

Effets du comportement différé sur le creusement des tunnels

Alexandra Kleine

LAEGO – Ecole Nationale Supérieure de Géologie – Institut National Polytechnique de Lorraine – Rue du Doyen Marcel Roubault, 54501 Vandoeuvre-les-Nancy Cedex.

RESUME. Divers retours d'expérience montrent que la prise en compte du comportement différé est un facteur susceptible de justifier la réduction de la résistance de la roche in-situ. Un modèle élasto-visco-plastique est proposé d'un point de vue conceptuel et analytique. Il a été mis en œuvre dans le cadre de simulations numériques de l'excavation d'une galerie circulaire. Ses applications ont permis de mettre en évidence les effets de la viscosité, de la vitesse de creusement, de la pose d'un revêtement, et d'étudier le comportement à très long terme du massif.

MOTS-CLÉS : comportement mécanique différé, ouvrages souterrains, modèle de comportement, viscoplasticité, vitesse de creusement, soutènement.

ABSTRACT. Several back analyses show that the time-dependent behavior may justify the decreasing of the rock masses strength in field. An elasto-visco-plastic constitutive model is described, from a conceptual and analytical point of view. It was used for numerical simulations of a circular gallery excavation. Its applications highlight the effects of the viscosity, of the digging process rate, of a support and allow to study very long term behavior of the rock mass.

KEYWORDS : time-dependent behaviour, underground openings, constitutive model, viscoplasticity, loading rate, support structure.

1. INTRODUCTION

Dans le domaine des travaux souterrains, il a été observé que les caractéristiques mécaniques des géomatériaux varient en fonction de l'échelle d'étude et de mesure ; en particulier, la résistance diminue avec l'accroissement de la dimension de l'échantillon testé. Par extrapolation, il en découle que les caractéristiques mécaniques du massif à l'échelle de l'ouvrage sont *a priori* plus faibles que celles mesurées en laboratoire. Cette notion, illustrée par Hoek et al. (1994), traduit ce qui est couramment appelé « *l'effet d'échelle* », qui attribue la baisse des caractéristiques mécaniques de la masse rocheuse à l'accroissement du taux de discontinuités et de défauts au sein de ce volume.

Si cette notion est prépondérante dans un grand nombre de contextes géologiques et de configurations d'ouvrages, elle ne peut être suffisante pour justifier certaines observations et certains retours d'expériences issus du creusement d'ouvrages souterrains. Par exemple, l'effet d'échelle ne suffit pas à expliquer les phénomènes observés lors du creusement du tunnel ferroviaire de Tartaiguille (André et al., 1999), dans des marnes pouvant être considérées comme continues à une échelle décamétrique autour de l'ouvrage (Kleine, 2007b).

Après l'énumération des principaux facteurs susceptibles d'expliquer la réduction de la résistance de la roche in-situ, le comportement différé des roches est abordé via son identification en laboratoire et sur ouvrages. Un modèle de comportement radoucissant intégrant l'effet du temps est proposé, suivi de ses applications à l'excavation d'une galerie circulaire.

2. PROBLEMATIQUE

Dans de nombreuses configurations, les difficultés pour prédire le comportement des ouvrages interpellent et soulèvent des interrogations quant aux différents facteurs susceptibles de justifier cette inadéquation entre la prédiction et les observations. Sans préjuger de leur prééminence respective, certains facteurs d'influence ont été identifiés. L'**effet d'échelle**, qui conduit à réduire les caractéristiques mécaniques avec l'augmentation de la dimension d'étude. L'**effet de structure** : l'initiation et le développement d'un mécanisme de dégradation et de ruine d'un ouvrage dépendent des conditions de chargement et aux limites de la « structure ». Le **chemin de contraintes**, pris en compte dans les modélisations usuelles, uni ou bidimensionnelles, diffère de celui induit en réalité par le creusement. Des études, réalisées en 3D (Kleine, 2006a), montrent que le passage du front de taille est susceptible d'induire une dégradation supplémentaire du massif. Les **conséquences des conditions d'excavation** ne sont généralement pas intégrées dans les modélisations (par exemple, les dégradations induites par l'usage d'explosifs). Les **couplages** entre le comportement mécanique de la matrice rocheuse et les fluides présents dans ses vides sont souvent négligés. Le **prélèvement** et le **remaniement** des échantillons testés en laboratoire s'accompagnent souvent d'un endommagement, d'un échauffement éventuel et d'une désaturation de la roche. Le **comportement différé**, qui est associé à un effet du temps sur la réponse de la roche à une sollicitation mécanique.

3. LE COMPORTEMENT DIFFERE DES ROCHES

En laboratoire, le comportement différé des roches est généralement mis en évidence à partir de trois types d'essai : des essais de fluage, des essais de relaxation et des essais de chargement mécanique à vitesse imposée. Par ailleurs, le creusement d'un tunnel est un processus conduisant à charger le terrain de manière relativement lente, 1000 à 10000 fois plus lentement qu'en laboratoire. Or, une étude, réalisée sur les marnes de l'Aptien (Kleine, 2007a), montre que la diminution de la vitesse de chargement se traduit par une réduction significative de la résistance (figure 1). Ainsi, pour une configuration habituellement considérée comme du *court terme*, ne faisant pas *a priori* intervenir le comportement différé du matériau, la résistance du massif mobilisée durant le creusement de l'ouvrage est beaucoup plus faible que celle définie par les essais de laboratoire. Cette analyse montre que l'existence d'un comportement différé, aussi faible soit-il, s'accompagne d'une réduction à relativement court terme de la résistance apparente de la roche. En conséquence, le comportement différé est un phénomène important à prendre en compte, soit par la mise en œuvre de modèles viscoplastiques pertinents, soit par des approches plus simples n'intégrant pas le comportement différé mais considérant un seuil de résistance maximale représentatif.

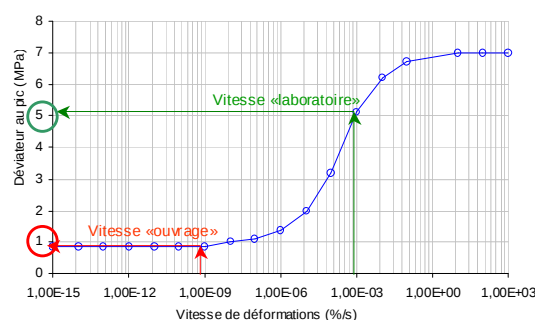


Figure 1 : Exemple d'évolution de la résistance en compression simple avec la vitesse de déformation.

4. MODELE RHEOLOGIQUE

4.1. NOTATIONS ET PARTITION DU TENSEUR DES DEFORMATIONS

Soient $\underline{\underline{\sigma}}$ le tenseur des contraintes, $\underline{\underline{s}}$ le tenseur déviatoire, I_1 la trace de $\underline{\underline{\sigma}}$, et s_{II} le second invariant de $\underline{\underline{s}}$: $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\text{tr}(\sigma_{ij})}{3} \delta_{ij}$, $I_1 = \text{tr}(\sigma_{ij})$, $s_{II} = \sqrt{s_{ij}s_{ij}}$. L'angle de Lode est défini par : $\theta = (1/3) \arccos(2^{1/2} 3^{3/2} \det(\sigma_{ij}) / s_{II}^3)$. Soient $\underline{\underline{\varepsilon}}$, $\underline{\underline{\varepsilon}}^e$, $\underline{\underline{\varepsilon}}^i$, les tenseurs des déformations totales, élastiques et irréversibles respectivement, ε_v , ε_v^e , ε_v^i , les déformations volumiques totales, élastiques et irréversibles respectivement, e_{ij} la partie déviatoire de ε_{ij} et γ^i la distorsion irréversible : $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{\text{tr}(\varepsilon_{ij})}{3} \delta_{ij}$, $\varepsilon_v = \text{tr}(\varepsilon_{ij})$, $\gamma^i = \int \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\varepsilon}_{ij}^i \dot{\varepsilon}_{ij}^i dt$. Conformément à la théorie de l'élastoplasticité : $\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} = \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^e + \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^i$. La déformation irréversible se décompose en un terme de déformation irréversible instantanée ε^{ep} et un terme de déformation irréversible différée ε^{vp} . Chacune de ces composantes est respectivement générée par un mécanisme élastoplastique et un mécanisme viscoplastique : $\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^i = \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{ep} + \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{vp}$.

4.2. MECANISME ELASTIQUE

La loi choisie est de type hypoélastique, de forme générale : $\dot{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{1}{2G} \dot{s}_{ij} + \frac{1}{9K} \dot{I}_1 \delta_{ij}$. Les modules de cisaillement G et volumique K dépendent de l'état des contraintes par la relation: $K = K_0^e [I_1 / 3P_a]^{n_{elas}}$ et $G = G_0^e [I_1 / 3P_a]^{n_{elas}}$, où P_a désigne la pression atmosphérique et K_0^e , G_0^e et n_{elas} sont des paramètres du modèle définis à partir d'essais de laboratoire.

4.3. MECANISME(S) ELASTOPLASTIQUE(S)

La surface de charge, écrite dans un formalisme en invariants, est définie par [Eq. 1] :

$$f^{ep}(\underline{\underline{\sigma}}, \kappa^i) = s_{II} H(\theta) - \sigma_c H_0^c [A(\kappa^i) s_{II} H(\theta) + B(\kappa^i) I_1 + D(\kappa^i)]^{a(\kappa^i)} = 0 \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$A(\kappa^i) = -\frac{m(\kappa^i)k(\kappa^i)}{\sqrt{6}\sigma_c H_0^c}, \quad B(\kappa^i) = \frac{m(\kappa^i)k(\kappa^i)}{3\sigma_c}, \quad D(\kappa^i) = s(\kappa^i)k(\kappa^i), \quad k(\kappa^i) = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2a(\kappa^i)}},$$

$$h(\theta) = (1 - \gamma \cos 3\theta)^{1/6}, \quad h_0^c = h(0^\circ) = (1 - \gamma)^{1/6}, \quad h_0^e = h(60^\circ) = (1 + \gamma)^{1/6},$$

$$H(\theta) = \frac{H_0^c + H_0^e}{2} + \left(\frac{H_0^c - H_0^e}{2} \right) \left(\frac{2h(\theta) - (h_0^c + h_0^e)}{h_0^c - h_0^e} \right).$$

σ_c désigne la résistance en compression simple, H_0^c est usuellement pris égal à h_0^c et H_0^e est un paramètre du modèle pilotant la résistance en extension. Sur un chemin de compression triaxiale ($\theta = 0^\circ$), le critère de plasticité correspond à un critère de Hoek et Brown généralisé. a , m et s évoluent en fonction d'un paramètre d'écrouissage κ^i défini en 4.6., selon des lois spécifiques. Sous l'effet d'un chargement de compression, cet écrouissage induit un comportement non-linéaire avant le pic de résistance (écrouissage positif) et un comportement post-pic radoucissant (écrouissage négatif). Ainsi, le mécanisme élastoplastique est virtuellement subdivisé en deux mécanismes : un mécanisme pré-pic, moteur de l'initiation d'une fissuration d'extension instantanée, et un mécanisme post-pic, traduisant la dégradation progressive du matériau, conséquence de l'initiation de la fissuration induite par les mécanismes pré-pic (instantanée) et viscoplastique (différée). Les déformations irréversibles

instantanées sont obtenues en appliquant la règle de normalité à une fonction potentielle G , dont l'expression est donnée par [Eq. 2].

4.4. MÉCANISME VISCOPLASTIQUE

Le calcul des déformations irréversibles différées ε^{vp} repose sur la théorie de Perzyna (1966). La vitesse de déformation viscoplastique s'exprime en fonction de la distance F entre le point de charge et la surface viscoplastique (surcontrainte) : $\underline{\dot{\varepsilon}}^{vp} = \langle \Phi(F) \rangle G$. La distance F est quantifiée par une expression du type [3]. G et $\Phi(F)$ caractérisent respectivement la direction et l'amplitude de la vitesse des déformations irréversibles. G s'obtient à l'aide des équations [Eq. 2] et $\Phi(F)$ est calculée par : $\Phi(F) = A_v (F/F_0)^{n_v}$, où A_v et n_v sont des paramètres du modèle et F_0 désigne la pression atmosphérique.

4.5. COMPORTEMENT VOLUMIQUE

Les lois d'écoulement des mécanismes irréversibles sont non-associées. Si f désigne f^{ep} pour les mécanismes élastoplastiques et F pour le mécanisme viscoplastique, la fonction potentielle G est de la

$$\text{forme : } G = \frac{\partial f}{\partial \sigma} - \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma} n \right) n, \text{ avec } n = \frac{\beta' \frac{s}{s_{II}} - Id}{\sqrt{\beta'^2 + 3}}, \beta' = \frac{\sqrt{6}g_v}{3 - g_v}, g_v = -\frac{2\sin\psi}{1 - \sin\psi} \quad [\text{Eq. 2}]$$

ψ désigne l'angle de dilatance et sa détermination diffère selon le mécanisme. Pour les mécanismes pré-pic et viscoplastique, le comportement volumique dépend de la position du point de charge par rapport à une *surface caractéristique*, introduite sur la base de justifications micromécaniques (Kleine, 2007a) et délimitant l'espace des contraintes en un domaine contractant et un domaine dilatant. Durant la phase de radoucissement post-pic, le comportement volumique est toujours dilatant, excepté à l'état résiduel où l'angle de dilatance s'annule (comportement purement frottant).

4.6. COUPLAGE DES MECANISMES

L'amplitude des déformations irréversibles instantanées et différées est fonction des positions respectives de la surface de charge f^{ep} et de la fonction de seuil viscoplastique F . Ces surfaces évoluent en fonction de la variable d'écrouissage κ^i . La distinction des mécanismes élastoplastiques pré et post pic ainsi que le couplage avec le mécanisme viscoplastique nécessitent une partition de la variable d'écrouissage. Soient κ_0^i , κ_1^i et κ_{visc}^i les variables d'écrouissage régissant respectivement l'évolution des mécanismes élastoplastiques pré-pic, post pic et viscoplastique. Si γ_0^i , γ_1^i et γ_{visc}^i désignent respectivement les déformations irréversibles *générées* par les mécanismes pré-pic, post-pic et viscoplastique, leur contribution peut ou non intervenir dans la variable d'écrouissage relative à chaque mécanisme. Plus précisément :

- L'écrouissage positif du mécanisme élastoplastique pré-pic est fonction uniquement des déformations déviatoires plastiques pré-pic : $\kappa_0^i = \gamma_0^i$.
- Le mécanisme viscoplastique évolue uniquement en fonction des déformations irréversibles différées : $\kappa_{visc}^i = \gamma_{visc}^i$.
- L'écrouissage du mécanisme élastoplastique post-pic est un peu plus subtil. Physiquement, cette phase d'écrouissage négatif doit traduire la dégradation des propriétés mécaniques de la roche,

proportionnellement à la dilatance. Mathématiquement, cela se traduit en faisant évoluer ou non le mécanisme post-pic : si le point de charge n'a pas encore atteint la surface caractéristique (contractance), le mécanisme post-pic n'est pas activé : $\kappa_1^i = 0$. Dès que le point de charge dépasse la surface caractéristique (dilatance), le mécanisme post-pic s'enclenche et évolue en fonction de $\kappa_1^i = \gamma_0^i + \gamma_{\text{visc}}^i$, si le critère de pic n'est pas atteint (mécanisme post-pic *activé* mais pas encore *actif*) et en fonction de $\kappa_1^i = \gamma_1^i + \gamma_{\text{visc}}^i$, en phase de radoucissement post-pic.

Ces conditions génèrent un couplage fondamental entre les 3 mécanismes : l'activation du mécanisme viscoplastique induit non seulement des déformations différées, mais génère implicitement un écrouissage négatif de la surface de charge du mécanisme élastoplastique post-pic. Ce couplage permet de traduire une dépendance avec le temps des caractéristiques mécaniques de la roche, et donc une dégradation progressive, sous l'effet d'un chargement mécanique variable ou constant, de la résistance de la roche.

5. EXEMPLES

Ce modèle rhéologique a été intégré, en langage C++, dans les logiciels FLAC et FLAC^{3D}. Il a été développé dans le cadre de projets d'ingénierie et doit permettre une interprétation rapide, claire et pertinente de certains critères de dimensionnement, tels que le niveau de dégradation de la roche, les zones de fissuration d'extension et d'accroissement de la perméabilité,...

Les exemples présentés visent à mettre en évidence l'effet de la viscosité sur le comportement à court et long termes d'un ouvrage souterrain. L'ouvrage de référence est une galerie circulaire de rayon $R=4\text{m}$ et l'état des contraintes initial est supposé isotrope d'amplitude $\sigma_0=16\text{MPa}$.

5.1. IDENTIFICATION DES PARAMETRES

Le matériau considéré est de type *roche argileuse* (Kleine, 2006b). La cinétique de fluage retenue est très faible, à la limite des possibilités des appareils de mesure. Ce choix permet de se placer dans une configuration où la viscosité pourrait être considérée comme négligeable. Des simulations d'essais triaxiaux à différentes vitesses de chargement sont présentées sur la figure 2.

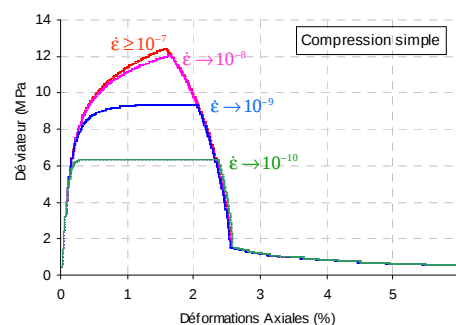


Figure 2 : Simulations d'essais triaxiaux à vitesse imposée sur un matériau argileux.

5.2. INFLUENCE DE LA VISCOSITE

Une première analyse consiste à visualiser les résultats des simulations obtenues avec les versions élastoplastique (viscosité inactive) et viscoplastique du modèle rhéologique. Les courbes contrainte-déformation, obtenues sur un chemin de compression triaxiale (à $10^{-5}/\text{s}$), coïncident avec les deux

versions ; à l'échelle du laboratoire, la viscosité semble donc négligeable. Le creusement de l'ouvrage est réalisé, de manière continue, à une vitesse de 2m/j, sans mise en place de soutènement ni de revêtement. La figure 3 présente l'état de dégradation de la roche autour du tunnel, obtenu avec les deux approches. L'épaisseur de la zone fracturée, 18 jours après le passage du front de taille, est estimée à 17.5%R avec l'approche viscoplastique et à 2.5%R avec l'approche élastoplastique. Alors que le processus de creusement est généralement considéré comme du *court terme*, l'approche viscoplastique prédit une fracturation plus importante et évolutive en parois de l'ouvrage.

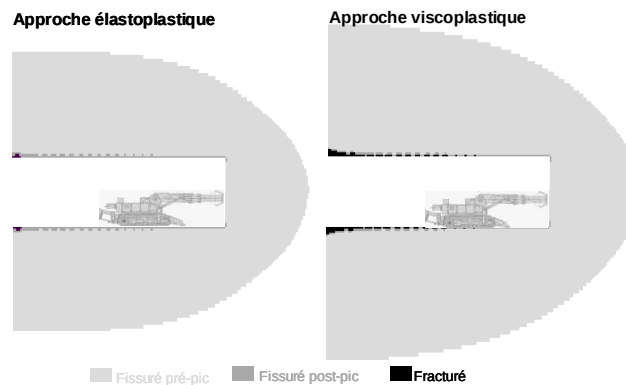


Figure 3 : Influence du modèle de comportement sur la dégradation du massif.

Par ailleurs, l'influence de la vitesse de creusement a également été mise en évidence par des modélisations viscoplastiques, réalisées à différentes vitesses d'avancement du chantier. L'épaisseur de la zone fracturée prédite par le calcul, varie de 12.5%R pour un creusement excessivement rapide, à 17.5%R pour un creusement très lent. Une réduction de la vitesse moyenne d'excavation s'accompagne d'une dégradation supplémentaire du massif, avec comme corollaire un accroissement du risque d'instabilité de l'ouvrage en l'absence provisoire d'un soutènement ou d'un revêtement.

5.3. INFLUENCE D'UN REVETEMENT

Le scénario envisagé ici consiste à poser un revêtement rigide (anneau de béton de 80cm d'épaisseur) à 5m du front de taille. La vitesse de creusement reste fixée à 2m/j. Deux calculs ont été menés : l'un avec le modèle élastoplastique et l'autre avec le modèle viscoplastique. L'évaluation de la contrainte maximale dans le béton, durant la phase d'excavation, montre que les efforts prédits par le calcul viscoplastique sont presque deux fois plus élevés que ceux prédits par le calcul élastoplastique, en fin de creusement (figure 4). De plus, contrairement à l'approche élastoplastique, l'approche viscoplastique permet d'analyser l'évolution des efforts dans le revêtement à *moyen* et *long* termes. La poursuite du calcul jusqu'à 100 ans montre que les efforts continuent à augmenter après l'excavation.

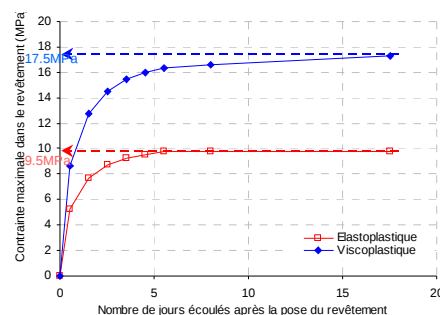


Figure 4 : Evolution des efforts dans le revêtement durant la phase de creusement.

5.4. COMPORTEMENT A LONG TERME

Les hypothèses des calculs présentés ci-dessous sont les mêmes que précédemment, sans mise en place de soutènement/revêtement. Après une excavation continue de 20m de galerie, une interruption prolongée du chantier est simulée. Les graphiques présentés sur la figure 5 montrent l'évolution de la fracturation en paroi de la cavité et en avant du front taille, sur une période de 4 ans.

Ce mécanisme de fracturation, initié par la création d'un *coin* décomprimé, délimité par une surface de fracturation en cisaillement, est similaire au mécanisme bien connu qui se développe sous une semelle de fondation. Il peut être à l'origine d'une instabilité du front, en particulier sous l'effet de forces gravitationnelles (non prises en compte ici). De tels résultats sont aussi représentatifs d'un mécanisme de fracturation par *chevron* qui a été observé lors de l'excavation de certains tunnels dans des milieux argileux (CFMR, 2000).

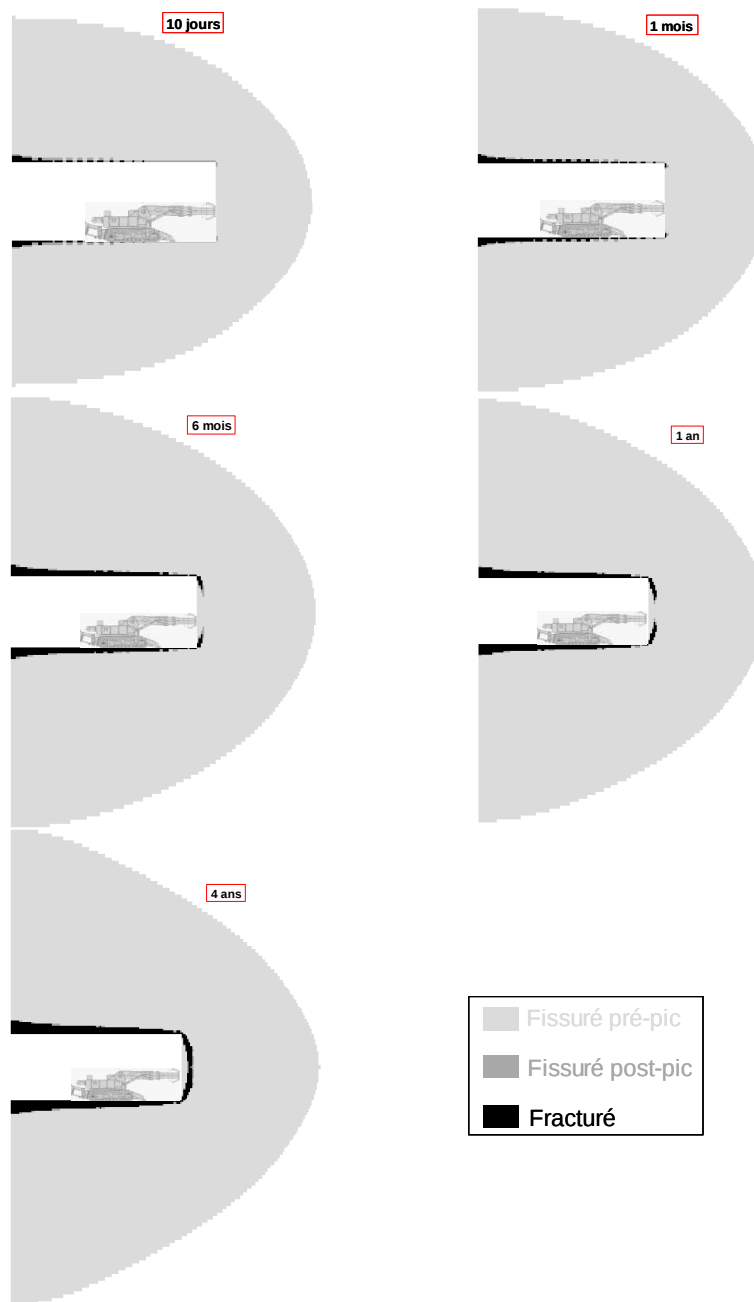


Figure5 : Dégradation progressive du massif en parois et en avant du front.

6. CONCLUSIONS

Les outils de modélisation et la démarche d'interprétation proposés ont permis de montrer l'apport de la prise en compte du comportement différé sur la représentativité des prédictions numériques du comportement d'un tunnel à court, moyen et long termes. La viscosité des géomatériaux est habituellement associée à la notion de *long terme* et, à ce titre, analysée de manière découplée du processus de conception à *court terme*. Or, il a été montré que le comportement différé a aussi une influence sur le comportement de l'ouvrage *en cours de creusement*. Il convient donc d'intégrer des essais de fluage au stade d'un projet d'ingénierie. Cependant, d'un point de vue expérimental, ce type d'essais est difficile à mettre en œuvre puisque la gamme des vitesses de sollicitation et l'amplitude des phénomènes induits sont de l'ordre de la limite de précision des appareils de mesure.

Le comportement différé est un phénomène, parmi d'autres, qui justifie la différence de résistance apparente entre les observations en laboratoire et le retour d'expérience issu des ouvrages. D'autres phénomènes ne doivent toutefois pas être négligés, en particulier les couplages hydro-mécaniques, qui peuvent avoir, dans le cas des roches argileuses, des temps caractéristiques du même ordre de grandeur que ceux du fluage-relaxation.

La spécificité du modèle rhéologique proposé ici, justifiée sur plusieurs ouvrages (Laigle, 2003), n'est pas seulement liée à la prise en compte du comportement différé, mais aussi à une formulation du comportement macroscopique de la roche adaptée dans le domaine des moyennes et grandes déformations (radoucissement).

7. BIBLIOGRAPHIE

- André D., Dardard B., Bouvard A., Carmes J., « La traversée des argiles du tunnel de Tartaiguille », *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, N°153, Mai/Juin, 1999.
- CFMR - Comité Français de Mécanique des Roches, *Manuel de mécanique des roches*, Tome 1, Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2000.
- Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F., « *Support of Underground Excavations in Hard Rock* », A.A. Balkema, 1994.
- Laigle F., « A New Viscoplastic Model for Rocks : Application to the Mine-by-test of AECL-URL », *Flac and Numerical Modeling in Geomechanics*, Eds Balkema Publisher, 2003.
- Kleine A., « Rapport d'avancement de thèse (2^{ème} année) », LAEGO-ENSG.LG.AK.EDF.PSI.RPRE.05.0087.A., 2006-a.
- Kleine A., « Dimensionnement des revêtements/soutènements. Hypothèses – propriétés mécaniques – critères d'interprétation – orientation de la contrainte horizontale majeure », Note technique interne EDF-CIH, 2006-b.
- Kleine A., « Modélisation numérique du comportement à court et long termes des ouvrages souterrains », Thèse INPL, à paraître, 2007-a.
- Kleine A., « Effets du comportement différé sur le creusement des tunnels », *Revue Française de Géotechnique*, à paraître, 2007-b.
- Perzyna P., « *Fundamental Problems in Viscoplasticity* », *Advances in applied mechanics*, vol. 9, Academic Press New York and London, 1966.