

MODELISATION DU COMPORTEMENT A LONG TERME D'UN ALVEOLE DE STOCKAGE DU PROJET CIGEO

MODELLING OF THE LONG TERM BEHAVIOR OF A DISPOSAL TUNNEL IN CIGEO PROJECT

Marco CAMUSSO¹, Minh-Ngoc VU², Odile OZANAM²

¹ Itasca Consultants SAS, Lyon, France

² ANDRA, Châtenay-Malabry, France

RÉSUMÉ – Cet article présente une analyse du comportement à long terme d'un alvéole de stockage MAVL (déchets exothermiques de Moyenne Activité à Vie Longue). L'influence du taux de déconfinement à la pose des voussoirs (représentatif de la distance de calage de l'anneau au terrain) et celle du dégagement de la chaleur des colis sont étudiées en termes d'évolution des efforts dans le béton lors de la phase d'exploitation du stockage.

ABSTRACT – The paper analyses the long-term behavior of a large diameter tunnel in which exothermic intermediate-level long-lived waste canisters are disposed of. The work focuses on the influence of the stress release ratio at the installation of the tunnel support and the thermal power released from the waste canisters on the concrete stress evolutions during the operational phase, through coupled thermo-mechanical analyses.

1. Introduction

Dans le cadre des études de faisabilité du projet CIGEO, des analyses thermomécaniques couplées ont été réalisées avec le logiciel *FLAC3D* (Itasca, 2019) pour analyser le comportement à long terme d'un alvéole de grand diamètre (environ 10 m) dans lesquelles seront stockés des déchets exothermiques MAVL (Moyenne Activité à Vie Longue). Ces ouvrages seront creusés au tunnelier avec la mise en place de voussoirs calés au massif par l'intermédiaire d'un matériau compressible. Cette couche présente une déformabilité importante (~50%) sous une faible contrainte radiale (2-3 MPa) et permettra de retarder et ainsi limiter le développement des contraintes dans le béton lors de la phase d'exploitation du stockage.

L'accent est mis dans cette étude sur l'influence du taux de déconfinement à la pose des voussoirs, et donc de la distance de calage de l'anneau de revêtement au terrain. On observe notamment que la prise en compte du couplage thermomécanique tout comme l'utilisation d'un taux de déconfinement plus important favorisent l'évolution des convergences de l'argilite et donc le développement de contraintes plus importantes dans le béton. Cependant, la fin du palier plastique du matériau compressible n'étant jamais atteinte, ce matériau continue de jouer son rôle de matériau « fusible », ce qui permet de garder les efforts dans les voussoirs en-deçà de leurs valeurs admissibles.

2. Conceptualisation des modèles numériques

2.1. Géométrie de l'alvéole MAVL et du modèle

Le principe de base du stockage des déchets proposé par l'ANDRA est celui d'un stockage modulaire et fractionné, situé sur un seul niveau au sein de la couche des argilites du Callovo-Oxfordien. Cette étude se concentre sur l'un des alvéoles de la zone de stockage dédiée aux déchets MAVL, dont la géométrie de la section est présentée en Figure 1 : les voussoirs en béton de classe C60/75 de diamètre intrados de 8,7m et d'épaisseur de 0,5m sont calés au terrain par une épaisseur de 20 cm de matériau compressible. Le diamètre

extrados de revêtement de l'alvéole est donc de 10,1m, ce qui dans le modèle numérique correspond également au diamètre d'excavation. Dans la réalité, l'excavation réalisée par un tunnelier nécessite une surcoupe, qui conduit à un diamètre excavé un peu plus grand. Le vide annulaire restant entre le revêtement et le terrain est ensuite comblé par un matériau de remplissage, mais cet élément n'est pas pris en compte dans la simulation.

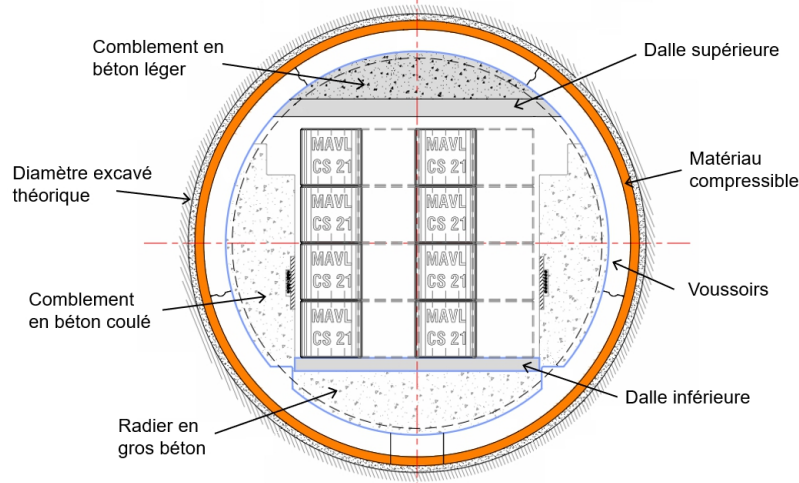


Figure 1. Géométrie de la section de l'alvéole MAVL étudiée.

2.2. Modèle de comportement de l'argilite

L'argilite du massif est simulée dans le logiciel *FLAC3D* avec une loi de comportement permettant de décrire à la fois les phénomènes à court et long terme. Dans sa version initiale, dont le développement a été basé sur les travaux de Souley et al. (2011), le comportement court terme est modélisé avec une loi de Hoek-Brown à double écrouissage, positif dans un premier temps pour simuler l'endommagement, puis négatif pour reproduire le passage de la résistance du pic au résiduel. Le comportement différé est modélisé par une loi de type Lemaitre avec seuil (Souley et al., 2011), dont les déformations viscoplastiques sont accélérées par la plasticité. Le paramètre d'écrouissage, gouvernant l'évolution de la résistance de l'argilite et son comportement différé, est la déformation plastique de cisaillement.

Depuis cette version initiale, plusieurs modifications ont été apportées à la loi, dans l'objectif de mieux reproduire – avec un seul jeu de paramètres – le comportement du terrain tel qu'observé dans les ouvrages du Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne (LSMHM), pour des galeries orientées selon les deux directions de contraintes horizontales principales, σ_H et σ_h . Notons que $\sigma_h \approx \sigma_v$ (avec σ_v la contrainte verticale) et $\sigma_H \approx 1,3\sigma_h$. Parmi ces modifications, les plus importantes concernent :

- la redéfinition du paramètre d'écrouissage, défini non plus seulement comme l'intégrale des incréments de la déformation plastique de cisaillement, mais également de la déformation viscoplastique. Le fluage lui-même est donc pris en compte comme un phénomène pouvant transformer le matériau et donc produire un endommagement ;
- la transition du comportement fragile à ductile sous l'effet de l'augmentation de la contrainte de confinement, σ_3 (fragile pour $\sigma_3=0$, ductile pour $\sigma_3=\sigma_{3,ref}=20\text{MPa}$).
- le couplage du modèle de comportement à une modélisation explicite de la zone fracturée, générée autour de la galerie lors de son creusement, telle qu'illustrée au paragraphe suivant.

Le calage de l'ensemble des paramètres mécaniques de la loi et géométrie de la zone fracturée a fait l'objet de plusieurs études réalisées par ITASCA et a permis d'aboutir à une reproduction satisfaisante des convergences mesurées sur le terrain à court et moyen terme au LSMHM, sur une durée d'une dizaine d'années. Ces courbes expérimentales ont par

ailleurs été extrapolées sur une durée plus longue (200 ans) avec une loi de type empirique, ce qui a également permis de vérifier la réponse de la loi sur cette période de temps.

Concernant l'effet thermique, et notamment l'influence de la température sur le comportement viscoplastique de l'argilite, cette étude s'appuie sur les résultats des campagnes d'essais de fluage, indiquant une augmentation de la vitesse de fluage d'un facteur d'environ 3, en moyenne, lorsque la température augmente de 60°C (passant de 20°C à 80°C).

2.3. Modélisation de la zone de préfracturation autour de l'alvéole

L'étude analyse le comportement thermomécanique de l'ouvrage lors de la période d'exploitation en se focalisant principalement sur l'évolution des contraintes dans le béton des voussoirs. L'étape initiale d'excavation des galeries n'est donc reproduite que partiellement. De ce fait, l'apparition à cette étape de fractures dans l'argilite, documentée par l'ANDRA dans le laboratoire souterrain, n'est pas reproduite explicitement : en effet, ceci exige une simulation fine du procédé d'excavation ainsi que du maillage, incompatible avec l'échelle de temps à représenter (200 ans). Pour pallier cela, et dans le cadre de la modélisation *FLAC3D* du massif comme un milieu continu, une zone de préfracturation caractérisée par des propriétés mécaniques réduites est introduite autour de l'excavation en amont du calcul « initial » (Saitta et al, 2017, Camusso et al., 2020). En effet, de multiples relevés de la fracturation autour des galeries sont aujourd'hui disponibles, ce qui permet une description détaillée de la géométrie ainsi que de l'extension des fractures. Pour les ouvrages orientés selon la contrainte principale majeure σ_H (ouvrages caractérisés par un état de la contrainte initiale quasi-isotrope dans la section du tunnel), on observe toujours une anisotropie de la zone affectée par l'excavation : l'extension est plus importante dans la direction horizontale (de l'ordre de 1D à partir de la paroi, avec D le diamètre d'excavation) que dans la direction verticale (de l'ordre de 0,1D). Par ailleurs, les observations géologiques semblent indiquer que ces extensions ne dépendent pas de la taille des excavations, qu'il s'agisse des forages comme des galeries du laboratoire. Le modèle conceptuel de la zone fracturée est donc repris dans les modèles des alvéoles MAVL, orientés selon la contrainte principale majeure σ_H et de diamètre plus important (de l'ordre de 10m), en utilisant une transposition par homothétie, comme indiqué en Figure 2.

Notons que pour simplifier la modélisation de la zone fracturée, seules les propriétés mécaniques des éléments volumiques y afférant en sont affectées, tandis que les propriétés thermiques restent identiques à celles de la zone saine.

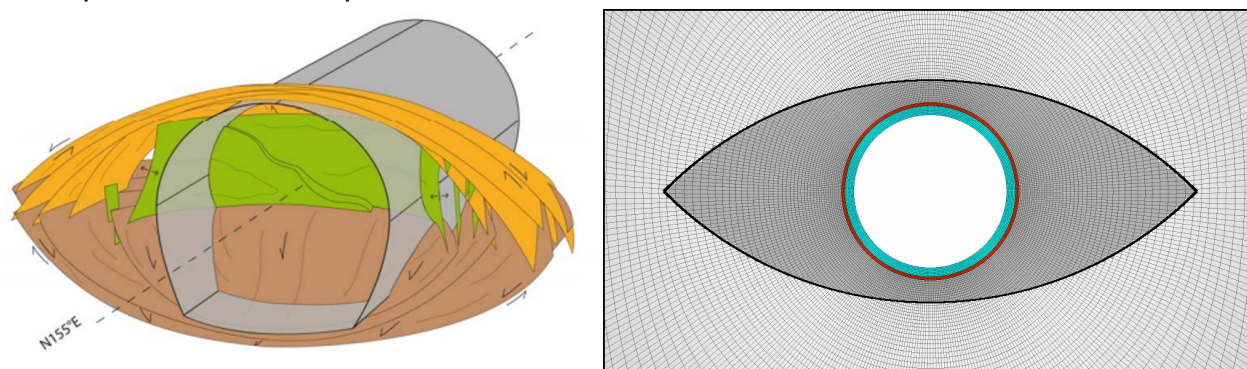


Figure 2. Modèle conceptuel de la fracturation induite par le creusement d'une galerie du LSMHM orientée selon la contrainte principale majeure (σ_H) et géométrie de la zone fracturée introduite dans le modèle *FLAC3D* de l'alvéole MAVL.

2.4. Modèle numérique et simulation du couplage thermomécanique

La longueur de l'alvéole (~500m) est beaucoup plus grande que son diamètre (~ 10m). De ce fait, l'hypothèse de la déformation plane est prise et le modèle *FLAC3D* ne reproduit

qu'une coupe 2D verticale perpendiculaire à l'axe du tunnel. Les limites latérales du modèle sont placées à 25 m de l'axe de l'alvéole, soit la moitié de la distance entre deux alvéoles adjacents du futur stockage. L'excavation est modélisée par un déconfinement progressif des forces appliquées aux parois de l'alvéole, d'abord par pas de 10% jusqu'à un taux de déconfinement de 50%, puis par pas de 1% pour suivre précisément le développement de la plasticité dans la roche autour de l'excavation. Les voussoirs sont activés pour un taux variable entre 85% et 95%, ce qui permet d'étudier de manière paramétrique l'influence de la distance de calage de l'anneau au terrain. Une fois le processus de déconfinement terminé, un temps de fluage de 4 ans est simulé avant l'introduction des déchets dans l'alvéole. L'effet des colis exothermiques est alors introduit par l'application, en paroi de l'alvéole, d'une puissance thermique équivalente et variable dans le temps, avec un calcul thermomécanique.

Le problème est partiellement découplé en effectuant d'abord un calcul thermique puis en injectant les champs de température obtenus dans un calcul mécanique. Cette approche est possible en raison de la faible énergie cinétique associée aux processus de déformation mécanique, ce qui rend le couplage thermomécanique unidirectionnel (effet de $T \rightarrow M$ mais pas de $M \rightarrow T$, avec M le processus mécanique et T le processus thermique). Cette technique permet d'utiliser deux maillages différents pour les deux calculs, d'où des temps de calcul et des discrétisations spatiales optimisés pour les deux modélisations. En effet, l'extension importante de la diffusion de la chaleur au sein de la masse argileuse nécessite un modèle thermique, avec des limites supérieures et inférieures très éloignées du tunnel, alors que ces mêmes conditions peuvent être plus proches du tunnel lors du calcul mécanique. Au même titre, le calcul mécanique nécessite une discrétisation fine des voussoirs, pour une estimation fiable des contraintes, alors que dans le modèle thermique une discrétisation plus grossière n'affecte que marginalement les résultats et permet l'utilisation d'un pas de temps plus élevé et donc des temps de calcul plus courts.

La Figure 3 montre les deux modèles *FLAC3D*. Pour le calcul thermique, la puissance thermique des déchets est uniformément répartie sur les faces internes du béton de la chambre de stockage. Dans le modèle mécanique, ce béton du génie civil secondaire n'est pas modélisé dans les calculs présentés ici, l'objectif premier étant d'évaluer l'impact des choix de modélisation sur les efforts dans le revêtement en béton. D'autres analyses non présentées ici ont évalué l'impact du génie civil secondaire sur les efforts développés.

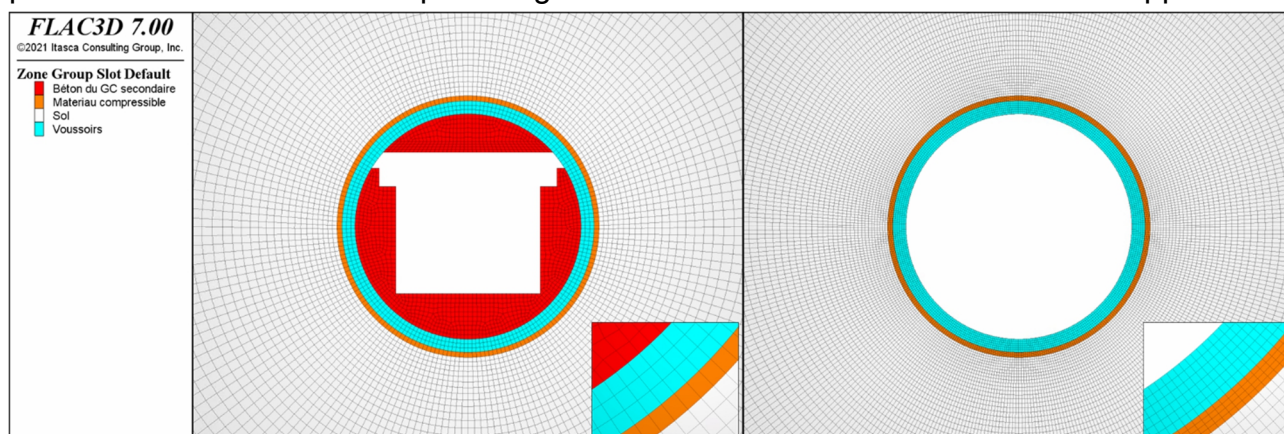


Figure 3. Maillage du modèle *FLAC3D* pour le calcul thermique (à gauche) et pour le calcul thermomécanique (à droite).

3. Influence du taux de déconfinement à la pose des voussoirs

Cette section analyse l'influence du taux de déconfinement à la pose des voussoirs sur le comportement à long terme de l'alvéole, lors de la phase d'exploitation du stockage. La Figure 4 illustre l'état de l'argilite autour de l'alvéole, à la fin du processus d'excavation et après 200 ans de fluage. On observe logiquement un passage progressif de la roche du

pré-pic au post-pic, puis au résiduel avec le temps, la déformation viscoplastique intervenant dans la définition du paramètre d'écroutissage. Par ailleurs, le calage tardif de l'anneau de voussoirs au terrain (λ passant de 85 à 95%) se traduit par un endommagement plus important, avec notamment le développement des bandes de cisaillement en parois de l'alvéole, où la zone de préfracturation introduite dans le modèle est plus développée. Ceci a un impact direct sur le chargement transmis aux voussoirs, la vitesse de fluage étant couplée - entre autres - à l'endommagement subi par la roche. La contrainte orthoradiale développée dans les voussoirs devient donc d'autant plus importante au fur et à mesure que le taux de déconfinement considéré pour le calage de l'anneau augmente (Figure 5). Cette figure illustre également l'ovalisation du revêtement à 200 ans, avec un facteur d'exagération des déplacements de 200, ce qui permet d'aboutir aux mêmes conclusions quant à l'impact de la distance de calage de l'anneau.

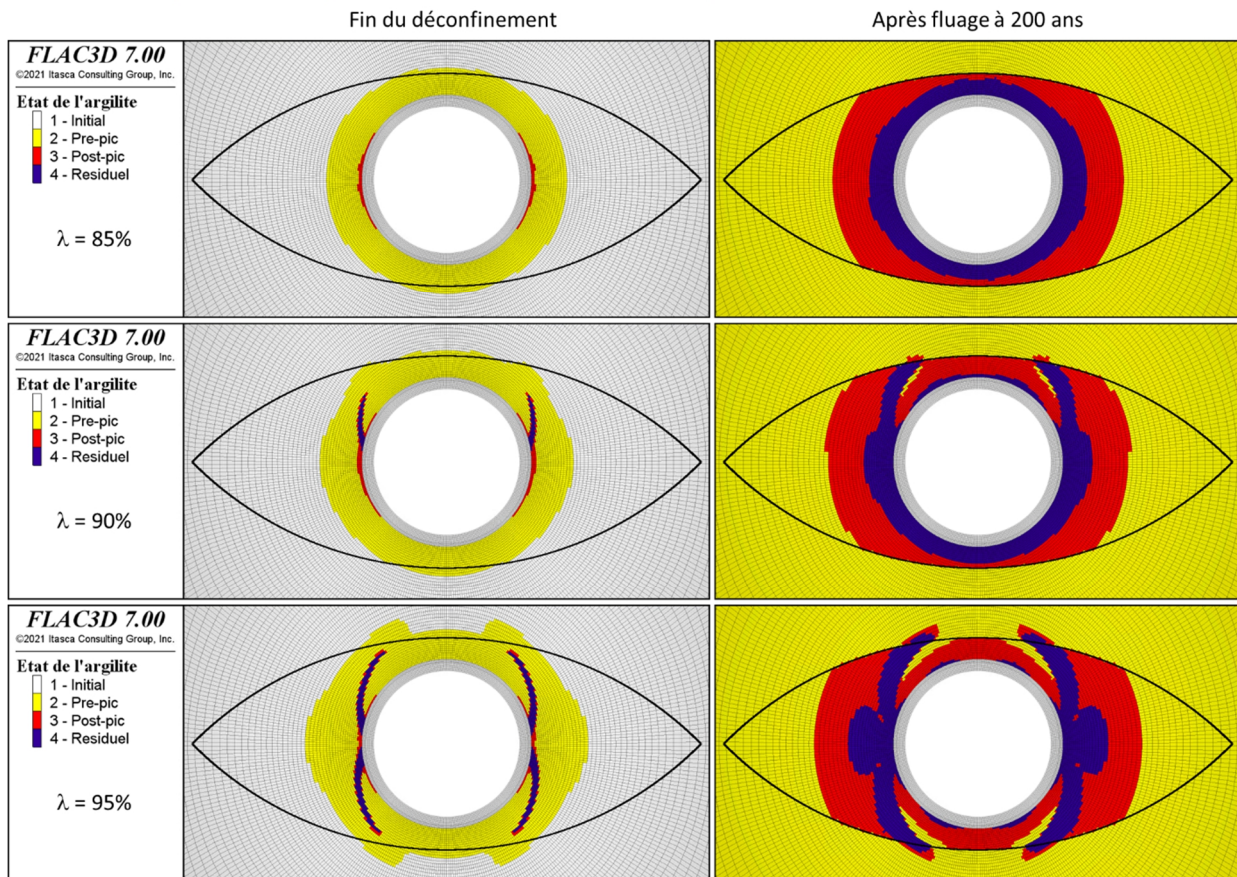


Figure 4. État de l'argilite autour de l'excavation, à la fin du déconfinement de l'excavation et à 200 ans, en fonction du taux de déconfinement (λ) à la pose des voussoirs.

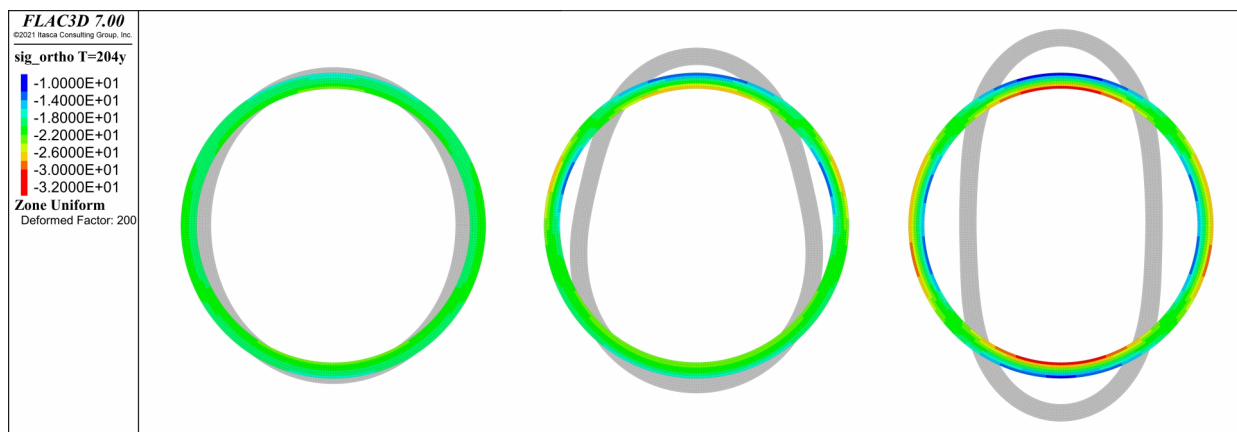


Figure 5. Contour de la contrainte orthoradiale dans les voussoirs à 200 ans, en fonction du taux de déconfinement λ à la pose des voussoirs (valeurs négatives = compression).

L'analyse des efforts induit dans les voussoirs est donnée en Figure 6 en termes de diagrammes d'interaction N-M et T-N en considérant une épaisseur des voussoirs de 50 cm et un béton de classe C60/75. Logiquement, l'apparition des bandes de cisaillement dans l'argilite en parement de l'alvéole tel qu'observé pour les cas 90% et 95%, et donc l'ovalisation de l'anneau plus prononcée, se traduit par des moments fléchissant, M , plus grands. On remarque cependant que les efforts restent largement en dessous des valeurs admissibles, même dans le cas d'une vérification à l'ELU. Pour cette dernière, un facteur de sécurité équivalent de 1,755 est utilisé dans les figures, valeur calculée comme la combinaison du facteur sur la contrainte développée dans le béton (1,35) et le facteur sur la résistance du béton préfabriqué des voussoirs (1,3).

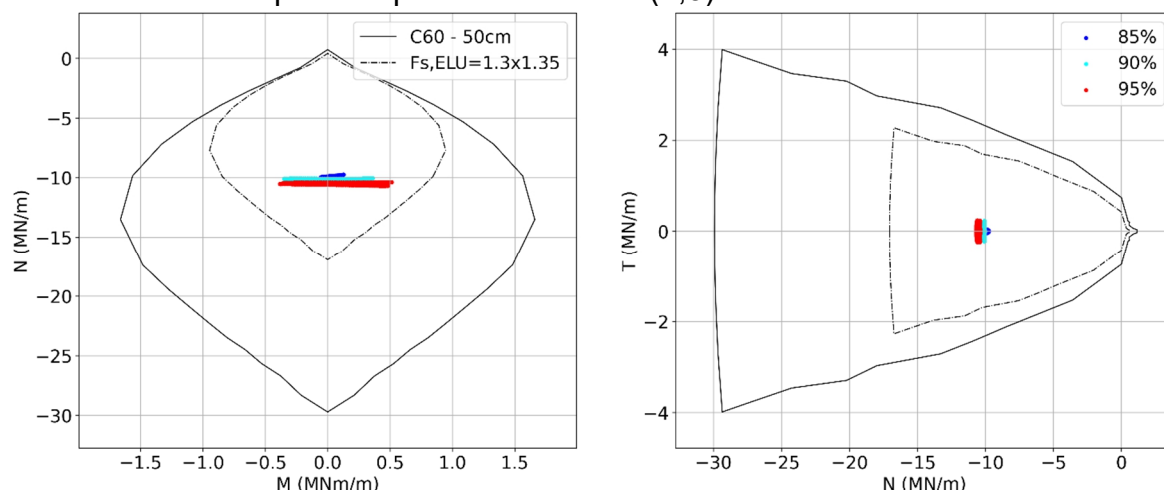


Figure 6. Diagrammes d'interaction des voussoirs à 200 ans, en fonction du taux de déconfinement (λ) à la pose des voussoirs (valeurs négatives = compression).

La présence d'une couche de matériau compressible de 20 cm, fixée à l'extrados des voussoirs mis en place à l'avancement, contribue largement à ce résultat. En effet, après une première phase élastique, ce matériau se caractérise par un palier plastique très étendu (jusqu'à une déformation de l'ordre de 50%), ce qui lui permet de reprendre efficacement les déformations différées du terrain tout en limitant le chargement transmis à l'anneau. La Figure 7 montre les profils angulaires de la déformation et de la contrainte radiale développées dans ce matériau. Les limites du palier plastique sont également indiquées, ainsi que la loi de comportement en compression œdométrique de ce matériau. On remarque des déformations, et donc des contraintes, plus importantes en correspondance de la localisation des bandes de cisaillement développées dans le terrain, mais avec des valeurs toujours situées à l'intérieur du palier plastique.

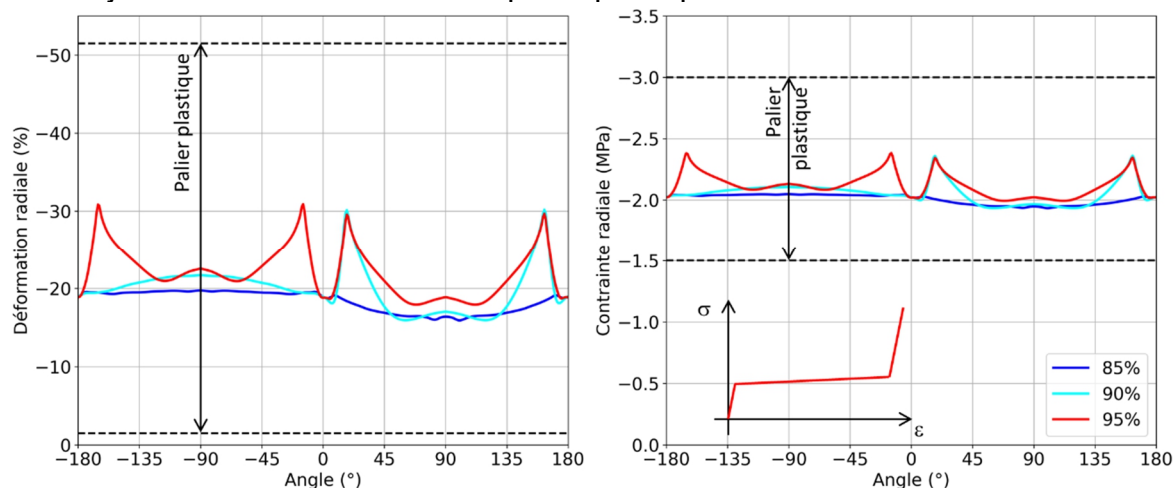


Figure 7. Profils angulaires de la déformation radiale (à gauche) et de la contrainte radiale (à droite) dans le matériau compressible à 200 ans, en fonction du taux (λ) à la pose des voussoirs.

4. Influence du couplage thermomécanique

L'influence du couplage thermomécanique est ici analysée pour un taux de déconfinement à la pose des voussoirs de 95%, en comparant le calcul thermomécanique (TM) à un calcul purement mécanique (M).

L'évolution des convergences de l'alvéole illustre une évolution plus rapide quand l'effet thermique est pris en compte, du fait de l'augmentation de la vitesse de fluage avec la température (augmentation x3, pour une augmentation de la température de 20 à 80°C) et de la dilatation thermique de la roche hôte (Figure 8). L'incrément est plus fort dans la direction horizontale, ce qui induit une ovalisation légèrement plus importante de l'anneau des voussoirs. On observe par ailleurs une augmentation plus rapide entre 30 et 50 ans, soit en correspondance du pic de la courbe de puissance thermique introduite dans l'alvéole par les colis exothermiques (pic apparaissant peu après l'arrêt du système de ventilation supposé avoir lieu dès la fin du remplissage de l'alvéole).

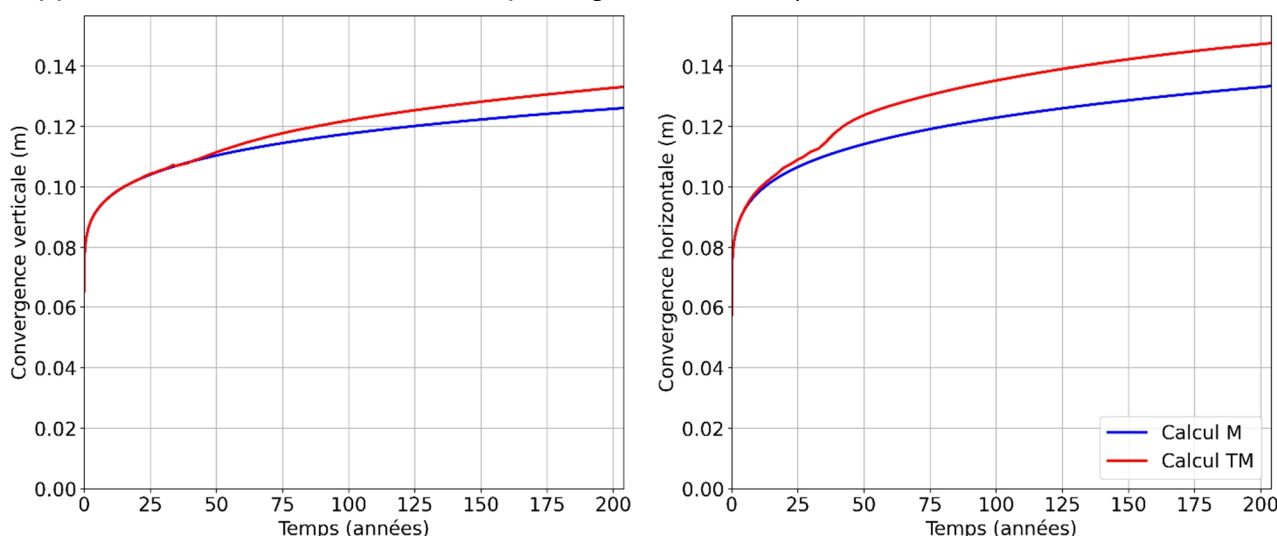


Figure 8. Evolution de la convergence verticale (à gauche) et horizontale (à droite) lors de la période d'exploitation du stockage, en fonction du type de calcul réalisé (M et TM).

L'analyse des contraintes et des efforts dans les voussoirs montre cependant des résultats similaires pour les deux calculs. Ceci est dû encore une fois à la présence du matériau compressible dont la déformabilité importante permet de reprendre efficacement les déformations du terrain induites par le fluage et la dilatation thermique.

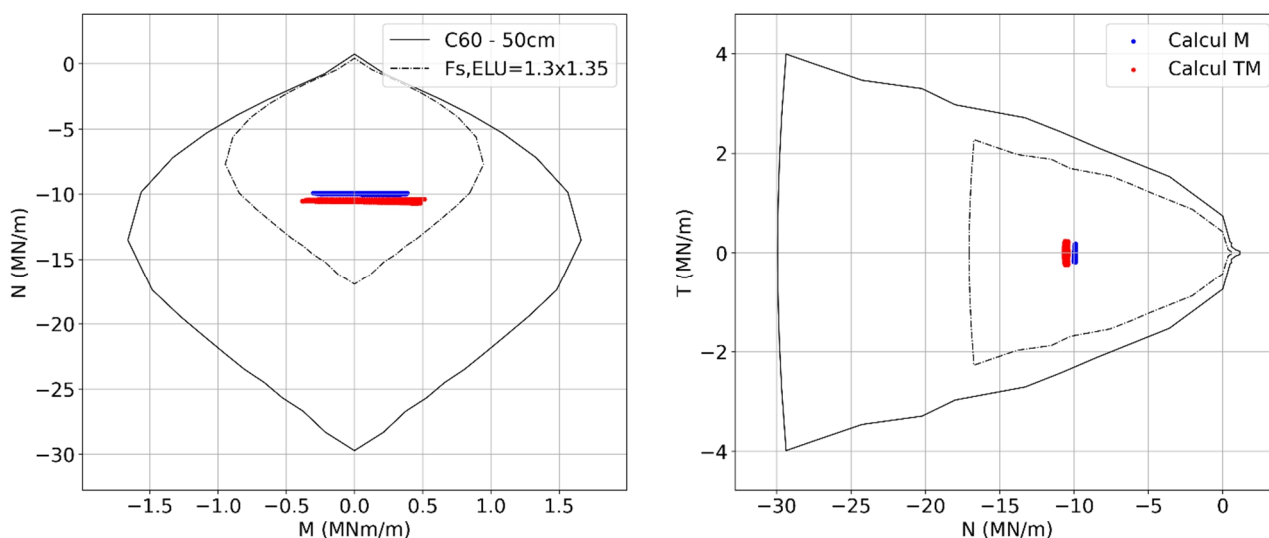


Figure 9. Diagrammes d'interaction des voussoirs à 200 ans, en fonction du type de calcul réalisé (valeurs négatives = compression).

5. Conclusions

Cette communication présente les résultats d'une étude réalisée dans le cadre du projet CIGEO dont l'objectif est de simuler le comportement d'une galerie de grand diamètre dans laquelle seront stockées des déchets exothermiques MAVL. La galerie sera creusée au tunnelier avec la mise en place de voussoirs en béton, calés au massif par l'intermédiaire d'un matériau compressible. La couche compressible est caractérisée par une déformabilité importante sous une faible contrainte permettant d'absorber la déformation différée de la roche hôte et de limiter la transmission des efforts aux voussoirs en béton.

La modélisation, bien qu'utilisant une approche continue, prend explicitement en compte la présence d'une zone fracturée autour de la galerie, induite par le processus d'excavation dont le comportement influence fortement l'ouvrage à court comme à long terme. Ceci est possible en introduisant une zone de caractéristiques mécaniques plus faibles que celles de la roche intacte, dont la forme et l'extension sont issues de l'analyse des nombreuses données, à partir d'essais et d'auscultations réalisés dans les galeries du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

La communication présente les résultats d'une des études de sensibilité réalisées, portant sur l'influence du taux de déconfinement à la pose des voussoirs (variable entre 85 et 95%). Les résultats sont analysés et comparés entre eux en termes d'état d'endommagement de l'argilite (pré-pic, post-pic, résiduel), ce qui permet de mettre efficacement en évidence la formation des bandes de cisaillement en parement de l'excavation. Les déformations et les contraintes, dans les voussoirs et dans le matériau compressible, sont également analysées. On observe notamment que la prise en compte du couplage thermomécanique favorise l'évolution des convergences de l'argilite et donc le développement de contraintes plus importantes dans le béton. Cette tendance de comportement est également observée, de manière contre intuitive, avec l'utilisation d'un taux de déconfinement plus important à la pose des voussoirs (et donc avec l'augmentation de la distance de calage de l'anneau de béton au terrain). Cependant, la fin du plateau plastique du matériau compressible n'étant jamais atteinte, ce matériau continue de jouer son rôle de matériau « fusible » lors de la phase d'exploitation du stockage, ce qui permet de garder les efforts dans les voussoirs en-deçà de leurs valeurs admissibles.

Les résultats présentés ici dépendent fortement des hypothèses de modélisation retenues (comme l'homogénéisation des propriétés dans la zone fracturée autour de l'excavation, la non prise en compte de l'écoulement sur la transmission de la chaleur, ...), dont l'influence n'est pas analysée dans cet article mais fait l'objet d'autres publications (Alonso et al, 2021).

6. Références bibliographiques

- Alonso M., Vu M., Vaunat J., Armand G., Gens A., Plua C., De Lesquen C., Ozanam O. (2021). Effect of thermo-hydro-mechanical coupling on the evolution of stress in the concrete liner of an underground drift in the Cigéo project. IOP Conference Series. Earth and Environmental Science, Vol. 833, N°1.
- Camusso M., Saitta A., Ozanam O., Vu M., (2020). CIGEO radioactive waste repository project – An observation-based model of claystone behavior for thermomechanical FLAC3D simulations. Applied Numerical Modeling in Geomechanics. Billiaux, Hazzard, Nelson & Schöpfer (eds.) Paper: 12-07.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2019). FLAC3D - Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three Dimensions, Ver. 7.0., Minneapolis.
- Saitta, A., Lopard, G., Petizon, T., Armand, G. (2017). Projet Cigéo – Modélisation du comportement des argilites de la galerie GRD du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne – Congrès AFTES, Paris.
- Souley M., Armand G., Su K., Ghoreychi M. (2011). Modeling the viscoplastic and damage behavior in deep argillaceous rocks. Physics and chemistry of the earth. Vol. 36, issues 17-18, pp. 1949-1959.