

Calculs 3d prédictifs pour la conception d'alvéoles de stockage de déchets radioactifs HAVL

Vincent Renaud, Jacques Morel

▶ **To cite this version:**

Vincent Renaud, Jacques Morel. Calculs 3d prédictifs pour la conception d'alvéoles de stockage de déchets radioactifs HAVL. 5. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur "Infrastructures, développement durable et énergie" (JNGG 2010), Jul 2010, Grenoble, France. pp.883-890. ineris-00973583

HAL Id: ineris-00973583

https://ineris.hal.science/ineris-00973583

Submitted on 4 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CALCULS 3D PREDICTIFS POUR LA CONCEPTION D'ALVEOLES DE STOCKAGE DE DECHETS RADIOACTIFS HAVL

3D PREDICTIVE CALCULATIONS FOR THE DESIGN OF DISPOSAL CELLS FOR HIGH LEVEL ACTIVITY WASTES

Vincent RENAUD[1], Jacques MOREL[2]
1 INERIS, Nancy, FRANCE
2 ANDRA, Bure, FRANCE

RÉSUMÉ – Dans le cadre de l'expérimentation "alvéoles HA" au laboratoire souterrain de recherche de Bure (Andra), des modélisations mécaniques couplées (comportement différé ou hydraulique) ont été réalisées pour prédire le comportement attendu des argilites à l'excavation d'une alvéole (contraintes, déplacements, EDZ). Elles sont ensuite comparées avec les mesures in situ (déplacements et pression interstitielle).

ABSTRACT – For the "HA cells" experimentation in the URL of Bure (Andra), coupled mechanical modelings (creep or hydraulic behavior) were carried out to predict the expected behavior of argillites during excavation of a disposal cell (stresses, displacements, EDZ). These predictions are then compared to in situ measurements (displacement and pore pressure).

1. Introduction

Dans le cadre du programme d'expérimentations et d'essais de démonstration, différentes expérimentations sont réalisées au laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne creusé dans des argilites. Certaines nécessitent des calculs hydromécaniques couplés et/ou différés pour la conception et l'interprétation des expérimentations in situ, en particulier pour les excavations des différents ouvrages souterrains et des premières alvéoles HA (Haute Activité Vie Longue).

L'unité de programme « Alvéoles HA » a pour but de vérifier qu'il est possible de creuser dans la formation hôte des alvéoles horizontales (20 à 40 m de longueur) en diamètre 740 mm environ, de tester la méthode de creusement et d'étudier le comportement des alvéoles en vue d'un éventuel stockage de déchets radioactifs haute activité – vie longue.

Dans la première phase du programme d'expérimentations in situ, des alvéoles ont été réalisées dans différentes directions par rapport aux contraintes naturelles in situ. Les modélisations mécaniques 3D (élastoplastique + comportement différé, HM couplée) ont pour but d'optimiser le dispositif de mesure in situ. Elles fournissent des prédictions du comportement attendu (impact hydromécanique du creusement, déformations, endommagement généré par le creusement).

Cet article présente les résultats prédictifs des modélisations couplées qui tiennent compte des géométries de la galerie d'accès (GRM) et des alvéoles (Figure 1), de l'environnement autour de la galerie GRM, du phasage prévisionnel d'excavation, de la rhéologie des argilites et des caractéristiques poromécaniques et différées au niveau –490 m.

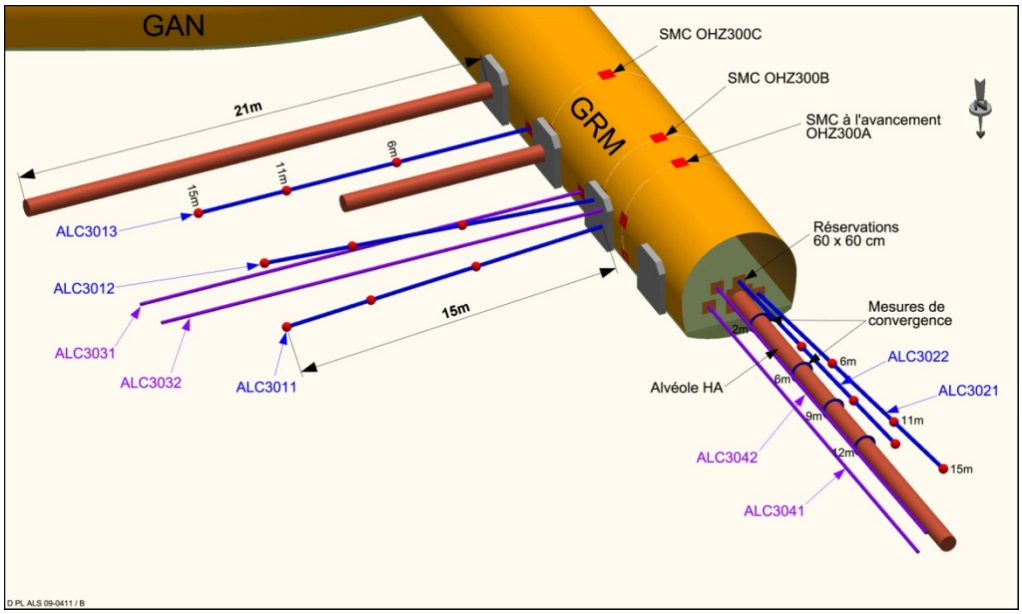


Figure 1 : Localisation des alvéoles et de la galerie d'accès.

2. Hypothèses et données d'entrée

Les alvéoles, non chemisées, ont été creusées dans les 2 directions des contraintes principales horizontales (σ_H et σ_h). Bien que les calculs aient été réalisés selon les deux directions, nous ne présentons ici (dans un but de concision) que ceux relatifs à l'alvéole HA axiale selon σ_H. L'objectif des calculs numériques est de modéliser le creusement de l'alvéole en prenant en compte la galerie d'accès (GMR, de section quasi-circulaire de 21,6 m²), le comportement à court et moyen terme. On s'intéresse plus particulièrement à la plasticité autour des alvéoles, à l'évolution de la convergence de l'alvéole, à l'impact du creusement de l'alvéole sur la galerie (déformation induite et plasticité induite) ainsi qu'au champ de déplacement, de contrainte et de pression interstitielle (pour comparaison avec les mesures).

2.1. Etat de contrainte initiale

L'état de contraintes naturelles est le suivant : σ_v = 12,7 MPa, σ_h = 12,4 MPa et $\sigma_H \approx 1{,}3 \times \sigma_h$ = 16,1 MPa. σ_v, σ_h et σ_H représentent respectivement la contrainte verticale et les deux contraintes horizontales (mineure et majeure).

2.2. Propriétés mécaniques et hydrauliques des terrains

Le code de calcul utilisé pour cette étude est : FLAC3D 3.1 v477 (64 bits, Itasca, 2002). Les calculs sont réalisés avec le modèle élastoplastique endommageable avec écrouissage (EPE – Hoek et Brown, développé dans le cadre du projet MODEX-REP, Su, 2005b) ou avec le modèle hydromécanique. Les paramètres utilisés pour ces modélisations sont ceux du référentiel du site –version juin 2005.

Le modèle élastoplastique avec écrouissage est basé sur le critère de Hoek & Brown et exprimé en contraintes totales. Les paramètres poroplastiques utilisés (paramètres de Hoek et Brown m, s et σ_c au seuil d'endommagement, à la rupture et

en post-pic) ont été identifiés à partir d'essais de laboratoire réalisés en conditions non drainées (Tableau 1).

Le couplage hydromécanique est défini par la relation de Biot : $\sigma = \sigma_{eff} - b\,P$.

Tableau 1 : Valeurs des paramètres poromécaniques (poroélasticité)

Symbole	Désignation	
k_i [m²]	Perméabilité intrinsèque du matériau sain	5.10^{-20}
K_w [MPa]	Compressibilité de l'eau	2000
ϕ [–]	Porosité	0,15
b [–]	Coefficient de Biot (valeur moyenne)	0,6
M [MPa]	Module de Biot	5113
E_0 [MPa]	Module de Young drainé	3435
ν_0 [–]	Coefficient de Poisson drainé	0,1164

Le matériau endommagé est regardé comme un matériau viscoplastique dont les caractéristiques sont délimitées par celles du matériau sain (identifiées en laboratoire) et celles du matériau rompu (pouvant être identifiées à partir des mesures de convergence des galeries). L'influence de l'endommagement sur les déformations viscoplastiques est considérée à travers l'énergie d'activation et l'écrouissage, *m*, de la loi de Lemaître. Une évolution de l'écrouissage *m* en fonction de l'endommagement a été proposée par Souley (2007b) :

$$m = m(\gamma) = 2(m_0 - m_1)(\gamma^*)^3 - 3(m_0 - m_1)(\gamma^*)^2 + m_0$$

où γ^* est la distorsion plastique réduite (traduisant le taux d'endommagement en pré-pic) et m_0 et m_1 les valeurs de *m* respectivement dans la partie saine (valeur obtenue sur échantillon) et dans la zone fracturée ($0 > m_0 \geq m_1$).

L'existence d'un seuil viscoplastique variable (Su, 2005a) est supposée : écart entre les contraintes naturelles (p_0, q_0) et l'état de contrainte qui règne autour de l'ouvrage (p, q).

Les formulations utilisées pour les calculs ne sont valables qu'en l'absence d'altération de propriétés mécaniques avec le temps.

2.3. Conditions aux limites

L'ANDRA réalise depuis août 2005 des mesures de pression interstitielle dans des forages au niveau -490 m. Sur la base de ces mesures, les pressions observées dans la zone hydrauliquement perturbée (i.e. hors EDZ) présentent des caractéristiques semblables : une fois l'effet de foration résorbé (réponse non drainée), un profil de pression s'établit le long des forages, dont le gradient est toujours dirigé vers la galerie (effet de drainage). Une analyse de l'évolution des pressions, mesurées sur une période d'environ une année, a ainsi permis de montrer que les profils de pressions étaient quasi-stabilisés (Croisé et Enssle, 2006) et qu'à des distances de parois supérieures à 12,5 m, les valeurs de pression oscillent entre 4 et 4,5 MPa. Une valeur moyenne uniforme de 4,25 MPa a été retenue à l'exception du plan vertical médian de la galerie GRM et du drainage dû aux galeries GRM et GLN (dans le plan YZ).

Les conditions aux limites mécaniques/hydrauliques sont mentionnées en bleu/vert sur la Figure 2 (vue en plan). Pour le modèle hydromécanique, le profil de pression appliqué à la face « X = 0 m » du modèle est indicatif.

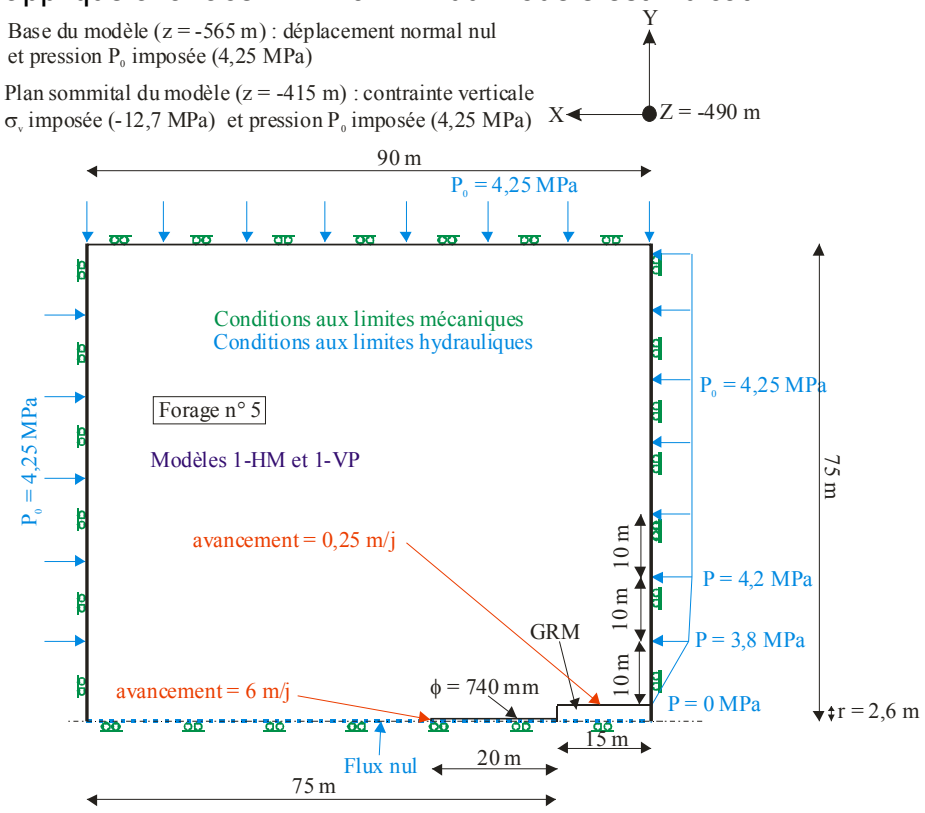


Figure 2 : Forage n° 5 dans la galerie GRM : géométrie et conditions aux limites.

2.4. Modèle géométrique 3D et phasage du creusement

Le domaine géométrique du modèle s'étend sur 90 m (165 mailles) en X, 75 m en Y et 150 m en Z, ce qui correspond à un modèle de 1 110 780 mailles. Les finesses radiale et orthoradiale en paroi de forage (1,5 cm) ont été privilégiées au détriment d'une précision axiale (20 cm le long du forage).

La vitesse d'avancement de la galerie GRM est de 0,25 m par jour, ce qui équivaut à 100 jours de creusement (longueur de 25 m). A l'issue de ce creusement, une pose de 2 mois a été prise en compte avant de commencer le forage des alvéoles.

Concernant le modèle géométrique, seuls les 15 derniers mètres de la galerie GRM sont modélisés, car l'alvéole n° 5 étant axiale à la galerie GRM, nous avons considéré qu'une longueur de galerie équivalente à trois diamètres est suffisante pour prendre en compte l'effet du creusement de la galerie GRM sur l'alvéole n° 5 (Figure 3).

La simulation numérique de l'extensométrie, des contraintes, des pressions de pore et des convergences est supposée démarrer juste avant le forage des alvéoles (temps remis à zéro pour les mesures).

Le creusement des ouvrages s'effectue en 25 phases (Figure 3). Une phase de creusement commence toujours par un calcul instantané qui est suivi de la diffusion (HM) ou du fluage (VP). Les temps de diffusion ou de fluage varient selon l'ouvrage concerné : 8 heures pour les alvéoles et entre 3 et 13 jours pour la galerie GRM.

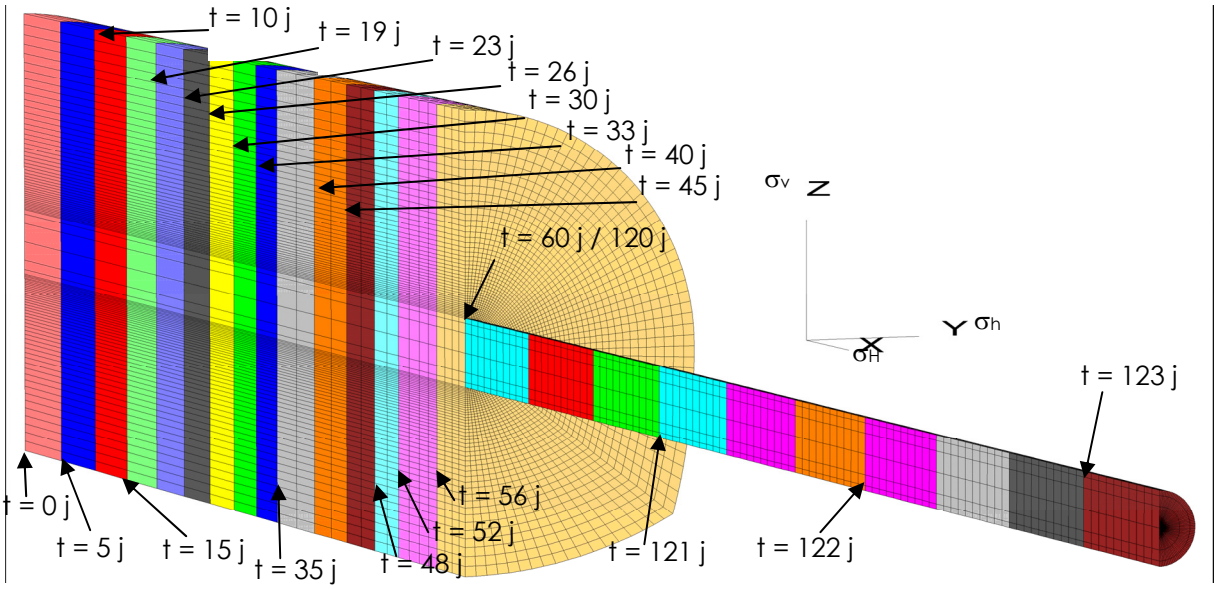


Figure 3 : Phasage du creusement de la galerie GRM et de l'alvéole n° 5.

3. Analyse des résultats

3.1. Calcul hydromécanique : Pression de pore

La distribution de la pression interstitielle pour un front à mi-longueur d'alvéole est donnée sur la Figure 4, la pression initiale étant de 4,25 MPa. Après le passage du front au niveau de la section, l'essentiel du drainage (valeurs finales de pression inférieures à 1 MPa) est limité dans un domaine de 10 cm autour de l'alvéole et cela même après le creusement complet de la galerie. Les principaux résultats sont :

- une zone de dissipation de pression interstitielle se développe en avant du front dans l'axe de l'alvéole, sur une distance de 2 diamètres environ. Ainsi, avant que le front n'arrive au niveau de la section, on assiste à une diffusion radiale dans les sections d'alvéole délimitées entre le front et 2 diamètres en avant (gradient de pression entre la valeur initiale et les chutes de pression en avant du front) ;
- en avant du front, tout autour de la galerie et sur une profondeur de 10 à 40 cm, la réponse instantanée (non drainée) génère des surpressions interstitielles, qui subsistent même au bout de 8 heures de drainage. Les surpressions qui se développent dans la direction verticale (contrainte intermédiaire) juste en avant du front traduisent le caractère tridimensionnel de la réponse instantanée. Cependant, ces surpressions sont faibles (de l'ordre de 0,15 MPa) après 8 heures de diffusion. Ces surpressions sont plus élevées (+ 0,65 MPa) lorsque le temps de diffusion est faible (100 s : voir fenêtre encadrée de la Figure 4), supérieures à celles du pic théorique de surpression (+ 0,06 MPa en paroi) calculé avec la solution analytique 2D de Detournay et Cheng (1988) ;
- en arrière du front, le processus de diffusion du fluide se traduit par le drainage autour de l'alvéole et au front qui s'accompagne donc d'une diminution de la pression avec le temps dont l'intensité (diffusion) se réduit lorsqu'on s'éloigne de la paroi vers l'intérieur du massif.

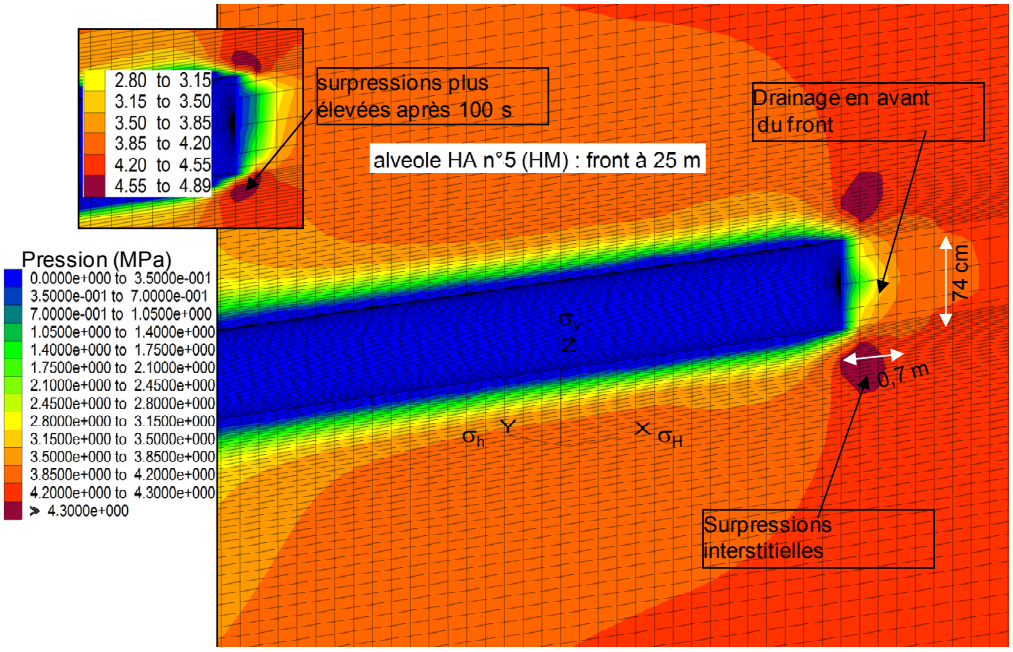


Figure 4 : Distribution de pression de pore autour de l'alvéole n° 5 creusée à mi-longueur (15 m de galerie GRM + 10 m d'alvéole), après 8 h de diffusion.

La Figure 5 présente l'évolution des pressions dans le profil latéral passant par les points de mesure de pression expérimentaux de l'alvéole n° 5. Cette figure permet d'illustrer davantage le processus de diffusion autour de l'alvéole. Le creusement de la galerie GRM correspond à des sous-pressions initiales (avant le creusement de l'alvéole) pouvant atteindre 2 MPa (point P1 à 2 m de GRM). Selon cette orientation par rapport au tenseur des contraintes, on constate que le creusement de la galerie GRM ne génère pas de surpressions interstitielles.

Les surpressions mesurées expérimentalement à la fin du creusement (entre 0,1 et 0,15 MPa) sont supérieures à celles prédites par le calcul (quelques centièmes de MPa). Cela peut être attribué à la pression d'outil et au dégagement thermique relatifs à la foration : phénomènes non pris en compte dans les calculs. Par ailleurs, le fait que les mesures (surtout le point P3) reportées sur la Figure 5 montrent des chutes quasi-totales (et instantanées) de pression pourrait traduire une influence de la fracturation (principalement pour le point de mesure P3).

3.2. Calculs viscoplastiques

La Figure 6 synthétise les convergences horizontales et verticales calculées par le modèle numérique. Les mesures n'ayant débuté que 2 jours après la fin du creusement de l'alvéole, les valeurs reportées sur cette figure ont été arbitrairement augmentées de 70 % de la convergence instantanée calculée. L'évolution de la convergence verticale (de la modalité hydromécanique correspondante) de la section à 6 m y a été rajoutée dans un but de comparaison.

La comparaison avec les mesures n'est pas aisée (hors profils par rapport à la section théorique, écaillage). Ces mesures évoquent une phase de fluage primaire suivie d'une phase de fluage secondaire. Dans la pratique, l'état de contrainte se relaxe rapidement (quelques semaines à quelques mois) autour des alvéoles. Le profil axial montant (4°) PP10 est situé au-dessus de l'alvéole, dans son plan vertical médian ; le premier point de mesure est le plus proche de la galerie GRM (les points étant espacés entre eux de 2m).

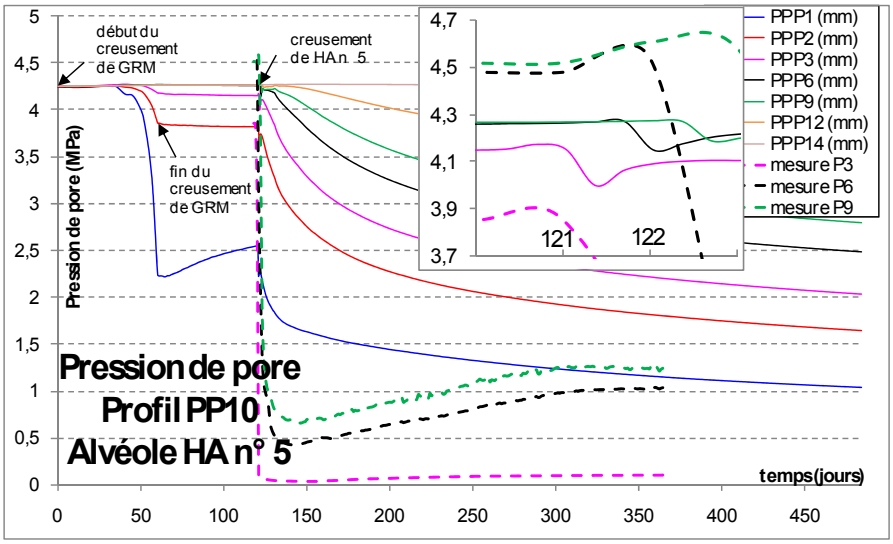


Figure 5 : Alvéole HA n° 5 : profil (EH1) de pression de pore, modalité hydromécanique.

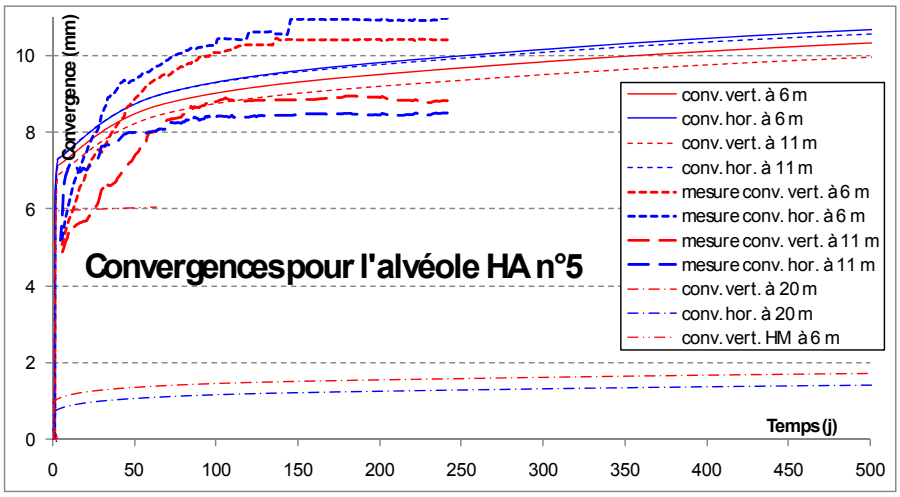


Figure 6 : Alvéole n° 5 : convergences horizontales et verticales en fonction du temps, modalité viscoplastique.

Cette période se traduit par une décroissance rapide de la vitesse de fluage (fluage primaire ou transitoire) tandis que le fluage devient stationnaire (secondaire) ou quasi-stationnaire lorsque le déviateur n'évolue guère dans le temps. Ce type d'évolution, observé sur la plupart des ouvrages souterrains est bien reproduit par le modèle. En effet, le champ de contraintes autour de toute cavité réalisée avec le modèle de Lemaitre tend vers un état asymptotique. Les amplitudes maximales des convergences sont respectivement de l'ordre de 7, 9 et 13 mm (section à 6 m) pour une excavation instantanée, un effet différé de 2 mois (soit comparable au temps de mise en œuvre) et de 10 ans. Pour les effets différés à 2 mois/10 ans, ces convergences correspondent à une réduction de section variant entre 4,5 et 7 % pour les sections à 6, 11 et 15m. Les convergences à l'issue de l'excavation (calcul instantané) sont comparables pour les modalités hydromécanique et viscoplastique. Environ 55 % des convergences à 10 ans est obtenu dès la fin du forage soit 3 jours. Pour la section à 20 m, les convergences sont très faibles puisqu'il s'agit de l'extrémité de l'alvéole.

4. Conclusions

L'objectif principal des modélisations numériques était de simuler le creusement des alvéoles HA pour vérifier et optimiser le dimensionnement du dispositif de mesures (convergence et pression interstitielle) qui était prévu lors de la construction de la galerie GRM et des alvéoles qui y sont rattachées.

Ces calculs prédictifs ont permis d'évaluer les convergences en différentes sections, pour différentes orientations d'alvéole, à différentes dates. Les évolutions temporelles de différentes sections ont pu montrer que la réduction de section peut atteindre 4,5 % 2 mois après la fin du creusement des alvéoles (avec les effets différés), ainsi que des dérives différentes d'axe du forage et des "rotations".

L'analyse des calculs viscoplastiques nous amène aux conclusions suivantes :

- les déplacements radiaux viscoplastiques sont supérieurs à ceux des calculs couplés HM. L'importance de l'écart dépend de l'orientation de l'alvéole. La seule exception concerne les résultats couplés après creusement (court terme) pour l'alvéole orientée selon σ_H : cela est conforme avec le front de dissipation de pression qui se met en place en avant, entraînant ainsi un fort couplage d'abord en avant du front, puis dans les sections d'alvéole au-delà de 50 cm du front ;
- d'autre part, l'analyse des convergences montre un rapport élevé (pouvant dépasser 5) entre les convergences verticale et horizontale. Cependant, les calculs prédictifs sous-estiment la convergence verticale et surestiment la convergence horizontale. En conséquence, les modèles prédisent un ratio d'anisotropie entre les convergences verticale et horizontale de 2 qui est nettement inférieur à ceux mesurés.

C'est donc d'autres pistes qui vont être prochainement étudiées pour améliorer la loi de comportement : paramètres viscoplastiques après rupture, couplage du fluage sur l'endommagement et la rupture, caractéristiques élastiques du matériau rompu, évolution du seuil variable de déclenchement du fluage, etc.

5. Références bibliographiques

Croisé J., Enssle P. (2006) - "Impact de l'effet de drainage des galeries GEX et GMR à –490 m sur les mesures de pression des forages PEP, DIR et SUG". Référence ANDRA : DNT 0CPE 06.015.

Detournay E., Cheng (1988) : "Poroelastic Response of a Borehole in a Non-Hydrostatic Stress Field", Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 25, n° 3, pp. 171-182.

Itasca (2002) : Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, manual of Fish in FLAC3D. Minneapolis.

Modèles du comportement mécanique court et long terme des argilites de Meuse/Haute-Marne – Délivrable de FPT n° CAGG18 (E05, E10) – C RP ASMG 02-066/A du 05/03/03..Référentiel géologique du site de Meuse/Haute-Marne – tome 2 - volume 5 – D RP ADS 04-022/A - version décembre 2005.

Souley M., (2007a) - Calculs couplés hydromécaniques pour la conception de l'expérimentation OHZ (UP_GCS) – Rapport Andra D RP 1INE 07-008/1 du 27/11/2007.

Souley M., (2007b) - Développement d'une loi endo-viscoplastique de comportement à long terme, implantation numérique & validation– Rapport Andra D RP 1INE 07-009/1 du 05/12/2007.

Su K., (2005a) - "Contribution à l'étude du comportement mécanique et thermo-hydro-mécanique des argilites du Callovo-Oxfordien", Habilitation à diriger des recherches, Lille.

Su K., (2005b) - "Modèle élasto-plastique avec écrouissage pour les argilites développé dans le cadre du projet MODEX-REP. Rapport Andra C.NT.ASMG.05.0008.