

MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DIFFÉRÉ DES GALERIES EXCAVÉES DANS L'ARGILITE DU CALLOVO-OXFORDIAN

MODELLING OF THE TIME-DEPENDENT BEHAVIOUR OF DRIFTS EXCAVATED IN CALLOVO-OXFORDIAN CLAYSTONE

Frederico LARA¹, Lina-María GUAYACÁN-CARRILLO¹, Jean SULEM¹, Jana JABER², Jan CORNET², Gilles ARMAND², Jad ZGHONDI²

¹ Navier, Ecole des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France

² Andra, Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne, Bure, France

RÉSUMÉ – Le comportement différé des galeries excavées dans l'argilite du Callovo-Oxfordian est modélisé à l'aide d'une loi de comportement visco-élasto-plastique et par la prise en compte de la présence des zones fracturées induites par le creusement autour des galeries. Les résultats des deux cas d'études représentatives du comportement des galeries conçues avec un soutènement souple ont été comparés aux mesures in situ.

ABSTRACT – The time-dependent behavior of drifts excavated in the Callovo-Oxfordian argillite is simulated using a visco-elasto-plastic constitutive model and taking into account the presence of excavation induced fractured zones around the drifts. The results of two case studies that represent the behavior of drifts supported by flexible structures are compared with the in-situ measurements.

1. Introduction

Le Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne (LS MHM) a été construit et est exploité par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) afin d'étudier la faisabilité d'un stockage géologique dans l'argilite du Callovo-Oxfordien (COx). L'état des contraintes in situ est défini par une contrainte principale horizontale majeure ($\sigma_H \approx 16$ MPa) qui est environ 1,3 fois plus importante que la contrainte horizontale mineure et que celle verticale ($\sigma_h \approx \sigma_v \approx 12$ MPa).

Depuis les années 2000, un réseau de galeries a été construit dans le Laboratoire Souterrain pour tester et optimiser différentes méthodes d'excavation et des systèmes de soutènement. La formation de zones fracturées induites par l'excavation a pu être identifiée autour des parois. On a observé que les extensions de ces zones dépendent de l'orientation des galeries qui ont été excavées en majorité suivant les directions de σ_h ou de σ_H (Armand et al., 2014).

Des études précédentes qui ont analysé les données de convergence des galeries excavées dans différentes directions et sur plusieurs années de mesures ont montré que celles-ci suivent une évolution anisotrope intrinsèquement liée au développement des zones fracturées (Guayacán-Carrillo et al., 2016).

Pour simuler le comportement différé observé, des modèles numériques utilisant une loi de comportement visco-élasto-plastique sont développés pour des galeries conçues avec un soutènement souple dans les deux directions d'excavation. Ceux-ci introduisent explicitement la présence de la zone fracturée avec une différenciation des paramètres de comportement par rapport à ceux de la roche saine.

Deux cas d'études des galeries soutenues par une couche de béton projeté intercalée par des cales compressibles, galeries GCS (parallèle à σ_H) et GER (parallèle à σ_h), ont été évaluées. L'extension de la zone fracturée modélisée a été délimitée à partir des résultats

des auscultations in situ. Enfin, les paramètres visco-plastiques du modèle ont été ajustés de manière à reproduire l'évolution de la convergence mesurée des deux galeries.

2. Description des galeries et mesures in situ

2.1. Galerie GCS excavée dans la direction de σ_H

La galerie GCS, orientée suivant la contrainte principale majeure, σ_H , a été construite pour tester la réponse du massif rocheux avec un système de soutènement souple. Elle a été excavée avec une section circulaire de diamètre 5,2 m en deux tronçons : GCS 1 d'une longueur de 63,3 m et GCS 2 d'une longueur de 20,5 m excavée 4 ans plus tard.

Le soutènement de la section de GCS 1 est composé initialement d'une fine couche de béton projeté et un boulonnage radial. À chaque passe d'excavation de 1,2 m, une couche de 18 cm de béton projeté est mise en place intercalée par 12 cales compressibles uniformément espacées de 30° (Figure 1).

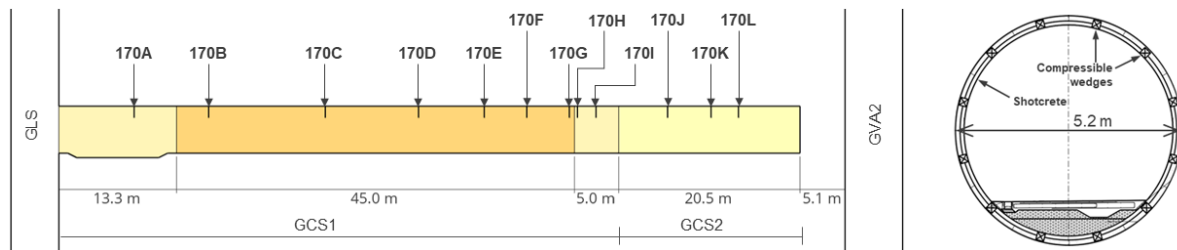


Figure 1. Position des sections de mesure de convergence et géométrie de la section GCS 1 soutenue par une couche de béton projeté intercalée par des cales compressibles.

Ces éléments compressibles de section 18 cm x 18 cm sont caractérisés par une faible limite plastique qui leur permet d'absorber une grande partie de la déformation induite par l'excavation de la galerie. Ainsi, la déformation à l'intérieur du soutènement se localise au niveau des cales limitant le chargement mécanique du béton projeté (Djizanne et al., 2019).

Tout le long de la galerie, différentes sections de mesure de convergence ont été installées (Figure 1). À partir du suivi des mesures du tronçon GCS 1, il a été observé que la convergence dans la direction horizontale est la plus forte et celle dans la direction verticale est la plus faible (Figure 2). Ce comportement, observé également dans d'autres galeries excavées suivant σ_H , est lié à l'orientation des zones fracturées dont l'extension horizontale est plus importante que l'extension verticale (Armand et al., 2014).

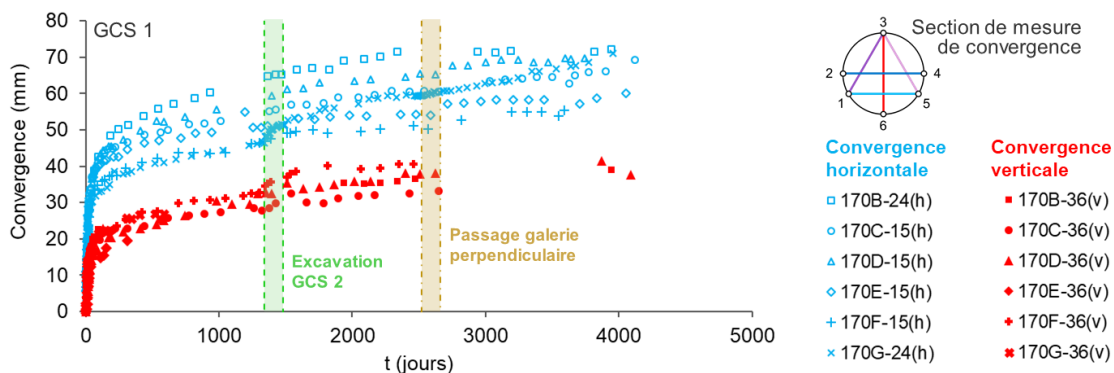


Figure 2. Mesures de convergence horizontales et verticales de la galerie GCS 1.

Globalement, les mesures de convergence montrent une diminution de la vitesse de déformation au cours du temps parmi les différentes sections. Cependant, quelques

variations de la vitesse liées aux conditions géotechniques in situ sont observées. D'abord, la section 170B présente des vitesses à court terme plus élevées que les autres sections, ce qui peut être lié à la proximité de la section à l'entonnement de la galerie. De l'autre côté, les sections 170F et 170G présentent des vitesses horizontales plus faibles jusqu'à 1500 jours, en raison de la proximité du front de taille. Après l'excavation du deuxième tronçon de la galerie (GCS 2) les vitesses de déformation dans ces deux sections ont augmenté.

Par ailleurs, à 2500 jours, l'excavation d'une galerie perpendiculaire à GCS engendre une perturbation dans la distribution des contraintes autour de la galerie. Après cette période, on observe des variations de la vitesse de déformation sur certaines sections qui ne sont pas représentatives du comportement à long terme de la galerie GCS.

En prenant en considération uniquement la mesure des sections centrales du tronçon GCS 1 (sections 170C à 170E), on observe qu'à 2500 jours, les vitesses mesurées varient de 2 à 8×10^{-7} jours⁻¹. Un rapport d'anisotropie verticale/horizontale moyen d'environ 0,50 tend à rester constant pendant toute la période suivie. Une analyse complète des mesures de convergence de cette galerie est présentée par Lara et al. (2023a).

2.2. Galerie GER excavée dans la direction de σ_h

La galerie GER a été excavée dans la direction de σ_h pour une longueur totale de 83 m. Dans les tronçons centraux de la galerie (Tableau 1), différents éléments structuraux ont été installés avec l'objectif de tester, dans les mêmes conditions d'excavation, l'impact des différentes conceptions de soutènement et revêtement dans la réponse du massif rocheux.

Tableau 1. Caractéristiques principales de chaque tronçon de la galerie GER.

Tronçon	Diamètre (m)	Longueur (m)	Soutènement	Revêtement
GER 1	5,7	11,0	Cintres coulissants	-
GER 2	5,2	20,4	Béton projeté (18cm) + Cales compress.	-
GER 3	5,4	21,6	Béton projeté (18cm) + Cales compress.	Béton coulé (30 cm)
GER 4	5,4	25,2	Béton projeté (18cm)	Béton coulé (30 cm)
GER 5	5,2	4,8	Béton projeté (18cm) + Cales compress.	-

La section du tronçon GER 2, modélisée dans cette étude, possède les mêmes caractéristiques et dimensions que la section GCS 1. Cela permet de comparer les simulations numériques pour deux directions d'excavation différentes. Les autres deux tronçons sont caractérisés par la présence d'un revêtement rigide (GER 3 et 4) et l'absence des cales compressibles (GER 4).

Les mesures de convergence sont effectuées dans des sections de mesure à partir de cibles installées sur des boulons ancrés dans la roche ou sur le soutènement et revêtement. Dans la galerie GER, on a observé que la convergence verticale est plus importante que l'horizontale (Figure 3), ce qui est en accord avec les autres galeries orientées selon σ_h . À l'opposé de ce qui a été observé en GCS, l'extension des zones fracturées des galeries suivant σ_h est plus importante dans la direction verticale que dans la direction horizontale.

Dans les sections du tronçon GER 2, on a observé une tendance globale de diminution de la vitesse de déformation au cours du temps. Dans la direction verticale, des vitesses de l'ordre de 3×10^{-6} jours⁻¹ ont été observées pour les dernières années de mesure. De plus, le rapport d'anisotropie vertical/horizontal calculé pour GER 2 à 1000 jours vaut environ 2,15 avec une légère augmentation jusqu'à environ 2,30 dans le long terme vers 2500 jours.

Par ailleurs, les observations montrent que les sections qui possèdent des cales compressibles (GER 2 et 3) présentent des convergences plus importantes que celles avec uniquement du béton projeté (GER 4). L'étude de Lara et al. (2023b) présente une analyse plus détaillée des mesures in situ de cette galerie.

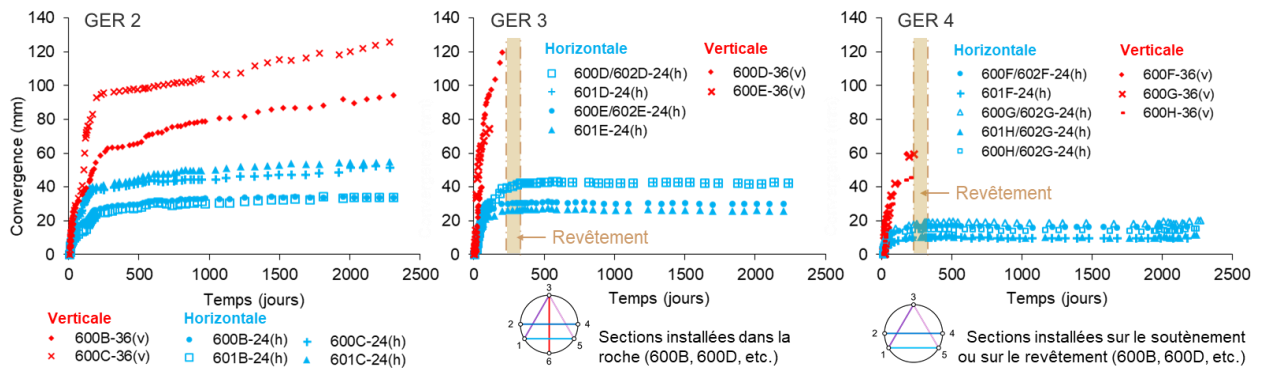


Figure 3. Mesures de convergence de la galerie GER.

3. Modélisation numérique

3.1. Géométrie

Dans cette étude numérique, les simulations ont pour objectif de reproduire l'évolution de la convergence des galeries du LS MHM au cours du temps. Un modèle bidimensionnel en déformation plane a été établi avec les caractéristiques de la section GCS 1 et GER 2 pour une section excavée qui se place suffisamment loin du front de taille (Figure 4). Les observations in situ ont montré une réponse quasi symétrique du massif par rapport aux axes horizontal et vertical, ce qui permet de ne modéliser qu'un quart du domaine.

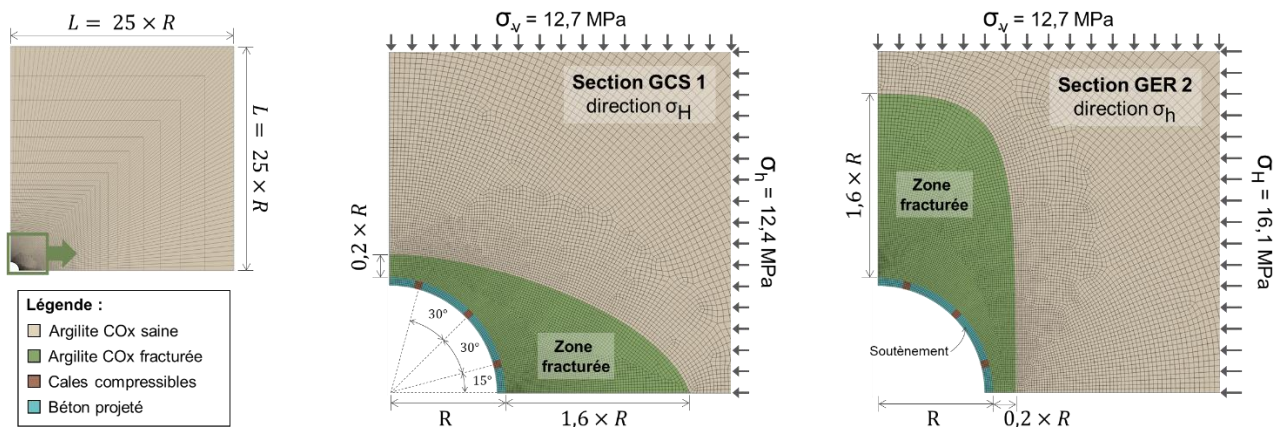


Figure 4. Géométrie du modèle numérique des galeries étudiées.

Le massif rocheux représentant l'argilite du COx a été modélisé par un bloc carré de dimension 65 m (25 fois le rayon) et la section excavée par un quart de cercle de 2,6 m de rayon. La contrainte initiale appliquée au massif correspond à l'état de contrainte in situ et dépend de l'orientation de la galerie modélisée.

Une zone fracturée a été introduite autour des galeries. Sa forme (elliptique dans la direction de GCS et oblique dans la direction de GER) et les extensions verticales et horizontales ont été définies à partir des résultats des auscultations in situ d'excavation (Armand et al., 2014). À l'intérieur de ces zones, les propriétés mécaniques sont définies de manière continue pour représenter un comportement global différent de celui du massif.

Le soutènement, composé d'une couche de béton projeté intercalée par des cales compressibles, est pris en compte dans le modèle. Il est important de noter que, dans cette étude, la première couche de béton projeté appliquée à l'avancement et le boulonnage radial ne sont pas modélisés explicitement. Le comportement de ces éléments est donc intégré au comportement global du massif rocheux.

3.2. Comportement des matériaux

Le comportement de l'argilite du COx a été modélisé à l'aide de la loi de comportement CVISC, appelé aussi Burgers-Mohr, dans le logiciel de calcul FLAC3D (Itasca, 2023). Ce modèle combine un comportement volumique élasto-plastique à un comportement déviatorique visco-élasto-plastique isotrope (Figure 5).

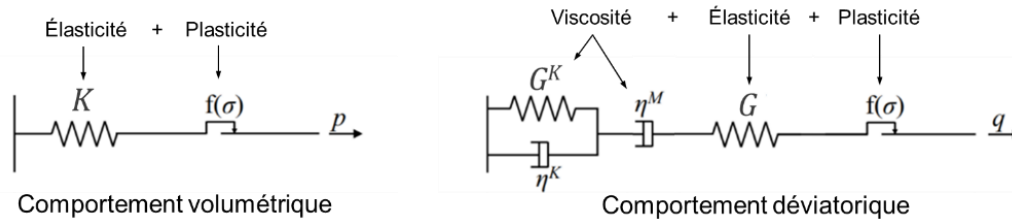


Figure 5. Schéma simplifié du comportement dans le modèle CVISC (Itasca, 2023)

La partie déviatorique est représentée, par un élément du type Kelvin caractérisé par un module de cisaillement, G_K , et une viscosité, η_K , qui contrôle le fluage primaire du matériau et par un élément associé en série du type Maxwell avec un paramètre de viscosité, η_M qui contrôle le fluage secondaire. Enfin, un élément élasto-plastique parfait du type Mohr Coulomb est associé en série.

L'ensemble des paramètres du comportement de la roche et des matériaux du soutènement est présenté dans le Tableau 2.

Tableau 2. Paramètres de comportement du modèle.

Paramètre	Unité	Valeur	Paramètre	Unité	Valeur		
Massif rocheux – Argilite COx			Cales compressibles				
Module de compressibilité	K	GPa	4,67	Module d'Young	E MPa	360	
Module de cisaillement	G	GPa	2,15	Coefficient de Poisson	ν	0	
Cohésion	c	MPa	6,0	Pression de "cap"	p_c MPa	1,33	
Angle de frottement	φ	°	20	Cohésion	c MPa	$10^{14} \sim \infty$	
Résistance à la traction	σ_t	MPa	1,5	Angle de frottement	φ °	5	
Module de cisail. de Kelvin	G_K	GPa	60	Résistance à la traction	σ_t MPa	0	
Viscosité de Kelvin	η_K	GPa.jour	80	Béton projeté			
Viscosité de Maxwell	η_M	GPa.jour	150 000	Module d'Young	E GPa	10.8	
Roche fracturée			Coefficient de Poisson			ν	0.25
Module de cisail. de Kelvin	$G_{K,frac}$	MPa	200	Cohésion	c MPa	6.1	
Viscosité de Maxwell (GCS)	$\eta_{M,frac}$	GPa.jour	3500	Angle de frottement	φ °	38	
Viscosité de Maxwell (GER)	$\eta_{M,frac}$	GPa.jour	500	Résistance à la traction	σ_t MPa	2.1	

Afin de représenter la dégradation de la roche fracturée, des paramètres du modèle visqueux différents de ceux de la roche saine ont été attribués à la zone fracturée. Les observations in situ ont montré que les déformations différées dans le court terme et long terme sont plus importantes dans les directions où les zones fracturées sont plus étendues. Ainsi, la roche fracturée se distingue de la saine par une viscosité plus faible, ce qui induit un fluage plus important.

De plus, selon Armand et al. (2014), le mode de fracturation autour des galeries varie selon son orientation. Ainsi, la viscosité $\eta_{M,frac}$ dans la zone fracturée a été définie pour chaque direction d'excavation. Ce modèle mécanique permet de reproduire le comportement différé des mesures in situ des galeries par un ajustement des paramètres

visqueux de la roche alors que les paramètres élasto-plastiques sont définis à partir des études numériques publiées précédemment (Vu et al., 2020).

Dans le soutènement, les cales compressibles ont été modélisées avec la loi de comportement "Double Yield cap" qui permet de simuler la déformabilité de ces éléments avec une surface de plasticité fermée. Les paramètres de ce modèle ont été définis à l'aide des résultats d'essais de compression axiale. Enfin, le béton projeté a été modélisé avec un comportement élasto-plastique parfait du type Mohr-Coulomb.

3.3. Phasage

La modélisation numérique reproduit le phasage d'excavation et d'installation des éléments du soutènement pour les deux galeries. La vitesse d'excavation moyenne calculée à partir des chronogrammes d'excavation est d'environ 0,31 m/jour. Dans les simulations, les étapes du calcul sont les suivantes :

1. Calcul élasto-plastique de la première passe d'excavation de 1,2 m en considérant un massif non soutenu. Le taux de déconfinement, λ , correspondant est obtenu à partir d'un calcul 3D du profil longitudinal de déplacement et de la comparaison avec la simulation 2D en déformation plane. On obtient une valeur de 0,82 ;
2. Calcul de fluage de 3,8 jours avant l'installation du soutènement ;
3. Calcul élasto-plastique après la pose du soutènement pour un déconfinement total de la section ($\lambda = 1$) ;
4. Calcul de fluage sur le long terme.

4. Résultats

4.1. Galerie GCS

Les résultats des simulations montrent que les tendances d'évolution en temps de la convergence sont bien reproduites à moyen et long terme. Pour GCS, le champ de déplacement calculé montre une concentration des déplacements dans la direction horizontale à l'intérieur de la zone fracturée (Figure 6).

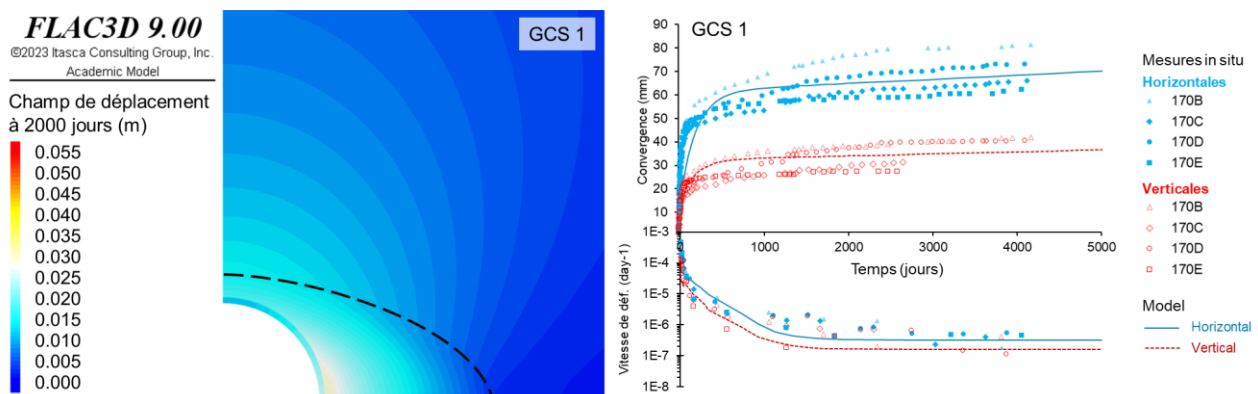


Figure 6. Résultats de la modélisation numérique de la section GCS 1 : à gauche, le champ de déplacement à 2000 jours et à droite, la comparaison avec les mesures in situ pour la convergence (en haut) et pour les vitesses de déformation (en bas)

Le rapport d'anisotropie vertical/horizontale obtenu par le modèle d'environ 0,52 tend à rester constant dans le long terme ce qui est en bon accord avec les mesures (rapport de

0,50 in situ). Par ailleurs, le suivi de la vitesse de déformation au cours du temps a montré une évolution similaire aux données in situ. Dans le modèle, les vitesses à long terme atteignent des valeurs comprises entre $1,5$ et 3×10^{-7} jours⁻¹ (pour des vitesses in situ de 2 à 8×10^{-7} jours⁻¹).

4.2. Galerie GER

Dans les résultats du modèle GER, on a observé une concentration des déplacements dans la direction verticale à l'intérieur de la zone fracturée (Figure 7). La comparaison avec les mesures in situ montre un bon accord entre les tendances d'évolution de la vitesse de déformation à long terme. Dans le long terme, les vitesses verticales du modèle atteignent environ 2×10^{-6} jours⁻¹ (pour une vitesse d'environ 3×10^{-6} jours⁻¹ in situ).

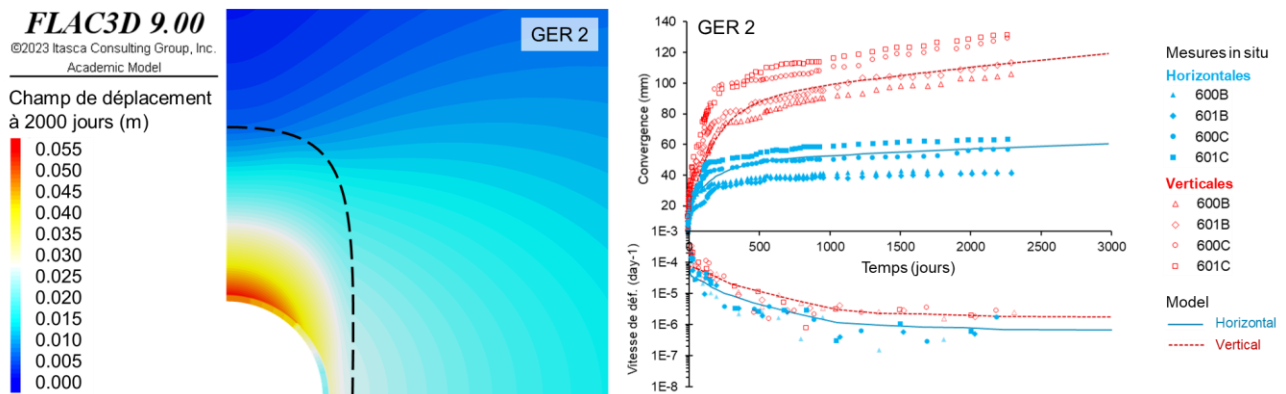


Figure 7. Résultats de la modélisation numérique d'une section GER 2 : à gauche, le champ de déplacement à 2000 jours et à droite, la comparaison avec les mesures in situ pour la convergence (en haut) et pour les vitesses de déformation (en bas)

Le rapport d'anisotropie vertical/horizontale obtenu par le modèle dans le long terme est d'environ 1,98 ce qui est inférieur au rapport d'anisotropie mesuré (rapport de 2,30 in situ). Toutefois, comme observée dans les mesures in situ, la convergence maximale obtenue pour le modèle GER, dans la direction verticale, est significativement supérieure à la convergence maximale de GCS, dans la direction horizontale. Cela est principalement dû à la géométrie des zones fracturées et à l'orientation de l'état de contrainte dans la section.

Ainsi, pour ce jeu de paramètres, le modèle est capable de reproduire globalement les différences entre la convergence mesurée dans les galeries excavées dans les deux directions perpendiculaires.

4.3. Discussion

La comparaison des résultats numériques avec les mesures de convergence montre que, pour un choix d'hypothèses simple pour le comportement de l'argilite du COX, le modèle capable de bien reproduire la réponse in situ de manière qualitative et quantitative.

Dans l'extrapolation à long terme, les vitesses de déformation estimées sont contrôlées par le paramètre η_M sachant qu'un scénario de fluage secondaire a été modélisé. L'hypothèse conservatrice prise en compte considère que les vitesses mesurées dans les dernières années de suivi resteraient constantes. Cela signifie que la convergence continue à augmenter progressivement ainsi que la sollicitation des éléments du soutènement.

Par ailleurs, les résultats des simulations illustrent l'influence des cales compressibles dans le comportement global du modèle. On observe que les déformations orthoradiales du soutènement se concentrent dans les cales compressibles. Cela conduit à une faible sollicitation du béton projeté qui est largement au-dessous de sa résistance maximale. Le

suivi dans le temps des contraintes orthoradiales à l'intérieur du béton projeté montre que les contraintes tendent à se stabiliser à une valeur autour de 4 MPa ce qui correspond à la valeur de résistance à la compression des cales (Figure 8). Ces résultats sont en bon accord avec les mesures in situ dans le soutènement de la galerie GER.

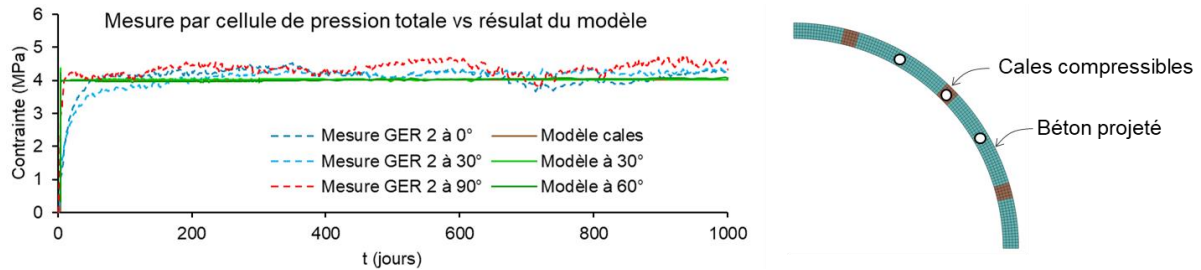


Figure 8. Évolution de la contrainte orthoradiale dans le soutènement : en lignes continues les résultats obtenus du modèle, en lignes pointillées les mesures in situ.

5. Conclusions

Un modèle numérique qui prend en compte la mise en place du soutènement et l'introduction des zones fracturées induites pour évaluer le comportement différé des galeries du LS MHM a été établi. Cette étude montre que la distinction du comportement de la roche saine et celui de la roche fracturée par l'ajustement de seulement deux paramètres (Module de cisaillement de Kelvin et viscosité de Maxwell) permet de reproduire de manière quantitative les tendances globales d'évolution et d'anisotropie de la convergence mesurée dans les deux directions d'excavation. Le comportement in situ du soutènement composé de béton projeté et des cales compressibles a été également reproduit par les simulations.

Dans la suite de cette étude, il est envisagé d'inclure dans la modélisation les sections avec différentes combinaisons de soutènement et revêtement de la galerie GER. Cela permettra d'évaluer la distribution des contraintes à l'intérieur du béton du revêtement. Enfin, ces modèles pourront être utilisés pour estimer le niveau de convergence et du chargement des structures de soutènement et de revêtement à très long terme.

Références

- 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*, 47(1), 21–41.
- Djizanne, H., Zghondi, J., Armand, G., Conil, N., & de La Vaissière, R. (2019). Some aspects of the hydro-mechanical behaviour of Callovo-Oxfordian (COx) claystone around a gallery parallel to the principal horizontal minor stress. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 17, 3–15.
- 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*, 49(1), 97–114.
- Itasca. (2023). *FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions* (9.0). Itasca Consulting Group, Inc.
- Lara, F., Guayacán-Carrillo, L.-M., Sulem, J., Jaber, J., Cornet, J., & Armand, G. (2023, October 2). *Long term evolution of drifts closure excavated in Callovo-Oxfordian claystone based on in-situ monitoring in Bure, France*. 17th International Congress AFTES 2023, Paris, France.
- Lara, F., Guayacán-Carrillo, L.-M., Sulem, J., Jaber, J., Cornet, J., & Armand, G. (2023, October 15). *Influence of different support systems on drifts closure evolution in Callovo-Oxfordian claystone*. 15th ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium, Salzburg, Austria.
- Vu, M.-N., Guayacán Carrillo, L. M., & Armand, G. (2020). Excavation induced over pore pressure around drifts in the Callovo-Oxfordian claystone. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1–16.