

1 MODELISATION DES TUNNELS EXCAVES DANS LES TERRAINS 2 FORTEMENT TECTONISES

3 MODELING OF TUNNELS EXCAVATED IN HIGHLY SQUEEZING GROUND

4 Yichun LIU¹, Jean SULEM¹, Didier SUBRIN², Huy TRAN-MANH³, Emmanuel HUMBERT⁴

5 ¹ Laboratoire Navier/CERMES, Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR, CNRS, Université
6 Paris-Est, 77455 Marne-la-Vallée, France

7 ² Centre d'études des tunnels (CETU), 69674 Bron, France

8 ³ Itasca Consultants SA, 69130 Ecully, France

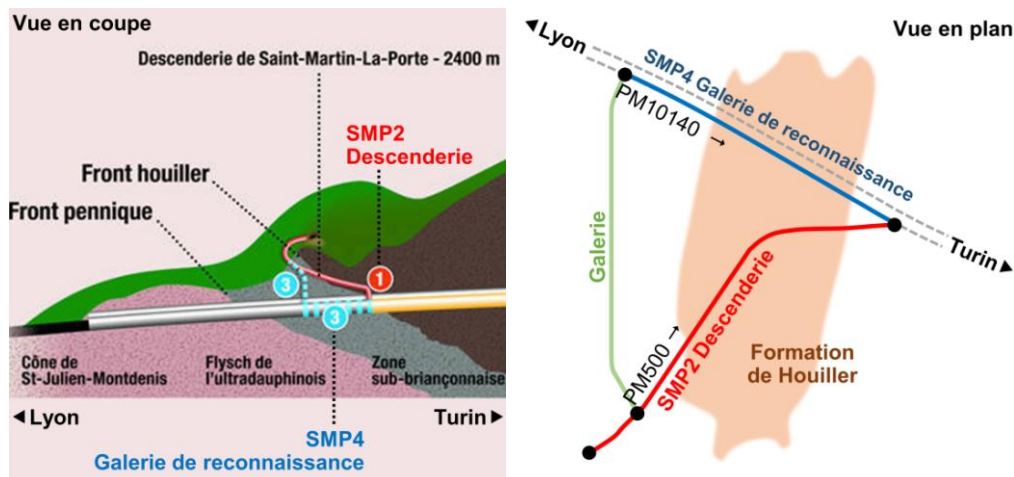
9 ⁴ Tunnel Euralpin Lyon Turin, 73375 Le Bourget du Lac cedex, France

10 **RÉSUMÉ** – Dans le contexte de la liaison ferroviaire Lyon-Turin, des terrains fortement
11 tectonisés ont été rencontrés durant l'excavation d'une descenderie (SMP2) et d'une
12 galerie de reconnaissance (SMP4) à Saint-Martin-la-Porte (SMP) en France. Dans cet
13 article, les analyses des données de terrain et la modélisation numérique de la réponse
14 différée de SMP2 sont extrapolées et appliquées aux conditions rencontrées dans SMP4.

15 **ABSTRACT** – In the context of the Lyon-Turin railway link, the highly squeezing ground
16 were encountered during the tunneling of an access gallery (SMP2) and a survey gallery
17 (SMP4) in Saint-Martin-la-Porte (SMP) in France. In this paper, the analyzes of field data
18 and numerical modeling of the time-dependent response of SMP2 are extrapolated and
19 applied to the conditions encountered in SMP4.

20 1. Introduction

21 Le projet de nouvelle liaison ferroviaire à grande vitesse Lyon-Turin est un élément clé du
22 Réseau Transeuropéen de Transport (RTE-T). Elle permettra de relier France et Italie par
23 un tunnel de base de 57,5 km traversant les Alpes. Dans ce contexte, un projet de
24 reconnaissance est en cours à Saint-Martin-la-Porte (SMP) en France pour étudier le
25 contexte géologique de l'une des zones les plus complexes du futur tunnel de base
26 (Figure 1).



27 Figure 1. Galeries de SMP : descenderie (SMP2) et galerie de connaissance (SMP4).
28

29 Une descenderie (SMP2) a d'abord été excavée en méthode conventionnelle entre
30 2003 et 2010 pour accéder au tunnel de base perpendiculairement. Des difficultés
31 d'exécution ont été rencontrées dans la formation du Houiller productif fortement

32 tectonisé à 300 m de profondeur du côté ouest du mont Brequin. Depuis 2017, une
 33 nouvelle galerie de reconnaissance (SMP4) a commencé à être excavée le long de l'axe
 34 du futur tunnel de base à une profondeur de 600 m. Elle traverse la même formation
 35 tectonisée que SMP2, mais plus en profondeur.

36 Le Houiller productif rencontré présente une structure très hétérogène et stratifiée. Il se
 37 compose de grès, schistes noirs et veines de charbons, avec un degré de fracturation très
 38 élevé. En raison de ses faibles propriétés mécaniques, le terrain présente un
 39 comportement particulièrement poussant, caractérisé par des fortes déformations,
 40 différées et anisotropes autour du tunnel. Une ovalisation de la section avec une
 41 convergence jusqu'à 2 m a été observée, ce qui a provoqué de graves problèmes pour le
 42 processus d'excavation et de soutènement (Figure 2). Un programme intensif
 43 d'auscultation in-situ a été réalisé dans SMP2 pour suivre la réponse de terrain et du
 44 soutènement durant et après l'excavation (Bonini et Barla, 2012, Tran-Manh et al. 2015).
 45 De nombreuses études ont été réalisées pour SMP2 (e.g. Rettighieri et al. 2008,
 46 Debernardi et Barla. 2009, Russo et al. 2009, Subrin et al. 2009, Bonini et Barla. 2012, Vu
 47 et al. 2013, Monin et al. 2014, Tran-Manh et al. 2015, Descoedres et al. 2015) sur les
 48 difficultés rencontrées au chantier liées au comportement tectonisé de terrain.



49
 50 Figure 2. Hétérogénéité de matériaux au front de taille et ovalisation de la section observées dans
 51 les galeries de SMP.

52 Dans cet article, les analyses des données de terrain et la modélisation numérique de
 53 la réponse différée réalisées pour SMP2 sont extrapolées et appliquées aux conditions
 54 rencontrées à SMP4. La réponse de terrain peut être reproduite en tenant compte de la
 55 méthode d'excavation et de soutènement spécifique mise en place.

56 2. Etudes réalisées pour SMP2

57 Afin d'être compatible avec des fortes convergences et d'assurer la stabilité en paroi, un
 58 processus d'excavation en plusieurs phases associé à un reprofilage et un système
 59 innovant de soutènement semi-rigide DSMxx comprenant des éléments de blocs
 60 compressibles (HiDCon) a été adopté dans SMP2 (Bonini et Barla 2012). Le tunnel est
 61 d'abord creusé et soutenu par des cintres coulissants (type TH). Des blocs compressibles
 62 sont ensuite installés entre les joints coulissants des cintres et le soutènement est rempli
 63 de béton projeté. Un anneau de béton de 80-100 cm d'épaisseur a été installé comme
 64 revêtement définitif lorsque le taux de convergence atteint un niveau suffisamment faible
 65 (quelques millimètres par jour). Ce système de soutènement semi-rigide a également été
 66 adopté à SMP4 pour traverser la même formation de Houiller.

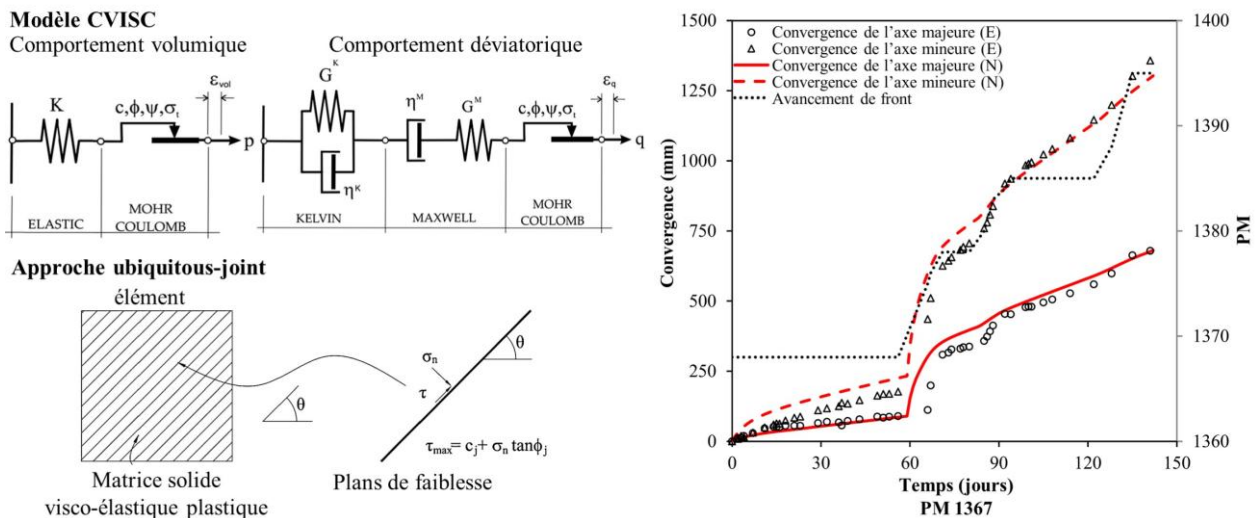
67 La convergence de la descenderie est auscultée tous les 5 mètres le long de tunnel par
 68 l'installation de 5 plots de mesure pour la partie supérieure en paroi du tunnel et en
 69 suivant le déplacement des plots et l'évolution de longueur des cordes entre les plots (Vu
 70 et al. 2013, Tran-Manh et al. 2015). Les études précédentes ont montré que la
 71 convergence anisotrope observée dans les mesures in-situ du PM 1250 au 1550 pouvait

72 être représentée en considérant une forme elliptique de la section déformée du tunnel. Le
 73 rapport d'anisotropie de la plupart des sections varie de 1,5 à 3. L'évolution des axes
 74 majeurs et mineurs de l'ellipse au cours du temps peut être ensuite étudiée en calant la
 75 loi de convergence proposée (Sulem et al. 1987a, b), où la convergence est exprimée en
 76 fonction de la distance de la section considérée au front de taille x et du temps depuis le
 77 passage du front t :

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

78 Cette fonction dépend de cinq paramètres: T - temps caractéristique du comportement
 79 différé du système; X - paramètre lié à la distance d'influence du front de taille; $C_{\infty x}$ -
 80 convergence instantanée pour un avancement infiniment rapide; m - rapport entre la
 81 convergence différée et la convergence instantanée; n - exposant qui décrit la forme de la
 82 courbe, généralement fixée à 0,3. Le comportement moyen du terrain non soutenu dans
 83 SMP2 a été caractérisé par les valeurs typiques des paramètres: $C_{\infty x} = 0,5$ m ; $T = 20$
 84 jours; $X = 15$ m; $m = 18$; $n = 0,3$.

86 Un modèle numérique (Figure 3a) combinant la loi de comportement visco-élastique
 87 plastique (CVISC) et l'approche *ubiquitous-joint model* (modèle de plans de faiblesse
 88 omniprésents) a été développé et implémenté dans le code de calcul en différences finies
 89 FLAC3D. Le modèle CVISC est utilisé pour décrire le comportement différé du massif
 90 rocheux et le modèle *ubiquitous-joint* permet de simuler l'anisotropie du matériau en
 91 introduisant des plans de faiblesse avec une orientation donnée. Les paramètres ont été
 92 calés pour SMP2 et les données d'auscultation in-situ ont pu être bien reproduites (figure
 93 3b) (Tran-Manh et al. 2015).



94 visco-élastique plastique
 95 Figure 3. (a) Modèle CVISC et modèle *ubiquitous-joint* (b) Modélisation numérique de la
 96 convergence de SMP2 (N) et comparaison avec les données mesurées (E) (Tran-Manh et al.2015)
 97 pour la section PM 1367.

98 3. Analyse des convergences de SMP4

99 L'excavation de SMP4 a commencé en grande section (SMP4-GS) avec un rayon
 100 équivalent d'environ 6,5 m. Un effondrement du front s'est produit près du PM 10303 à
 101 cause de la présence d'une zone de faille. Après cela, le terrain autour a été renforcé et la
 102 taille des sections suivantes a été réduite pour assurer la sécurité des travaux. Du PM
 103 10311 au 10410 (SMP4-PS), le rayon équivalent de la section est d'environ 3,15 m et
 104 cette partie sera réalisée à la taille de la grande section plus tard.

105 La lithologie du massif rocheux près de SMP4-PS est très hétérogène et plusieurs
 106 zones de faille sont présentes (Figure 4). Autour du PM 10310, le matériau est stratifié et

107 la proportion de charbon et de schiste carboné est plus élevée que dans les sections
 108 suivantes. L'avancement du front pour SMP4-PS est d'environ 0,6 m / jour et l'excavation
 109 est réalisée en 2 étapes : tout d'abord, le terrain est renforcé par des boulons au front et
 110 en voûte, et la partie supérieure du tunnel est excavée et soutenue par des cintres
 111 coulissants. Ensuite, à environ 11 m du front de taille, la partie inférieure de la section
 112 est excavée et soutenue par des cintres coulissants, et le soutènement semi-rigide contenant
 113 des blocs compressibles est installé.

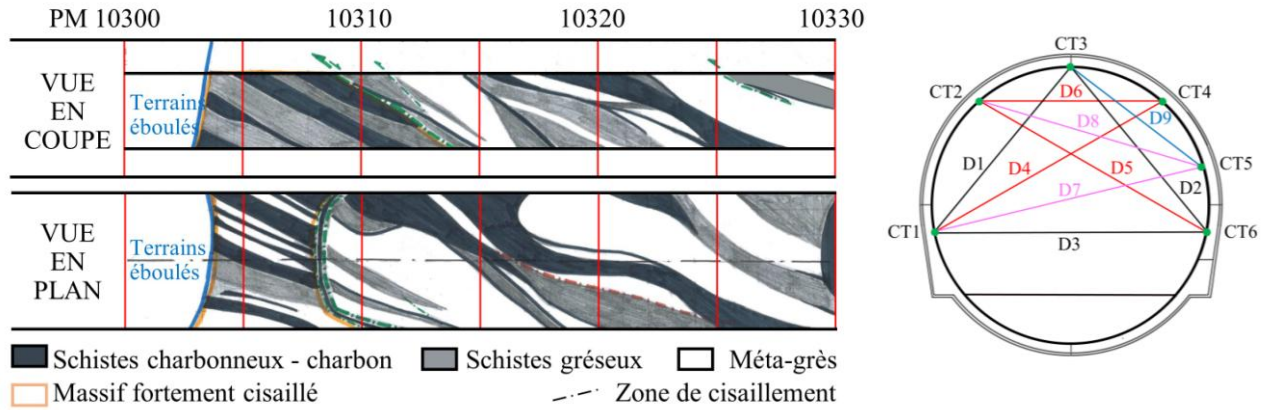


Figure 4. Lithologie autour de SMP4-PS et plots de mesure de convergence.

114
115

3.1. Traitement de données in-situ

116

117 On observe que l'installation du système de soutènement semi-rigide limite l'amplitude et
 118 le taux de convergence. La convergence des parois est fortement anisotrope. Par
 119 exemple, dans la section au PM 10321, la corde D3 se raccourcit beaucoup plus que les
 120 autres cordes car les points CT1 et CT6 présentent un fort déplacement horizontal (Figure
 121 5).

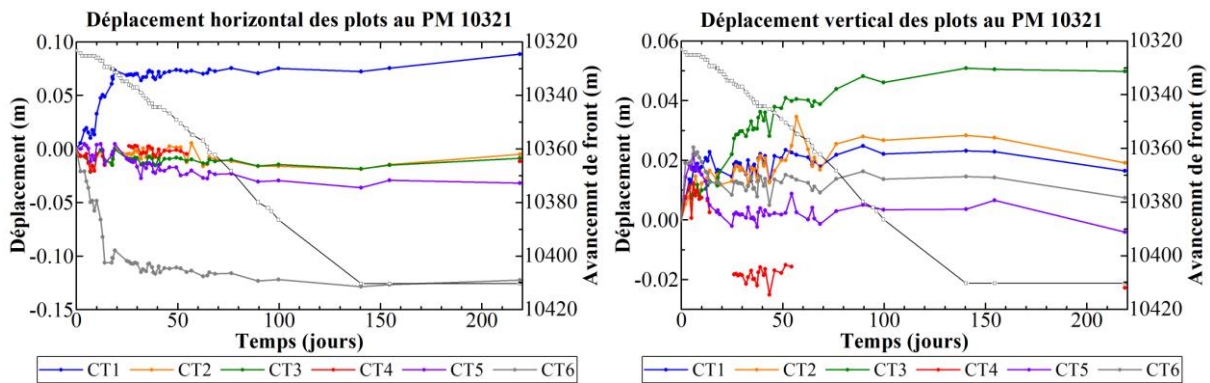


Figure 5. Mesure de convergence au PM 10321.

122
123

124 L'anisotropie de la convergence est provoquée par la forte hétérogénéité du massif
 125 rocheux et une direction stable de l'anisotropie ne peut pas être identifiée. Dans un
 126 premier temps, la déformation de tunnel est caractérisée par la convergence moyenne en
 127 considérant une déformation circulaire. Étant donné que les convergences mesurées
 128 couvrent deux phases d'excavation et de soutènement, l'analyse de convergence doit être
 129 effectuée séparément en deux étapes (Figure 6) : la phase A (excavation de la section) et
 130 la phase B (installation du soutènement).

131 La convergence mesurée pendant la phase A est :

$$\Delta C_A(x_i, t_i) = C_A(x_i, t_i) - C_A(x_0, t_0)$$

132

133 où x_0 est la distance au front de taille au moment de la première lecture de données et t_0
 134 est le temps écoulé depuis que le front a traversé la section considérée.

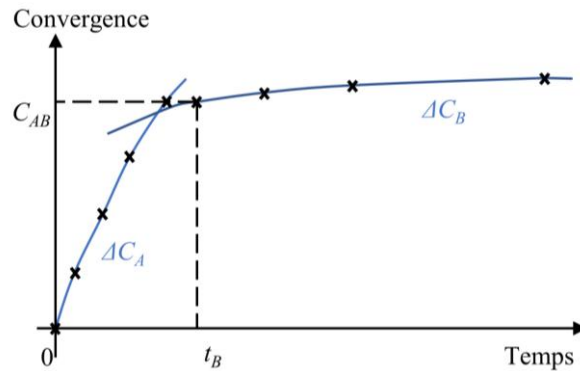


Figure 6. Calage de convergence en deux phases

Pour la phase B :

$$\Delta C_B(x_i, t_i) = C_B(x_i, t_i) - C_B(x_B, t_B) + C_{AB}$$

où x_B est la distance au front à l'installation du soutènement semi-rigide, t_B est le temps correspondant et C_{AB} est la convergence mesurée correspondante.

Les 4 paramètres de la loi de convergence (X , T , m et n) obtenus de SMP2 sont directement appliqués au SMP4-PS qui est beaucoup plus profonde et dans une autre direction. L'effet de la taille de tunnel sur les paramètres sont pris en compte : X est supposé proportionnel au diamètre du tunnel (Guayacán-Carrillo et al. 2018). Les valeurs de paramètres suivantes sont ensuite proposées pour SMP4-PS : $X = 7,6$ m, $T = 20$ jours, $m = 18$ et $n = 0,3$. Cela permet de caler uniquement $C_{\infty x}$ pour chacune des deux phases. L'analyse de la section au PM 10321 est illustrée sur Figure 7. La valeur de $C_{\infty x A}$ obtenue dans SMP4-PS est beaucoup plus faible que celle de SMP2.

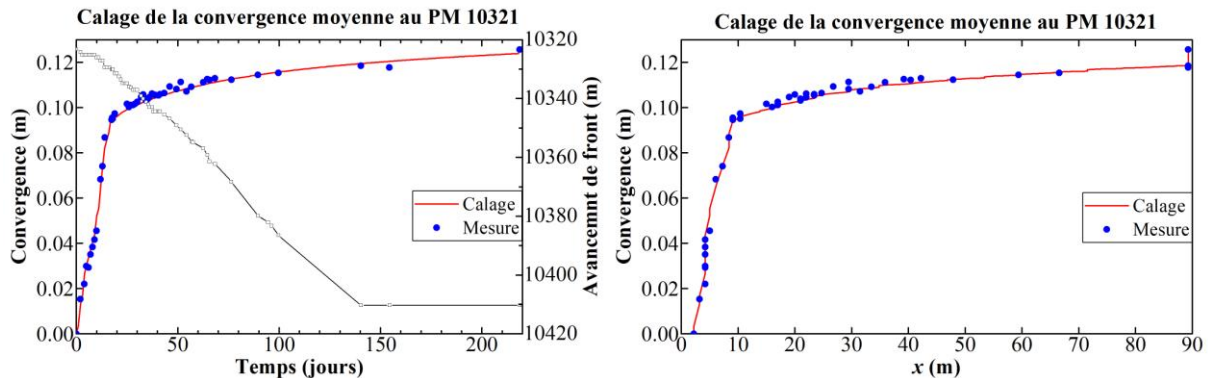


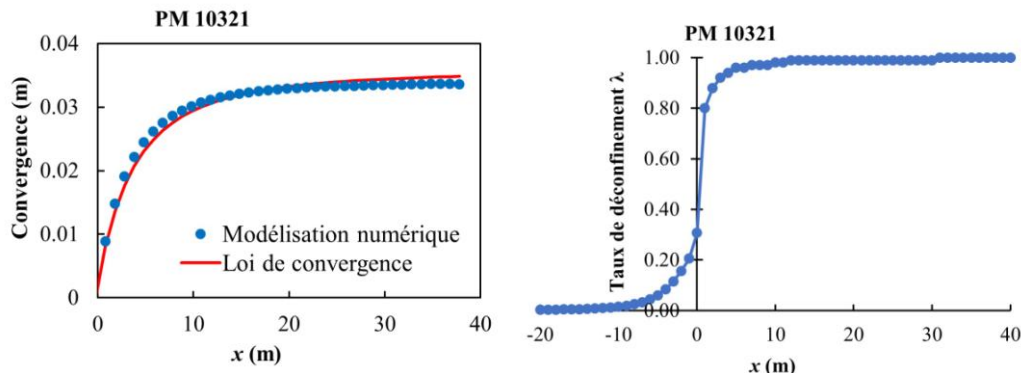
Figure 7. Analyse de convergence au PM 10321 ($C_{\infty x A} = 0,0340$ m; $C_{\infty x B} = 0,0042$ m; $C_{AB} = 0,0946$ m; $C_{\infty} = 0,160$ m).

3.2. Modélisation numérique

A partir du calage de la loi de convergence, une modélisation numérique 2D est effectuée pour SMP4-PS à l'aide du code FLAC3D. Dans une analyse préliminaire, l'anisotropie des matériaux n'est pas introduite, et le massif rocheux est modélisé par le modèle CVISC sans introduire de plans de faiblesse. La géométrie réelle de la section du tunnel est simplifiée en considérant une ouverture circulaire avec un rayon équivalent de 3,15 m et l'état initial de contrainte est supposé isotrope : $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 16,2$ MPa.

Dans un modèle 2D, l'avancement du front du tunnel est simulé par une réduction progressive de la pression fictive à la paroi $\Delta\sigma_r = -\lambda\sigma_0$, où λ est le taux de déconfinement et σ_0 la contrainte initiale (Panet 1995). L'évolution du taux de déconfinement λ est d'abord évaluée en effectuant une simulation numérique 3D du processus d'excavation en supposant un comportement élastique parfaitement plastique avec un critère de Mohr-Coulomb du massif rocheux. A titre d'exemple, on présente ci-dessous l'analyse de la

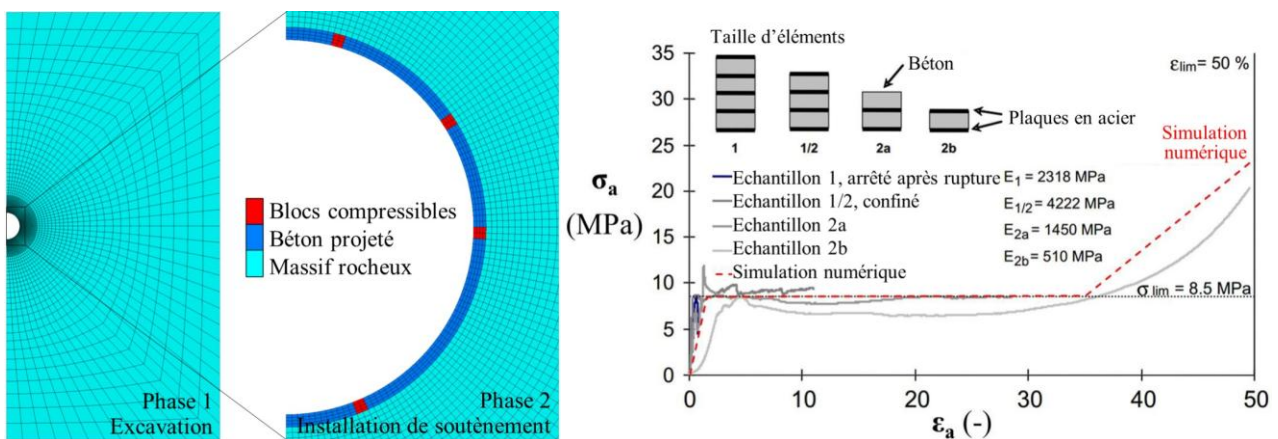
166 section au PM 10321. Les paramètres élasto-plastiques (module d'Young E et cohésion
 167 c) du modèle CVISC sont ajustés en considérant la partie indépendante du temps de la loi
 168 de convergence $C_{\infty}x[1-(X/(x+X))^2]$ (Figure 8a) et les valeurs des modules de compression
 169 et de cisaillement sont calculées.



170 Figure 8. Réponse instantanée : (a) Comparaison des résultats numériques ($E = 1625$ MPa et $c =$
 171 $3,84$ MPa) et de la loi de convergence (b) Taux de déconfinement.
 172

173 Le profil de déplacement longitudinal est obtenu à partir des résultats numériques 3D
 174 qui permettent de déterminer l'évolution du taux de déconfinement λ avec la distance au
 175 front x (Figure 8b). Pour simplifier, on suppose que la même fonction de l'évolution du
 176 taux de déconfinement avec la distance au front peut être utilisée lorsque les effets
 177 différés sont introduits dans les simulations.

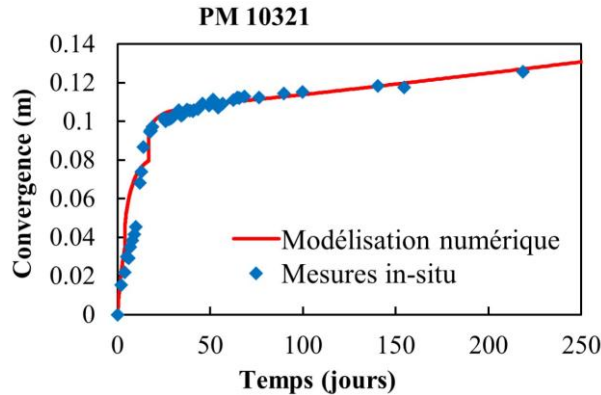
178 Après avoir obtenu le taux de déconfinement, une nouvelle modélisation numérique 2D
 179 est réalisée pour simuler l'excavation et le soutènement en deux phases : la section
 180 pleine est d'abord excavée, puis le système de soutènement semi-rigide est activé (Figure
 181 9a). Le soutènement de la première phase (cintres coulissants) et le renforcement par
 182 boulons ne sont pas modélisés. Leurs effets sont intégrés dans la modélisation de terrain
 183 non soutenu dans la première phase. Le soutènement semi-rigide installé dans la
 184 deuxième phase est introduit : le béton projeté est supposé élastique (module d'Young =
 185 10 GPa, coefficient de Poisson = $0,2$) et les blocs compressibles sont simulés par le
 186 modèle « Double-Yield » disponible dans le code FLAC3D (Figure 9b). La charge sur le
 187 soutènement est largement dû au comportement différé du terrain.



188 Figure 9. (a) Maillage 2D de la simulation numérique de SMP4-PS (b) Essais de compression
 189 simple des blocs compressibles (Barla et al. 2011) et modélisation numérique.
 190

191 En calant le module de cisaillement Kelvin et les viscosités de Maxwell et de Kelvin, la
 192 convergence mesurée est bien reproduite dans la simulation numérique (Figure 10), et les
 193 paramètres obtenus du terrain sont présentés dans Tableau 1. Ces paramètres du terrain
 194 représentent l'ensemble du massif rocheux, cintres coulissants et boulons. Le terrain
 195 dans SMP4-PS est plus rigide que dans SMP2, ce qui peut être lié au fait que SMP4 est

196 plus profond (environ 600 m pour SMP4-PS et 300 m pour SMP2) : le module de
 197 compression du massif rocheux dans SMP4-PS est 2,5 fois plus grand que dans SMP2 et
 198 la cohésion est 3,2 fois plus élevée.

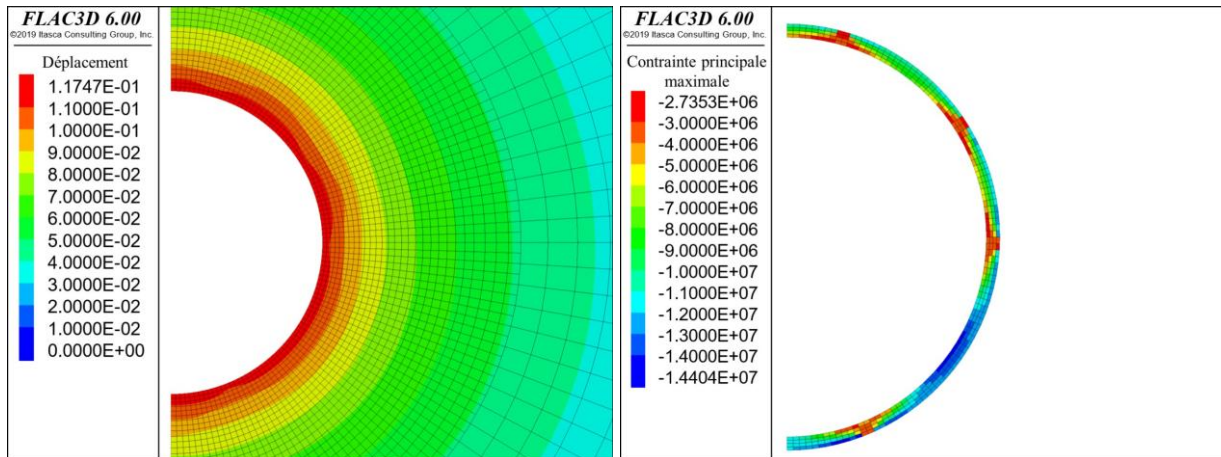


199
 200 Figure 10. Convergence moyenne de SMP4-PS au PM 10321 : données in-situ et résultats
 201 numériques.

202 Tableau 1 Paramètres du modèle CVISC pour PM 1383 de SMP2 et PM 10321 de SMP4-PS

	SMP2	SMP4		SMP2	SMP4
Module de compression (MPa)	541	1355	Cohésion (MPa)	1,2	3,84
Module de cisaillement (MPa)	250	625	Résistance en traction (kPa)	8,5	8,5
Module de cisaillement Kelvin (MPa)	550	605	Angle de frottement (°)	26	26
Viscosité de Maxwell (GPa.jour)	13,75	412,5	Angle de dilatance (°)	0	0
Viscosité de Kelvin (GPa.jour)	2,2	2,64			

203 Le contour de déplacement et la contrainte principale maximale dans le soutènement
 204 semi-rigide sont représentés sur Figure 11. La contrainte dans les éléments est plus faible
 205 que dans le béton projeté, et la contrainte est beaucoup plus élevée dans la partie droite
 206 inférieure du soutènement où aucun bloc compressible n'est installé.



207
 208 Figure 11. (a) Contour de déplacement (en m) (b) Contrainte principale maximale dans le
 209 soutènement semi-rigide (en Pa) (t = 200 jours)

210 4. Conclusions

211 Les galeries SMP2 et SMP4 excavés à Saint-Martin-la-Porte traversent la même
 212 formation de Houiller, où on rencontre des terrains fortement tectonisés. Afin d'étudier le
 213 comportement de ces galeries dans les conditions poussantes, des études ont été
 214 réalisées pour SMP2 et peuvent être étendues à SMP4. La convergence moyenne de
 215 SMP4-PS peut être calée par la loi de convergence en appliquant les résultats obtenus en
 216 SMP2 et en considérant l'effet de taille de tunnel. Le modèle numérique développé dans

217 SMP2 peut être utilisé dans SMP4-PS tandis que les paramètres du modèle doivent être
218 réajustés car le massif rocheux traversé par SMP4-PS est plus rigide à plus grande
219 profondeur. Dans les études futures, l'anisotropie du massif rocheux sera prise en compte
220 et les modélisations numériques seront étendues à l'excavation future en pleine section.

221 Remerciements

222 Les auteurs tiennent à remercier l'entreprise Tunnel Euralpin Lyon Turin (TELT) pour son
223 soutien à ce projet de recherche et pour les données sur les galeries de Saint-Martin-la-
224 Porte et ITASCA pour son aide via le programme de « Itasca Educational Partnership ».

225 5. Références bibliographiques

- 226 Barla, G., Bonini, M. and Semeraro, M., 2011. Analysis of the Behaviour of a Yield-Control
227 Support System in Squeezing Rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*
228 26 (1): 146 - 54.
- 229 Bonini, M. and Barla, G., 2012. The Saint Martin La Porte access adit (Lyon - Turin Base
230 Tunnel) revisited. *Tunnelling and underground space technology*, 30, pp.38-54.
- 231 Debernardi, D. and Barla, G., 2009. New viscoplastic model for design analysis of tunnels
232 in squeezing conditions. *Rock mechanics and rock engineering*, 42(2), p.259.
- 233 Descoeurdes, F., Giani, G.P. and Brino, L., 2015. Il tunnel di base del Moncenisio per la
234 nuova linea ferroviaria Torino-Lione: aspetti geomeccanici e confronto con i grandi
235 trafori svizzeri, *Gallerie e Grandi Opere Sotterranee*, n. 115, pp. 21-31.
- 236 Guayacán-Carrillo, L.M., Sulem, J., Seyedi, D.M., Ghabezloo, S. and Armand, G., 2018.
237 Size effect on the time-dependent closure of drifts in Callovo-Oxfordian claystone.
238 *International Journal of Geomechanics*, 18(10), p.04018128.
- 239 Tran-Manh, H., Sulem, J., Subrin, D. and Billiaux, D., 2015. Anisotropic time-dependent
240 modeling of tunnel excavation in squeezing ground. *Rock Mechanics and Rock*
241 *Engineering*, 48(6), pp.2301-2317.
- 242 Monin, N., Brino, L. and Chabert, A., 2014. Le tunnel de base de la nouvelle liaison
243 ferroviaire Lyon-Turin : retour d'expérience des ouvrages de reconnaissance, *Congrès*
244 *International AFTES 2014*, Lyon.
- 245 Panet, M., 1995. Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement. Presses
246 ENPC.
- 247 Rettighieri, M., Triclot, J., Mathieu, E., Barla, G. and Panet, M., 2008. Difficulties
248 associated with high convergences during excavation of the Saint Martin La Porte
249 access adit. *Congrès International de Monaco*. Monaco: AFTES.
- 250 Russo, G., Repetto, L., Piraud, J. and Laviguerie, R., 2009. Back-analysis of the extreme
251 squeezing conditions in the exploratory adit to the Lyon-Turin base tunnel. *Rock*
252 *Engineering in Difficult Conditions*, Toronto, ON, Canada, pp.9-14.
- 253 Subrin, D., Vu, T.M., Sulem, J., Robert, A.A., Monin, N. and Brino, L., 2009. Geometrical
254 treatment of convergence and levelling data for the description of the anisotropic
255 behaviour of carboniferous coal schists met in the St-Martin-La-Porte access gallery,
256 *AITES-ITA 2009 World Tunnel Congress*, Budapest.
- 257 Sulem, J., Panet, M. and Guenot, A., 1987a. Closure analysis in deep tunnels. In
258 *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics*
259 *abstracts*, Vol. 24, No. 3, pp. 145-154. Pergamon.
- 260 Sulem, J., Panet, M. and Guenot, A., 1987b. An analytical solution for time-dependent
261 displacements in a circular tunnel. In *International journal of rock mechanics and*
262 *mining sciences & geomechanics abstracts*, Vol. 24, No. 3, pp. 155-164. Pergamon.
- 263 Vu, T. M., Sulem, J., Subrin, D., Monin, N. and Lascols, J., 2013. Anisotropic closure in
264 squeezing rocks: the example of Saint-Martin-la-Porte access gallery. *Rock mechanics*
265 *and rock engineering*, 46(2), pp.231-246.