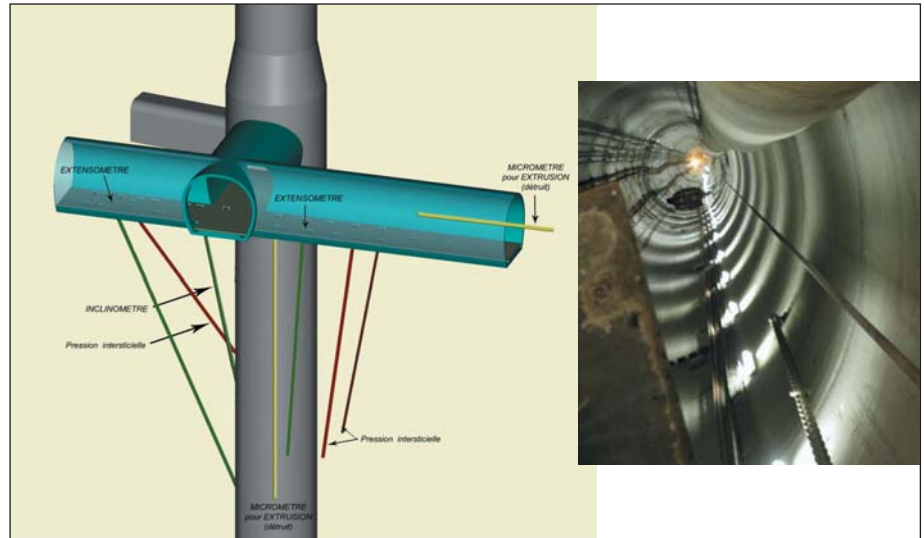


Figure 3 - Visualisation de l'expérience REP et photo du puits d'accès

équipements capables d'assurer un retour en pression le plus rapidement possible, d'être stables à long terme, et d'être résistants à de fortes pressions (jusqu'à 100 bar, sachant que les pressions de formation attendues dans le Callovo-oxfordien étaient de 50 à 60 bar). La réalisation d'expérimentation en phase de chantier, avec la tenue du délai de production pour le creusement, suppose également l'utilisation d'équipements robustes et fiables.

### 3.1 - Mesures de pression interstitielle dans la matrice

Les mesures de pression interstitielles sont réalisées à l'aide d'un équipement multi-obturateur spécifique nommé « PP système » (Pore Pressure System).

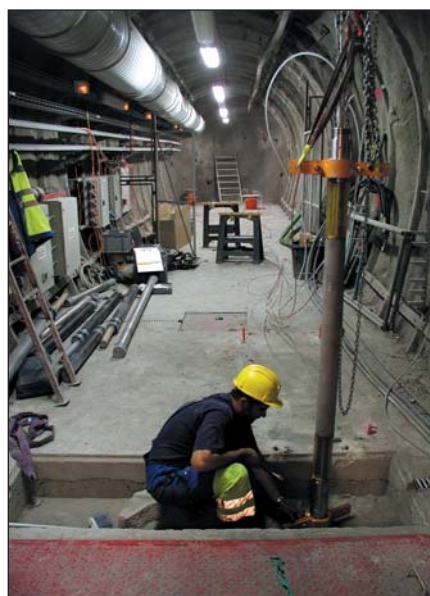


Figure 4 - Installation « PP Système »

Le « PP Système » permet de définir jusqu'à 5 intervalles de mesure dans un même forage. Chaque intervalle d'une longueur de 20 cm comporte deux tubulures inox reliées à un panneau de contrôle placé en surface. Un capteur de pression monté sur une des lignes permet de suivre en continu les variations de pression, tandis que l'autre ligne permet de conduire des tests hydrauliques (pulse, injection, production). Le volume de la chambre est réduit au maximum pour assurer une stabilisation rapide de la pression. Chaque intervalle est isolé à l'aide d'une section de résine dans l'annulaire du forage. La résine assure une très grande stabilité à long terme ainsi qu'une très faible compressibilité du système. Elle est mise en place en isolant au préalable l'intervalle de mesure avec un obturateur mécanique.

Trois forages carottés, de 25 m de long environ et 101 mm de diamètre, sont réalisés depuis la niche. Dans chaque forage, un « PP Système » définit cinq chambres de mesure, réparties autour du puits à une distance comprise entre 1,08 et 4,88 m de la paroi réelle du puits et à une cote comprise entre -460 et -476 m. Les chambres du forage REP2101 se situent dans la direction de la contrainte maximum par rapport au puits, alors que celles du forage REP2102 sont localisées dans la direction de la contrainte minimum. Les chambres du forage REP2103 sont orientées principalement dans la direction de la contrainte majeure par rapport au puits, sauf une qui se trouve plus proche de la direction mineure. Un quatrième forage REP2104 situé dans une zone peu influencée par le puits à 13,8 m de la paroi, sert de mesure de référence pour la pression et la perméabilité.

### 3.2 - Mesures de perméabilité autour du puits

Pour étudier l'impact du creusement, et les variations de perméabilité induites par le développement de l'EDZ (zone endommagée par le creusement), des mesures de perméabilité sont réalisées en cours de creusement. Ces mesures viennent compléter les mesures de perméabilité réalisées avant et après le creusement dans les équipements multi-obturbateur de mesure de pression interstitielle de type PP système (cf chapitre précédent). En cours de creusement, les mesures de perméabilité étant effectuées à proximité de la paroi, il est par conséquent nécessaire de disposer d'intervalles très proches et modulables. Pour cela Solexperts a conçu le système MMPS (Mini-Multi-Packer-System), permettant de délimiter 5 à 6 chambres de 10 à 20 cm de long. Chaque chambre est isolée par un obturbateur gonflé à l'eau. Le volume des chambres est réduit pour assurer une stabilisation rapide des pressions, et les obturbateurs rigides limitent la compressibilité du système. Deux tubulures inox permettent de suivre la pression en continu et de conduire des tests pneumatiques et hydrauliques. Le système est conçu avec des éléments simplement interchangeables.



Figure 5 - Retrait du MMPS de test du forage (Photo Antea)

Pendant le creusement du puits, deux sections ont été étudiées aux cotes (-467 m, -479 m). Dans chacune d'elle, des tests hydrauliques ont été conduits dans un forage radial horizontal de 56 mm de diamètre et de 6 m de long réalisé depuis la sole. Un système MMPS définissant des chambres centrées sur 0,35 – 0,85 – 1,35 – 2,85 – 5,85 m depuis la paroi a été utilisé pour ces deux forages (Fig. 5).

Après réalisation du forage, le système est installé, les obturbateurs sont ancrés et des tests au gaz puis à l'eau sont réalisés. A la fin des tests, le système est retiré. Un équipement type PP système à intervalle unique (Fig. 6) est alors mis en œuvre pour un suivi à long terme de la pression interstitielle. Le système est ensuite réutilisé pour les forages suivants. Le MMPS, combiné à une procédure de test appropriée permet de tenir les délais très courts de mise à disposition du puits pour les expérimentations.

Figure 6 - PP système définitif pour le suivi des pressions à long terme



### 3.3 - Mesures de déformation

#### 3.3.1 - Mesures dans la roche autour du puits

Les mesures de déformation de la matrice sont réalisées avec deux extensomètres 10 points et une chaîne inclinométrique fixe 10 points, mis en place avant creusement dans des forages inclinés réalisés depuis la niche.

Les extensomètres de 24,55 m et 29,11 m de long mesurent les déformations relativement entre dix ancrages répartis dans le forage et une tête de mesure placée dans la niche. L'ancrage le plus profond de l'extensomètre de 24,55 m est distant de 0,48 m horizontalement par rapport à la paroi du puits et le moins profond de 11,08 m respectivement.

La chaîne inclinométrique, développée spécifiquement pour cette configuration

inclinée à 18° (par rapport à la verticale), comprend des éléments de 1 m. Le point de mesure inférieur se situe à une distance horizontale de 0,5 m du puits. Le principe de conception mécanique de la chaîne assure une parfaite continuité des mesures entre chaque élément grâce à une rotule particulière formant un unique point d'appui pour deux éléments consécutifs.

#### 3.3.2 - Mesures d'extrusion

Un forage vertical de 34 m de long situé dans l'axe du puits est équipé d'un tube de Micromètre de Forage (Fig. 7). Des mesures



Figure 7 - Tubes de micromètre de forage

manuelles, effectuées après chaque phase de creusement, fournissent un profil complet des déformations axiales (extrusion) du massif, avec une précision de l'ordre de 3 micromètres par mètre mesuré. L'endommagement des tubes de mesure par les tirs et le marinage de la sole a cependant perturbé certaines mesures.

## 4 - RÉSULTATS

Les mesures de déformations de l'extensomètre REP2202 sont reportées sur la figure 8. Les mesures, stabilisées avant la reprise du creusement, montrent avant le passage du front une phase de compression, liée à l'extrusion du massif, suivie d'une phase d'extension due à la convergence en puits après le passage du front. La compression maximale mesurée entre les ancrages 1 et 10 est de 3 mm juste après le passage du front. A chaque tir d'explosif, un déplacement instantané est mesuré par l'extensomètre. Entre les tirs, les déplacements enregistrés sont de plus faible amplitude. Lorsque le puits atteint la cote puits -480,3 m, les déplacements

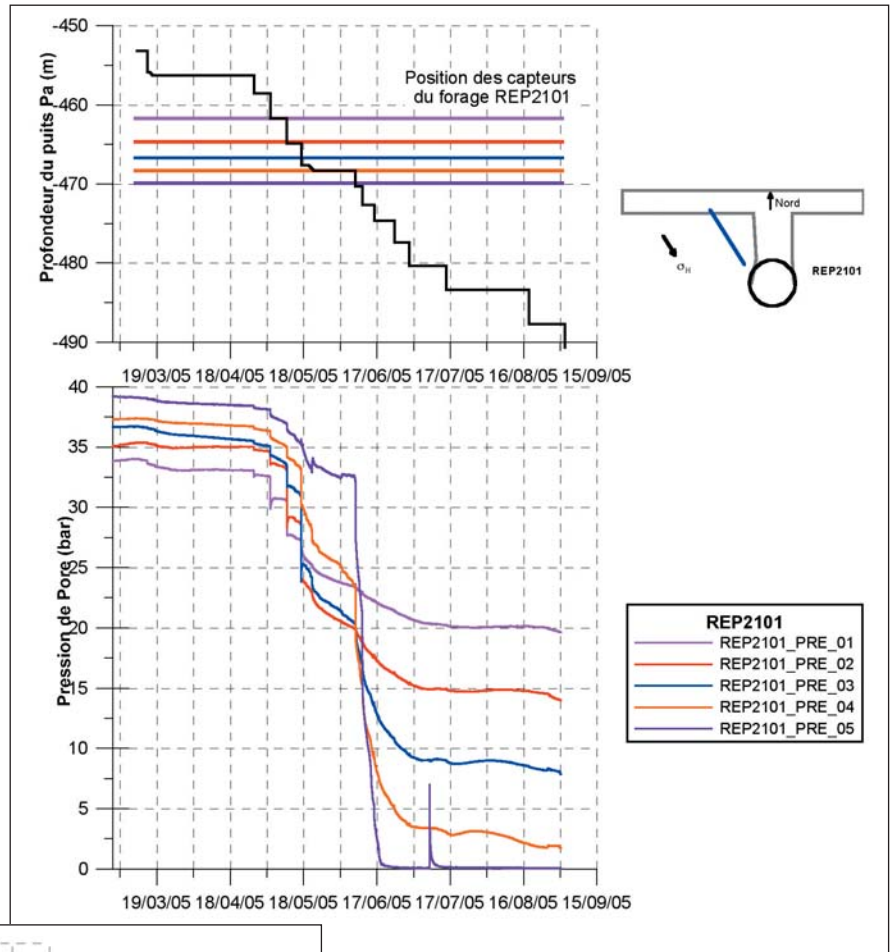


Figure 9 - Evolution de la pression de pore dans le forage REP2101

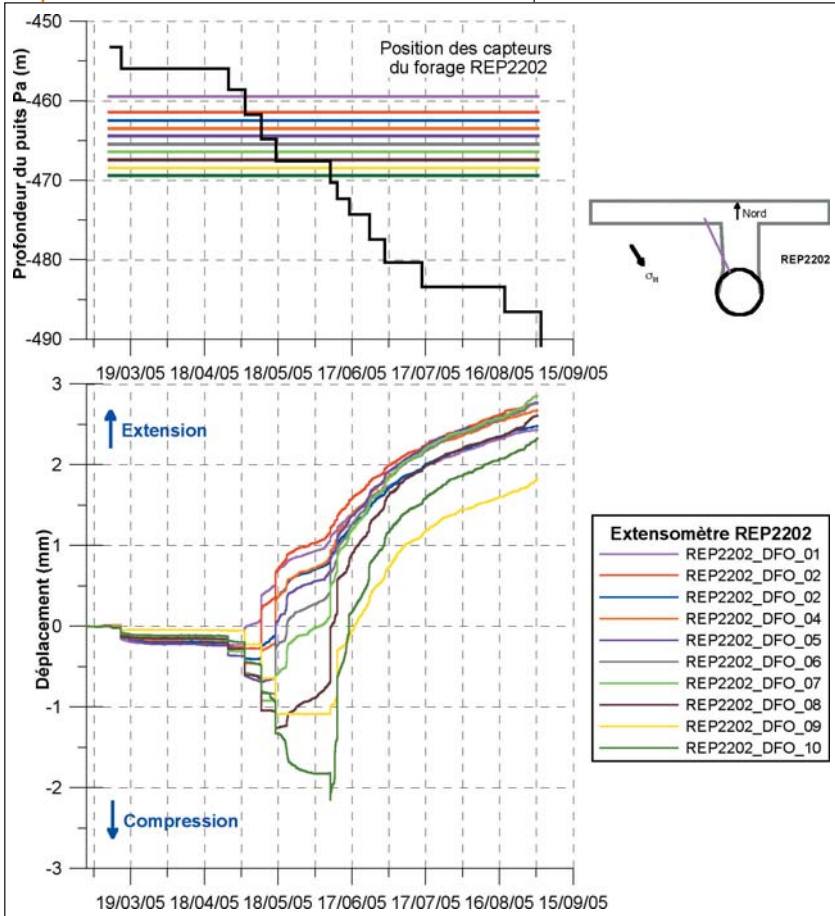


Figure 8 - Avancement du creusement et déplacements mesurés dans le forage REP2202

instantanés supplémentaires deviennent très faibles, mais une augmentation variant entre 0,5 et 0,8 mm a tout de même été observée entre le 15 juillet et le 1<sup>er</sup> septembre 2005. Les déplacements mesurés pendant cette période ne sont pas induits par le creusement du puits lui-même, mais plutôt par la convergence du puits (comportement différé des argiles).

Armand et al (2006b) montrent qu'un modèle élastique 3D, prenant en compte une anisotropie des contraintes in situ de 1,3, (Wileveau et al, 2007), prédit bien la déformation dans la direction de la contrainte principale majeure horizontale pendant l'excavation. L'amplitude des déplacements est bien prédite jusqu'à fin juin 2005 où les déplacements sont principalement dus au creusement du puits. Après les déplacements sont principalement liés au comportement différé, et ne peuvent pas être reproduits avec un modèle élastique.

Les mesures de pression se sont quasiment stabilisées avant la reprise du creusement. Chaque tir induit une variation de pression immédiate dans les intervalles, dont l'amplitude est fonction de la distance au puits. Dans le cas du forage REP2101 (Figure 9) on observe une chute de la pression après chaque tir, alors que le forage REP2102 (Figure 10) montre des surpressions tant que le front se situe avant la chambre. Après le passage du front, la pression chute dans toutes les chambres. Ce comportement est cohérent avec un

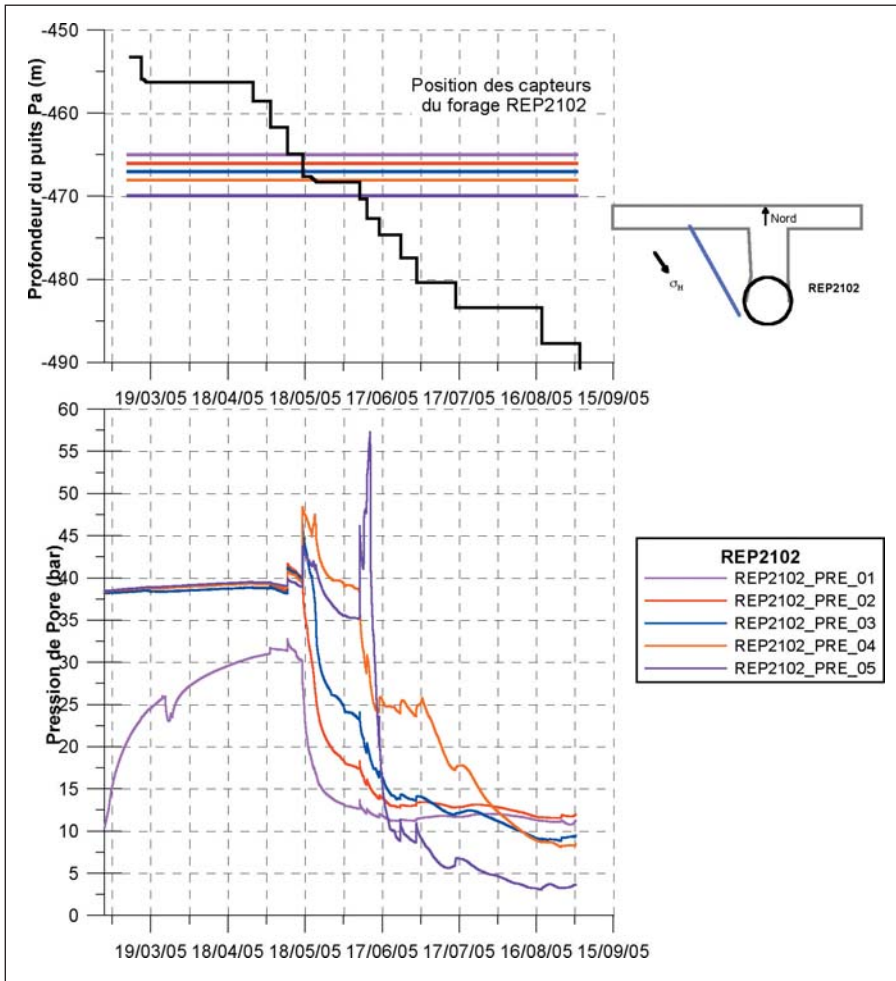


Figure 10 - Evolution de la pression de pore dans le forage REP2102

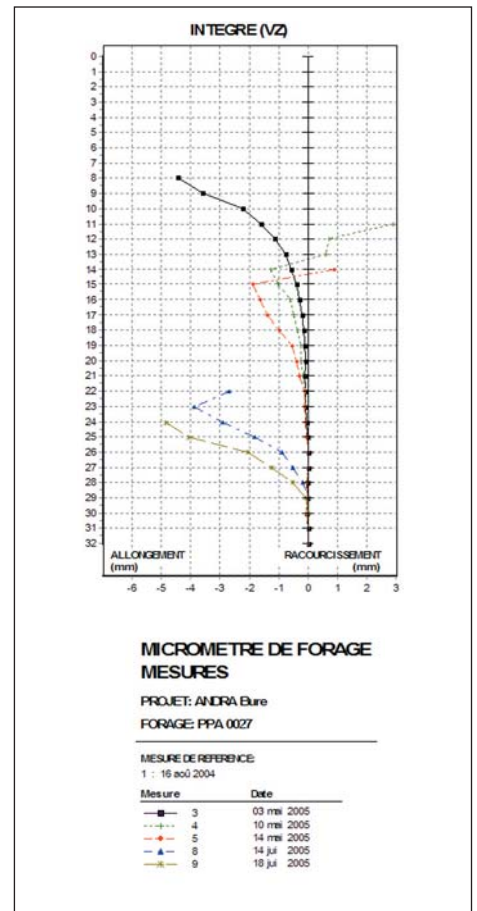


Figure 11 - Mesures d'extrusion dans l'axe du puits-forage PPA0027

modèle poro-élastique de l'excavation d'un puits dans un état de contrainte anisotrope (Armand et al 2006b).

Les plus fortes surpressions sont en effet observées dans les chambres les plus proches de la direction de la contrainte horizontale minimale, alors que les plus fortes chutes de pression s'observent dans celles proches de la contrainte horizontale majeure.

Les mesures d'extrusion (Figure 11) réalisées à l'avancement après chaque phase de creusement, montrent une distance d'influence du creusement de 6 à 9 m dans l'axe du puits avec une amplitude maximale de l'extrusion de 4 mm. On observe également un tassement de quelques millimètres sur le premier mètre du fonds de puits, lié à la compression induite par les tirs.

Une série de pulse tests hydrauliques a été conduite dans les chambres au sein des forages REP avant la descente du puits, dans les mêmes forages ainsi que dans le forage

radial à -467 m, afin d'expliquer les perturbations induites par l'excavation.

La Figure 12 montre l'évolution de la perméabilité à l'eau estimée, avec les

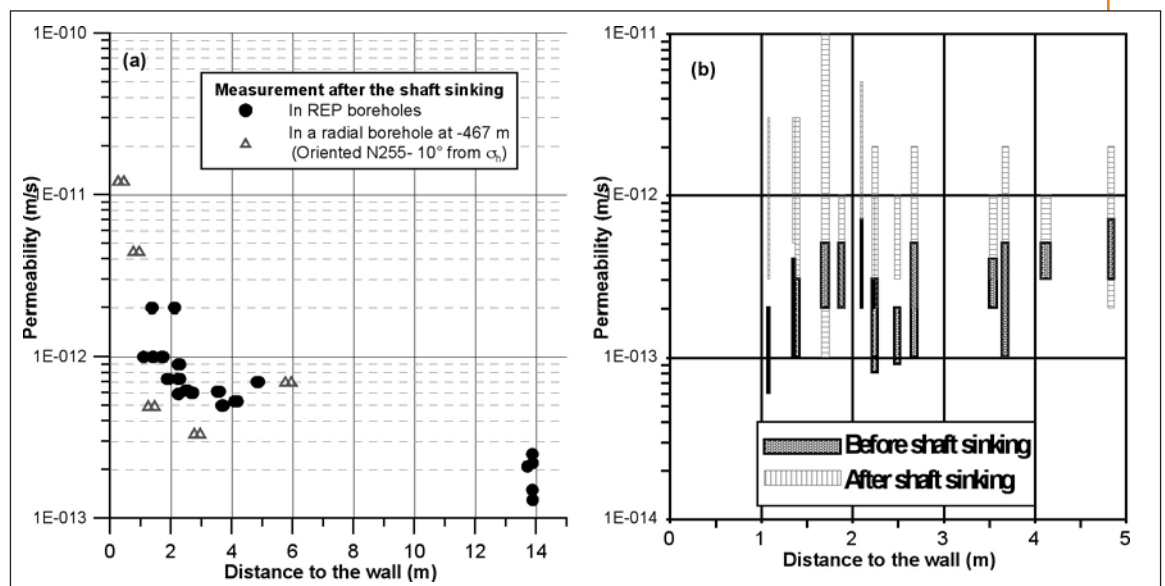


Figure 12 - Mesures de perméabilité



gamme d'erreur, mesurée avant et après l'excavation dans le domaine proche du puits. Les perméabilités mesurées avec le MMPS pendant l'excavation sont cohérentes avec celles mesurées par le PP système. On observe que la perméabilité augmente après l'excavation près de la paroi du puits d'une fois l'ordre de grandeur observé initialement. L'importance de l'augmentation se réduit progressivement quand on s'éloigne de la paroi.

### 5 - CONCLUSION

L'ensemble des capteurs mis en œuvre dans le cadre de l'expérimentation REP a permis d'obtenir un grand nombre de mesures et de résultats sur le comportement des argilites lors du percement d'un puits. Les équipements multi-obturateurs de type PP système ont été particulièrement adaptés pour la mesure précise des variations de pression dans des terrains de très faible perméabilité (de l'ordre de 10-14 m/s). Ces équipements

de test ont par ailleurs prouvé leur très grande fiabilité dans des conditions difficiles.

Les premiers résultats confirment un fort couplage hydromécanique, caractérisé par des surpressions et des sous-pressions interstitielles générées par le percement du puits dans un champ de contraintes anisotropiques.

Ces résultats font actuellement l'objet de modélisation dans le cadre du programme de recherche européen Modex-Rep.

### Références ●●●●●●●●

- Andra, 2005a, Dossier 2005 Argile – Synthèse d'évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse.
- Andra, 2005b, Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne. Andra Report no. C.RP.ADS.04.0022.
- Armand G., Su K., Hydromechanical coupling phenomena observed during a shaft sinking experiment in a deep argillaceous rock, In Proceeding of the Geoproc 2006 conference, to be publish, Nanjing, May 2006.
- Armand, G., Souley, M., Su, K., Vincent R. & Wileveau Y. 2006. Hydromechanical response to a mine-by test experiment in deep claystone, Proc. Sea to Sky Geotechnique 2006, Vancouver, October 2006, p. 488-495.
- Delay J., Krieguer J.M., Vinsot A., Rebours H., Armand G., 2005, Underground Experimental program at the Meuse/Haute-Marne underground Research Laboratory, North Eastern France - Symposium on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Management – Tours, 14-18 March 2005.
- Wileveau Y., Armand G., Morel J., REP and Niche Results: A complete Vertical and horizontal Mine by Test in the Meuse/Haute Marne Underground Research Laboratory – Congrès international de l'AFTES, Chambéry Oct 2005.
- Wileveau, Y., Cornet, F.H., Desroches, J., Blümling, P., 2007a. Complete in situ stress determination in an argillite sedimentary formation. *Physics and Chemistry of the Earth* 32 (2007) 866-878, doi:10.1016/j.pce.2006.03.018.