

# Comportement hydromécanique des géomatériaux : applications aux ouvrages souterrains



M. Souley

Après une période d'exploitation intense des mines, la France et d'autres pays européens sont confrontés aux problèmes posés par la fermeture et l'abandon de ces ouvrages, notamment leur stabilité mécanique sous l'effet d'une remontée

progressive des eaux souterraines après l'arrêt des pompages d'exhaure. Par ailleurs, la gestion des ressources naturelles (eau, gaz et hydrocarbures), explique le grand intérêt pour la communauté scientifique d'étudier le comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés, composés d'une matrice (roche poreuse et microfissures) et de fractures souvent disposées en réseaux. Enfin, l'exigence de sécurité et de fiabilité des sites de stockage, notamment de déchets radioactifs a donné lieu, depuis plus d'une vingtaine d'années, à des études approfondies sur le comportement thermohydromécanique de la roche hôte et des barrières ouvragées.

Ce sont quelques exemples de problématiques géoenvironnementales, mettant en jeu les comportements mécanique, hydromécanique et thermohydromécanique (THM) complexes et illustrant la nécessité de mieux comprendre les phénomènes s'y rattachant. L'approche adoptée dans cette recherche consiste à mener de front un travail expérimental, un travail de modélisation théorique des phénomènes (développements conceptuel et numérique) et un travail d'applications aux structures sur site. Plus précisément, à l'issue des essais en laboratoire et/ou d'observations *in situ* sur de nombreux matériaux (minerai de fer, argillites de l'Est et granite ; joints rocheux de granite, de schiste et de grès), plusieurs modèles conceptuels et lois de

comportement ont été développés. Ces modèles constitutifs ont été implantés dans des codes de calculs, et des applications à des cas réels ont été réalisées aussi bien pour des interprétations d'essais ou d'expériences *in situ* spécifiques que pour des rétro-analyses et des confrontations avec les mesures. Les applications concernent les structures de stockage de déchets radioactifs (laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne et celui de Manitoba au Canada creusés entre 400 et 500 m de profondeur, la mine de Kamashi au Japon située à 1000 m) et les ouvrages miniers (bassins houillers de Provence, bassins ferrifère et salifère lorrains) [3]. Cette méthodologie sera illustrée par trois exemples mettant en œuvre l'expérience, la modélisation théorique et les applications.

## EXEMPLE 1 : UN NOUVEAU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL POUR CARACTÉRISER LE COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE D'UNE MATRICE POREUSE ET FRACTURÉE

L'étude expérimentale, théorique et numérique du comportement hydro-mécanique de fracture isolée a été largement abordée dans la littérature depuis plusieurs décennies. C'est moins le cas lorsque la matrice constituant les épontes de la fracture est perméable (naturellement et/ou due à l'endommagement), à l'exception de quelques

### RÉFÉRENCES

- [1] MODEX-REP - Constitutive Model of the Meuse/Haute-Marne Argillites. EC Modex-Rep Project – Contract FIKW-CT-2000-0029 - Deliverable 2 & 3.
- [2] Souley M., Armand G., Su K., Wileveau Y. (2007). Modelling of the hydromechanical response of a shaft sinking in a deep claystone. Int. Symp. On Numerical Models in Geomechanics (NUMOGX) 25-27 April 2007, Rhodes (Greece), Pande & Pietruszczak (eds), Balkema, ISBN 978-0-415-44027-1, pp. 269-275.
- [3] Souley M. (2010). Comportement mécanique et hydromécanique des massifs rocheux : applications aux ouvrages souterrains. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches de l'INPL, Nancy, 100 p + 2 annexes.
- [4] Souley M., Lopez P., Boulon M., Thoraval A. (2010). Hydromechanical couplings between fracture and rock mass in the case of a fractured sandstone. Rock Mechanics and Rock Engineering (soumis).
- [5] Souley M., Su K., Ghoreychi M., Armand G. (2010). A viscoplastic behaviour including damage for deep argillaceous rocks: from in situ observations to constitutive equations. In: 4<sup>th</sup> Int. Symposium on "Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement", Nantes, France, March 29 - April 1<sup>st</sup>, 2010.



**FIGURE 1**  
DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ACCUEILLANT UN ÉCHANTILLON FRACTURÉ dont le pourtour et le forage d'injection d'eau sont imperméabilisés : la fracture comporte un collier amovible

études numériques. Un dispositif expérimental (figure 1), permettant de caractériser en même temps les écoulements dans la fracture et dans la matrice poreuse, mais aussi individuellement dans la fracture ou dans la matrice, a été mis au point en partenariat avec le laboratoire L3S de Grenoble. Les essais hydromécaniques réalisés sur un grès poreux et fracturé ont permis de progresser dans la compréhension des couplages hydromécaniques dans la fracture et la matrice, et leurs interactions. Il a été démontré que la perméabilité de la fracture à travers son ouverture hydraulique dépend aussi bien de sa fermeture mécanique que des contraintes effectives régnant dans les épontes [4]. De plus, ce dispositif offre l'opportunité de quantifier expérimentalement, avec précision, les échanges entre la fracture et la matrice.

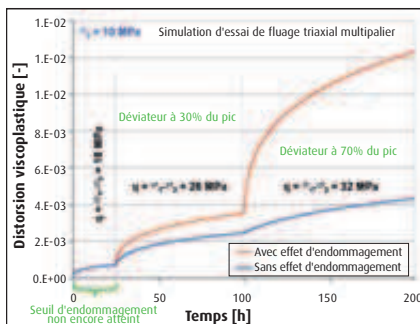
### EXEMPLE 2 : DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE RHÉOLOGIQUE POUR LES ARGILITES

Plus de 400 m de galeries horizontales au niveau principal de -490 m du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (LS/MHM) ont été équipés depuis avril 2005 pour les mesures continues de convergence et d'extension dans le but d'une meilleure compréhension de la réponse des argilites en fonction du temps à l'échelle de l'ouvrage souterrain. Ces mesures ont montré que :

- (a) les déformations viscoplastiques (ou différées) sont anisotropes et dépendent de l'orientation de la galerie par rapport à l'état initial des contraintes ;
- (b) les vitesses de déformations viscoplastiques observées dans les zones saines loin des parois de galeries sont du même ordre de grandeur que celles

obtenues sur échantillons en laboratoire. Les vitesses enregistrées dans la zone endommagée ou fracturée près des parois sont de 1 à 2 ordres de grandeur plus élevées. Ceci indique l'influence de l'endommagement et des fractures ouvertes sur les vitesses viscoplastiques. En s'appuyant sur ces observations et nos recherches antérieures, une loi de comportement endommageable-viscoplastique a été proposée pour les argilites de l'Est :

- à court terme, l'endommagement, la rupture et le comportement « post-pic » sont approchés par la théorie de plasticité basée sur la généralisation de Hoek & Brown récemment revisitée ;
- le comportement à long terme étend le modèle de Lemaitre modifié ;
- en première approximation, l'influence de l'endommagement et des fractures sur les déformations viscoplastiques est introduite dans l'énergie d'activation et l'écroissage à travers des évolutions en fonction de la variable d'endommagement. La figure 2 illustre la validation de la loi sur un chemin de contraintes n'ayant pas servi à l'identification des paramètres de loi (essai de relaxation) et l'apport de la nouvelle loi sur un chemin de fluage



**FIGURE 2**  
LOI DE COMPORTEMENT ENDOMMAGEABLE-VISCOPLASTIQUE. Mise en évidence de l'effet d'endommagement sur les déformations différées.

multiaxial et multipalier [5]. Par ailleurs, la plupart des essais mécaniques instantanés étant réalisés sur des échantillons d'argilites à l'état hydrique naturel (quasi saturé), en conditions pseudo-non drainées et sans mesure de la variation de pression de pore, le comportement hydromécanique a été, dans un premier temps, approché en contraintes totales. Les travaux en cours sont : d'une part, son application pour interpréter les mesures issues de différentes expériences *in situ* ; et d'autre part, son enrichissement en prenant en compte les deux phénomènes transitoires, couplages hydromécaniques et viscoplasticité.

### EXEMPLE 3 : APPLICATION AUX STRUCTURES DE STOCKAGE DES DÉCHETS AU LABORATOIRE SOUTERRAIN LS/MHM

Afin de caractériser le comportement mécanique, hydromécanique et thermohydromécanique des argilites du Callovo-Oxfordien, une grande campagne d'essais de laboratoire a été menée en 1995 et 2001 au cours de laquelle plusieurs centaines d'essais géomécaniques ont été réalisés par différents laboratoires nationaux et européens. Sur la base de ces essais, plusieurs modèles rhéologiques de prédiction du comportement à court terme et à long terme ont été développés dans le cadre du projet européen MODEX-REP ou de partenariat avec l'ANDRA [1]. Plus récemment, le comportement hydromécanique de ces argilites a également été étudié dans le cadre des expérimentations *in situ*, notamment l'expérimentation REP « réponse à l'excavation d'un puits », où des mesures en continu de pression de pore, de déformations

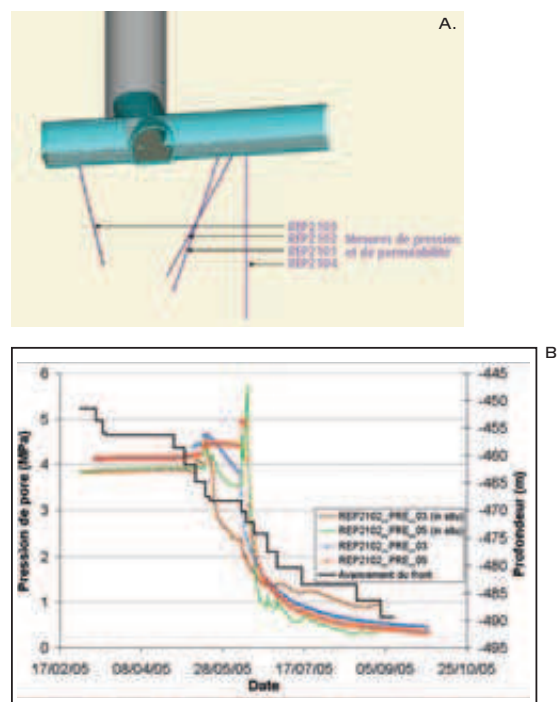
et de déplacements (extensomètres, convergensomètres et inclinomètres) ont été réalisées dans les forages à partir d'une niche située à -445 m au Laboratoire souterrain LS/MHM (figure 3). Les mesures de perméabilité (à l'eau) réalisées dans les chambres de mesure de pression dans les forages ont montré l'existence « vraisemblable » de deux zones distinctes : la première, adjacente à la paroi du puits, montrant de fortes valeurs de perméabilité correspondant à la zone perturbée au sens mécanique (EDZ) ; et l'autre zone, associée à des variations très modérées de la perméabilité, correspondant à la zone perturbée au sens hydraulique (EHZ). Un modèle conceptuel de variations de perméabilité autour du puits a donc été proposé. Ce modèle permet de combiner l'évolution empirique (issue des mesures *in situ*) de la perméabilité avec la distance radiale de la paroi dans l'EZH et l'évolution de la perméabilité liée à l'endommagement dans l'EDZ à travers la distorsion plastique considérée comme variable d'endommagement [2].

Ce modèle conceptuel est utilisé pour expliquer les variations de pression observées dans l'expérimentation REP. Les résultats sont montrés sur la figure 3. Le forage REP2102 est approximativement orienté dans la direction de la contrainte horizontale mineure : les chambres de mesure de pression PRE\_01, PRE\_03 et PRE\_05 sont respectivement situées à la distance radiale de 4,9, 2,7 et 1,7 m de la paroi du puits. La figure 3B montre la comparaison des pressions :

- le modèle prédit correctement la chute de pression après le passage du front ;
- dans les chambres (PRE\_01, PRE\_03 et PRE\_05), des surpressions plus élevées se sont développées. Le modèle et les mesures prévoient ces surpressions avant le passage du front. Cependant, en termes d'amplitude de surpression, le modèle tend à sous-estimer cette variation (relativement à la pression de pore initiale) comparée aux mesures, d'environ 0,5 MPa ;
- la baisse instantanée de la pression de pore à chaque séquence de fonçage est bien prédite. Ces résultats n'avaient pas pu être prédits sans la prise en compte de l'évolution de perméabilité dans l'EDZ et l'EZH.

Si le modèle conceptuel d'évolution de perméabilité a permis d'améliorer de manière significative les prédictions de pression en champ proche, il présente l'inconvénient d'utiliser en partie une relation basée sur un critère géométrique (distance radiale de la paroi du puits) plutôt qu'une grandeur intrinsèque du matériau en champ proche comme la porosité.

En conclusion, une méthodologie de modélisation en géomécanique a été proposée, basée sur la compréhension et la quantification des mécanismes physiques en jeu. Les applications s'inscrivent dans le cadre des problématiques liées à l'après-mine, à la gestion des ressources naturelles ou à la performance des structures de stockages. Notre retour d'expérience montre que, dans de nombreux cas, des hypothèses simplificatrices ne permettent pas d'expliquer les phénomènes multiphysiques de plus en plus complexes. Ceci justifie l'intérêt des recherches permanentes et pluridisciplinaires entreprises en France comme à l'étranger.



**FIGURE 3**

A. EXPÉRIMENTATION REP (réponse à l'excavation d'un puits) : vues des forages et chambres de mesures à partir de la niche

B. Confrontation entre mesures et modèle

## ABSTRACT

Research presented here is justified by several problematics in relation to the geoenvironmental applications: post-mining with regard to the mechanical stability of the abandoned mines due to a progressive rise of ground water after the end of the dewatering process; the deep underground storage of hydrocarbons or radioactive wastes. The approach adopted in this research consists to jointly undertake an experimental study, a theoretical modeling of physical phenomena (conceptual and numerical developments) and in situ applications.

On the basis of the laboratory tests and/or in situ experiments carried out on several geomaterials (iron ore, claystones and granite; rock joints of granite, schist and sandstone), several conceptual models and rheological laws were developed. These constitutive models were also implemented in numerical codes and applied to interpret specific in situ experiments and to perform retro-analyses with confrontations between measurements and predictions.

The practical applications involve structures of deep underground radioactive waste repository (such as the underground laboratory of Meuse/Haute-Marne in France) and the mining works. The details of methodology and the applications carried out are widely discussed in Souley (2010). Three examples are illustrated here:

- a new experimental device allowing to characterize the hydraulic exchanges between fracture and matrix in a double porosity environment,
- the developments of a macroscopic viscoplastic model of argillites aimed to improve the viscoplastic strain prediction in the EDZ (Extent of Damaged Zone) around the LS/MHM drifts are proposed based on the in situ observations,
- the modeling of REP experimentations (including the hydromechanical behaviour) at the underground laboratory of Meuse/Haute-Marne (LS/MHM).