

ÉTUDE ANALYTIQUE DU COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE post-fermeture d'un ouvrage souterrain

Frédéric DELERUYELLE

Bureau d'expertise et de recherche pour la sûreté des stockages de déchets radioactifs

Henry WONG, Nathalie DUFOUR

Département génie civil et bâtiment (CNRS)

Les galeries d'accès à l'installation de stockage de déchets radioactifs en formation géologique argileuse profonde seront remblayées à la fin de leur période d'exploitation. Les revêtements de ces galeries, qui assurent leur stabilité mécanique, ne seront alors plus entretenus et, longtemps après la fermeture de l'installation, ils devraient perdre leur intégrité mécanique. Ceci devrait se traduire par des mouvements de convergence des argilites environnantes et, après reprise des éventuels vides de construction, par un tassement des remblais jusqu'à ce qu'un nouvel état d'équilibre mécanique soit atteint.

La question des conséquences hydromécaniques de ces tassements différés sur des remblais saturés en eau s'est posée au cours de l'examen par l'IRSN du Dossier 2005 Argile [Andra, 2005], relatif à la faisabilité d'un stockage profond de déchets radioactifs dans une formation géologique argileuse. Le rapport DSU n° 106 indique notamment que « la convergence différée [devrait] aller dans le sens d'une diminution du volume libre des ouvrages remblayés. Si ceux-ci sont saturés en eau, en fonction de la cinétique de la convergence différée et de la diffusivité hydraulique environnante, [...] la possibilité de créer un gradient hydraulique supplémentaire sous l'effet du comportement différé de la roche et des ouvrages serait à étudier ». Comme tout phénomène susceptible de modifier les régimes d'écoulement d'eau ou de transfert des radionucléides autour des ouvrages, celui-ci doit être étudié pour l'évaluation de la sûreté à long terme du stockage.

La question est difficile du point de vue mécanique car elle nécessite de prendre en compte, à l'échelle d'un ouvrage, un couplage

entre les comportements différé et hydromécanique des géomatériaux. Elle se pose également en dehors du contexte du stockage des déchets radioactifs lorsque l'impact hydrogéologique du comportement post-fermeture d'une installation souterraine doit être évalué. Des études relatives à l'hydrogéologie post-fermeture existent dans la littérature [Vermeulen et Usher, 2006, Oliver *et al.*, 2006, Van Biljon *et al.*, 2006] mais il en existe assez peu sur les interactions hydromécaniques provoquées par la fermeture d'une cavité profonde [Xu et Genin, 1994].

Avant de se lancer dans des modélisations numériques complexes, l'IRSN s'est intéressé à la recherche de solutions analytiques, afin de mieux comprendre les différents mécanismes mis en jeu, de voir la meilleure façon de les aborder, d'apprécier l'influence des différents paramètres et de se doter d'un cas-test qui permettra de conforter des modélisations numériques ultérieures plus sophistiquées. Ce travail a été réalisé en collaboration avec le département génie civil et bâtiment (URA 1652) de l'ENTPE et a abouti à des

solutions analytiques originales récemment publiées [Wong *et al.*, 2008a et 2008b]. D'autres développements, théoriques et numériques, sont encore en cours.

Cet article présente brièvement la démarche mathématique adoptée et les solutions analytiques obtenues. Il présente ensuite les résultats d'une étude paramétrique obtenus grâce à cette approche analytique. Il sera également l'occasion de mentionner d'autres axes de recherche poursuivis par l'IRSN dans le domaine de la géomécanique et d'en préciser les liens avec la question du comportement hydromécanique post-fermeture d'ouvrages souterrains.

Mise en équation analytique dans le cas d'une cavité sphérique

Le problème général décrit précédemment est simplifié en considérant une cavité sphérique⁽¹⁾ de rayon 'a' située à grande profondeur dans un milieu poreux saturé en eau. On utilise les coordonnées sphériques où 'r' représente la distance au centre de la cavité et 't' le temps. Les inconnues sont les champs de déplacement radial $u(r, t)$, de pression de pore $p(r, t)$ et le tenseur de contraintes $\sigma(r, t)$. Les vecteurs et tenseurs sont notés en gras.

Le comportement du milieu environnant est supposé poro-visco-élastique, c'est-à-dire représentatif d'un matériau poreux dont la réponse aux sollicitations mécaniques n'est pas instantanée. À l'instant initial 't₀', la cavité est supposée remblayée et en équilibre hydraulique avec le milieu environnant. Un revêtement, intégré à cet instant, s'oppose à la convergence de la roche. L'état de contrainte environnant est supposé hydrostatique, de la forme $-\Sigma_0 \cdot 1$ où ' Σ_0 ' est une contrainte totale (i.e. la somme d'une contrainte effective et d'une pression d'eau) et '1' le tenseur unité d'ordre 2. C'est à partir de cet instant qu'on considère que le revêtement se dégrade.

Le comportement du remblai est supposé poro-élastique, avec un module de compressibilité ' K_R '. Il est fait l'hypothèse d'un remblai beaucoup plus perméable que le milieu environnant et sa pression de pore est donc supposée uniforme. À l'instant initial, le remblai est saturé en eau et en équilibre hydraulique avec le milieu environnant. Les contraintes effectives ($\sigma + p \cdot 1$) à l'intérieur du remblai sont supposées nulles, ce qui correspond à un tassement initial nul, hypothèse pessimiste en termes d'amplitude du transi-

toire hydromécanique attendu lors de la dégradation du revêtement. La différence de contraintes effectives entre le remblai et le milieu environnant est reprise par le revêtement qui, à l'instant initial, assure l'équilibre mécanique de la paroi.

Le revêtement lui-même n'est pas modélisé. Seule la pression de soutènement ' $p_s(t)$ ' qu'il exerce sur la paroi est prise en compte. Celle-ci décroît au cours du temps et, à ce stade de l'étude, cette décroissance a été prise de la forme $p_s(t) = (\Sigma_0 - p_0) \cdot e^{-\kappa \cdot t}$ où ' κ ' représente une cinétique de dégradation. Cette forme exponentielle a été choisie pour sa simplicité et pour les multiples possibilités qu'elle offre en matière de cinétiques de dégradation, allant du revêtement pérenne ($\kappa = 0$) à la rupture instantanée ($\kappa = \infty$). Ultérieurement, des travaux relatifs au couplage entre la lixiviation et le comportement mécanique du béton [Nguyen, 2005 ; Torrenti *et al.*, 2008], réalisés au sein de collaborations IRSN-ENPC et IRSN-LCPC/ENS-Cachan, permettront d'améliorer cette représentation dans des modélisations numériques plus sophistiquées.

La modélisation du comportement visqueux du milieu environnant repose sur les travaux de [Coussy, 2004]. Deux approches, directe et fonctionnelle, ont été considérées.

Dans l'approche directe, le comportement du matériau est décrit par les relations suivantes :

$$(\sigma - \sigma_0) + (p - p_0) = K_0 (\epsilon - \epsilon^v) ; s - s^0 = 2\mu_0 (e - e^v)$$

$$(\sigma - \sigma_0) + (p - p_0) = \xi \epsilon^v + \zeta e^v ; s - s^0 = 2\chi e^v + 2\eta e^v$$

où ' σ ' est la contrainte moyenne, 'p' la pression de pore, ' ϵ ' la déformation volumique, ' v ' un indice haut signifiant une contribution visco-élastique, 's' le déviateur du tenseur de contrainte, 'e' le déviateur du tenseur de déformation et K_0 , μ_0 , ξ , ζ , χ et η des constantes.

Dans l'approche fonctionnelle, le comportement du matériau fait intervenir le produit de convolution de Stieltjes et les fonctions de relaxation suivantes :

$$K(t) = \left[K_\infty - (K_\infty - K_0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] H(t) ; \mu(t) = \left[\mu_\infty - (\mu_\infty - \mu_0) \exp\left(-\frac{t}{\theta_r}\right) \right] H(t)$$

où ' K_0 ' et ' K_∞ ' sont des modules de compressibilité du squelette solide respectivement instantané et à long terme, ' τ_r ' et ' θ_r ' des temps caractéristiques de relaxation en compression volumique et en cisaillement, ' μ_0 ' et ' μ_∞ ' des modules de cisaillement respectivement instantané et à long terme et 'H(t)' la fonction de Heaviside ($H(t \geq 0) = 1$; $H(t < 0) = 0$).

[Wong *et al.*, 2008b] a montré que ces deux approches étaient équivalentes pour le problème considéré ici. Dans les applications numériques qui seront présentées au paragraphe 4 du présent

(1) La géométrie d'un cylindre de longueur infinie serait plus représentative de celle d'un tunnel mais conduit à des solutions plus difficiles faisant appel aux fonctions de Bessel ; ce cas a néanmoins été résolu et sa publication est en cours.

article, ce sont les notations de l'approche fonctionnelle qui seront principalement utilisées. Les temps caractéristiques de fluage en compression volumique et en cisaillement ' τ_c ' et ' θ_c ' sont liés aux paramètres précédents de la manière suivante :

$$\frac{\tau_r}{\tau_c} = \frac{K_\infty}{K_0}; \quad \frac{\theta_r}{\theta_c} = \frac{\mu_\infty}{\mu_0}$$

À ce stade de l'étude, cette représentation du comportement visqueux a l'avantage d'être suffisamment simple pour se prêter au calcul analytique tout en étant une référence de la littérature. À un stade ultérieur, dans une modélisation numérique plus sophistiquée, d'autres lois telles que celle proposée par [Pellet *et al.*, 2005] pourront être envisagées. L'implémentation de cette dernière dans le code de calcul CAST3M est en cours dans le cadre d'une collaboration IRSN-CEA.

Résolution dans l'espace des transformées de Laplace

Ce chapitre présente les grandes lignes de la méthode de résolution et les solutions obtenues. Une présentation plus détaillée se trouve dans [Wong *et al.*, 2008a et 2008b].

On utilisera la méthode des transformées de Laplace, méthode bien connue pour transformer des équations différentielles en équations algébriques. La transformée de Laplace $\bar{f}(r,s)$ d'une fonction $f(r,t)$ est définie par :

$$\bar{f}(r,s) = L\{f(r,t)\} = \int_0^\infty f(r,t)e^{-st} dt$$

où 's' est le paramètre de la transformation.

Le problème considéré sur le domaine $r \geq a$ (*i.e.* le milieu environnant) est un problème à deux champs : celui de déplacement radial $u(r,t)$ et celui de pression de pore $p(r,t)$. La première équation générale du problème provient de l'équation d'équilibre mécanique du milieu environnant, $div\sigma + \rho g = 0$, qui peut ici se simplifier en $div(\sigma - \sigma^p) = 0$. Finalement, après quelques manipulations, celle-ci peut se mettre sous la forme :

$$div[2\mu_0(\mathbf{e} - \mathbf{e}^v) + \{K_0(\epsilon - \epsilon^v) - (p - p_0)\} \mathbf{1}] = 0$$

En considérant la transformée de Laplace de cette équation et en tenant compte de l'hypothèse de comportement visco-élastique du milieu environnant, (\mathbf{e}, ϵ) peuvent être substitués à $(\mathbf{e}^v, \epsilon^v)$ et on obtient :

$$\bar{\epsilon} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + 2 \frac{\bar{u}}{r} = \frac{p - p_0}{\omega(s)} \quad (\text{EG-1})$$

$$\text{avec } \omega(s) = K_0 \alpha(s) + \frac{4\mu_0}{3} \beta(s), \quad \alpha(s) = \frac{(1/\tau_c) + s}{(1/\tau_c) + s} \quad \text{et} \quad \beta(s) = \frac{(1/\theta_c) + s}{(1/\theta_c) + s}$$

La seconde équation générale provient de la diffusion hydraulique

de la pression de pore. Elle s'obtient de la façon suivante : l'équation de conservation de la masse de fluide et la loi de Darcy sont écrites en tenant compte de la condition initiale d'équilibre hydraulique. On obtient :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \lambda_h \Delta (p - p_0)$$

où ϕ est la porosité et λ_h la conductivité hydraulique du milieu environnant. Les hypothèses usuelles de petites déformations et d'incompressibilité de la matrice solide conduisent ensuite à :

$$\epsilon = \phi - \phi_0, \quad \text{et donc : } \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \lambda_h \Delta (p - p_0)$$

Enfin, la transformée de Laplace de l'équation précédente est reportée dans l'équation générale (EG-1) et donne :

$$\frac{\partial^2 (\overline{p - p_0})}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial (\overline{p - p_0})}{\partial r} - q^2 (\overline{p - p_0}) = 0 \quad (\text{EG-2})$$

$$\text{avec } q = \sqrt{\frac{s}{\lambda_h \omega(s)}}$$

Les conditions aux limites doivent également être écrites dans l'espace des transformées de Laplace. En supposant que l'eau est incompressible, la première condition à la limite exprime que la convergence de la cavité s'accompagne de l'expulsion d'un volume d'eau égal à la diminution de volume de la cavité. Elle est présentée ci-dessous sous ses deux formes, réelle et transformée :

$$\lambda_h \frac{\partial (p - p_0)}{\partial r}(a,t) = \frac{\partial u}{\partial t}(a,t); \quad \lambda_h \frac{\partial (\overline{p - p_0})}{\partial r}(a,s) = s \bar{u}(a,s) \quad (\text{CL-1})$$

La seconde exprime l'équilibre de la paroi de l'excavation sous l'effet des contraintes appliquées par le remblai, le revêtement et le milieu extérieur :

$$-\sigma_{rr}(a^-, t) + p_s(t) = -\sigma_{rr}(a^+, t); \quad -\bar{\sigma}_{rr}(a^-, s) + \frac{\Sigma_0 - p_0}{s + \kappa} = -\bar{\sigma}_{rr}(a^+, s) \quad (\text{CL-2})$$

Le signe négatif de σ_{rr} provient de la convention de signe pour l'état « en compression ». Le terme $\sigma_{rr}(a^-, t)$ représente la contribution du remblai et peut s'exprimer en fonction des inconnues 'u' et 'p' à la paroi de la façon suivante :

$$\sigma_{rr}(a^-, t) = 3K_R \frac{u(a,t)}{a} - p(a,t)$$

où ' K_R ' est le module de compressibilité du remblai. Le terme $\sigma_{rr}(a^+, t)$ représente la contribution du milieu environnant et peut également s'exprimer en fonction des inconnues à la paroi d'une manière un peu plus compliquée détaillée par [Wong *et al.*, 2008b].

Les deux équations générales EG-1 et EG-2, complétées des conditions aux limites CL-1 et CL-2 et des conditions initiales définissent complètement le problème mathématique pour $r \geq a$. Bien que la pression paraisse découplée dans EG-2, le couplage intervient

fortement dans les conditions aux limites. Ce système peut être complètement résolu dans l'espace des transformées de Laplace. La solution s'écrit :

$$\overline{p-p_0} = \overline{p-p_0} = \frac{\kappa(\Sigma_0 - p_0)}{\lambda_h} \frac{a^3}{r} \frac{e^{-q(r-a)}}{(1+qa)(s+\kappa)\Omega(s)}$$

$$\overline{u}(r,s) = \frac{a^3}{r^2} \frac{(\Sigma_0 - p_0)}{\Omega(s)} \left(\frac{1}{s+\kappa} - \frac{1}{s} \right) \left(\frac{1+qr}{1+qa} \right) e^{-q(r-a)} \quad (S-1)$$

$$\overline{\sigma}_{rr} = -\frac{\Sigma_0}{s} - 4\mu_0\beta(s) \frac{\overline{u}}{r} ; \overline{\sigma}_{\theta\theta} = -\frac{\Sigma_0}{s} + 2\mu_0\beta(s) \left(\frac{\overline{u}}{r} - \frac{\overline{p-p_0}}{\omega(s)} \right)$$

où $\Omega(s) = 3K_R + 4\mu_0\beta(s) + \frac{a^2s}{\lambda_h(1+qa)}$

La solution S-1 peut également être mise sous une forme adimensionnelle. Les variables adimensionnelles (ou « normalisées ») choisies sont notées avec une apostrophe et rassemblées dans le tableau suivant :

$r' = \frac{r}{a} ; u' = \frac{u}{a} ; t' = \frac{t}{\tau_h} ; \kappa' = \kappa\tau_h ; p' = \frac{p}{\Sigma_0} ; p'_0 = \frac{p_0}{\Sigma_0} ; K'_\infty = \frac{K_\infty}{\Sigma_0}$ $K'_0 = \frac{K_0}{\Sigma_0} ; \mu'_0 = \frac{\mu_0}{\Sigma_0} ; \mu'_\infty = \frac{\mu_\infty}{\Sigma_0} ; K'_R = \frac{K_R}{\Sigma_0} ; s' = s\tau_h ; \omega'(s') = \frac{\omega(s)}{\Sigma_0}$ $\omega'_c = \frac{\omega_c}{\Sigma_0} ; \Omega'(s') = \frac{\Omega(s)}{\Sigma_0} ; \tau'_c = \frac{\tau_c}{\tau_h} ; \tau'_r = \frac{\tau_r}{\tau_h} ; \theta'_c = \frac{\theta_c}{\tau_h} ; \theta'_r = \frac{\theta_r}{\tau_h} ;$ $q' = \sqrt{\frac{\omega'_c s'}{\omega'(s')}}$

Tableau 1 Définition des variables normalisées.

Le temps caractéristique 'τ_h' est choisi de sorte que $\tau_h = \frac{a^2}{\lambda_h\omega_c}$ où $\omega_c = K_0 + \frac{4}{3}\mu_0$.

En particulier, ω'(s') et Ω'(s') s'écrivent :

$$\omega'(s') = K'_0\alpha'(s') + \frac{4\mu'_0}{3}\beta'(s') ;$$

$$\alpha'(s') = \frac{(1/\tau'_c) + s'}{(1/\tau'_r) + s'} ; \beta'(s') = \frac{(1/\theta'_c) + s'}{(1/\theta'_r) + s'}$$

$$\Omega'(s') = 3K'_R + 4\mu'_0\beta'(s') + \omega'_c \frac{s'}{1+q'}$$

La solution analytique adimensionnelle dans l'espace des transformées de Laplace s'écrit alors :

$$\overline{p'-p'_0}(r',s') = \kappa'\omega'_c \frac{1-p'_0}{r'} \frac{e^{-q'(r'-1)}}{\Omega'(s')(1+q')(s'+\kappa')}

$$\overline{u'}(r',s') = \frac{1-p'_0}{r'^2} \frac{(1+q'r')e^{-q'(r'-1)}}{\Omega'(s')(1+q')} \left(\frac{1}{s'+\kappa'} - \frac{1}{s'} \right) \quad (S-2)$$

$$\overline{\sigma}'_{rr} = -\frac{1}{s'} - 4\mu'_0 \left(\frac{1/\theta'_c + s'}{1/\theta'_r + s'} \right) \frac{\overline{u}'}{r'}$$

$$\overline{\sigma}'_{\theta\theta} = -\frac{1}{s'} + 2\mu'_0 \left(\frac{1/\theta'_c + s'}{1/\theta'_r + s'} \right) \left(\frac{\overline{u}'}{r'} - \frac{\overline{p'-p'_0}}{\omega'(s')} \right)$$$$

Le retour de l'espace des transformées de Laplace à l'espace « habituel » n'est pas trivial. La définition générale de l'inverse d'une transformée de Laplace s'écrit :

$$f(r,t) = L^{-1}\{\overline{f}(r,s)\} = \int_{\Gamma-i\infty}^{\Gamma+i\infty} \overline{f}(r,s)e^{st} ds$$

et nécessite le calcul d'une intégrale dans le plan complexe. Lorsque ce calcul n'est pas possible analytiquement, on a recours à des algorithmes numériques tels que ceux de [Stehfest, 1970] ou de [Talbot, 1979]. C'est de cette manière qu'a été réalisée l'étude paramétrique du paragraphe ci-après.

Néanmoins, dans le cas de la cavité sphérique présenté dans cet article, deux cas particuliers existent où la solution (S-2) peut être inversée analytiquement. Il s'agit :

- du cas où le comportement du milieu environnant est simplement poro-élastique, i.e. sans viscosité. Ce cas est étudié en détail par [Wong et al., 2008a]. On le retrouve ici en faisant tendre vers l'infini les temps caractéristiques de fluage et de relaxation (τ_c, τ_r, θ_c, θ_r). Le champ de déplacement dans l'espace « habituel » prend alors la forme :

$$u'(r',t') = \frac{(p'_0-1)}{\omega r'^2} \left[g(r',t',\Omega_1) - g(r',t',\Omega_2) - A\varphi(r',t',\Omega_1) - B\varphi(r',t',\Omega_2) - C\varphi(r',t',-i\sqrt{\kappa'}) - D\varphi(r',t',i\sqrt{\kappa'}) \right]$$

où les fonctions g(r', t', Ω_i) et φ(r', t', Ω_i) et les constantes (A, B, C, D) sont données par [Wong et al., 2008a] ;

- du cas « général » poro-visco-élastique mais avec les hypothèses supplémentaires suivantes : τ_c = θ_c et τ_r = θ_r. Ces hypothèses sont inspirées des résultats de l'étude paramétrique présentée au paragraphe 4. Le champ de déplacement obtenu est alors de la forme :

$$\frac{r'^2}{1-p'_0} u'(r',t') = \Lambda(r',t',\kappa') - \Lambda(r',t',0)$$

où la fonction Λ(r', t', κ') est donnée par [Wong et al., 2008b].

Exemples d'applications – étude paramétrique

Cet article a pour but de montrer l'applicabilité de la solution analytique obtenue dans le cas général d'un comportement poro-visco-élastique du milieu environnant, de visualiser les mécanismes en jeu et d'apprécier l'influence de différents paramètres. La solution analytique (S-2), écrite dans l'espace des transformées de Laplace, est inversée numériquement à l'aide de l'algorithme de Stehfest. Les valeurs de référence des différents paramètres sont les suivantes :

$\Sigma_0 = 10 \text{ MPa}$; $p_0 = 5 \text{ MPa}$; $K_0 = 1\,680 \text{ MPa}$; $\mu_0 = 1\,890 \text{ MPa}$;
 $K_R = K_0/30 = 56 \text{ MPa}$;
 $k_h = 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$; $\lambda_h = 2,4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^4\text{N}^{-1}\text{s}^{-1}$; $K' = 2$; $\tau'_c = 12$; $\tau'_r = 4$
(i.e. $K_\infty = 560 \text{ MPa}$)
 $\theta'_c = 6$; $\theta'_r = 2$ *(i.e. $\mu_\infty = 630 \text{ MPa}$)*
 ce qui conduit aux paramètres adimensionnels suivants :
 $P'_0 = 0,5$; $K'_0 = 168$; $\mu'_0 = 189$; $K'_R = 5,6$

Tableau 2 Valeurs de référence des paramètres utilisées pour l'étude paramétrique.

Ces valeurs ne sont que des ordres de grandeur possibles des différents paramètres et ne doivent pas être considérées comme « établies » pour réaliser d'éventuelles études de sûreté relatives au site de Meuse/Haute-Marne.

Les résultats sont présentés sous leur forme adimensionnelle. La **figure 1** montre l'évolution de la pression de pore, du déplacement en paroi et des contraintes effectives en cinq rayons ($r' = r/a = 1 ; 1,1 ; 1,3 ; 1,6$ et $2,5$). L'évolution de la pression de pore présente un pic puis un retour à sa valeur initiale. La valeur du pic est d'autant plus élevée et le temps nécessaire à l'atteindre d'autant plus court que l'on est proche de la cavité. Les déplacements présentés sur la **figure 1b** sont rapportés au déplacement asymptotique de la paroi de l'excavation afin de varier dans l'intervalle $[0, 1]$. Les contraintes se stabilisent beaucoup plus vite que les déplacements, ce qui explique une échelle de temps limitée à $[0, 3]$ sur les **figures 1c** et **1d**. Ce point mérite d'être souligné car il montre que, pour des temps élevés, le fluage se produit pratiquement à contrainte constante. Pour ce qui concerne les contraintes effectives, la compression radiale diminue tandis que la compression circonférentielle augmente du fait de la dégradation du revêtement. Le comportement asymptotique dépend beaucoup de la compressibilité du remblai. Dans le cas présent, cette compressibilité explique la contrainte effective radiale faible mais non nulle sur la paroi de l'excavation aux temps élevés.

La **figure 2** montre l'effet de la cinétique de dégradation du revêtement κ' sur les pressions et contraintes circonférentielles. Elle confirme le rôle essentiel de ce paramètre dans cette étude. Pour les grandes valeurs de κ' , ce qui représente une rupture quasi instantanée du revêtement, la pression de pore à la paroi de l'excavation passe instantanément à la valeur de la contrainte hydrostatique initiale Σ_0 (soit $p' = 1$) puis retourne lentement à sa valeur initiale. Contrairement à la contrainte effective radiale, l'évolution de la contrainte effective circonférentielle n'est pas monotone et présente un maximum très localisé qui apparaît pour des temps

très courts, avec un pic d'autant plus pointu et élevé que la valeur de κ' est grande. Les effets visqueux sont complètement définis par la donnée des quatre temps caractéristiques ($\tau'_c, \theta'_c, \tau'_r, \theta'_r$), la lettre ' τ ' étant relative à la compression volumique, ' θ ' au cisaillement et les indices c et r respectivement au fluage (*creep*) et à la relaxation. Pour simplifier l'étude, ces paramètres ont été groupés par deux : (τ'_c, τ'_r) et (θ'_c, θ'_r). Pour chaque couple, les deux composantes ont été multipliées ensemble et successivement par un facteur $k = 1, 2, 5, \infty$, les autres paramètres restant à leur valeur de référence indiquée au **tableau 2**.

La **figure 3** montre l'évolution de la pression de pore normalisée en un point fixe situé près de la paroi ($r' = 1,1$). La **figure 3a** montre plus particulièrement l'influence du couple (τ'_c, τ'_r) et la **figure 3b** celle du couple (θ'_c, θ'_r). On voit que les variations du couple (τ'_c, τ'_r) (i.e. les temps caractéristiques de fluage et relaxation en compression volumique) ont peu d'effet sur le champ de pression. On a vérifié qu'il en était de même sur les champs de contraintes et de déplacements.

Ceci peut s'expliquer par le fait que les contraintes induites dans le milieu environnant par une pression appliquée sur la paroi d'une excavation sont essentiellement déviatoriques, comme le montre la **figure 4**. Les variations de contrainte moyenne, totale ou effective sont inférieures à 5 % de la contrainte hydrostatique initiale Σ_0 alors que celles de la contrainte déviatorique ($\sigma'_{rr} - \sigma'_{\theta\theta}$) peuvent atteindre 70 % (**figure 1**). Cette observation justifie l'hypothèse $\tau'_c = \theta'_c$ et $\tau'_r = \theta'_r$ mentionnée au chapitre 3 pour simplifier l'inversion analytique de la transformée de Laplace.

La dernière étude paramétrique concerne les effets de la compressibilité du remblai ' K_R ' et de la cinétique de dégradation du revêtement ' κ' '. La **figure 5** montre l'évolution en fonction du temps de la pression de pore en un point ($r' = r/a = 1,1$) pour différents modules de compressibilité normalisés du remblai $K'_R = 0, 50, 168$ et 504 . La première valeur (0) correspond à l'absence de remblai (cavité uniquement remplie d'eau) et la dernière correspond à un remblai trois fois plus raide que le milieu environnant. La cinétique de dégradation du revêtement est $\kappa' = 2$ sur la **figure 5a** et $\kappa' = \infty$ (rupture instantanée) sur la **figure 5b**.

L'influence de ces deux paramètres est clairement significative, ce que confirme la **figure 6** qui montre l'évolution en fonction du temps de la contrainte déviatorique ($\sigma'_{rr} - \sigma'_{\theta\theta}$) en $r' = 1,1$ pour les mêmes valeurs de K'_R et de κ' . On constate que la valeur maximale de la contrainte déviatorique peut apparaître pendant la phase transitoire, ce que ne pourraient pas voir des approches simplifiées basées sur seulement deux calculs élastiques réalisés avec des paramètres court et long termes.

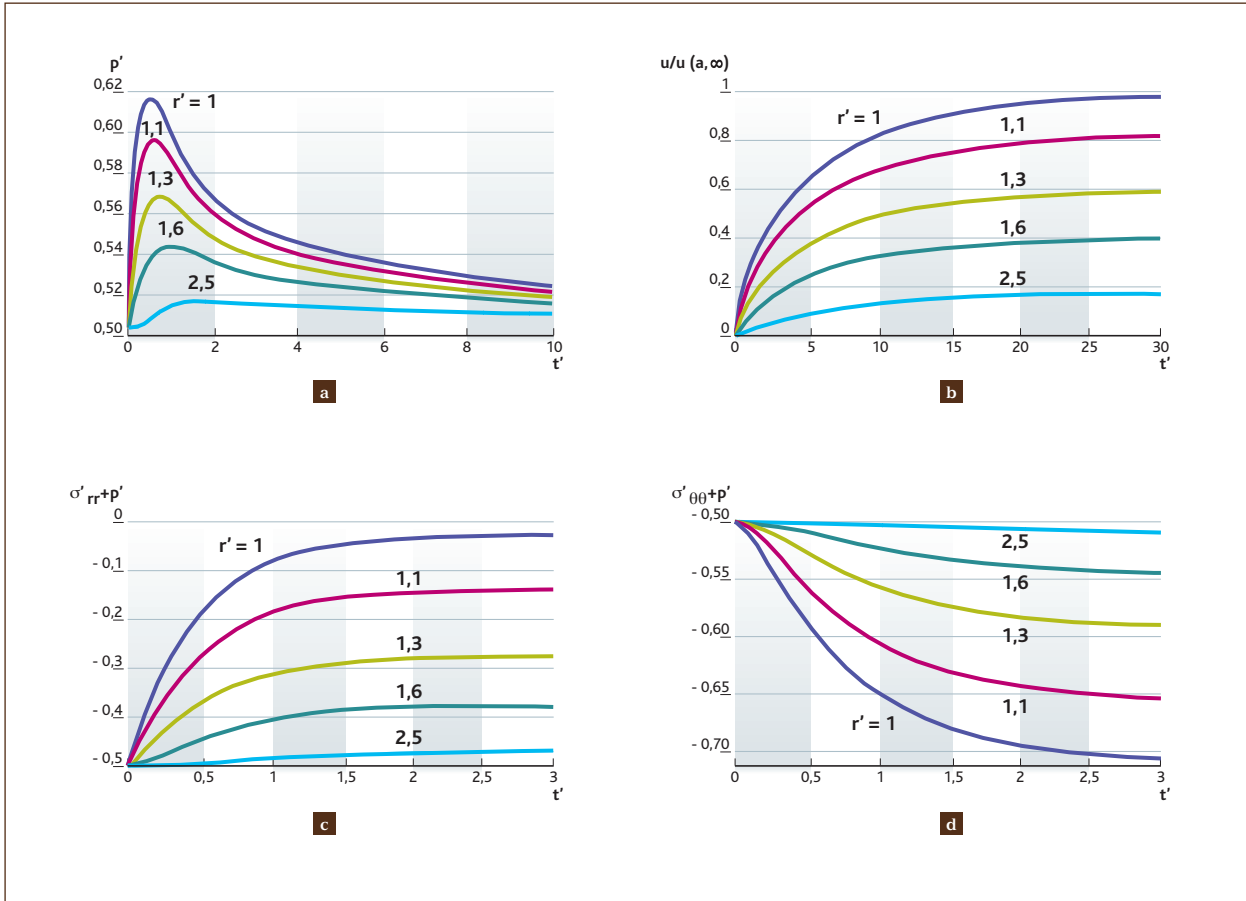


Figure 1 Évolution en fonction du temps et en différents rayons ($r' = r/a = 1 ; 1,1 ; 1,3 ; 1,6$ et $2,5$) de : **a**) le champ de pression normalisé p/Σ_0 ; **b**) le champ de déplacement normalisé u/u_∞ ; **c**) la contrainte effective radiale normalisée $(\sigma_{rr+p})/\Sigma_0$; **d**) la contrainte effective circonferentielle $(\sigma_{\theta\theta+p})/\Sigma_0$ normalisée.

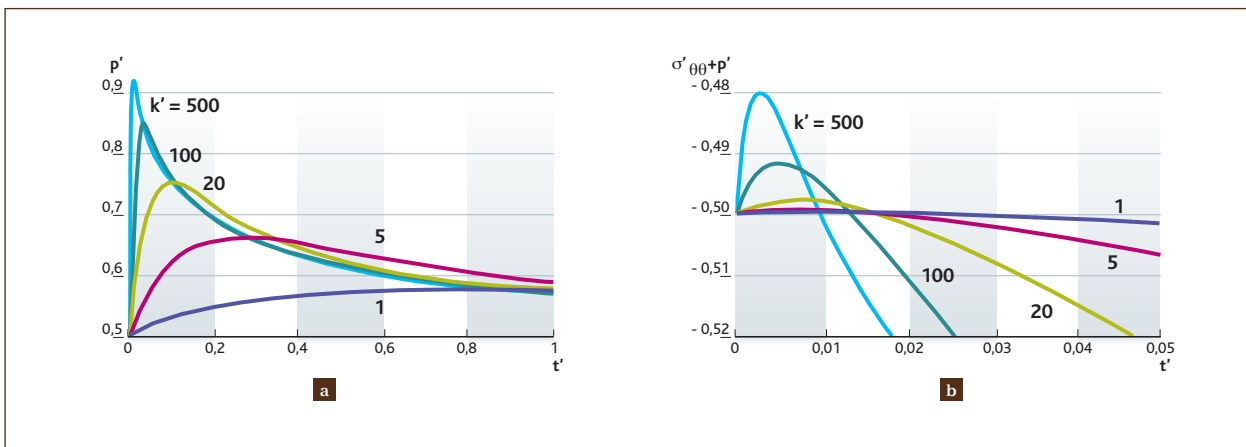


Figure 2 Évolution en fonction du temps, à la paroi de l'excavation ($r' = 1$) et pour différentes cinétiques de dégradation du revêtement ($k' = 1,5 ; 20 ; 100$ et 500) de : **a**) le champ de pression normalisé p/Σ_0 ; **b**) la contrainte effective circonferentielle $(\sigma_{\theta\theta+p})/\Sigma_0$. Les autres paramètres sont fixés à leur valeur de référence indiquée au tableau 2.

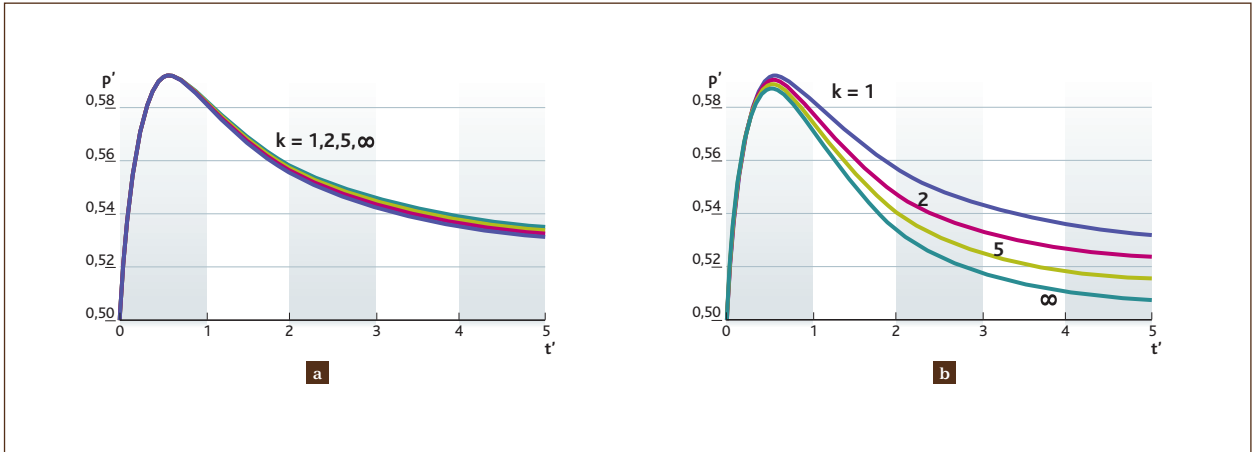


Figure 3 Évolution de la pression de pore en fonction du temps en $r' = 1,1$: **a)** les temps de fluage et de relaxation en compression volumique (τ'_c, τ'_p) sont successivement multipliés par un facteur $k = 1, 2, 5, \infty$; **b)** idem pour les temps de fluage et de relaxation en cisaillement (θ'_c, θ'_s).

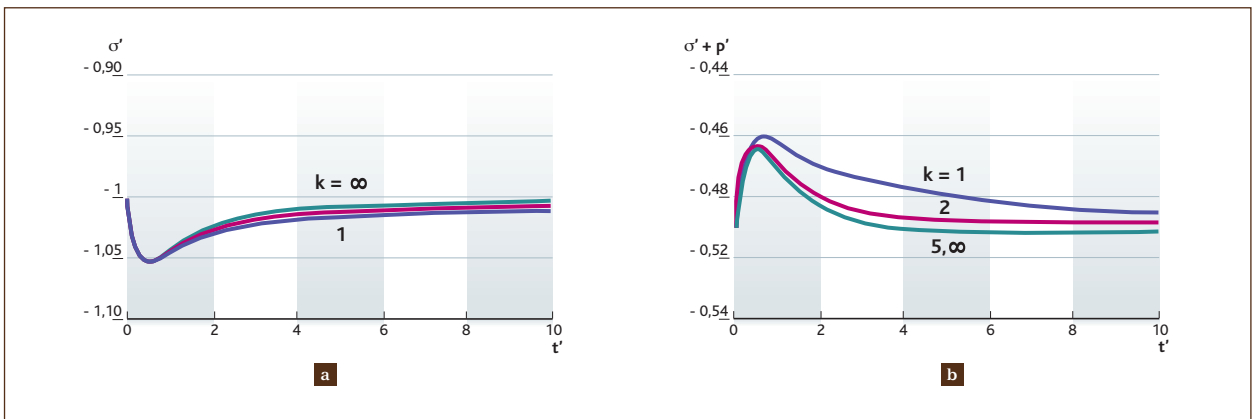


Figure 4 Évolution en fonction du temps en $r' = 1,1$ de : **a)** la contrainte totale moyenne normalisée ; **b)** la contrainte effective moyenne normalisée ($\sigma' + p'$). Les différentes courbes correspondent à des valeurs croissantes des temps de fluage et de relaxation (θ'_c, θ'_s) définies comme sur la figure 3b à l'aide du paramètre k .

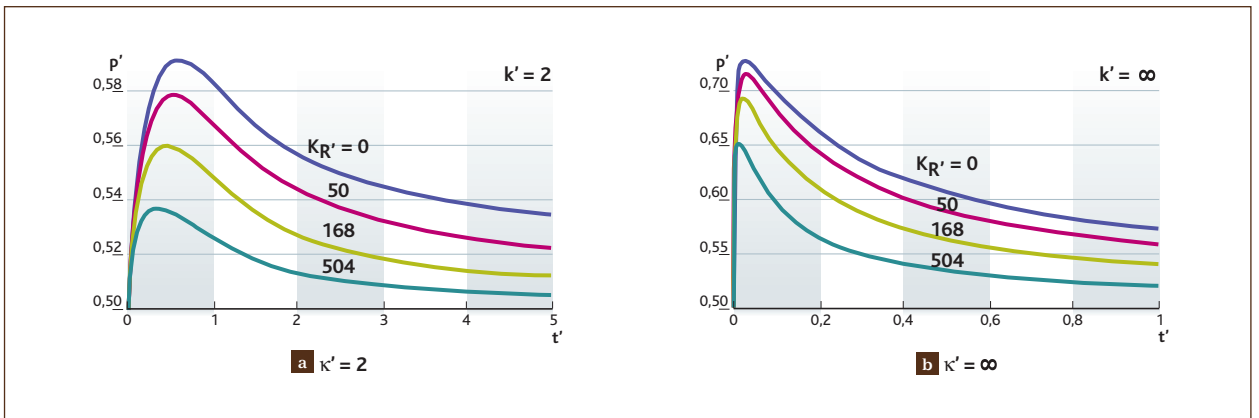


Figure 5 Évolution en fonction du temps en $r' = 1,1$ de la pression de pore pour différents modules de remblai normalisés $K'_R = 0, 50, 168$ et 504 avec : **a)** $\kappa' = 2$ et **b)** $\kappa' = \infty$ (rupture instantanée du revêtement).

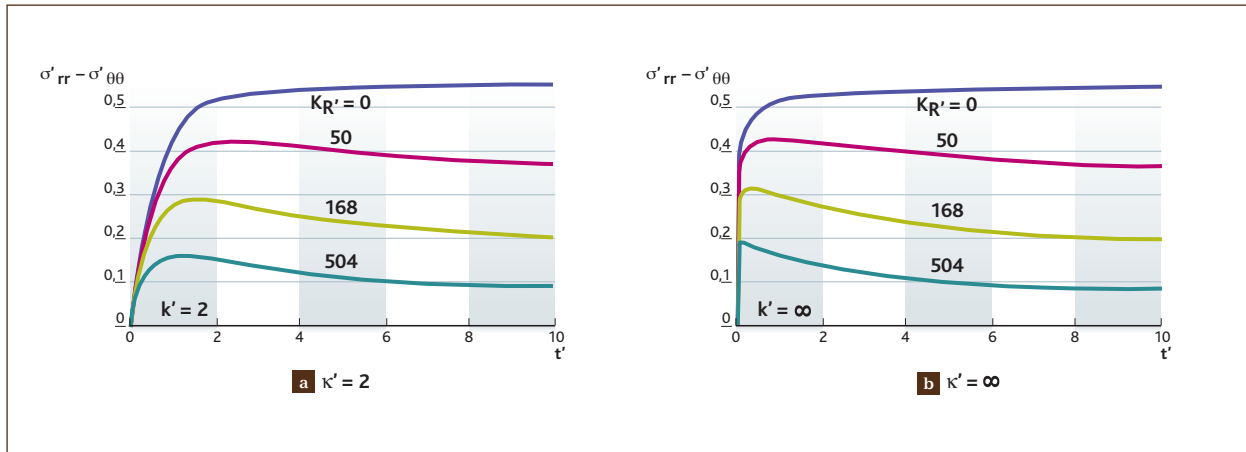


Figure 6 Évolution en fonction du temps en $r' = 1,1$ de la contrainte déviatorique ($\sigma'_{rr} - \sigma'_{\theta\theta}$) pour différents modules normalisés du remblai $K_{R'} = 0, 50, 168$ et 504 avec : a) $k' = 2$ et b) $k' = \infty$ (rupture instantanée du revêtement).

Conclusions

Au cours de l'examen du Dossier 2005 Argile s'est posée la question du comportement hydromécanique post-fermeture d'ouvrages souterrains. Une collaboration IRSN-CNRS/ENTPE a été engagée sur ce sujet et des solutions analytiques originales ont été obtenues.

L'ouvrage souterrain considéré est une cavité sphérique profonde supposée fermée et remblayée, dont le revêtement se dégrade au cours du temps. Dans le cas d'un comportement poro-élastique du milieu environnant, la solution analytique peut être complètement explicitée. Dans le cas plus difficile d'un comportement poro-visco-élastique du milieu environnant, la solution est totalement explicitée dans l'espace des transformées de Laplace et peut être ramenée dans l'espace « habituel », sous réserve d'hypothèses supplémentaires dont la validité est évaluée. La solution obtenue dans l'espace des transformées de Laplace peut également être exploitée directement, dans toute sa généralité, à l'aide d'algorithmes d'inversion numérique.

Cette approche analytique améliore notre compréhension des mécanismes mis en jeu et fournit un cas-test très utile pour conforter des calculs plus sophistiqués qui pourraient être réalisés avec des codes de calcul. Elle confirme la possibilité

de créer un gradient hydraulique supplémentaire sous l'effet du comportement différé de la roche et des ouvrages dont les conséquences, en termes de régime d'écoulement d'eau ou de transfert de radionucléides autour des ouvrages, restent à évaluer. Enfin, elle permet la réalisation d'études paramétriques dont un exemple est présenté.

L'étude paramétrique présentée montre que, pour la géométrie considérée, les temps caractéristiques de fluage et de relaxation en compression volumique du milieu environnant ont peu d'effet sur les résultats. Elle indique également que les extrema des évolutions de pression de pore et de contraintes peuvent être atteints pendant le transitoire hydromécanique, ce que ne pourrait pas déceler une analyse simplifiée basée sur seulement deux calculs élastiques avec des paramètres court et long termes. Elle montre enfin que les transitoires les plus importants sont généralement obtenus avec des cinétiques de dégradation de revêtement élevées et des remblais souples, ce qui confirme le rôle « clé » de ces deux paramètres et permet d'apprécier leur importance relative.

Remerciements

La contribution du Pr Chin Jian LEO, de *University of Western Sydney* (Australie), aux travaux présentés dans cet article mérite d'être soulignée.

Références

- Andra (2005). Dossier 2005 Argile – Tome architecture et gestion du stockage géologique.
- O. Coussy (2004). *Poromechanics*. John Wiley & Sons Ltd.
- V.-H. Nguyen (2005). Couplage dégradation chimique – comportement en compression du béton. Thèse ENPC, 4 octobre 2005.
- L.-J. Oliver, A.-H. Swart, C.-O. Brawner (2006). *In-service monitoring of water barrier project at South Deep Gold Mine*. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 106(5), p.351-354.
- F. Pellet, A. Hajdu, F. Deleruyelle, F. Besnus (2005). *A viscoplastic model including anisotropic damage for the time dependent behaviour of rock*. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanic*.
- H. Stehfest (1970). *Algorithm 368, Commun. Assoc. Comput. Mach*, 13(1), p.47-49.
- A. Talbot (1979). *The accurate inversion of Laplace transforms*. *J. Inst. Maths. Applics*. 23, p.97-120.
- J.-M. Torrenti, V.-H. Nguyen, H. Colina, F. Le Maou, F. Benboudjema, F. Deleruyelle (2008). *Coupling between leaching and creep of concrete*. *Cement and Concrete Research* 38, p.816-821.
- M. Van Biljon, A.-H. Swart, C.-O. Brawner (2006). *Geology, hydrogeology and structural competency of the boundary pillar at South Deep Gold Mine*. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 106(5), p.317-329.
- P.-D. Vermeulen, B.-H. Usher (2006). *An investigation into recharge in South African underground collieries*. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 106(11), p.771-778.
- H. Wong, M. Morvan, F. Deleruyelle, C.-J. Leo (2008a). *Analytical study of mine closure behaviour in a poro-elastic medium*. *Computers and Geotechnics* 35 (2008), p.645-654.
- H. Wong, M. Morvan, F. Deleruyelle, C.-J. Leo (2008b). *Analytical study of mine closure behaviour in a poro-visco-elastic medium*. *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 32, p.1,737-1,761.
- W. Xu et J. Genin (1994). *Closure of a nuclear waste repository deeply imbedded in a stratified salt bed*. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 116(4), p.567-573.