



GEO Québec
2015

Challenges from North to South
Des défis du Nord au Sud

Résistance mécanique et pressions de fissuration de quelques matériaux rocheux sédimentaires typiques

Denis Labrie

CanmetMINES – Ressources naturelles Canada, Ottawa, Ontario, Canada

RÉSUMÉ

Des essais de compression et de microfissuration hydraulique ont été réalisés au Laboratoire de mécanique des roches de CanmetMINES à Ottawa, Ontario, pour déterminer la résistance mécanique, les modules de déformation élastique et les pressions de fissuration ou d'injection de quelques matériaux rocheux sédimentaires typiques. Ces travaux ont été entrepris d'abord pour caractériser les matériaux soumis aux essais, ensuite pour appuyer l'étude de projets éventuels de production, séquestration, stockage et/ou d'enfouissement de combustible naturel ou usé, de nature radioactive ou pas, à l'intérieur de ces mêmes matériaux. Les essais ont donné d'excellents résultats, autant en ce qui concerne leur cohérence que leur dispersion relative autour des moyennes mesurées. Les écarts observés s'expliquent principalement par les conditions de déposition ou de prélèvement, ou de façonnage des matériaux. Les essais de microfissuration en laboratoire ont permis de vérifier les méthodes usuelles de prédiction des pressions de fracturation hydraulique et d'écoulement des fluides à l'intérieur des matériaux rocheux intacts et fissurés, de faible porosité et/ou perméabilité. © Droits d'auteur protégés, Ressources naturelles Canada.

ABSTRACT

Compression and micro-fracking hydraulic tests were carried out at the CanmetMINING Rock Mechanics Laboratory in Ottawa, Ontario, to determine the mechanical strength, elastic deformation moduli and fracking pressures of some typical sedimentary rocks. These tests were initiated, first, to characterize the materials under investigation, and second, to support the assessment of eventual projects either in relation with shale gas extraction and/or CO₂ sequestration, with storage or disposal of natural or used fuels, of radioactive type or not, within these rocks. Test results were excellent, either considering their consistency or their relative dispersion around the mean. Variations observed can be explained mainly by the modes of deposition (formation) and/or retrieval of these rocks. Micro-fracking tests allowed the verification in laboratory of theoretical models currently used to predict hydraulic pressures for fracking and circulating fluids through rocks, either intact or fractured, with low porosity and/or permeability. © Copyright reserved, Natural Resources Canada.

1 INTRODUCTION

L'utilisation éventuelle de formations rocheuses sédimentaires comme sources d'approvisionnement non-conventionnelles en gaz et en pétrole lourd, ou comme sites de stockage ou de déposition de combustible à l'état naturel ou usé, de nature radioactive ou pas, est en forte croissance partout en Amérique du Nord et ailleurs dans le monde (OPG, 2015, Su et al., 2015, Séjourné et al., 2013, Niemi et al., 2012, Lee et al., 2011). De tels scénarios d'approvisionnement ou d'entreposage ne sauraient être réalisés sans une solide connaissance des conditions géologiques à l'intérieur desquelles de telles activités prennent place, et de l'évolution de ces conditions avec le temps. Ceci est d'autant plus vrai lorsque les effets doivent perdurer des centaines, voire des milliers d'années, comme c'est le cas pour l'enfouissement de matières radioactives (OPG, 2015, Su et al., 2015).

Des essais de compression et de microfissuration hydraulique ont été réalisés au Laboratoire de mécanique des roches de CanmetMINES à Ottawa, Ontario, pour déterminer la résistance mécanique, les modules de déformation élastique et les pressions de fissuration et/ou

d'injection de quelques matériaux rocheux sédimentaires typiques. Ces travaux ont d'abord été entrepris pour caractériser les matériaux soumis aux essais, et aussi pour appuyer l'étude d'éventuels projets liés à la production, au stockage ou à la séquestration de gaz et autre combustible, naturel ou usé, à l'intérieur de ces mêmes matériaux ou formations rocheuses. Les matériaux étudiés sont identifiés ci-après. Les méthodes de prélèvement des échantillons en chantier, et celles utilisées pour les essais en laboratoire sont décrites sommairement. Les résultats sont présentés. Leur signification et leur utilisation éventuelle dans le contexte des applications visées sont discutées.

2 MATÉRIAUX SOUMIS AUX ESSAIS

Trois (3) matériaux ont été utilisés pour le programme d'essai en laboratoire. Ce sont : (1) un matériau de shale provenant du Groupe de Lorraine et de Shale d'Utica à la hauteur de Québec, à l'intérieur des basses-terres du Saint-Laurent; (2) un matériau de calcaire provenant de la Formation de Cobourg, prélevé à Bowmanville à l'est de Toronto, Ontario; et (3) un matériau de ciment sans retrait

fréquemment utilisé comme matériau de compensation ou d'injection dans diverses applications industrielles, e.g. fondations et ancrages.

Les échantillons de shale ont été prélevés dans la région de Lotbinière sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, à l'ouest de Québec, lors de campagnes de forage et d'exploration effectuées entre 2006 et 2010 (BAPE, 2011). Les échantillons utilisés pour les essais ont été fournis par le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) du Québec, où ils étaient entreposés pour fin de recherche et d'archivage. Le calcaire de la Formation de Cobourg a été prélevé sous forme de gros blocs à la carrière Saint-Mary's Cement®, Bowmanville, à l'est de Toronto, Ontario. Deux de ces blocs ont été expédiés à une usine de pierre de taille pour y être coupés en blocs de dimensions réduites, afin de faciliter leur transport et leur manutention en laboratoire, e.g. dimensions finales de 50x40x40 cm. Une fois livrés au Laboratoire de mécanique des roches de CanmetMINES à Ottawa, Ontario, on aura procédé au forage de carottes et à la préparation des éprouvettes d'essai. Le calcaire d'essai est décrit à l'intérieur d'une publication précédente (Ghazvinian et al., 2013). Les éprouvettes de ciment ont été coulées et façonnées en laboratoire au même endroit, à partir de moules spécialement conçus à cette effet, e.g. moules de 7.5 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur. Le coulis de ciment SikaGrout® 212 sans retrait, lequel possède une résistance en compression uniaxiale nominale de 58 MPa après 28 jours, a été utilisé pour les essais (Sika, 2014). Les méthodes de prélèvement des matériaux en chantier et de façonnage des éprouvettes en laboratoire sont illustrées aux Figures 1 à 3.

Une fois coupés à la longueur désirée, les éprouvettes d'essai ont été rectifiées et vérifiées conformément aux procédures suggérées. Les dimensions des éprouvettes ont été mesurées, et les tolérances indiquées pour la planéité, le parallélisme et la perpendicularité des faces par rapport à l'axe de chargement, ont été vérifiées (ASTM, 2015d). Leur masse a été mesurée et leur densité volumique a été déterminée. Les temps de voyage des ondes, e.g. ondes P et S, ont été mesurés, et les vitesses sismiques propres à chacun des matériaux ont été déterminées (ASTM, 2015b). Les propriétés physiques moyennes des matériaux utilisés pour le programme d'essai sont montrées au Tableau 1.

3 RÉSISTANCE ET MODULES DE DÉFORMATION ÉLASTIQUE DES MATÉRIAUX

Les essais de compression ont été réalisés au Laboratoire de mécanique des roches de CanmetMINES à Ottawa, Ontario, sur un système de chargement servo-hydraulique de marque MTS, Modèle 815 (MTS, 2015). Le système comporte quatre (4) modules de base, lesquels sont : (1) un module de chargement axial d'une capacité nominale maximale de 2.6 MN avec le système installé en configuration triaxiale; (2) une cellule triaxiale d'une capacité de confinement maximal de 140 MPa; (3) un circuit de pressurisation hydraulique (*pore pressure*) de même capacité, soit 140 MPa, pour réaliser des essais



Figure 1. Forage dans les basses-terres du Saint-Laurent et carottage à l'intérieur du Groupe de Lorraine et de Shale d'Utica, région de Lotbinière, Québec (haut); éprouvettes sciées lors de la description géologique pour fin d'analyse et archivage (bas).



Figure 2. Forage et rectification en laboratoire des éprouvettes de calcaire de Cobourg à partir de blocs de roche prélevés à la carrière Saint-Mary's Cement®, Bowmanville, Ontario.



Figure 3. Coulée et façonnage en laboratoire d'éprouvettes de gypse et de ciment, et compensation des éprouvettes de shale sciées fournies par le Ministère (MERN).

Tableau 1. Propriétés physiques des matériaux testés

Propriété	Shale d'Utica ¹	Shale d'Utica-Ciment ²	Calcaire de Cobourg	Ciment d'injection
Densité (g/cm ³) ³	2.63 ±0.05 ⁴	2.49 ±0.04	2.67 ±0.01	2.24 ±0.03
Vitesse Onde-P (km/sec)	2.00 ±0.37	2.32 ±0.39	4.00 ±0.46	4.10 ±0.06
Vitesse Onde-S (km/sec)	1.27 ±0.21	1.46 ±0.08	2.42 ±0.28	2.10 ±0.05

¹ shale uniquement, intact, éprouvettes non-compensées pour la partie manquante

² matériau composite shale-ciment, endommagé, éprouvettes compensées pour la partie manquante

³ densité moyenne des éprouvettes après préparation

⁴ valeur moyenne et écart-type

de fissuration et d'écoulement à l'intérieur de matériaux rocheux; et (4) un circuit de température pour permettre la réalisation d'essais à des températures comprises entre 20 et 200 °C, pour une période d'environ 24 heures. Le système de chargement est également équipé d'un module de contrôle automatique, entièrement informatisé, pour réaliser des essais et acquérir les données. Les trois (3) premiers modules du système de chargement ont été utilisés lors du présent programme d'essai.

3.1 Résistance en tension

La résistance en tension a été déterminée à l'aide de l'essai en compression diamétrale, e.g. un essai indirect de tension communément appelé essai Brésilien (ASTM, 2015a, 2015c). L'essai est réalisé en comprimant l'éprouvette de roche de façon diamétrale, sur ses côtés. La résistance en tension σ_T est donnée par l'expression suivante :

$$\sigma_T = 2 \cdot P / \pi \cdot D \cdot L \quad [1]$$

Dans cette équation, P représente la force appliquée, et D et L, le diamètre et la longueur de l'éprouvette, respectivement. Les éprouvettes ont été chargées à un taux de chargement constant de 0.1 kN/sec concernant les matériaux de shale et de ciment, et de 0.2 kN/sec pour le calcaire, de façon à obtenir la rupture entre 1 et 10 minutes après le début du chargement, tel que prescrit par la norme d'essai (ASTM, 2015c). Les valeurs de résistance déterminées sont montrées au Tableau 2. On notera que tous les essais ont été réalisés en insérant des bandes de contre-plaqué de 4 mm d'épaisseur à l'interface, pour éliminer tout risque de broyage des éprouvettes au contact avec les plateaux de chargement et ainsi assurer la validité des résultats d'essai (ASTM, 2015a).

3.2 Résistance en compression uniaxiale

L'essai de compression uniaxiale est réalisé par simple compression de l'éprouvette d'essai dans sa direction axiale (ASTM, 2015e). La résistance en compression uniaxiale C_0 est donnée par l'expression suivante :

$$C_0 = P / A \quad [2]$$

Dans cette équation, outre les symboles déjà définis, A représente l'aire de la section droite de l'éprouvette. Les éprouvettes ont été chargées à un taux de déplacement axial constant de 0.0020 mm/sec dans le cas des matériaux de shale et de ciment, et de 0.0011 mm/sec dans le cas du calcaire. Ce mode de chargement assure un plein contrôle au moment de la rupture de l'éprouvette, et limite au minimum le risque de dommage éventuel aux équipements en raison du relâchement rapide de la pression et de l'énergie accumulée. Ce mode de chargement rend aussi possible la poursuite de l'essai au-delà du pic de résistance, et ainsi la détermination de la résistance résiduelle du matériau fissuré. Ce dernier avantage devient manifeste dans des conditions de chargement triaxial, comme on le verra au paragraphe suivant. Les valeurs de résistance en compression uniaxiale déterminées pour l'ensemble des matériaux testés sont montrées au Tableau 2.

3.3 Résistance en compression triaxiale

L'essai de compression triaxiale est réalisé de la même manière que l'essai de compression uniaxiale précédent, en respectant la même norme d'essai et le même mode de chargement, après confinement de l'éprouvette dans toutes ses directions, e.g. confinement isotrope triaxial. La résistance est également déterminée à l'aide de

l'équation 2, en spécifiant le niveau de confinement exercé tel qu'indiqué par l'indice ajouté à la droite du symbole utilisé, e.g. C_0 , C_4 , C_{10} , etc. Les valeurs de résistance triaxiale déterminées pour l'ensemble des matériaux testés sont montrées au Tableau 2.

3.4 Modules de déformation élastique

Deux modules de déformation sont habituellement utilisés pour caractériser le comportement élastique des matériaux rocheux homogènes intacts. Ce sont : (1) le module de Young E ; et (2) le coefficient de Poisson ν du matériau, tels que définis par les équations suivantes :

$$E = P / (A \cdot \varepsilon_a) , \text{ et} \quad [3a]$$

$$\nu = \varepsilon_c / \varepsilon_a \quad [3b]$$

Dans ces équations, outre les symboles déjà définis, ε_a et ε_c représentent les déformations axiale et circonférentielle (ou radiale) de l'éprouvette, respectivement. Pour simplifier les équations, seules les variables sont montrées. Les modules d'élasticité sont déterminés en utilisant la partie linéaire des courbes contrainte-déformation observées, avec un intervalle de calcul généralement compris entre 35 et 65% de la contrainte maximale mesurée lors de l'essai. Les valeurs de modules déterminés pour l'ensemble des matériaux testés lors du programme

Tableau 2. Résistance mécanique et modules de déformation élastique des matériaux rocheux testés

Propriété	Shale d'Utica ¹	Shale d'Utica-Ciment ²	Calcaire de Cobourg ³	Ciment d'injection
Résistance σ_T (MPa) ⁴	N/D ⁵	7.2 ±1.8 ⁶	8.2 ±1.5	6.2 ±0.9
Résistance C_0 (MPa)	98.5 ±28.9	53.4 ±24.5	96.0 ±17.5	59.6 ±11.1
Résistance C_4 (MPa)	N/D	82.3 ±17.5	N/D	N/D
Résistance C_{10} (MPa)	N/D	106.8 ±21.7	162.9 ±7.7	98.77 ±9.0
Résistance C_{20} (MPa)	N/D	N/D	208.8 ±21.8	N/D
Module de Young E (MPa)	16766 ±4677	10888 ±3442	31478 ±2904	15963 ±2614
Coefficient de Poisson ν	N/D	0.227 ±0.162	0.231 ±0.046	0.154 ±0.027

¹ shale uniquement, intact, éprouvettes non-compensées pour la partie manquante

² matériau composite shale-ciment, endommagé, éprouvettes compensées pour la partie manquante

³ éprouvettes testées perpendiculairement au plan de litage

⁴ résistance déterminée à l'aide de l'essai de compression diamétrale de type Brésilien, ou tension indirecte (ASTM, 2015a, 2015c)

⁵ valeur non-disponible (N/D)

⁶ valeur moyenne et écart-type



Figure 4. Équipement de chargement et montage d'essai utilisés pour les essais (haut), et exemples d'éprouvettes brisées tel qu'observées à la fin du programme d'essai en laboratoire (milieu et bas).

d'essai sont montrées au Tableau 2. Quelques photos du bâti de chargement, du montage d'essai utilisé et des éprouvettes testées sont montrées à la Figure 4.

4 ESSAIS DE MICROFISSURATION HYDRAULIQUE RÉALISÉS EN LABORATOIRE

Des essais de microfissuration hydraulique ont été réalisés en laboratoire avec les trois (3) matériaux utilisés pour le présent projet, afin de : (1) vérifier la capacité du système de chargement de simuler efficacement en laboratoire, à petite échelle, le phénomène de fracturation hydraulique; (2) confirmer l'applicabilité des théories usuelles de calcul pour estimer les pressions de terrain en chantier, et prédire les pressions de fissuration à l'intérieur des matériaux rocheux intacts et d'écoulement

du fluide une fois le matériau fissuré; et (3) examiner le type de fracture obtenue en comparaison avec celui anticipé en chantier au voisinage des trous de forage. Ces éléments de vérification sont explicités à l'intérieur des paragraphes suivants.

4.1 Prédiction des pressions de fissuration et d'écoulement à l'intérieur des matériaux rocheux

La théorie suggérée pour prédire la pression hydraulique à exercer à la paroi d'un forage ou d'un cylindre creux, suffisante pour fissurer un matériau rocheux intact, est celle proposée par Schmitt et Zoback (1993) et Haimson et Cornet (2003). Cette théorie de base, dérivée des équations de Lamé et de Kirsch pour étudier la distribution des contraintes autour d'une cavité circulaire cylindrique percée en milieu fini ou infini, a été proposée originalement pour déterminer le tenseur de contrainte naturel à l'intérieur des massifs rocheux, e.g. tenseur *in situ*, dans le cas d'un massif homogène en postulant une des contraintes principales parallèle à l'axe du forage ou de la cavité. Dans le cas d'un forage vertical percé en milieu infini, et pour fin de simplification, considérant la contrainte horizontale σ_H ou radiale σ_R isotrope, e.g. identique dans toutes les directions, la pression de fissuration Q_0 est donnée par l'expression suivante :

$$Q_0 = 2 \cdot \sigma_H + T_0 - P_P = 2 \cdot \sigma_R + T_0 - P_P \quad [4]$$

où T_0 est la résistance en tension du matériau rocheux, déterminée à l'aide de l'essai de compression diamétrale de type Brésilien par exemple, et P_P , la pression interstitielle. Dans le cas de matériaux faiblement poreux et/ou peu perméables, la pression P_P est généralement postulée égale à la contrainte horizontale radiale $\sigma_H = \sigma_R = P_0 = P_P$ (Schmitt et Zoback, 1993).

Dans le cas d'un milieu fini, comparable aux conditions observées en laboratoire lors d'un essai de compression triaxiale par exemple, l'équation 4 doit être modifiée pour tenir compte de la géométrie de l'éprouvette, e.g. cylindre creux avec cavité axiale. Celle-ci s'écrit alors de la façon suivante, dérivée des expressions proposées par Dally et Riley (1978) et Schmitt et Zoback (1993) :

$$Q_0 = \{[2 \cdot D_E^2 \cdot P_0 + (T_0 - P_P) \cdot (D_E^2 - D_I^2)] / (D_E^2 + D_I^2)\} \quad [5]$$

où D_E et D_I sont les diamètres externe et interne de l'éprouvette d'essai ou de la cavité, respectivement. Dans des conditions de chargement triaxial, P_0 est remplacé par σ_3 , égal au niveau de confinement de l'éprouvette d'essai. Par ailleurs, on peut vérifier que pour un D_I petit par rapport à D_E , celui-ci devient alors négligeable et on retrouve l'expression de l'équation 4 pour un milieu infini.

4.2 Essais de microfissuration réalisés au Laboratoire de mécanique des roches de CanmetMINES

Des essais ont donc été réalisés pour reproduire en laboratoire, à petite échelle, les conditions de fissuration observées en chantier, en vraie grandeur, lors d'essais de fracturation hydraulique (Haimson et Cornet, 2003). Le même type d'éprouvettes que celles utilisées pour les

essais précédents, pour déterminer la résistance et les modules de déformation élastique du matériau, a été utilisé pour procéder à cette nouvelle série d'essais. Les échantillons ont été coupés et rectifiés à la longueur désirée, e.g. diamètre et longueur nominaux de 7.5 et 14.5 cm, respectivement, dans le cas des matériaux de shale et de ciment, et 8.0 et 17.0 cm, respectivement, dans le cas du calcaire. Dans le cas de ce dernier matériau, prélevé et livré au laboratoire sous forme de blocs rectangulaires, on aura procédé au forage de la cavité interne devant servir à l'injection dès le départ, et ainsi pratiquement éliminé l'endommagement lié à la préparation des éprouvettes, e.g. cylindre creux. Une cavité interne de 2.2 cm de diamètre et de 10 cm de profondeur a été forée à l'intérieur des éprouvettes de shale et de ciment, alors que dans le cas du calcaire, la cavité interne avait un diamètre de 3.2 cm et une profondeur de 10 cm. Quatre ou cinq essais de fissuration ont été réalisés avec chacun des matériaux, en utilisant des niveaux de confinement nominaux de 5, 10 et 20 MPa, voire de 30 MPa dans le cas du calcaire, équivalent à une profondeur d'essai de quelques 1000 à 1500 mètres à l'intérieur des basses-terres du Saint-Laurent (Konstantinovskaya et al., 2011). La cavité interne a été remplie d'eau, la conduite reliant le réservoir d'alimentation à l'éprouvette d'essai a été raccordée, et le liquide a été injecté à un taux de 0.016 cc/sec, e.g. taux nominal non-corrigé pour tenir compte de la déformation de la conduite (0.467 cc/MPa de pression). Une pression axiale nominale d'environ 10 MPa, e.g. valeur corrigée ultérieurement pour tenir compte de la présence de la cavité et de la réduction de section de l'éprouvette, a été ajoutée pour éviter tout écoulement à l'interface avec les plateaux de chargement, et forcer la fissuration à prendre place de façon radiale à la paroi de la cavité. Ce protocole a été respecté pour tous les essais réalisés. L'injection a été initiée et poursuivie jusqu'à la fissuration du matériau intact, ou jusqu'au début de l'écoulement dans le cas d'un matériau fissuré, après quoi quelques 10 cc de liquide supplémentaire étaient injectés pour confirmer les conditions d'écoulement stable. L'injection a alors été stoppée, et on a procédé au déchargement du système dans l'ordre inverse du chargement, i.e. retrait de la pression hydraulique en premier lieu, de la pression de confinement triaxial ensuite, et pour terminer, retrait de la pression axiale.

4.3 Résultats obtenus et examen des éprouvettes fissurées

Au total, vingt-deux (22) essais ont été réalisés suivant les conditions décrites ci-dessus. Outre les quatorze (14) essais prévus au départ, avec des éprouvettes forées verticalement et le litage horizontal dans le cas du calcaire et du shale, quatre (4) essais ont été réalisés avec des éprouvettes de calcaire forées horizontalement, parallèlement au plan de litage, pour vérifier l'influence de l'anisotropie (Ghazvinian et al., 2013). Quatre (4) essais, avec le calcaire toujours mais une cavité interne de 14 cm de profondeur, ont aussi été ajoutés pour confirmer le respect des conditions de symétrie axiale et de contrainte et déformation planes (Éq. 4 et 5).

En ce qui concerne l'anisotropie du matériau d'essai, l'influence des conditions se sera avérée importante, e.g. réduction de la pression de fissuration de plus de 60% dans la majorité des cas, pouvant aller jusqu'à 100% dans un cas (parmi les quatre essais réalisés). Ceci est parfaitement logique et prévisible, en raison du caractère lité propre aux formations rocheuses sédimentaires. Quant à la profondeur de la cavité, e.g. 10 versus 14 cm, ce changement n'aura eu aucune influence sur les conditions de fissuration observées, le diamètre de la cavité interne étant suffisamment petit pour satisfaire pleinement les conditions de symétrie axiale et de chargement planaire énoncées.

Les résultats sont montrés au Tableau 3. Pour éviter la confusion, dans le cas du calcaire, seuls les résultats pour les éprouvettes forées verticalement, perpendiculairement au plan de litage ou de déposition, sont montrés. Dans le cas du shale, l'influence du litage est encore plus marquée que dans le cas du calcaire, en raison du mode de déposition et de formation notamment, mais aussi en raison de la profondeur de prélèvement, e.g. formation située entre 1700 et plus de 2000 mètres de profondeur, laquelle aura ajouté un effet d'endommagement supplémentaire (discage) au caractère lité déjà prononcé du matériau.

Quelques courbes d'essai typiques, e.g. pression hydraulique mesurée versus volume de fluide injecté (non-corrigé), sont montrées à la Figure 5. Des photos des éprouvettes, réalisées au début et à la fin du programme d'essai, sont montrées à la Figure 6. Les éprouvettes fissurées ont été sectionnées perpendiculairement à l'axe de chargement, pour examiner le patron de fissuration et/ou d'écoulement. Dans tous les cas examinés, la fissuration du matériau intact était de type radial, partant de la paroi de la cavité interne et se dirigeant vers l'extérieur de l'éprouvette. L'écoulement prend place à l'intérieur de ces mêmes fissures nouvellement créées, et à l'intérieur des plans de litage ouverts et activés par les fissures radiales.

Tableau 3. Pressions de confinement, de fissuration et d'écoulement mesurées en laboratoire pour les différents matériaux testés

Pression	Shale d'Utica ¹	Calcaire de Cobourg ¹	Ciment d'injection
Pression de confinement σ_3 (MPa)	- 10.0 20.0	5.0 10.0 20.0	- 10.0 20.0
Contrainte axiale σ_1 (MPa) ²	- 21.5 32.1	17.4 23.3 35.1	- 21.1 31.9
Pression de fissuration Q_0 (MPa)	- 10.1-17.7 20.1	15.0 19.5-20.1 29.0-30.3	- 16.7-21.1 27.9
Pression d'écoulement Q_E (MPa)	- 10.0-11.1 20.1	5.0 10.0-10.2 20.0-20.2	- 10.1-10.5 21.1

¹éprouvettes testées perpendiculairement au plan de litage

²niveau de contrainte corrigé pour le diamètre de la cavité interne

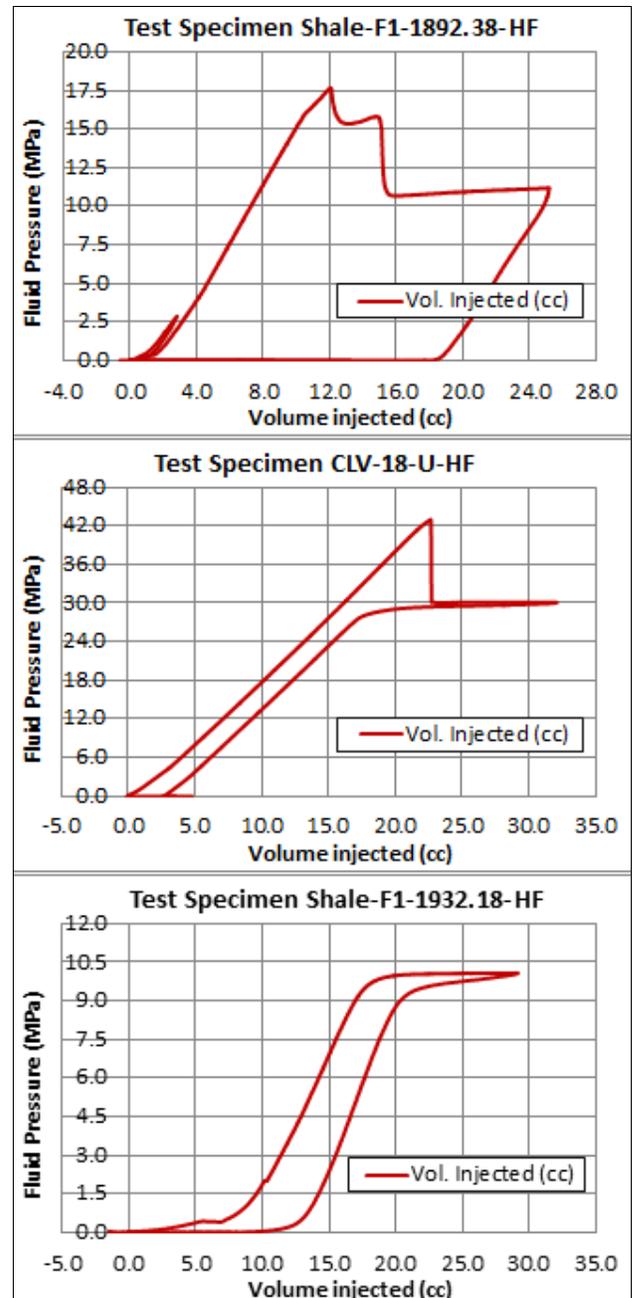


Figure 5. Graphes de pression hydraulique mesurée en fonction du volume de fluide injecté (non corrigé pour la déformation de la conduite d'alimentation): fissuration du matériau intact, shale et calcaire (haut et milieu); écoulement en milieu fissuré, shale (bas).

5 DISCUSSION

Parmi les nombreux enjeux liés à l'utilisation des formations rocheuses sédimentaires aux fins de production de gaz, de stockage et/ou d'enfouissement de combustible naturel ou usé, de nature radioactive ou non, l'intégrité des ouvertures d'accès au réservoir ou à la zone d'entreposage, e.g. forages, puits, galeries, etc., et

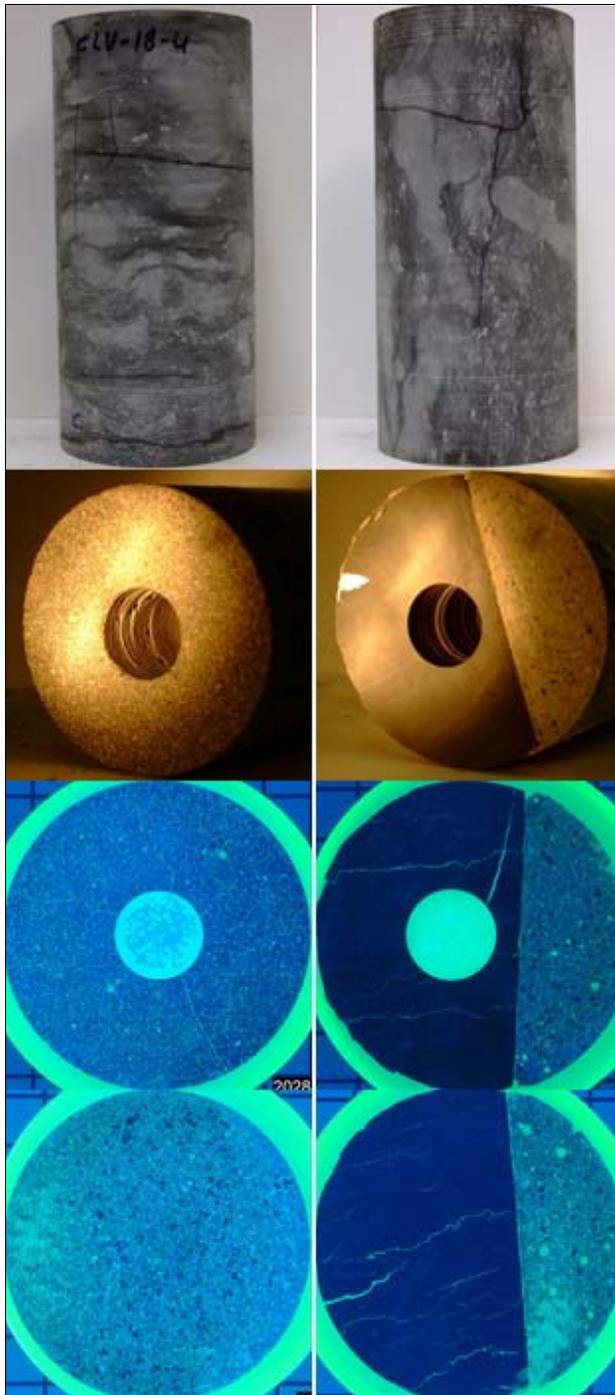


Figure 6. Photos et sections des éprouvettes d'essai : éprouvettes de calcaire de Cobourg fissurées, avec litage horizontal et vertical (1^o rangée, haut); extrémités des éprouvettes d'essai avec cavité interne, ciment et shale (2^o rangée); sections d'éprouvette avec cavité fissurée, ciment et shale (3^o rangée); et sections d'éprouvette intacte, non fissurée, ciment et shale (4^o rangée, bas).

leur isolation du milieu ambiant, pour éliminer tout risque de contamination éventuelle en cas de fuite de produits potentiellement toxiques à l'extérieur de la zone de pro-

tection, constituent sans doute les plus importants. Les propriétés déterminées lors du présent programme d'essai constituent une première étape pour apprécier encore mieux la difficulté et l'importance des enjeux auxquels l'ingénieur est confronté, et évaluer les limites des solutions proposées. À la lumière des résultats obtenus, d'un point de vue géo-mécanique, on peut en effet penser que, en autant que les outils de conception et de suivi disponibles soient utilisés correctement, l'intégrité et la stabilité à long terme des ouvrages seront le plus souvent assurées (Lee et al., 2011, OPG, 2015). Cependant, pour d'autres aspects de la question, tels la connaissance du réseau de fracturation, interne au massif rocheux, et le cheminement du fluide une fois le réseau activé et l'écoulement amorcé, il en est tout autrement. C'est en effet pour tenter de répondre à ces nombreuses questions que le présent programme d'essai a été entrepris, en laboratoire dans un premier temps, et en chantier, éventuellement. Les résultats obtenus à la fin de cette première partie des travaux sont discutés brièvement.

5.1 Propriétés mécaniques des matériaux testés

Les propriétés physiques et mécaniques des matériaux testés sont montrées aux Tableaux 1 et 2. En ce qui concerne le calcaire de Cobourg et le ciment d'injection, les valeurs obtenues sont très similaires à celles montrées dans la littérature, ou observées lors de programmes d'essai précédents (Ghazvinian et al., 2013, Sika, 2014). Dans le cas du shale d'Utica provenant du Groupe de Lorraine et prélevé dans la région de Lotbinière, Québec, à des profondeurs comprises entre 1750 et 2050 m, les valeurs de résistance et de rigidité sont généralement moindres que celles affichées par Konstantinovskaya et al., 2011, pour des essais réalisés sur un matériau probablement similaire mais prélevé dans la région de Bécancour, quelques 50 kilomètres plus à l'ouest, à une profondeur d'environ 700 m. De fait, la résistance et la rigidité du shale prélevé dans la région de Bécancour sont même plus élevées que celles déterminées pour le calcaire de Cobourg. Le module de Young déterminé pour le shale prélevé à Bécancour est de 42.0 GPa, alors que la valeur maximale dépasse rarement les 20.0 GPa dans le cas de celui prélevé à Lotbinière. La densité du matériau est légèrement plus basse, e.g. 2.70 versus 2.63 pour le shale prélevé à Bécancour et à Lotbinière, respectivement. Les vitesses sismiques déterminées pour le shale calcaire prélevé à Bécancour sont similaires à celles du calcaire de Cobourg, et le double de celles du shale provenant de Lotbinière. Une première raison pour expliquer de tels écarts serait d'invoquer la profondeur de prélèvement du matériau, et surtout l'endommagement lié au forage et au changement de contrainte subit par le matériau lors du prélèvement, e.g. passage d'un état fortement comprimé à un état lâche avec ouverture de fissures et discage, typique de la réaction observée lors de forage à grande profondeur (Corthésy et Leite, 2008). La qualité des échantillons prélevés et livrés au laboratoire, et la constance observée dans les résultats, malgré un écart-type significatif, situé autour de 20-25%, voire davantage

dans certains cas, invitent à un constat probablement plus simple et plus juste encore, à savoir la variabilité élevée des propriétés intrinsèques du matériau lui-même, et la nécessité de procéder à une investigation rigoureuse du site d'essai au niveau local lors de la réalisation des travaux, avec référence au cadre régional au besoin.

5.2 Pressions de fissuration et d'écoulement mesurées en laboratoire

Les pressions de fissuration et d'écoulement mesurées lors du programme d'essai en laboratoire concordent parfaitement avec les valeurs mesurées par d'autres chercheurs dans des conditions similaires, et dont les résultats ont été publiés dans la littérature (Schmitt et Zoback, 1993). Pour des matériaux peu poreux et/ou peu perméables, e.g. le granite de Westerly dans le cas des auteurs référés, les pressions de fissuration Q_0 et d'écoulement Q_E prédites théoriquement et mesurées expérimentalement sont données par les expressions suivantes, dérivées des équations 4 et 5, et réduites à leur forme la plus simple. Dans le cas d'un matériau intact, non-fissuré, l'expression s'écrit :

$$Q_0 = P_0 + T_0 \quad [6a]$$

Dans le cas d'un matériau fissuré, l'expression s'écrit encore plus simplement :

$$Q_0 = Q_E = P_0 \quad [6b]$$

Ces expressions montrent clairement que, dans le cas d'un matériau intact, le niveau de confinement et la résistance en tension sont les facteurs déterminants pour prédire la pression de fissuration. Dans le cas d'un matériau fissuré, seul le niveau de confinement importe. Encore, cette simplification extrême prévaut uniquement pour les matériaux faiblement poreux et/ou peu perméables tels ceux testés à l'intérieur du présent programme d'essai, e.g. matériaux sédimentaires détritiques d'origine chimique avec contenu argileux élevé ou similaire (Schmitt et Zoback, 1993).

Les patrons de fissuration observés lors du programme d'essai sont également cohérents avec le type et le mode de rupture prévus dans ces conditions, à savoir (Figure 6) : (1) la fissuration radiale en tension, le plus souvent unique, est initiée à la paroi de la cavité et se dirige rapidement vers l'extérieur de l'éprouvette; (2) dans le cas de matériaux lités, la pression de fissuration parallèle au litage est moindre que celle dans la direction perpendiculaire, la résistance en tension étant aussi beaucoup moindre (Figure 6, haut); (3) une pression verticale nominale de 10 MPa, e.g. pression déviatorique, supérieure à la résistance en tension du matériau, a été exercée suivant l'axe de l'éprouvette pour forcer sa fissuration radiale et ainsi éviter l'écoulement préférentiel à l'interface avec les plateaux de chargement; (4) une fois le matériau fissuré, la pression d'injection chute brusquement pour égaler le niveau de confinement de l'éprouvette, le liquide étant dissipé dans la fissure, et l'écoulement s'amorce, le fluide empruntant le réseau d'écoulement le plus perméable (Figure 6, haut); (5)

l'écoulement a été stoppé après injection de 10 cc de liquide supplémentaire, sans variation observable de la pression d'injection, et on a procédé au déchargement de l'éprouvette (Figure 5); et (6) encore, les pressions d'injection mesurées en laboratoire sont similaires à celles mesurées en chantier dans les mêmes conditions (Schmitt et Zoback, 1993, Schmitt et al., 2012).

6 CONCLUSION

Des essais de compression et de microfissuration hydraulique ont été réalisés en laboratoire pour caractériser un ensemble de matériaux rocheux d'origine sédimentaire, naturels ou fabriqués, utilisés lors de nombreuses applications industrielles, non-conventionnelles pour la plupart, actuellement à l'étude pour ce type de matériau. On pense notamment à l'extraction éventuelle du gaz emprisonné à l'intérieur des formations de shale, à la séquestration de CO_2 à l'intérieur de formations rocheuses aussi d'origine sédimentaire, au stockage de combustible usé, radioactif ou pas, à l'intérieur de ces mêmes formations, et autres. Les résultats obtenus constituent un effort important pour, dans un premier temps, proposer un ensemble de valeurs réelles utilisables lors de la conception et de la réalisation des ouvrages, et dans un deuxième temps, illustrer les enjeux mécaniques et environnementaux liés à l'exploitation de ces mêmes ouvrages. La fracturation des formations rocheuses pour augmenter le taux d'extraction et/ou de production du gaz contenu à l'intérieur de ces dernières, par exemple, constitue un énorme défi. Dans le cas inverse où l'étanchéité des excavations et des formations rocheuses est recherchée, ceci pour des périodes pouvant aller jusqu'à quelques millénaires dans le cas de l'enfouissement de déchets radioactifs, le scellement de ces mêmes fractures, naturelles ou induites, s'avère tout aussi critique. L'auteur espère que le présent article aura à tout le moins permis de proposer quelques valeurs de propriété typiques, essentielles à la conception et à la réalisation des ouvrages, et mieux encore, souligné ou rappelé quelques enjeux et limites spécifiques au comportement de ces mêmes matériaux dans le contexte des applications visées. Les résultats proposés constituent une première étape, lesquels résultats pourront être affinés et révisés ultérieurement avec la réalisation de nouveaux travaux.

REMERCIEMENTS

L'auteur aimerait souligner la contribution de nombreuses personnes et organisations impliquées dans la réalisation des travaux. Les échantillons de shale ont été fournis par le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) du Québec par l'entremise des collègues de la Commission géologique du Canada – Bureau de Québec, principaux partenaires du projet de recherche. Les échantillons de calcaire ont été fournis par la Société de gestion des déchets nucléaires (NWMO) avec l'aide du personnel du Département de génie géologique de l'Université Queen's, Kingston, Ontario, aussi partenaires

du projet. La préparation des éprouvettes et les essais en laboratoire ont été réalisés aux laboratoires de mécanique des roches et de minéralogie de CanmetMINES de Ressources naturelles Canada à Ottawa. Le projet a bénéficié du support financier du Programme de recherche et de développement énergétiques (PRDE) du gouvernement fédéral, administré par Ressources naturelles Canada. De nombreuses personnes, internes et externes à l'organisation, ont contribué à la réalisation des travaux et à la révision de l'article. L'auteur les en remercie sincèrement.

RÉFÉRENCES

- ASTM, 2015a. *ASTM C496 Standard Test Method for Splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*, ASTM International, West Conshohocken, PA, É.-U.: 5 p.
- ASTM, 2015b. *ASTM D2845 Standard Test Method for Laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock*, ASTM International, West Conshohocken, PA, É.-U.: 7 p.
- ASTM, 2015c. *ASTM D3967 Standard Test Method for Splitting tensile strength of intact rock core specimens*, ASTM International, West Conshohocken, PA, É.-U.: 4 p.
- ASTM, 2015d. *ASTM D4543 Standard Practices for Preparing rock core as cylindrical test specimens and verifying conformance to dimensional and shape tolerances*, ASTM International, West Conshohocken, PA, É.-U.: 9 p.
- ASTM, 2015e. *ASTM D7012 Standard Test Methods for Compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures*, ASTM International, West Conshohocken, PA, É.-U.: 9 p.
- BAPE, 2011. *Développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec*, Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE), Québec, QC, Rapport d'enquête et d'audience publique R-273: 323 p.
- Corthésy, R. et Leite, M.H., 2008. A strain-softening numerical model of core discing and damage, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(3): 329-350.
- Dally, J.W. et Riley, W.F., 1978. Elementary elasticity, in *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, É.-U.: 3-85.
- Ghazvinian, E., Perras, M., Langford, C., Diederichs, M. et Labrie, D., 2013. A comprehensive investigation of crack damage anisotropy in Cobourg limestone and its effect on the failure envelope, *GéoMontréal 2013*, Comptes-rendus de la 66^e Conférence canadienne de géotechnique, Montréal, QC, Canada, 29 septembre - 3 octobre, Société canadienne de géotechnique (SCG/CGS), Article 686: 7 p.
- Haimson, B.C. et Cornet, F.H., 2003. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation – Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF), *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8): 1011-1020.
- Konstantinovskaya, E., Malo, M. et Castillo, D.A., 2011. *Present-day stress magnitudes and rock strengths in the St. Lawrence lowlands: Implications for CO₂ injection*, Congrès annuel de l'Association pétrolière et gazière du Québec (APGQ), 24-25 octobre, Montréal, QC, Canada, Institut national de recherche scientifique (INRS), Affiche: 1 p.
- Lee, D.S., Herman, J.D., Elsworth, D., Kim, H.T. et Lee, H.S., 2011. A critical evaluation of unconventional gas recovery from the Marcellus shale, Northeastern United States, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4): 679-687.
- MTS, 2014. *MTS Model 815 and 816 Rock Mechanics Test Systems*, MTS Systems Corporation, Eden Prairie, MN, É.-U.: 12 p.
- Niemi, A., Bensabat, J., Fagerlund, F. et al. (partenaires du projet Mustang), 2012. Small-scale CO₂ injection into a deep geological formation at Heletz, Israel, *Energy Procedia*, 23: 504-511.
- OPG, 2015. OPG's deep geologic repository project for low and intermediate level radioactive waste, *L&ILW DGR Overview*, Ontario Power Generation (OPG), Tiverton, ON, Canada, OPG's website: 3 p.
- Schmitt, D.R. et Zoback, M.D., 1993. Infiltration effects in the tensile rupture of thin walled cylinders of glass and granite: Implications for the hydraulic fracturing breakdown equation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 30(3): 289-303.
- Schmitt, D.R., Wilson, T.J., Jarrard, R.D., Paulsen, T.S., Pierdominici, S., Handwerker, D. et Wonik, T., 2012. Wireline hydraulic mini-frac testing: Experiences in the ANDRILL SMS borehole, McMurdo Sound, Antarctica, *Proceedings of the 21st Canadian Rock Mechanics Symposium*, Edmonton, AB, 5-9 mai 2012, C. Hawkes Editor, The Canadian Rock Mechanics Association (CARMA) et The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM), Montréal, QC, Canada: 561-568.
- Séjourné, S., Lefebvre, R., Lavoie, D. et Malet, X., 2013. Geologic and hydrogeologic understanding of caprock strata overlying the Utica shale in the St. Lawrence lowlands, Québec, QC, Canada, *GéoMontréal 2013*, Comptes-rendus de la 66^e Conférence canadienne de géotechnique, Montréal, QC, Canada, 29 septembre - 3 octobre, Société canadienne de géotechnique (SCG/CGS), Article 504: 7 p.
- Sika, 2014. *SikaGrout® 212 – Coulis cimentaire de haute qualité, à usage polyvalent et sans retrait*, Sika Canada Inc., Pointe-Claire, QC, Canada, Fiche technique: 3 p.
- Su, G., Nguyen, T.S., Haghghat, E., Pietruszczak, S., Labrie, D., Barnichon, J.D. et Abdi, H., 2015. Laboratory and numerical investigation of the mechanical behavior of the Tournemire argillite, *Programme de la 6^e Conférence internationale Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement*, Bruxelles, Belgique, 23-26 mars, Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF/NIRAS), Affiche P-08-02: 404-405.