

TUNNEL DE BASE DU LYON-TURIN – COMPORTEMENT POUSSANT DU HOILLER PRODUCTIF

LYON-TORINO BASE TUNNEL – SQUEEZING BEHAVIOUR OF THE “HOILLER PRODUCTIF”

Jean-Pierre JANIN¹, Thomas ROSSI², Angel SILVESTRE³, François LAIGLE⁴

¹ Setec Terrasol, Lyon, France

² Setec Terrasol, Lyon, France

³ Consultant, Valencia, Espagne

⁴ EDF-CIH, Le Bourget du Lac, France

RÉSUMÉ – Le comportement fortement poussant des formations du Houiller Productif mis en évidence lors de l’excavation de la descenderie de Saint Martin la Porte (SMP1) a été de nouveau retrouvé lors du creusement à l’axe du Tube Sud du Tunnel de Base du Lyon-Turin (SMP4). L’analyse des auscultations a permis par le biais d’une rétro-analyse numérique d’approcher la réponse du massif rocheux en simulant le comportement différé de manière explicite.

ABSTRACT – The squeezing behaviour of the “Houiller Productif” formations, highlighted during the excavation of the Saint Martin la Porte access tunnel (SMP1) was again found during the digging at the axis of the South Tube of the Lyon-Turin Base Tunnel (SMP4). The analysis of the auscultations made it possible by means of a numerical back-analysis to approach the response of the rock mass simulating the time dependant behaviour in an explicit way.

1. Introduction

La conception et la construction de tunnels dans des massifs à comportement poussant différé (« squeezing behaviour »), restent un défi majeur dans le domaine des ouvrages souterrains. Il est en effet difficile de prévoir de manière fiable la réponse du massif à court et long terme. Ce comportement est complexe à étudier parce qu’il dépend de plusieurs facteurs (conditions géologiques et structurales, contrainte in-situ...). En outre, il est fortement lié à la méthode d’excavation et à la technique de soutènement adoptée.

Le comportement poussant peut être étudié par différentes approches, semi-empiriques, analytiques et numériques. Néanmoins, ces différentes approches se basent toutes sur des retours d’expérience réels, ces types de matériaux ne pouvant pas être caractérisé par essais en laboratoire. Ces caractéristiques peuvent être déduites sur la base de retro-analyse sur les auscultations recueillies lors de la construction du tunnel.

Cet article présente les études de retro-analyse menées sur les données recueillies lors du creusement de la galerie de reconnaissance (SMP4) excavée à l’axe du Tube Sud de la future liaison ferroviaire Lyon-Turin. Ces études s’inscrivent dans la mission de MOE du groupement S2iP des lots CO6 et 7 du Tunnel de Base.

Ces études ont permis de définir la réponse du massif en termes de déformations et de chargement sur le soutènement. Un calage analytique et numérique a ensuite été mené sur les données à disposition afin de justifier les dispositions constructives pour le Tube Nord au droit du franchissement du Front du Houiller Briançonnais (FHB).

2. Présentation du projet

2.1. Contexte et enjeux

Afin de sécuriser le projet au franchissement du FHB, il a été décidé de réaliser une galerie de reconnaissance à l'axe du tube sud et au diamètre de l'ouvrage définitif (Galerie SMP4 Partie 3B). Celle-ci a recoupée le FHB au PK 10+270 (Figure 1). De nouveau, d'importantes déformations (squeezing sévère) se sont manifestées dès l'entrée dans les formations gréso-schisto-charbonneuses du Houiller.

En 2018, TELT a confié au groupement S2iP (Setec TPI, Systra, Italferr et Pini Swiss Engineers), les études de maîtrise d'œuvre des chantiers opérationnels CO6/7. Ils concernent l'excavation du Tube Nord du Tunnel de Base entre la descenderie de Saint Martin la Porte et celle de La Praz, ainsi que l'excavation des deux tubes en direction de Modane à partir de la descenderie de La Praz. Dans ce cadre, l'analyse des données d'auscultation au franchissement du FHB a été nécessaire de manière à mieux comprendre le comportement différé du massif rocheux et concevoir les méthodes d'excavation, les profils de soutènement et le revêtement définitif du Tube Nord.

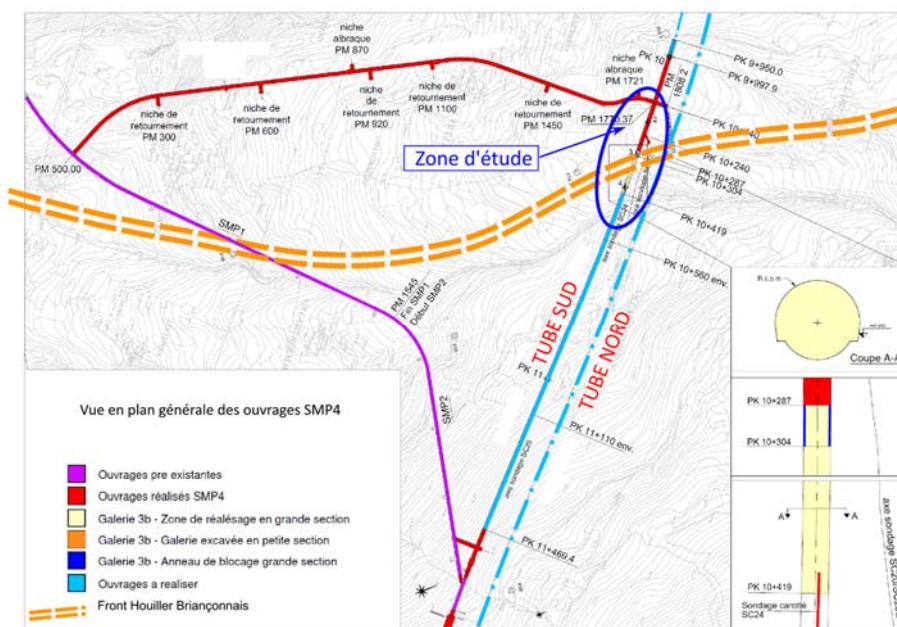


Figure 1 : Vue en plan du projet dans la zone du Houiller Productif.

2.2. Contexte géologique et structural

La zone étudiée correspond au franchissement par le tunnel de base, du Front Houiller Briançonnais (FHB). Cette structure tectonique majeure correspond au décollement de la couverture briançonnaise d'âge Carbonifère venant chevaucher vers l'ouest les formations du sub-briançonnais plus récentes d'âge jurassique et crétacé par l'intermédiaire d'une «semelle» gypseuse d'âge triasique (Figure 2).

L'excavation de la galerie SMP4 à l'axe du tunnel de base est réalisée perpendiculairement aux discontinuités principales (schistosité). Ces conditions d'excavation sont plus favorables vis-à-vis des convergences autour du tunnel que celles rencontrées lors de la réalisation de la descenderie SMP1 (creusement en direction).

L'entrée dans les formations du Houiller débute au PK 10+270. Celles-ci recoupées en voûte gauche gagnent rapidement l'ensemble du front d'excavation. L'amas rocheux est de qualité très médiocre, les valeurs de GSI ne dépassant pas 30. A partir du PM10+295, le

massif rocheux est affecté de nombreux plissements et cisaillements engendrant un changement de direction de la schistosité principale. La déstructuration du massif est totale au PM 10+300 avec des valeurs de GSI inférieures à 20 et induit alors un effondrement du front en grande section ($R_{exc} = 6.55 \text{ m}$) nécessitant un remblaiement en urgence.

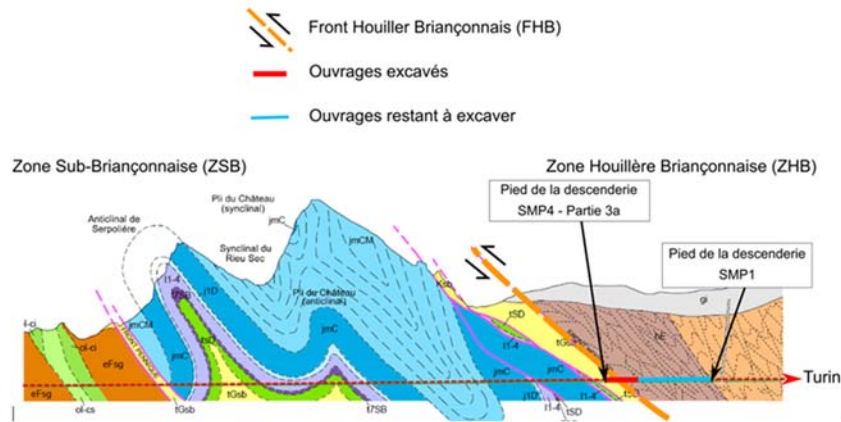


Figure 2 : Extrait de la coupe géologique au droit des ouvrages de Saint Martin la Porte.

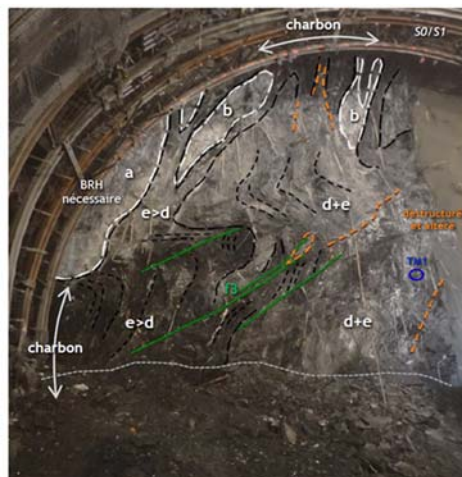


Figure 3 : Photographie du front de taille dans le Houiller Productif au PM10+299 (Chantier SMP4), « a » et « b » : grès, « d » et « e » : schistes carbonneux.

2.3. Méthodes de creusement et de soutènement

Dans les formations du Houiller Productif, l'excavation a été réalisée à la machine à attaque ponctuelle par passe de 1 m. La cadence d'avancement a été de 0.5 m/jour. Le soutènement P6b, inspiré du retour d'expérience de SMP1, mis en œuvre a été le suivant :

- Phase A :
 - Excavation pleine section (sauf la contre-voûte) 116 m², $R = 6.55 \text{ m}$,
 - Pré-soutènement systématique par « forepoling » et boulons en fibres de verre
 - 5 cm de béton projeté de sécurité en paroi (10 cm au front),
 - 32 boulons auréolaires 38N en voûte + 10 autres en contre-voûte, $L = 8 \text{ m}$,
 - Pose d'un cintre coulissant TH44
- Phase B (à environ 25 m du front) :
 - Excavation de la contre-voûte,
 - Pose d'un deuxième cintre coulissant annulaire TH44,
 - Mise en place de 10 blocs compressibles de type HidCon ® et remplissage des cintres par une coque béton projeté de 30 cm d'épaisseur,
 - Remblaiement complet de la contre-voûte.

3. Auscultations

3.1. Convergences

Les mesures in situ ont montré que, dès la rentrée en front mixte dans le Houiller productif à partir du PK 10+270 environ, les convergences diamétrales ont augmenté très rapidement à mesure que le front s'inscrivait entièrement dans le Houiller. Celles-ci passent en effet de l'ordre de 50 mm maximum dans les anhydrites triasiques à 600 mm en front mixte Houiller/Anhydrite puis 800 à 900 mm en front plein dans le Houiller.

Au PM 10+300 environ l'excavation en grande section est stoppée suite à l'effondrement général du front de taille associé causant la rupture des soutènements, la nécessité de combler la galerie pour sa mise en sécurité et la perte des dispositifs d'auscultation. Ainsi, dans ce secteur, le REX disponible sur le creusement en front plein dans le Houiller représente seulement 15 à 20 m.

Ainsi, afin de pouvoir caler le comportement du Houiller Productif à « long terme », le REX de SMP1/SMP2 a été considéré et comparé à celui de SMP4, le soutènement semi-rigide utilisé étant très similaire au soutènement DSMXX utilisé sur SMP1. La superposition des courbes de convergences caractéristiques de SMP1 et de SMP4 montre une similarité remarquable malgré une couverture plus importante de 200 m pour SMP4 (Figure 4).

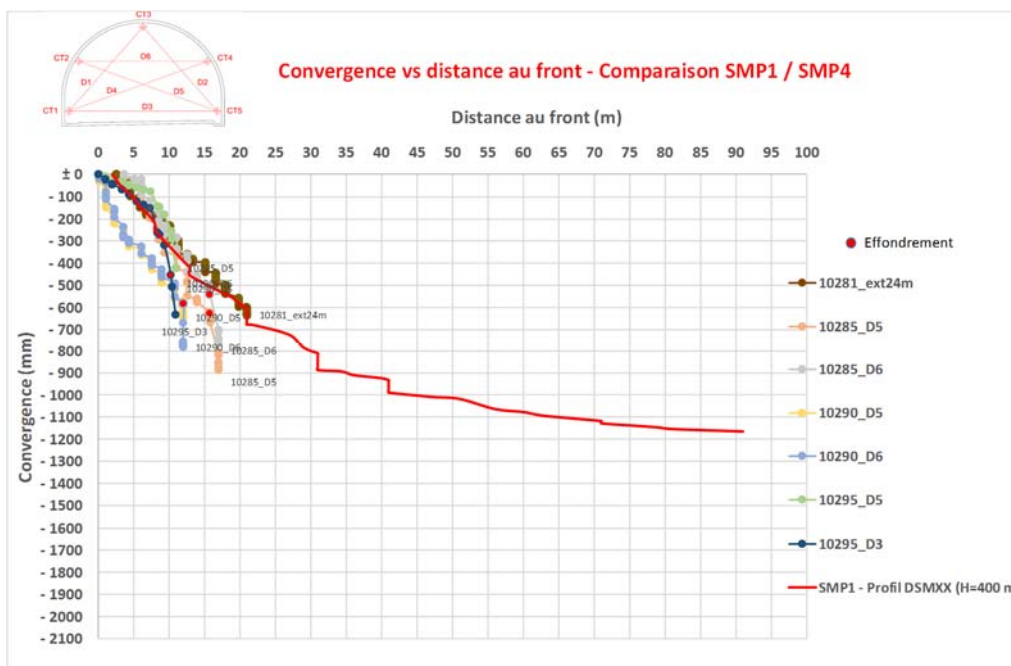


Figure 4 : Comparaison entre la convergence « type » de SMP1 pour le profil DSMXX et les convergences diamétrales mesurées dans le Houiller pour SMP4.

L'analogie de la réponse du massif est également confirmée en ce qui concerne les vitesses de convergence en phase de creusement et en phase d'arrêt du front (Figure 5) :

- Vitesses de convergence similaires entre les deux ouvrages.
- Comportement différé se manifestant très tôt, dès front de taille.
- Effet mécanique du front sensible jusqu'à 25 m environ du front. Au-delà, seul l'effet différé provoque l'évolution des convergences. Après 25 m, en effet, les vitesses totales et à l'arrêt se superposent.

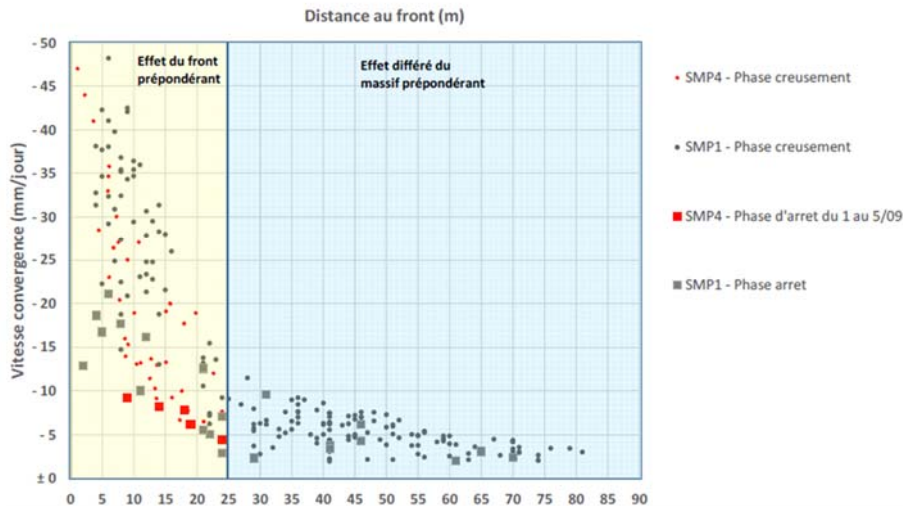


Figure 5 : Comparaison entre les vitesses de convergence de SMP1 et celles mesurées sur SMP4.

4. Calage semi-empirique et analytique

4.1. Calage de la loi de Sulem

Les convergences du massif ont été calées dans un premier temps par l'approche proposée par Sulem et al (1987). Dans le cas d'un massif montrant un comportement différé, l'évolution de la convergence dépend à la fois de l'influence du front de taille, mais aussi du temps écoulé depuis le passage du front. Cette loi permet de distinguer la réponse instantanée du massif de celle couplée (instantanée + comportement différé).

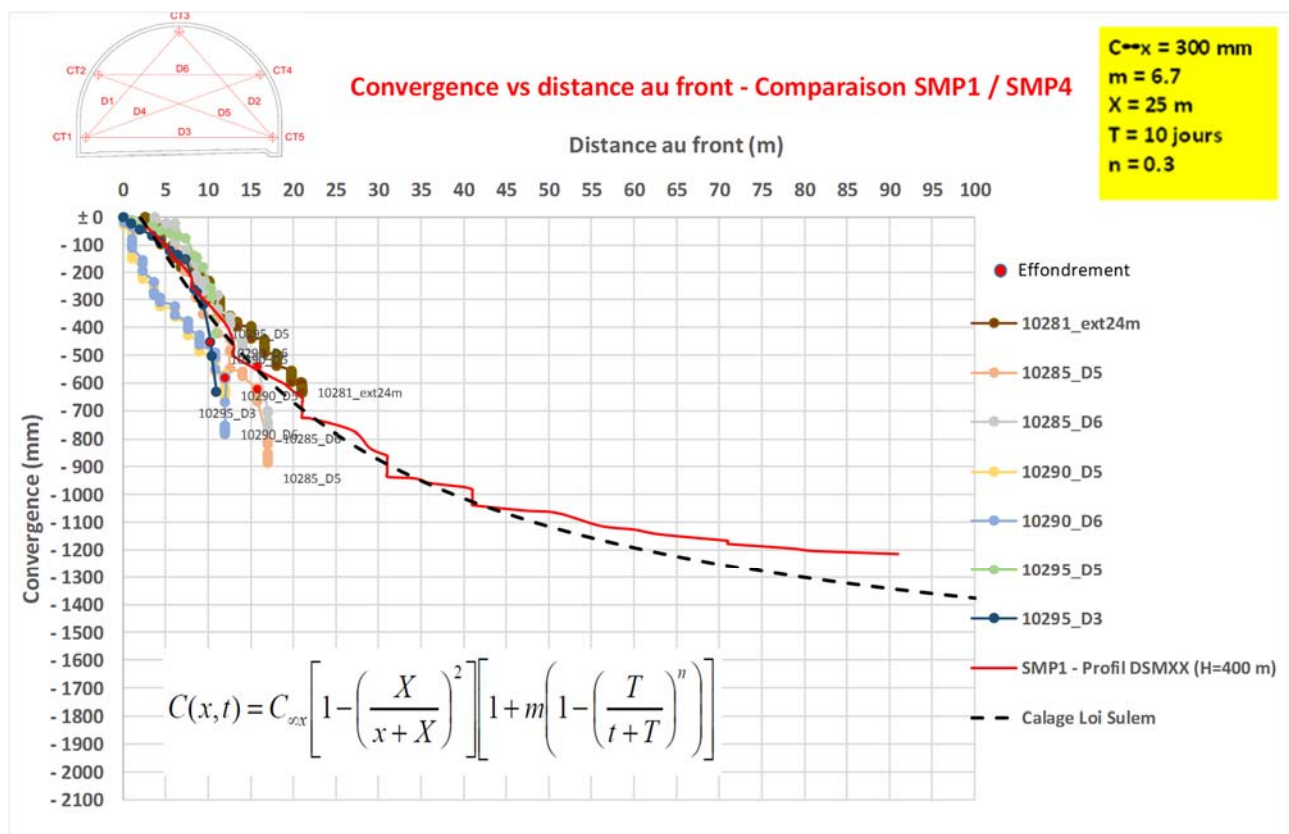


Figure 6 : Calage de la loi de Sulem sur les convergences mesurées depuis la mesure zéro.

4.2. Distinction entre la réponse instantanée et celle liée au comportement différé

Grace au calage de la loi de Sulem, il a été possible de déduire de la convergence totale (pour une mesure zéro fictive au front), celle liée aux effets différés et celle instantanée du massif.

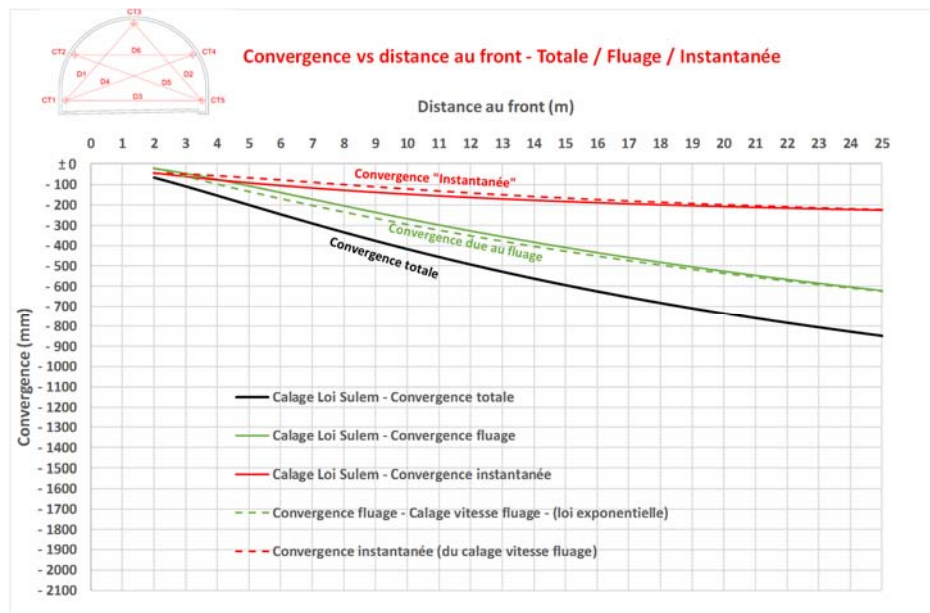


Figure 7: Distinction entre la réponse instantanée et différée.

4.3. Détermination des paramètres instantanés par approche convergence-confinement

Une fois déterminée la convergence instantanée, entre 0 et 25 m du front (avant la pose du soutènement semi-rigide), le déplacement radial stabilisé (y compris préconvergence) a été calculé en utilisant la formulation de la courbe LDP (c) proposée par Vlachopoulos et Diederichs (2009). Les paramètres instantanés E_{rm} (module du massif), c (cohésion) et φ ont ensuite été déterminés avec les différentes approches convergence-confinement disponibles dans la littérature, conduisant à retenir :

$$E_{rm} = 4 \text{ GPa}, c = 0.9 \text{ MPa}, \varphi = 25^\circ$$

Le module de déformation, est significativement plus fort que les valeurs retenues jusqu'alors pour caractériser le Houiller productif, celui-ci ayant été souvent calé sur les convergences totales « polluées » par les effets différés.

Néanmoins, ces paramètres « instantanés », gardent encore implicitement l'effet du soutènement souple de la Phase A, en particulier celui du boulonnage radial.

5. Calage numérique et justification du soutènement/revêtement

5.1. Présentation du modèle

Un modèle 3D aux différences finies a été réalisé avec le code FLAC 3D (ITASCA). La section de creusement, le phasage des travaux et les éléments suivants ont été modélisés de façon explicite et discrète (cf. 2.3) :

- Phase A : boulonnage au front, forepoling, boulonnage radial (éléments « câble »)
- Phase B: coque de béton projeté (éléments volumiques), blocs compressibles (éléments volumiques avec comportement type « double-yield » permettant de simuler la relation contraintes/déformations des HidCon)
- Revêtement final : éléments volumiques, épaisseur de 1 m.

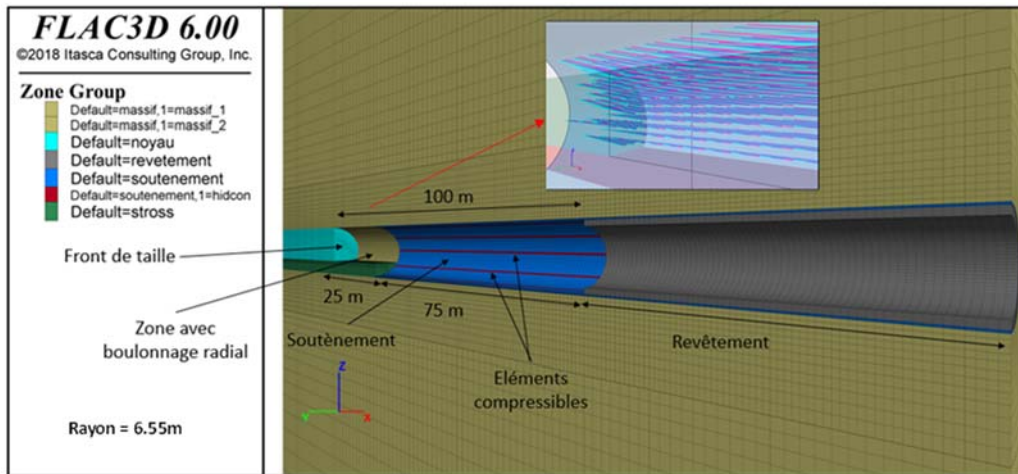


Figure 8 : Vue du modèle 3D aux différences finies.

5.2. Simulation du comportement différé

Les effets différés ont été simulés par la loi de comportement « Power Model » (FLAC, ITASCA) basée sur la loi de fluage visco-élastique de Norton où la vitesse de déformation est définie comme suit :

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = A \cdot \bar{\sigma}^n$$

Avec $\bar{\sigma} = \sqrt{(3 \cdot J_2)}$ et J_2 le deuxième invariant du déviateur des contraintes.

Cette loi implémentée sur FLAC ne comporte que peu de paramètres. Combinée au critère de plasticité de Mohr-Coulomb, elle permet d'ajouter au modèle élastique parfaitement plastique, un comportement visco-élastique. Elle permet en outre de définir un seuil en contrainte σ_{ref} au-dessous duquel la vitesse de déformation diminue ou s'arrête.

5.3. Calage sur les auscultations

La simulation numérique 3D a été recalée sur les auscultations disponibles (cf. 3). Le calcul couplé « instantané et différé » a été exécuté de la façon suivante :

1. Excavation mécanique et instantanée d'un pas de creusement de 1 m avec recherche de l'équilibre mécanique sans effets différés.
2. Simulation d'une période de 2 jours (effets différés), correspondant à la vitesse de creusement moyenne de la galerie SMP4 dans le Houiller productif (0.5 m/j).

Le calage a conduit à devoir corriger les paramètres instantanés et à introduire un comportement radoucissant, étant donné que l'effet du soutènement de la Phase A est explicitement pris en compte ; $E_{rm} = 3$ GPa, $\varphi = 25^\circ$, $C_{initiale} = 0.9$ MPa avec une loi dégradation fonction de la déformation.

En ce qui concerne la loi de fluage, les paramètres A et n calés par Barla et al (2010) sur la section du PM 1443 de SMP1, correspondant au profil de soutènement DSMXX similaire à celui mis en œuvre sur SMP4 (P6b), ont été retenus ; $A1 = 4.86 \times 10^{-59} \text{ Pa}^{-n} \times \text{s}^{-1}$ et $n1 = 7.28$

En outre un seuil déviatorique de fluage a été introduit, au-dessous duquel la vitesse de fluage est réduite, voire arrêtée, afin de se caler au comportement à long terme du massif.

Le seuil de fluage σ_{ref} est assimilé au seuil d'endommagement à partir duquel commence une dégradation progressive de la cohésion de la matrice rocheuse (Panet, 1976). Dans ce type de matériau, il peut être estimé entre 15% à 20% de la résistance "pondérée" σ_{ci} à l'échelle du front (Hoek et Marinos, 2000). La simulation numérique se montre capable d'approcher de façon satisfaisante la réponse du massif en termes d'évolution des convergences (Figure 9).

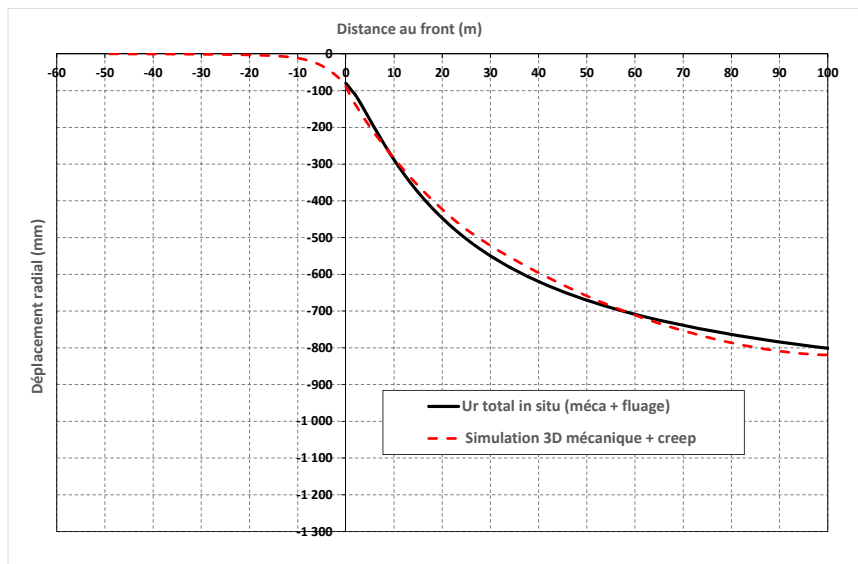


Figure 9 : Calage de la simulation numérique sur l'évolution du déplacement radial.

Par le biais de cette méthodologie de calage et par le biais de la simulation numérique, les profils de soutènement pour le Tube Nord ont pu être justifiés.

6. Conclusions et perspectives

Le creusement d'un tunnel dans un massif présentant un comportement différé est un problème très complexe tant en phase de conception, qu'en phase de réalisation. Cela nécessite, en effet, d'anticiper le niveau de déformation attendu de manière à maîtriser à la fois les fortes convergences et les contraintes dans les soutènements et in fine dans le revêtement final à long terme (durée de vie de l'ouvrage).

Cet article présente les études de retro-analyse menées sur les données d'auscultation du creusement au niveau du tube sud du Tunnel de Base de la future ligne ferroviaire Lyon-Turin, à l'entrée du front houiller briançonnais. Une méthodologie d'étude est proposée consistant à croiser différents types d'approche, visant à caler aux différentes données à disposition. Cette méthodologie aboutit à un calage numérique du comportement du massif, distinguant la réponse instantanée de celle différée, simulée de manière explicite par une loi relativement simple d'utilisation pour l'ingénieur.

Le travail présenté se base sur un linéaire limité du tunnel dans le Houiller productif du fait de l'effondrement lié à la rencontre d'une faille majeure. Les nouvelles données issues de la poursuite des travaux de SMP4 permettront de valider et améliorer la méthodologie proposée et, en particulier, le calage du comportement différé, ainsi que l'importance de l'état lithologique et structural du massif sur la réponse globale.

7. Références

- Hoek E., Marinos P. (2000). Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and tunnelling international* 32, n° 11, pp. 45-51.
- Panet M. (1976). *La Mécanique des roches appliquée aux ouvrages du génie civil*.
- Sulem J., Panet M., Guenot A. (1987). An analytical solution for time-dependent displacements in a circular tunnel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 24, n° 3, pp.155-64.
- Vlachopoulos N., Diederichs M. S. (2009). Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 42, n° 2, pp. 131-46.