Intégrité des roches couverture d'une unité de gaz de shale : l'apport des données structurales et hydrauliques

P. Ladevèze[1,2]; C. Rivard[2]; S. Séjourné[3]; R. Lefebvre[1]; H.Crow[2]; D. Lavoie[2]; X. Malet[1]

pierre.ladeveze@ete.inrs.ca

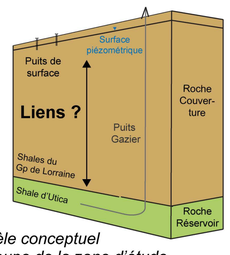
1: INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec, QC, Canada
2: Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada, Québec, QC, Canada
3: Consultant, Montréal, QC, Canada

Ressources naturelles Canada
INRS UNIVERSITÉ DE RECHERCHE
ENTRETIENS JACQUES CARTIER

1. Introduction

- **Contexte** : Étude réalisée dans le cadre du projet d'évaluation de liens potentiels entre le Shale d'Utica (réservoir gazier) et les aquifères de St-Édouard (Basses-Terres du St-Laurent, Québec)

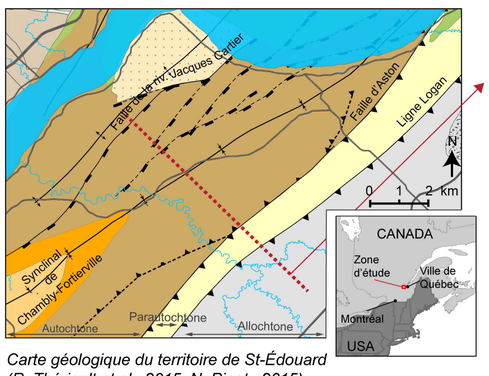
- **Objectifs :** Approche structurale et hydraulique en surface et en profondeur pour évaluer l'intégrité de la roche couverture



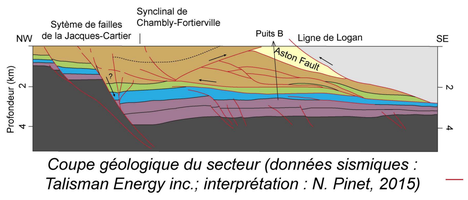
Modèle conceptuel en coupe de la zone d'étude

2. Territoire étudié

- Réservoir : shale gazifère (*Shale d'Utica*) / Couverture : shale avec interlits de siltstone
- Deux grands domaines structuraux:
  -> **Domaine autochtone** au NO : roches légèrement déformées de la plateforme sédimentaire du Saint-Laurent (Synclinal de C.F.) / failles normales
  -> **Domaines parautochtone et allochtone** au SE : déformation importante/ failles de chevauchement associées au front appalachien



Carte géologique du territoire de St-Édouard (R. Thériault et al., 2015; N. Pinet, 2015)



Coupe géologique du secteur (données sismiques : Talisman Energy inc.; interprétation : N. Pinet, 2015)

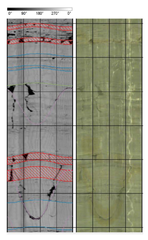
Failles

DOMAINE AUTOCHTONE
- Fm de Bécancour (Gpe de Queenston)
- Fm de Pontgavré (Gpe de Lorraine)
- Fm de Nicolet (Gpe de Lorraine) - Shale et siltstone
- Fm de Lotbinière (Gpe de Ste Rosalie) - Shale
- Shale d'Utica
- Gpe de Trenton - Calcaire
- Gpes de Potsdam, Beekmantown, Chazy & Black River

DOMAINE PARAUTOCHTONE / Fm de LesFonds - Shale
DOMAINE ALLOCHTONE
Socle de Grenville
Failles inverses / Failles normales

3. Mise en relation de données variées

- Diagraphies dans 13 puits de surface
-> Imagerie des parois de puits (sondes acoustiques et optiques); propriétés du fluide (conductivité, débimétrie de puits)



Exemple de diagraphie de sonde acoustique et optique

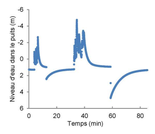
- Carottes de roches extraites de 7 puits
-> Aspect des parois de fractures et remplissage

Exemple de carotte collectée lors du projet

- Mesures sur 18 affleurements de roc
-> Type de fractures, orientation, répartition

Exemple d'affleurement de roc à St-Édouard

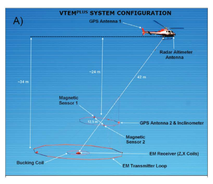
- Slug tests pneumatiques sur 14 puits au roc



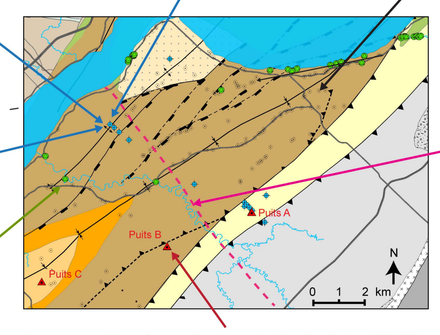
- Base de données des puits résidentiels du secteur et de leurs caractéristiques hydrauliques
(431 puits au roc dans le Gpe de Lorraine)
(*Ministère de l'Environnement*)

Système d'information hydrogéologique (SIH)

- Levé VTEM:
Profil de résistivité électrique
-> variations de salinité latérales/verticales

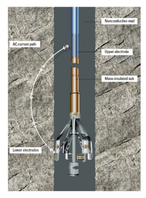


Système VTEM déployé sur le terrain

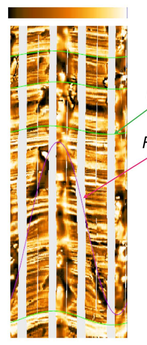


- Imagerie de microrésistivité (FMI) de 4 puits gaziers (section verticales + horizontales)
(*Talisman Energy inc.*)

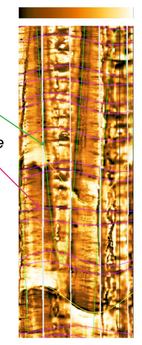
Tête du puits gazier de St-Édouard



Présentation de la sonde FMI et représentation 3D d'une section horizontale de puits imagée par FMI (ww.slb.com)



Exemple de section verticale imagée par sonde FMI

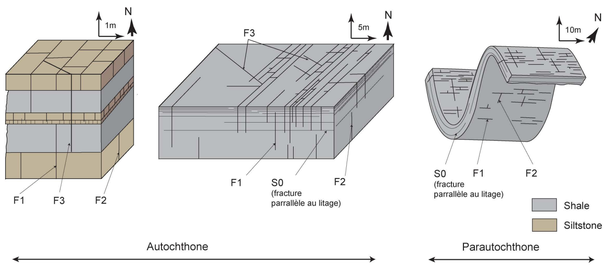


Exemple de section horizontale imagée par sonde FMI

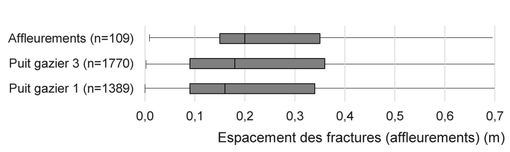
4. Fracturation et implications sur l'hydraulique

Les joints en surface et en profondeur

- Données : affleurements + puits de surface + puits gaziers profonds
- Une famille retrouvée uniquement en proche-surface : fractures parallèles au litage (S0)
- 3 familles de fractures systématiques : F1 (NE-SO) / F2 (NO-SE) orthogonal à F1/ F3 (ONO-ESE)
- Les fractures systématiques = retrouvées aussi bien en surface + en profondeur (aspect planaire + orientations et espacements identiques)

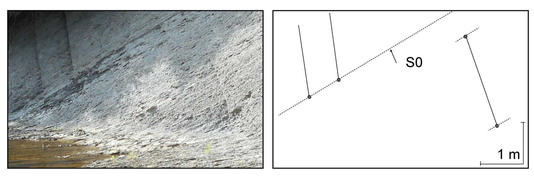


Modèle conceptuel de fracturation du roc



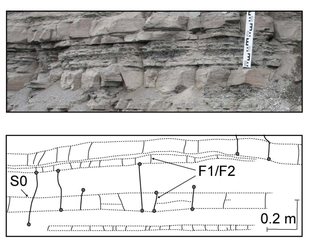
Extension verticale limitée des fractures: contrôle sur les écoulements verticaux

- Shales : hauteur des fractures : 10-30 m (max), hauteur limitée par les lits les moins indurés

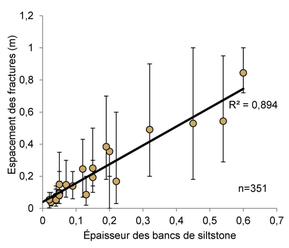


Affleurement de shale

- Siltstones : fractures limitées par l'épaisseur des bancs, ces derniers sont densément fracturés (corrélation linéaire entre leur épaisseur et l'espacement des fractures)



Affleurement de siltstone



Milieu fracturé et écoulement

- La perméabilité matricielle des shales est très faible (<10^{-8}mD)
- L'écoulement se fait via les fractures

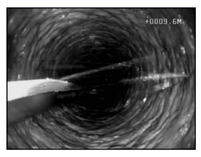
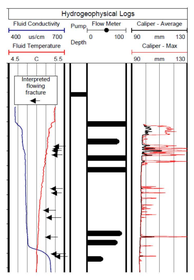
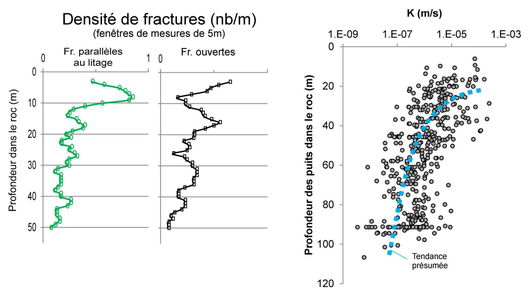


Image de l'intérieur d'un des puits lors d'un pompage: l'eau sort des fractures dans le shale



Exemple de diagraphie des puits du projet: la présence de fractures est corrélée avec des variations de conductivité et de débit mesuré avec un heatpulse-flowmeter (Crow et Ladevèze, 2015)

Densité de fractures et *K* selon *z*



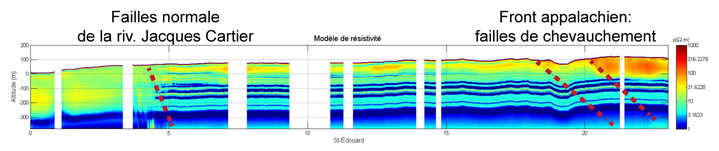
-> Décroissance de la densité de fractures et de (*K*) jusqu'à 50 m

5. Zones faillées et contrôle sur l'écoulement

Modèle de résitivité : compartimentalisation des aquifères entre les failles ?

- Levé VTEM™ -> méthode TDEM: diffusion d'un champ EM transitoire -> résistivité électrique d'un terrain selon *z* (Quand la salinité augmente, la résistivité diminue)

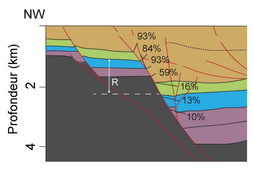
- Les contrastes de résistivité à proximité des failles pourraient indiquer que ces dernières constitueraient des barrières aux écoulements



Modèle de résistivité préliminaire (Bouchedda A.; Gloaguen E., Duchesne, M., 2015)

Plans de failles dans les shales : écrasement/étalement des shales et diminution de *K*

1. Observation de carottes de forages: présence de Gouge
Quantification de l'imperméabilité des plans de failles : calcul du "Shale Gouge Ratio" (Yielding et al., 1997; Freeman et al., 1998) :



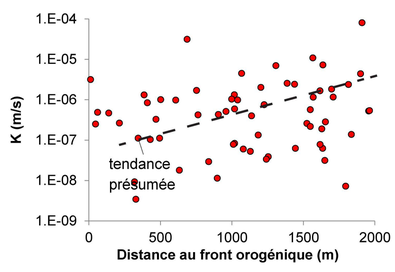
"Shale Gouge Ratio" (%)

$$SGR = \frac{\sum V_{sh} \times \Delta z}{R} \times 100$$

Valeur seuil au-dessus de laquelle la faille peu être considérée comme scellée par l'étalement des argiles (Freeman et al., 1998)

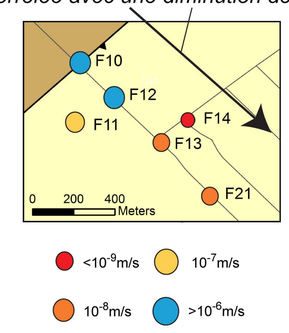
0 / 15-18 / 100 — Augmentation du caractère "scellé " de la faille

2. Puits résidentiels : *K* estimé à partir des débits spécifiques (Q/s) : diminution de *K* à proximité du front orogénique (dans les Shales de Lorraine) :



3. Slug tests dans les forages à proximité du front orogénique :

Intensification de la déformation corrélée avec une diminution de K

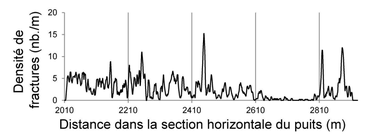


Proximité des faille et présence de fractures ouvertes en profondeur

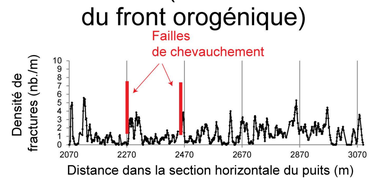
- Imagerie FMI des sections horizontales des puits gaziers (longues de 1km) : fractures ouvertes et fermées

Densité de Fractures fermées

Exemple de fracture fermée (calcite moins résistive)

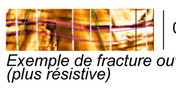


N=2078

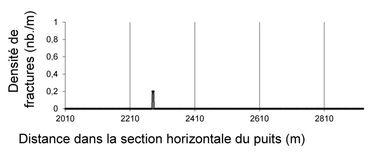


N=1273

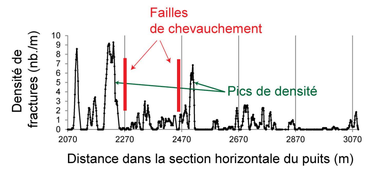
Densité de fractures ouvertes



Exemple de fracture ouverte (plus résistive)



N=1



N=907

-> Répartition homogène des fractures fermées le long des puits / pas d'influence de la présence de failles

-> Densité de fractures ouvertes plus importante à proximité des failles de chevauchement

6. Conclusion : intégrité de la couverture

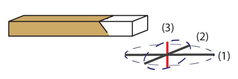
Fracturation naturelle de la couverture / anisotropie de *K* :

- L'écoulement dans les aquifères de surface se fait dans les fractures (notamment celles parallèles au litage), particulièrement dans les 30 premiers mètres

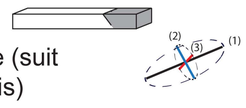
- Ces fractures ont une extension limitée, elles contribuent donc à l'anisotropie de *K* à l'échelle métrique mais ne constituent pas des cheminements préférentiels sur de longues distances (100 - 1000 m)

Tenseur de *K* dans les shales (échelle du mètre)

Autochtone :
(1)=(2)>(3)
(3) perpendiculaire au litage



Paraautochtone & Allochtone:
(1)>(2)>(3)
(3) perpendiculaire au litage (suit donc les orientations des plis)



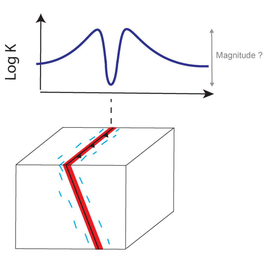
Orientations des axes du tenseur de *K*
(1) Maximum
(2) Intermediaire
(3) Minimum

Failles dans la roche couverture :
=> Caractère imperméable + potentiel contrôle sur la remontée d'écoulements profonds

- **En surface** (jusque ~100 m) : la fracturation importante du massif rocheux limite le contrôle des failles
- **En profondeur** : **Variations de *K* :**

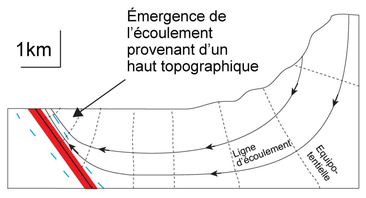
Gouge + autres lithologies entrainées dans le plan de faille (siltstones..) => *K* faible

Zones fracturées => *K* élevé



Contrôle des failles (fractures ouvertes + gouge) sur l'écoulement :

- À l'échelle régionale :
=> Émergence possible des écoulements le longs des plans de faille si les gradients hydrauliques sont suffisants
=> Compartimentation entre failles



- À l'échelle locale
l'écoulement reste possible à travers les failles :
- si des matériaux perméables sont entrainés dans le plan de faille (siltstones...)
- il se fera probablement à de très faibles vitesses