

ANALYSE DE LA CONVERGENCE A LONG TERME DES GALERIES DANS L'ARGILITE DU CALLOVO-OXFORDIEN

ANALYSIS OF LONG-TERM CONVERGENCE OF DRIFTS IN THE CALLOVO OXFORDIAN CLAYSTONE

Lina-María Guayacán-Carrillo^{1,2}, Jean Sulem², Aurélien Noiret³, Darius Seyedi¹, Siavash Ghabezloo², Gilles Armand³

¹ Andra R&D, 92298 Chatenay-Malabry, France

² Université Paris-Est, Laboratoire Navier/CERMES, Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR, CNRS, 77455 Marne la Vallée, France

³ Andra R&D, Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne, 55290 Bure, France

RÉSUMÉ – L'évolution dans le temps de la convergence des parois de galeries de différents diamètres est analysée à l'aide de la loi semi-empirique proposée par Sulem et al. (1987). On observe que les paramètres décrivant le comportement différé de la galerie sont indépendants de la taille de l'excavation et que les valeurs de ces paramètres peuvent être utilisées pour des prévisions fiables de l'évolution de la convergence à long terme.

ABSTRACT – The anisotropic convergence evolution of drifts of various diameters, is analyzed using the semi-empirical law proposed by Sulem et al. (1987). It is shown that similar values are obtained for the parameters describing the time-dependent properties of the ground. Thus they can be considered as independent of the excavation size. These values can be used for reliable predictions of the long term closure.

1. Introduction

En 2000, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) a commencé la construction du Laboratoire Souterrain de Meuse / Haute-Marne (LSM/HM) avec l'objectif principal de démontrer la faisabilité d'un stockage géologique dans l'argilite du Callovo-Oxfordien. Pour cela, un réseau de galeries expérimentales a été excavé en suivant les directions des contraintes horizontales principales (majeure et mineure) et avec différentes méthodes d'excavation, différentes géométries de la structure et différents soutènements. Il faut noter qu'au niveau principal du LSM/HM (490 m) la contrainte verticale est très proche de la contrainte horizontale mineure ($\sigma_v \approx \sigma_h \approx 12\text{MPa}$), tandis que la contrainte horizontale majeure (σ_H) est d'environ 16MPa. Par conséquent, l'état initial de contraintes est quasi-isotrope (dans le plan de la section) pour les galeries suivant la direction de la contrainte horizontale majeure, alors qu'il présente un rapport d'anisotropie σ_H / σ_v d'environ 1,3 pour les galeries suivant la direction de la contrainte horizontale mineure.

Chaque galerie a été instrumentée en différentes sections pour suivre l'évolution de la convergence des parois et la déformation du massif. Le suivi de la zone autour des galeries, a révélé le développement d'une zone fracturée (fractures en extension et en cisaillement) induite par l'excavation. La distribution des fractures dépend à la fois de l'orientation de la galerie et du champ de contraintes in-situ (Armand et al., 2014) et influence largement la déformation des galeries. Ainsi, les mesures de convergence ont montré une fermeture anisotrope, qui dépend de l'orientation des galeries (Armand et al., 2013).

Les mesures de convergences relevées pour des galeries d'environ 5m de diamètre (une galerie représentative en chaque direction) ont été analysées à l'aide de la loi semi-empirique proposée par Sulem et al. (1987). Cette méthode permet de distinguer deux effets : l'effet de l'avancement du front de taille et la réponse différée du massif. Dans cet article, nous présentons tout d'abord un récapitulatif de la méthodologie utilisée et des résultats obtenus. Ensuite, nous analysons l'effet de la taille de galeries dans l'évolution des convergences. Pour ce faire, des galeries de différents diamètres (0,70m, 3,80m et 5,20m) suivant la direction de la contrainte horizontale majeure, ont été analysées.

2. Observations in-situ

Le long des galeries, différentes sections de mesure de convergence (SMC) ont été installées dans le plan de la section. Chaque SMC est composée de six plots installés autour du périmètre et la mesure du déplacement des parois est effectuée suivant cinq cordes différentes (Figure 1). Ces plots sont installés à environ 2m du front de taille. Les mesures s'effectuent avec une fréquence d'une mesure par jour pendant les deux premières semaines après l'excavation de la section. Ensuite, la fréquence diminue au cours du temps.

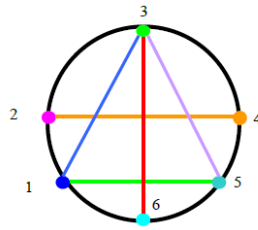


Figure 1. Section de mesure de convergence (SMC)

Les mesures de convergence montrent une réponse anisotrope, qui est plus prononcée pour les galeries excavées le long de la contrainte horizontale mineure avec un rapport d'anisotropie entre la convergence verticale et la convergence horizontale de 4,0 tandis que pour les galeries excavées le long de la contrainte horizontale majeure, ce rapport est d'environ 0,5 (Armand et al., 2013). Il faut noter que dans les deux orientations d'excavation, les valeurs maximales et minimales se trouvent dans la direction verticale et horizontale de la section. La Figure 2 présente les convergences verticales et horizontales mesurées le long de deux galeries de 5,20m de diamètre (GCS excavée dans la direction parallèle à la contrainte horizontale majeure) et de 4,60m de diamètre (GED excavée dans la direction parallèle à la contrainte horizontale mineure).

Pour les deux orientations on observe une forte évolution de la convergence pendant les cent premiers jours de suivi et ensuite la convergence tend à se stabiliser avec le temps. On note que, même si la vitesse de convergence dans la direction verticale de la galerie GED diminue avec le temps, la convergence présente une vitesse un peu plus forte que celle dans la direction horizontale. De plus, une dispersion dans toutes les sections de mesure est observée dans toutes les galeries et celle-ci est plus prononcée dans la direction où se produit la plus forte convergence. Cela peut être relié d'une part à l'hétérogénéité locale de la roche et à la dispersion de la distribution des fractures induites autour de la galerie et d'autre part au fait que les SMCs ne sont pas toutes installées à la même distance du front. Plusieurs facteurs peuvent influencer le temps et/ou la distance d'installation, comme cela est discuté dans Guayacán-Carrillo et al. (2016). Etant donné, que l'évolution des convergences est la plus forte pendant les premiers jours depuis l'ouverture de la section, si la mesure initiale est décalée pour une SMC, une partie de la

convergence totale est perdue dans l'enregistrement des données. Cependant, dans l'analyse présentée cette « convergence perdue » est prise en compte. Finalement, il faut remarquer que les sections qui se trouvent très proches de la position finale du front de taille (à moins de deux diamètres de distance) présentent les convergences les plus faibles, étant donné que dans ces sections le déconfinement est partiel (comme par exemple les sections F et G dans la galerie GCS).

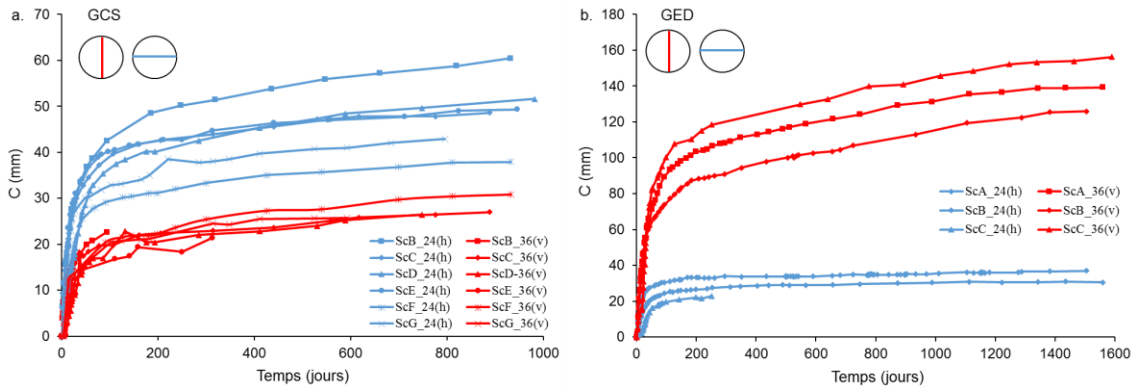


Figure 2. Mesures de convergence dans deux galeries représentatives : a. Galerie GCS excavée suivant la direction de σ_H . b. Galerie GED excavée suivant la direction de σ_h (Armand et al., 2013)

3. Méthodologie

Le caractère anisotrope de la déformation est pris en compte en approximant la déformée de la section par une ellipse. En suivant la méthodologie proposée par Vu et al. (2013), les données de convergence sont analysées afin d'identifier les axes principaux de l'ellipse. Ensuite, l'évolution dans le temps des deux axes principaux de l'ellipse est interprétée comme la convergence de la paroi de la galerie le long des deux directions principales de déformation comme cela a été présenté par Guayacán-Carrillo et al. (2016).

3.1. Evolution de la convergence le long des deux axes principaux de déformation

En utilisant la loi semi-empirique proposée par Sulem et al. (1987), (équation (1)), l'évolution de la convergence est analysée de manière indépendante pour chaque axe de l'ellipse. La convergence est définie comme la variation de distance entre deux points opposés de la paroi de la galerie. Elle est fonction des variables : x - distance au front de taille et t - temps après le passage du front. Cette loi de convergence dépend de cinq paramètres : T - Paramètre relié au temps caractéristique du comportement différé du terrain; X - Paramètre dépendant de l'extension de la zone plastique, ainsi que de la distance d'influence du front de taille; $C_{\infty x}$ - Convergence instantanée (pour une vitesse d'avancement infiniment rapide); m - paramètre reliant la convergence différée et la convergence instantanée; n - exposant décrivant la forme de la courbe ajustée.

$$C(x,t) = C_{\infty x} \left[1 - \left(\frac{X}{x+X} \right)^2 \right] \left\{ 1 + m \left[1 - \left(\frac{T}{t+T} \right)^n \right] \right\} \quad (1)$$

La convergence totale à long terme est donnée par :

$$C_{totale} = C_{\infty x} (1 + m) \quad (2)$$

Il faut remarquer que l'analyse des mesures de convergence doit prendre en compte la convergence qui a eu lieu entre l'ouverture de la section et l'installation de la SMC (c.-à-d. «la convergence perdue»). La convergence mesurée est donnée par l'équation (3), où x_0 est la distance au front lors la première mesure et t_0 est le temps écoulé depuis le passage du front à la hauteur de la section considérée.

$$\Delta C(x_i, t_i) = C(x_i, t_i) - C(x_0, t_0) \quad (3)$$

Les valeurs optimales des cinq paramètres T , X , $C_{\infty x}$, m et n sont obtenues par calage des données de convergence. Cette procédure est effectuée de manière indépendante pour chaque axe de l'ellipse et, pour chaque SMC dans les différentes galeries.

4. Résultats

Les résultats montrent que dans les deux directions des galeries, les axes principaux de déformation se trouvent dans la direction verticale et horizontale (de la section transversale), avec l'axe majeur formant un angle de 90° avec l'horizontale. Il faut remarquer que dans le cas de GCS (parallèle à σ_H), la galerie a une forme circulaire au début et va se déformer de manière elliptique avec une forte déformation dans la direction horizontale (c.-à-d. l'axe mineur de l'ellipse). Par contre dans le cas de GED (parallèle à σ_h) la forme initiale de la galerie est elliptique et elle va se déformer en suivant la même géométrie. Même si la déformation la plus forte se développe dans l'axe vertical, celui-ci reste l'axe majeur de l'ellipse.

Ensuite, l'analyse de l'évolution de ces deux axes principaux de déformation pour chaque section de mesure (pour chaque galerie indépendamment), montre des valeurs très proches pour certains paramètres. En effet, il est observé que dans les deux directions de déformation de chaque galerie et aussi pour les deux orientations d'excavation des galeries, les paramètres m , n et X présentent des valeurs similaires qui restent constantes le long des deux galeries. La valeur du paramètre X qui a la dimension d'une longueur est d'environ 0,9 fois le diamètre de la galerie. Le paramètre T , garde la même valeur pour les deux axes principaux de déformation le long de la galerie GCS et dans la direction horizontale de la galerie GED. Par contre, on observe que dans la direction verticale de GED, la valeur de T présente une valeur plus forte, qui est en accord avec les observations in-situ. Comme mentionné auparavant, la vitesse de convergence verticale présente des valeurs un peu plus fortes dans cette galerie.

Tableau 1. Paramètres de la loi de convergence (Guayacán-Carrillo et al., 2016)

	Galerie GCS (parallèle à σ_H)		Galerie GED (parallèle à σ_h)	
	Axe mineur (horizontale)	Axe majeur (verticale)	Axe mineur (horizontale)	Axe majeur (verticale)
T (jours)	6		6	16
X (m)	4,6		4,6	
$C_{\infty x}$ (mm)	11,1	5,3	5,3	32,2
m	5,7		5,7	
n	0,3		0,3	

Enfin, on observe qu'une très bonne prédiction de la convergence des galeries est obtenue par la seule variation du paramètre $C_{\infty,x}$ le long d'une galerie. Ce paramètre tient compte de l'anisotropie de la convergence et de la dispersion dans l'évolution de la déformation, le long des différentes galeries. On peut donc considérer que ce paramètre reflète les conditions locales dans chaque SMC alors que les autres paramètres sont représentatifs de la réponse globale du massif. La Figure 3 et la Figure 4 montrent les résultats obtenus pour une SMC des galeries GCS et GED, respectivement. On observe que l'évolution de la convergence est très bien reproduite en fonction du temps et aussi en fonction de la distance au front.

Cette approche a été validée sur une galerie parallèle à GCS avec le même type de soutènement et le même diamètre (Guayacán-Carrillo et al., 2016).

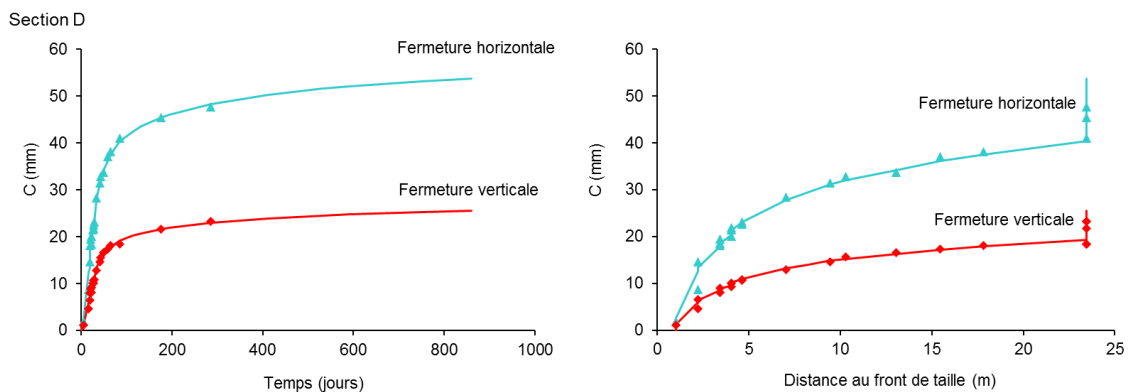


Figure 3. Evolution de la convergence dans la galerie GCS. A gauche : Evolution de la convergence en fonction du temps. A droite : Evolution de la convergence en fonction de la distance au front. Les données obtenues à partir du calage de l'ellipse sont représentées par les symboles et la prédiction obtenue à partir de la loi semi-empirique par les traits continus.

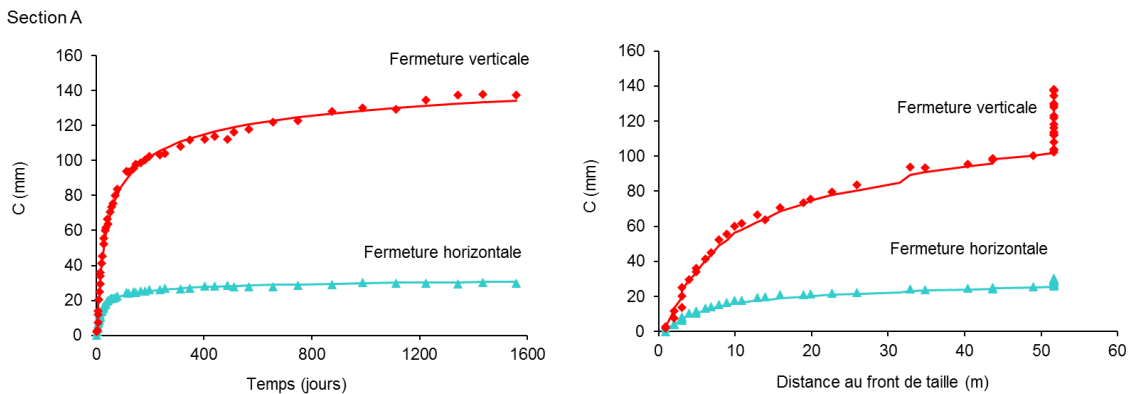


Figure 4. Evolution de la convergence dans la galerie GED. A gauche : Evolution de la convergence en fonction du temps. A droite : Evolution de la convergence en fonction de la distance au front. Les données obtenues à partir du calage de l'ellipse sont représentées par les symboles et la prédiction obtenue à partir de la loi semi-empirique par les traits continus.

4.1. Influence de la taille des galeries sur l'évolution des convergences

Le réseau des galeries expérimentales comporte des galeries de différents diamètres. Dans cette section, nous analysons l'évolution des convergences dans des galeries de différents diamètres suivant la direction de σ_H . Pour ce faire, nous considérons une

galerie de 3,80m de diamètre (GRM3) et une alvéole de 0,70m de diamètre (ALC1603) et nous comparons les résultats avec ceux obtenus précédemment pour la galerie GCS.

4.1.1. Galerie GRM3 (3,80m de diamètre)

Comme dans le cas de GCS, les convergences maximales sont observées dans la direction horizontale et les convergences minimales dans la direction verticale. De ce fait, les axes principaux de déformation de l'ellipse suivent la direction verticale et horizontale de la section, avec l'axe majeur formant un angle de 90° avec l'horizontale. Le rapport entre la convergence verticale et la convergence horizontale est d'environ 0,3, ce qui est inférieur au rapport moyen observé dans GCS (0,5 environ). Ceci peut être relié à l'absence de boulonnage et de béton projeté dans la partie basse de la galerie GRM3, ainsi qu'à l'absence d'un radier en béton, contrairement aux autres galeries.

L'analyse des convergences s'effectue en suivant la méthodologie présentée dans la section 3. Pour cela, on garde les mêmes valeurs pour les paramètres liés au comportement différé de la roche $T = 6$, $m = 5,7$ et $n = 0,3$ et on modifie la valeur de X à 3,4 (soit là encore 0,9 fois le diamètre comme pour GCS). En calant uniquement la convergence instantanée $C_{\infty x}$, l'évolution de la convergence est reproduite de manière très satisfaisante en fonction du temps et en fonction de la distance au front (Figure 5).

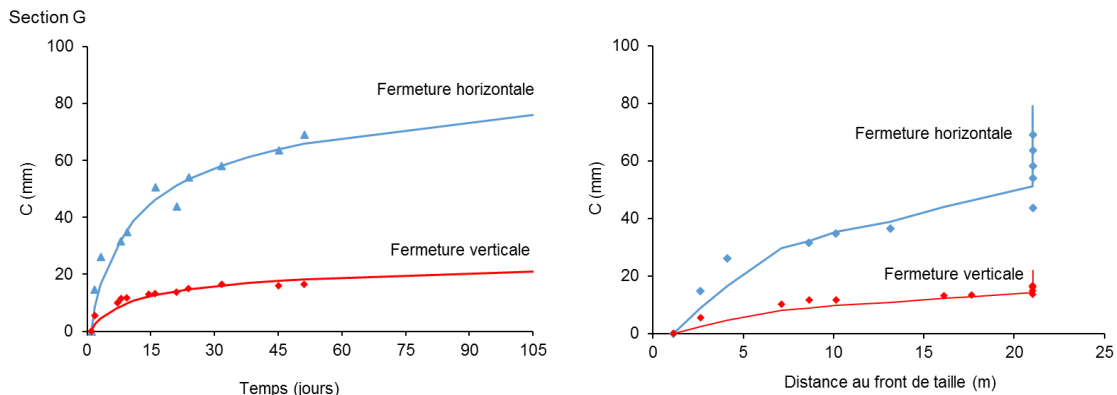


Figure 5. Evolution de la convergence dans la galerie GRM3. A gauche : Evolution de la convergence en fonction du temps. A droite : Evolution de la convergence en fonction de la distance au front. Les données obtenues à partir du calage de l'ellipse sont représentées par les symboles et la prédiction obtenue à partir de la loi semi-empirique par les traits continus.

4.1.2. Alvéole ALC1603 (0,7m de diamètre)

Cette alvéole a été excavée et laissée sans chemisage, ce qui permet un meilleur suivi de l'état des parois des alvéoles, de l'écaillage et de son évolution dans le temps. Compte tenu du faible diamètre de l'alvéole, l'installation des SMC n'a pu être effectuée qu'après la fin du creusement et l'extraction de la machine d'excavation. Par conséquent, les mesures de convergence ont été réalisées quelques jours après l'ouverture de chaque section de mesure. Ainsi, au moment de la réalisation des mesures de convergence le front de taille est suffisamment loin de chaque SMC, et il n'a pas d'influence sur l'évolution des convergences. Les convergences mesurées décrivent donc seulement le comportement différé du massif.

Par ailleurs, les convergences verticales restent pratiquement nulles pendant les deux premiers mois de suivi. Ensuite, elles commencent à évoluer avec une vitesse très faible, ce qui rend difficile une analyse basée sur la méthode exposée ci-dessus. En effet, le suivi de la convergence verticale peut être perturbé si le système de mesure n'est pas bien en contact avec la roche (par exemple dans des zones d'écaillage) ou si le système

est perturbé par la chute de blocs. Pour cette raison, l'analyse des convergences n'a pu être effectuée que sur l'évolution de la convergence horizontale. De plus, seulement la partie de la loi de convergence reliée au comportement différé est prise en compte

$$C(t) = C_{\infty x} \left\{ 1 + m \left[1 - \left(\frac{T}{t+T} \right)^n \right] \right\}.$$

Les résultats montrent des valeurs très proches pour les paramètres liés au temps caractéristique du comportement différé du terrain le long de l'alvéole. Cependant, comme l'alvéole n'a pas de support et que la vitesse d'excavation de celle-ci est plus grande, par rapport à celle des galeries ($\approx 0,6$ m/heure et 2 m/semaine), on s'attend à un taux de convergence plus élevé durant les premiers jours après l'excavation et à une stabilisation plus rapide de la convergence avec le temps, ce qui correspond à des valeurs plus faibles de T et m . Ceci est effectivement observé dans les résultats obtenus ($T = 0,2$ et $m = 4,0$). De plus, une valeur plus élevée de l'exposant n ($= 0,45$) permet de capter le plus fort déconfinement du massif. Enfin le calage du paramètre $C_{\infty x}$ le long de l'alvéole permet de reproduire l'évolution de la convergence de manière très satisfaisante (Figure 6).

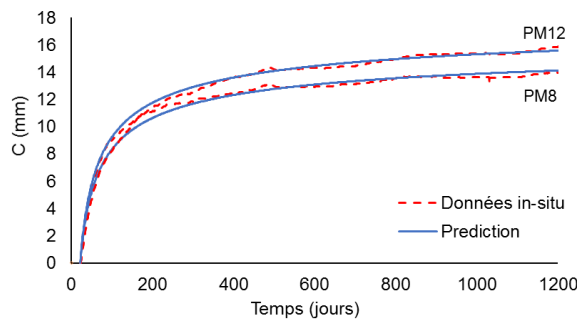


Figure 6. Evolution de la convergence horizontale dans deux sections de mesure de l'alvéole ALC1603. En pointillées les données mesurées in-situ et en traits continus la prédiction obtenue à partir de la loi semi-empirique

4.2. Discussion

Afin de comparer la convergence dans les galeries de différentes tailles. Une analyse basée sur l'évolution de la convergence dans le temps ($f(t) = 1 - \left(\frac{T}{t+T} \right)^n$), est effectuée en prenant en compte les valeurs obtenues pour les paramètres T , m et n dans les galeries et l'alvéole.

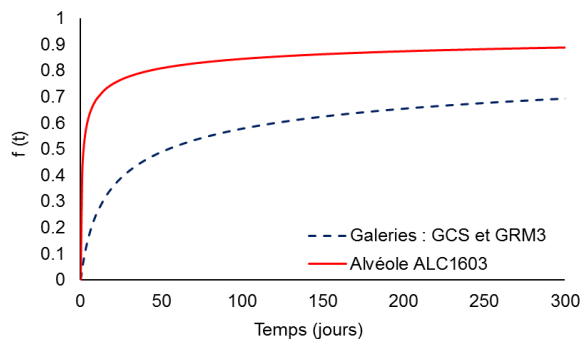


Figure 7. Comparaison de l'évolution de la convergence dans le temps. La comparaison est basée sur les prédictions de convergence obtenues

On observe que pendant les premiers jours, l'évolution de la convergence présente une vitesse plus élevée pour l'alvéole et que celle-ci se stabilise plus rapidement avec le temps (Figure 7). Cette observation met en évidence l'influence de la mise en place ou non du soutènement après chaque étape d'excavation, ainsi que l'influence de la vitesse d'excavation dans l'évolution de la convergence.

De plus, la forte évolution de la convergence se reflète dans la variation du paramètre $C_{\infty x}$. En effet, le rapport de $C_{\infty x}$ sur le diamètre de l'excavation, est plus élevé pour l'alvéole ($\approx 5\%$) tandis que pour GCS et GRM3 il est d'environ 0,22% et 0,39%, respectivement. A noter que la galerie GRM3 présente un rapport plus fort que la galerie GCS. Ceci est dû probablement à la différence des soutènements de ces galeries.

5. Conclusions

Les mesures de convergence dans les galeries excavées dans le Laboratoire Souterrain de Meuse / Haute-Marne montrent une réponse anisotrope qui dépend de l'orientation des galeries par rapport aux directions des contraintes in situ. L'évolution dans le temps de la convergence des parois des galeries a été analysée à l'aide de la loi semi-empirique proposée par Sulem et al. (1987). Cette méthode permet de distinguer deux effets: l'effet de l'avancement du front de taille et la réponse différée du massif. L'analyse des convergences dans des galeries d'environ 5m de diamètre montre qu'un jeu unique de paramètres peut être établi (indépendamment de l'orientation d'excavation) pour décrire l'évolution en temps de la galerie. Pour une galerie ayant un diamètre inférieur (3,80m), l'analyse montre que les paramètres décrivant le comportement différé de la galerie (T - temps caractéristique de fluage et m - rapport de la convergence à long terme et de la convergence instantanée) sont indépendants de la taille de l'excavation. Les valeurs de ces paramètres peuvent être utilisées pour des prévisions fiables de l'évolution de la convergence à long terme. Finalement, une comparaison avec une alvéole (0,7m de diamètre), montre que l'installation d'un soutènement après chaque étape d'excavation et également la variation de la vitesse d'excavation jouent un rôle important dans l'évolution de la convergence.

6. Références bibliographiques

- Armand G., Noiret A., Zghondi J., Seyedi D.M. (2013). Short- and long-term behaviors of drifts in the Callovo-Oxfordian claystone at the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 5, pp. 221–230.
- Armand G., Leveau F., Nussbaum C., de La Vaissière R., Noiret A., Jaeggi D., Landrein P., Righini C. (2014). Geometry and properties of the excavation induced fractures at the Meuse/Haute-Marne URL drifts. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 47, n°1, pp. 21-41.
- Guayacán-Carrillo L.M., Sulem J., Seyedi D.M., Ghabezloo S., Noiret A., Armand G. (2016). Analysis of long-term anisotropic convergence in drifts excavated in Callovo-Oxfordian claystone. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 49, n°1, pp. 97-114.
- Sulem J., Panet M., Guenot A. (1987). Closure analysis in deep tunnels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 24, n°3, pp. 145–154.
- Vu TM., Sulem J., Subrin D., Monin N., Lascols J. (2013). Anisotropic Closure in Squeezing Rocks: The Example of Saint-Martin-la-Porte Access Gallery. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 46, pp. 231-246.