

Faculté de sciences et de génie  
Département de géologie et de génie géologique  
Université LAVAL



UNIVERSITÉ  
LAVAL

**Modélisation numérique de la migration du méthane et des fluides de formation le long de coffrage d'un puits abandonné en utilisant les variables physiques propres à la province géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent**

A. Nowamooz, J-M. Lemieux, J. Molson, F.A. Comeau et R. Therrien

Mercredi 29 janvier 2014

## **Plan de la présentation :**

**Contexte**

**Puits type dans les Basses-terres du Saint-Laurent**

**Problématiques Environnementales et Scénarios Conceptuels**

**Propriétés Hydrodynamiques du Ciment et du Shale**

**Simulation Numérique**

**Conclusion**

## Étude environnementale stratégique sur les gaz de shale :

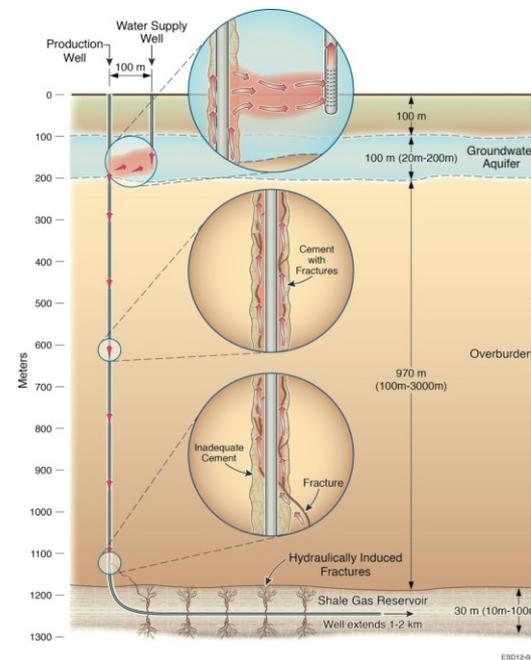
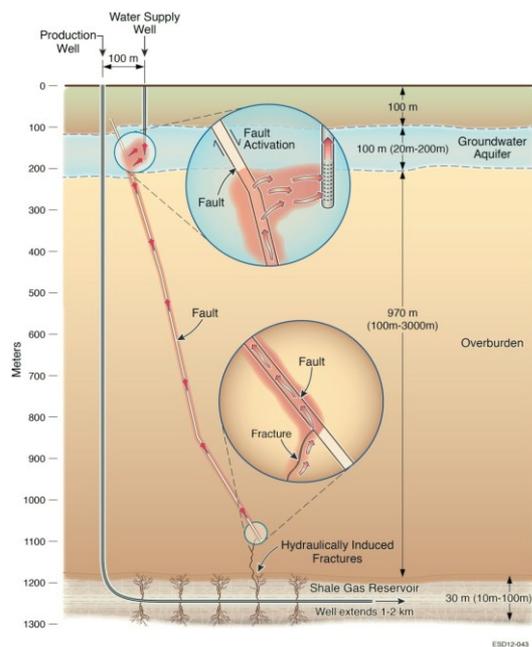
E3-10 : Modélisation numérique de la migration du méthane dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (Nowamooz, Lemieux, Molson et Therrien, 2013)

[http://ees-gazdeschiste.gouv.qc.ca/wordpress/wpcontent/uploads/2013/12/Rapport-etude-E3-10\\_UL.pdf](http://ees-gazdeschiste.gouv.qc.ca/wordpress/wpcontent/uploads/2013/12/Rapport-etude-E3-10_UL.pdf)

Réaliser une synthèse et une analyse des problématiques environnementales rapportées dans la littérature et définir des modèles conceptuels permettant d'étudier les problématiques jugées les plus importantes :

Problèmes liés à la présence des fractures naturelles ou des failles

Problèmes liés à la construction de puits



## Étude environnementale stratégique sur les gaz de shale :

E3-10 : Modélisation numérique de la migration du méthane dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (Nowamooz, Lemieux, Molson et Therrien, 2013)

[http://ees-gazdeschiste.gouv.qc.ca/wordpress/wpcontent/uploads/2013/12/Rapport-etude-E3-10\\_UL.pdf](http://ees-gazdeschiste.gouv.qc.ca/wordpress/wpcontent/uploads/2013/12/Rapport-etude-E3-10_UL.pdf)

Définir les propriétés hydrogéologiques de ciment et de shale (groupe de Lorraine et shale d'Utica) :

Porosité, perméabilité et les propriétés capillaire

Préparer le simulateur (code DuMux) :

Discretisation et système de fluide

Réaliser des modélisations numériques en utilisant les variables physiques propres à la province géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent.

## Étude environnementale stratégique sur les gaz de shale :

E3-3 : Étude de puits type représentative des puits forés au Québec au cours des 100 dernières années (Nowamooz, Comeau et Lemieux, 2014)

Développer d'une méthode permettant de distinguer d'un échantillonnage représentatif de l'ensemble des puits des Basses-Terres du Saint-Laurent :

85 puits situés dans le corridor 2 d'exploration du gaz de shale

Réaliser d'une nouvelle base de données dynamique pour étudier et comparer les caractéristiques des puits échantillonné :

Compiler les informations concernant le statut du puits, les coffrages, le type et le nombre de bouchons utilisés pour la fermeture à partir des rapports de fin de forage et des programmes d'abandonne

Définir les périodes pour lesquelles les méthodes de construction et de fermeture des puits sont distinctes :

	Périodes			Gaz de shale	Information Insuffisante
	< 1950	1950 - 1969	> 1970		
Coffrages					Peu conforme
Ciment					Moyennement conforme
Abandon				N/A	Bien conforme

## Puits type dans les BSTL :

Premier puits conventionnel en 1873

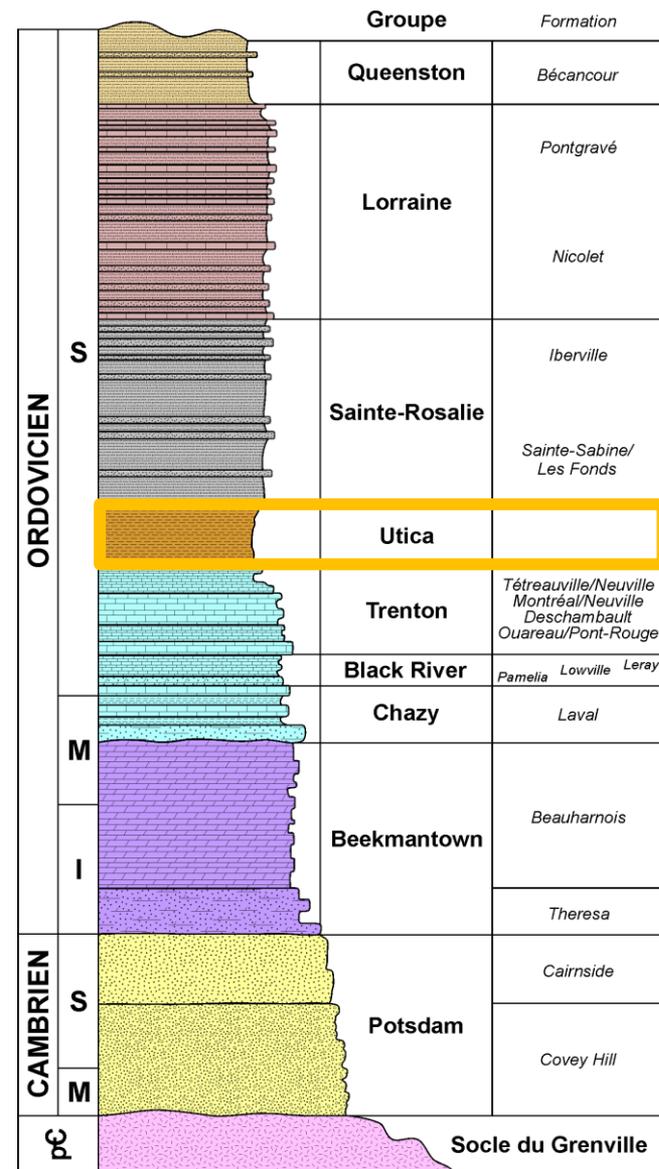
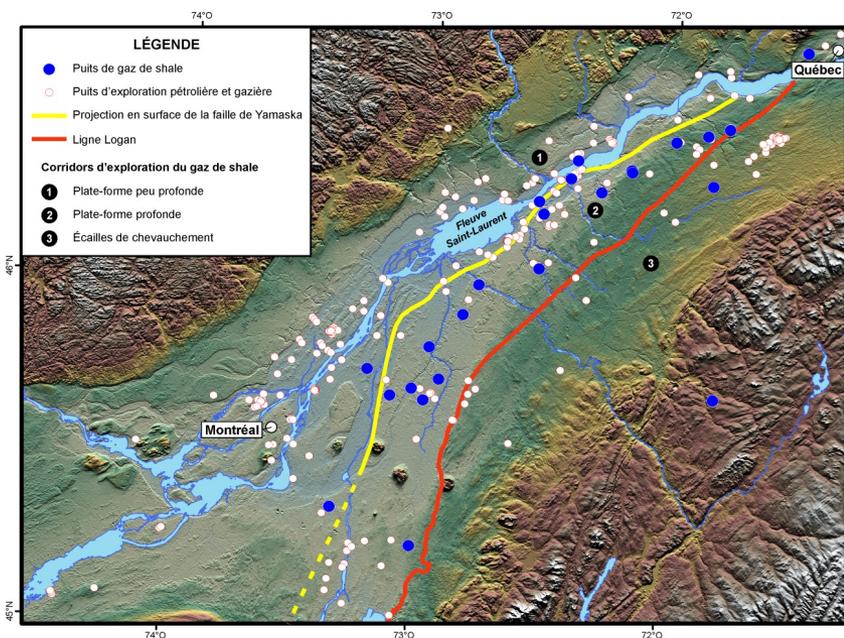
Total de 280 puits :

251 conventionnels

29 gaz de shale

3 corridors potentiels du gaz de shale :

Politique actuelle : Shale Utica - Corridor 2



(Comeau et al., 2013)

## Puits type dans les BSTL :

251 puits conventionnels :

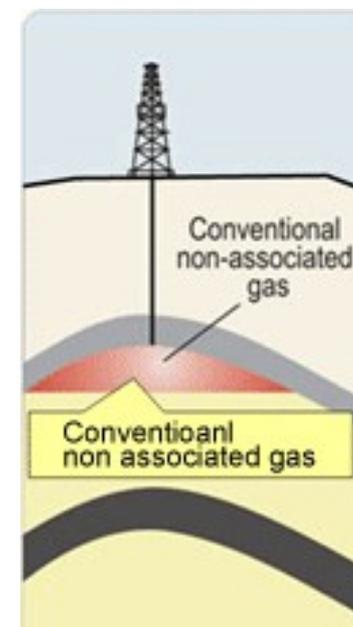
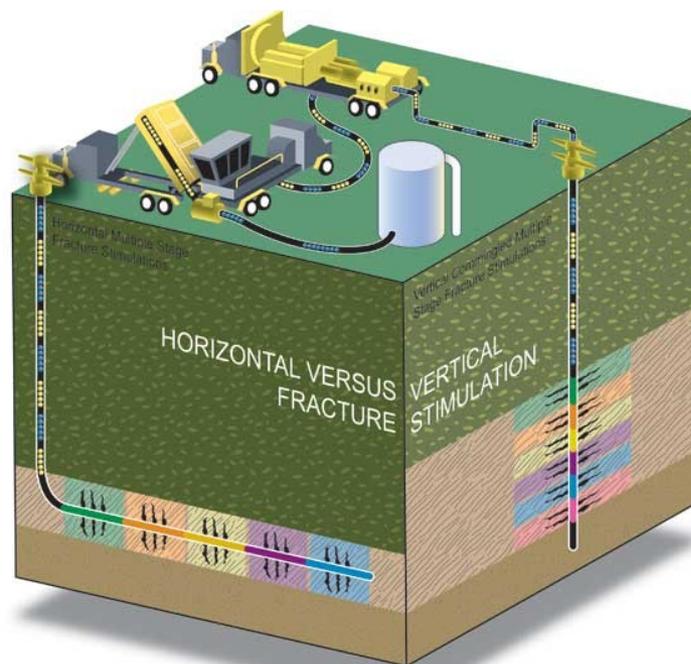
217 puits abandonnés et 34 puits complétés

29 puits de gaz de shale :

Tous complétés et temporairement abandonnés

18 puits verticaux (11 fracturés)

11 puits horizontaux (7 fracturés)

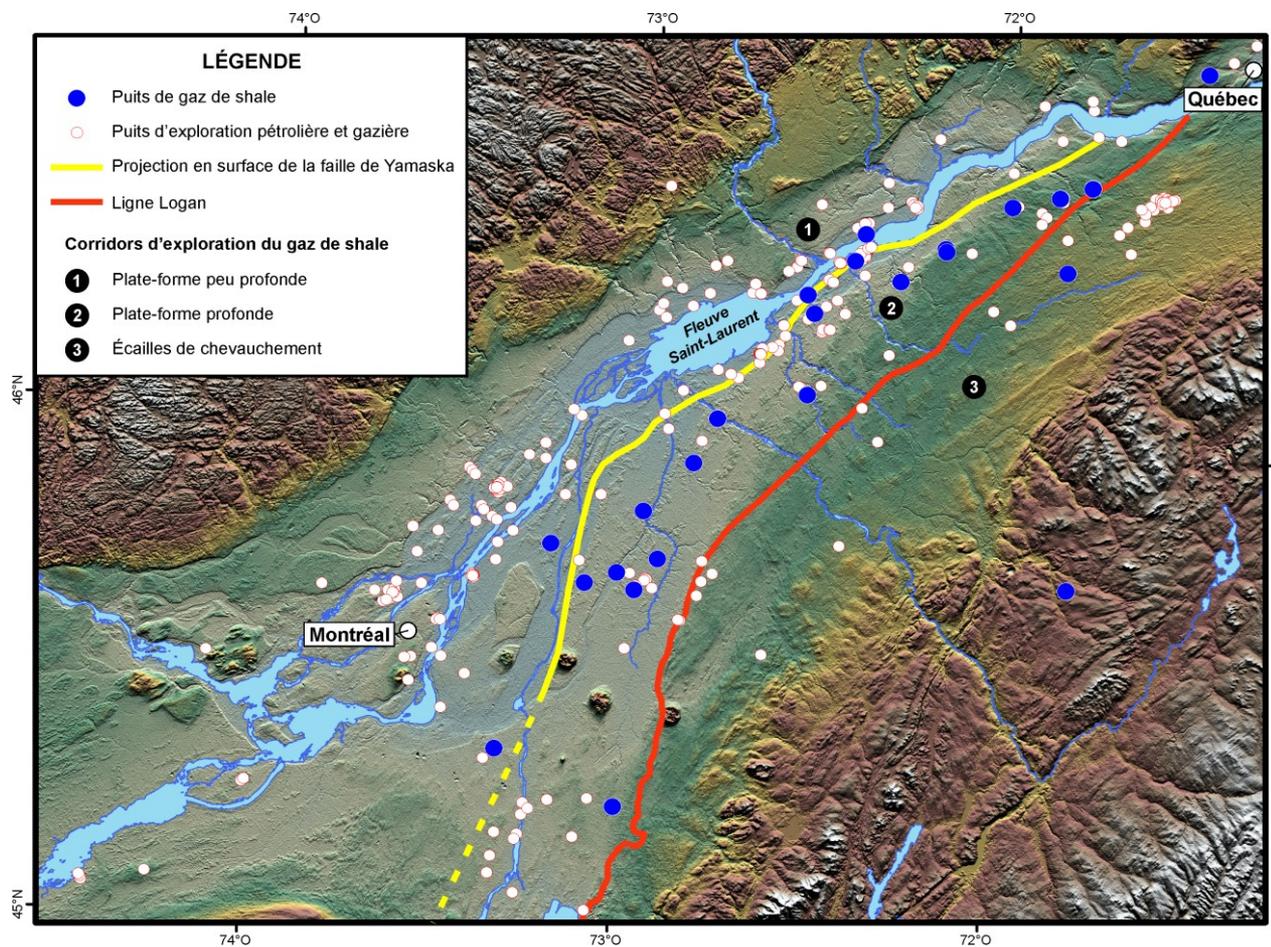


## Puits type dans les BSTL :

### Echantillonnage :

85 puits situés dans le corridor 2 d'exploration du gaz de shale :

22 puits (sur 29 puits) de gaz de shale sont situés dans ce corridor



## Puits type dans les BSTL :

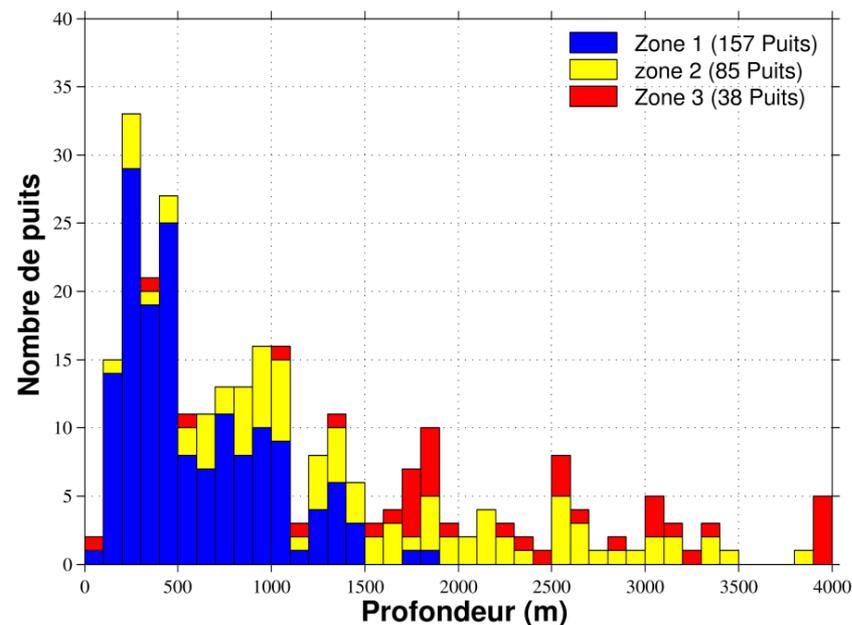
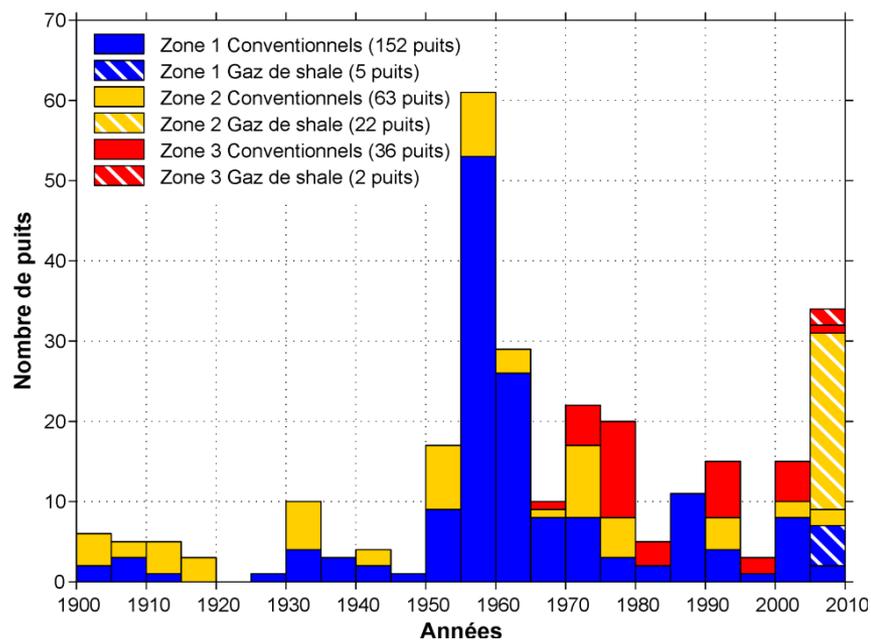
### Echantillonnage :

85 puits situés dans le corridor 2 d'exploration du gaz de shale :

22 puits (sur 29 puits) de gaz de shale sont situés dans ce corridor

Une distribution uniforme de nombre de puits entre 1900 et 2010

Une distribution uniforme de la profondeur (50 - 4000 m)



## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

Définition des périodes :

Bien documenté

Obturés par le ciment et bouchons mécaniques

Information sur la classification de ciment

---

Moyennement documenté

Puits sont obturés essentiellement par le ciment

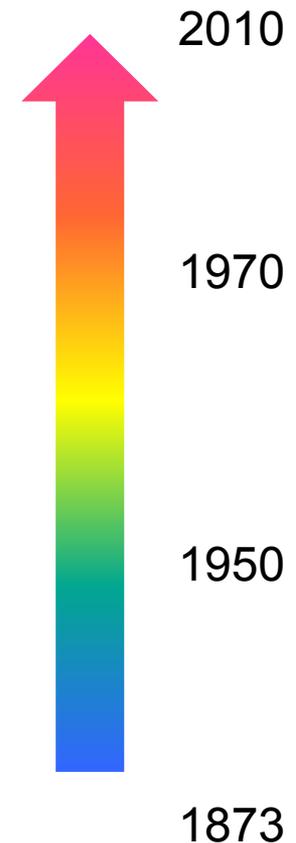
Les puits pas très profonds sont cimentés

Arrivée des bouchons mécaniques

---

Très peu d'information

Obturés par le bois et ciment



## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

Un puits est construit en plusieurs sections :

Coffrage conducteur :

Mis en place avant l'arrivée de la foreuse

Cimenté ou fixe

Rôle : Renforcer et stabiliser la surface du sol

Coffrage de surface :

Forage jusqu'à la limite de la zone de protection des eaux douces

Complètement cimenté (jusqu'à la surface)

Rôle : protéger les eaux potables d'une contamination

Coffrage intermédiaire :

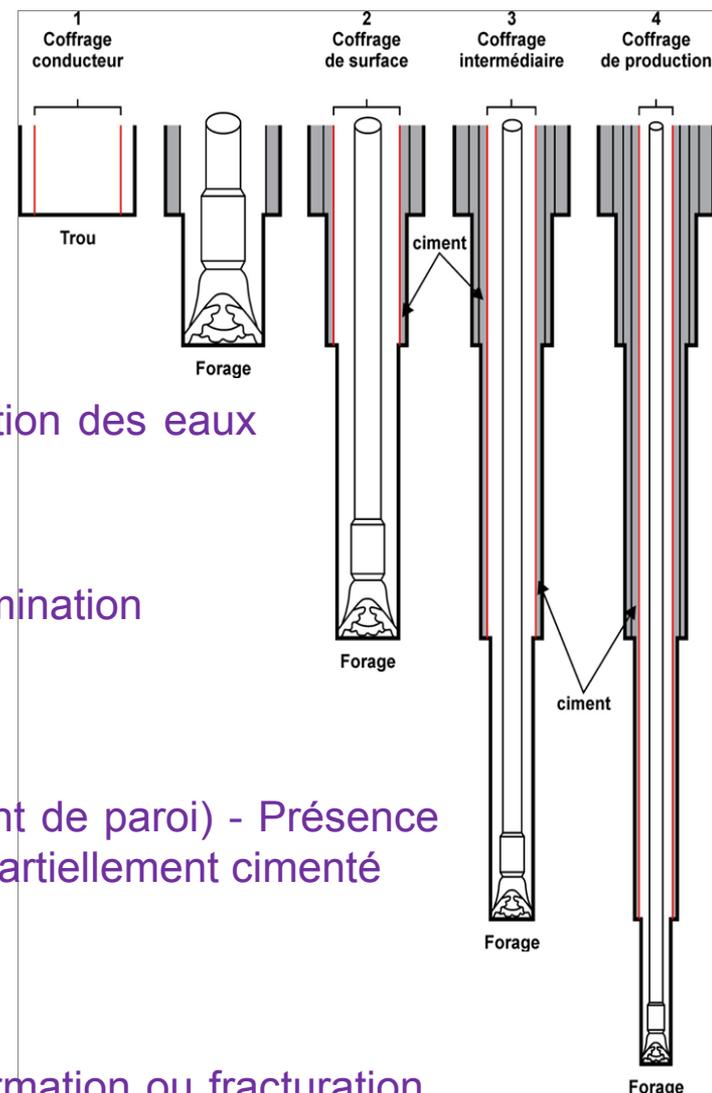
Complètement ou partiellement cimenté

Utilisation : Problème de cave-in (effondrement de paroi) - Présence des couches poreuses - Coffrage de surface partiellement cimenté

Coffrage de production :

Complètement ou partiellement cimenté

Rôle : Protéger la migration des fluides de formation ou fracturation depuis la formation cible vers la surface

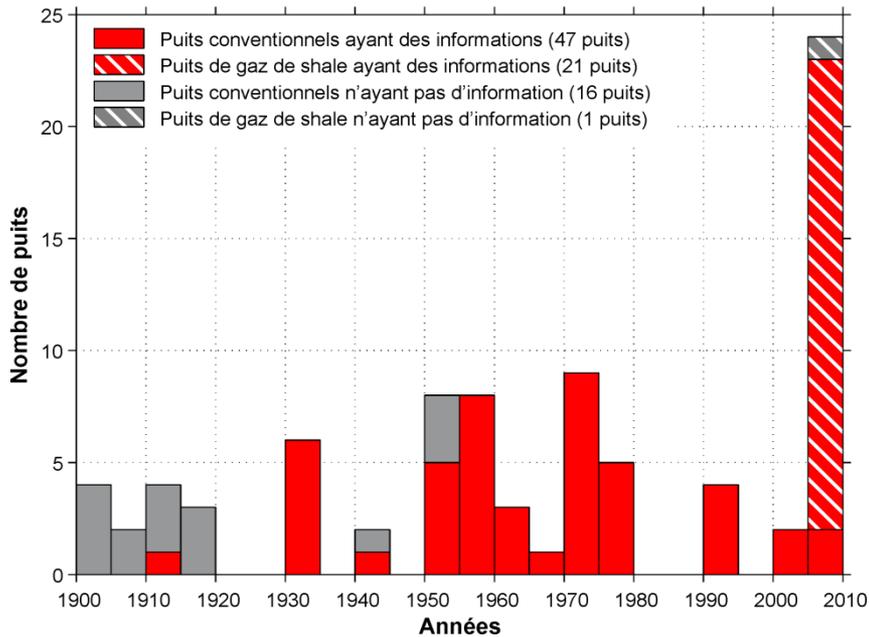


## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

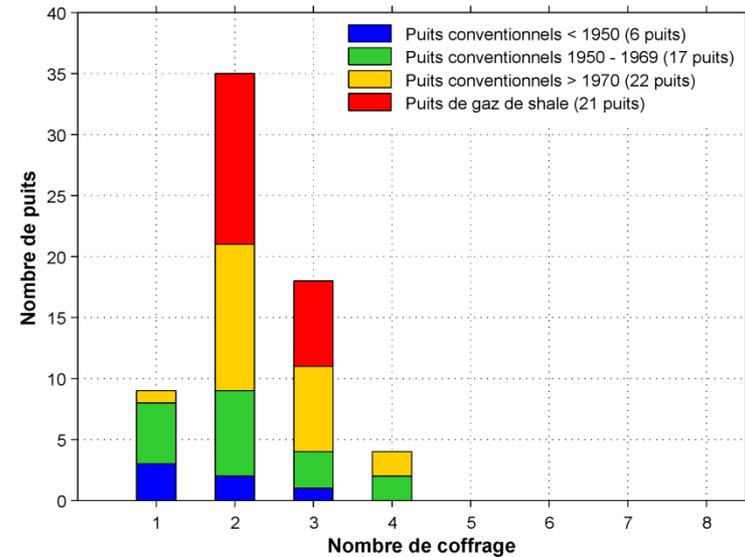
Information sur les coffrages :

Périodes	# de puits	# de coffrages
< 1950	8 / 21	38
1950 – 1969	17 / 20	39
> 1970	22 / 22	57
<b>Gaz de shale</b>	21 / 22	49
<b>Total</b>	<b>68 / 85</b>	<b>183</b>

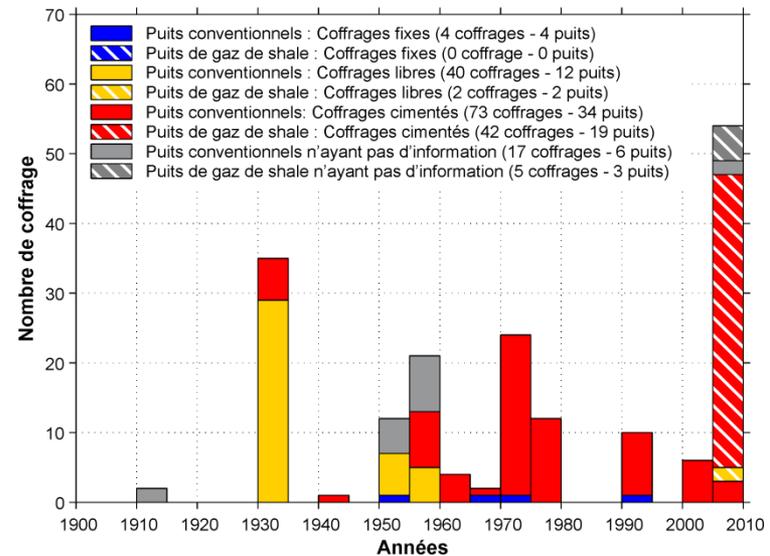
Informations sur les coffrages



Nombre de coffrages dans les puits après l'abandon



Statut des coffrages



## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

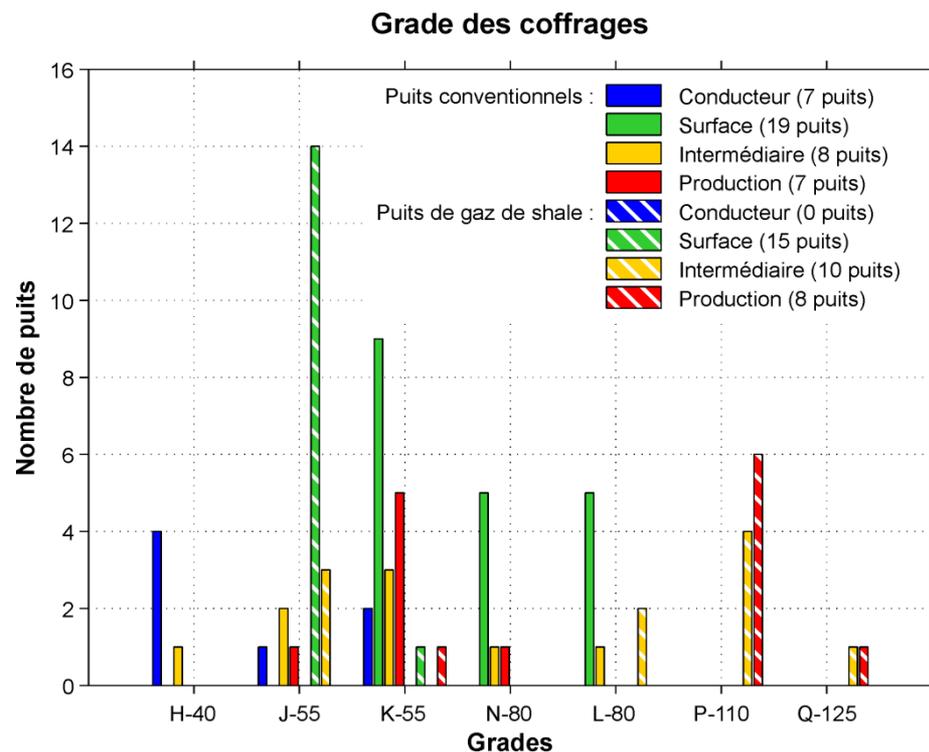
### Grade des coffrages :

Québec :

Le titulaire de permis de forage de puits doit, lors des travaux de forage, s'assurer que les coffrages supportent les contraintes d'éclatement, d'écrasement et de toutes autres contraintes physiques auxquelles ils peuvent être soumis

API STEEL GRADES				
API Grade	Yield Stress, psi		Minimum Ult. Tensile, psi	Minimum Elongation, %
	Minimum	Maximum		
H-40	40,000	80,000	60,000	29.5
J-55	55,000	80,000	75,000	24.0
K-55	55,000	80,000	95,000	19.5
N-80	80,000	110,000	100,000	18.5
L-80	80,000	95,000	95,000	19.5
C-90	90,000	105,000	100,000	18.5
C-95	95,000	110,000	105,000	18.5
T-95	95,000	110,000	105,000	18.0
P-110	110,000	140,000	125,000	15.0
Q-125	125,000	150,000	135,000	18.0

Périodes	# de puits	# de coffrages
< 1950	0 / 21	0 / 38
1950 – 1969	3 / 20	5 / 39
> 1970	19 / 22	36 / 57
<b>Gaz de shale</b>	16 / 22	33 / 49
<b>Total</b>	38 / 85	74 / 183



## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

Cimentation des coffrages :

Recommandation API :

Cimenté le coffrage jusqu'à la surface

Classe de Ciment :

Classe A : 0 – 1830 m sans aucune caractéristique particulière

Classe B : 0 – 1830 m avec une résistance modérée ou élevée aux sulfates

Classe C : 0 – 1830 m avec une résistance modérée ou élevée aux sulfates + avec une vitesse d'hydratation élevée et donc une forte résistance initiale

Classe D : 1830 – 3050 m utilisé en conditions de température et pression modérément élevées

Classe E et F : 3050 – 4270 m utilisé en conditions de température et pression élevées

Classe H et G : 0 – 2440 m adéquate des plus basses aux plus hautes températures grâce à sa compatibilité avec tous les additifs

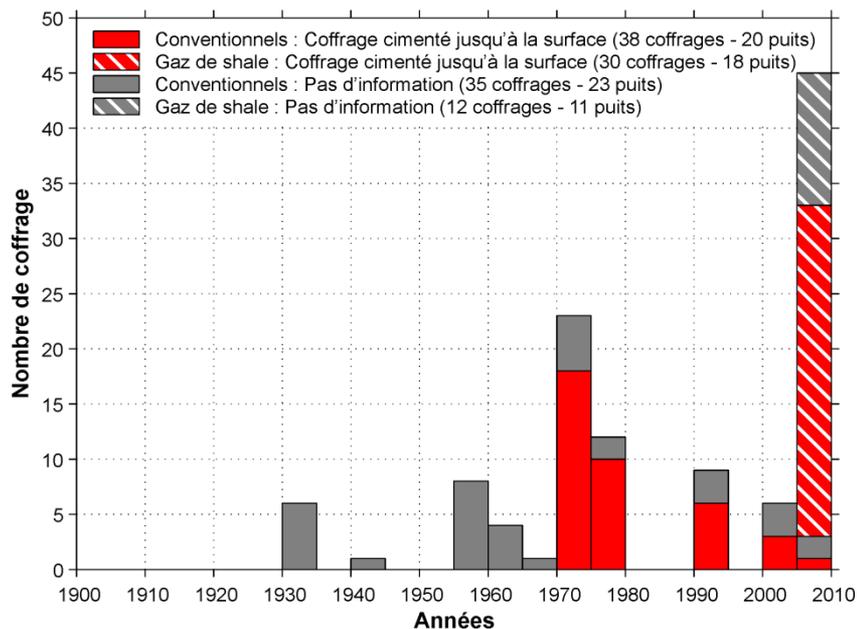
## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

Cimentation des coffrages :

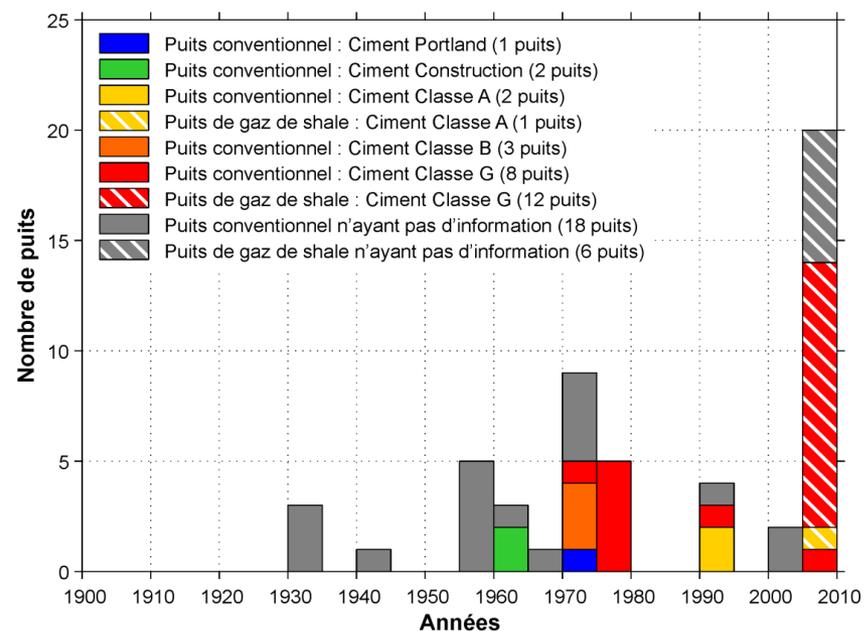
Périodes	# de coffrages cimenté
< 1950	7
1950 – 1969	13
> 1970	53
Gaz de shale	42
<b>Total</b>	<b>115/183</b>

Périodes	# de Puits
< 1950	4/21
1950 – 1969	9/20
> 1970	19/22
Gaz de shale	18/22
<b>Total</b>	<b>50/85</b>

Cimentation complète des coffrages



Classe des ciments



## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

Coffrage de surface :

Québec (depuis 2010) :

Le titulaire de permis de forage de puits doit fixer le coffrage de surface à une profondeur égale ou supérieure à 10% de la profondeur vertical (TVD) prévue au programme de forage

Alberta :

Calcul de la profondeur de coffrage de surface :

1. Profondeur la plus élevée des puits d'eau dans un rayon de 200 m
2. 
$$\frac{\text{Gradient de pression maximum} \times \text{TVD} \times (0.5 - 0.0000625 \times \text{TVD})}{22 \text{ kPa/m}}$$
3. 10% de la profondeur maximale prévue
4. Choisir la valeur maximale de 1, 2 et 3

API (American Petroleum Institute) :

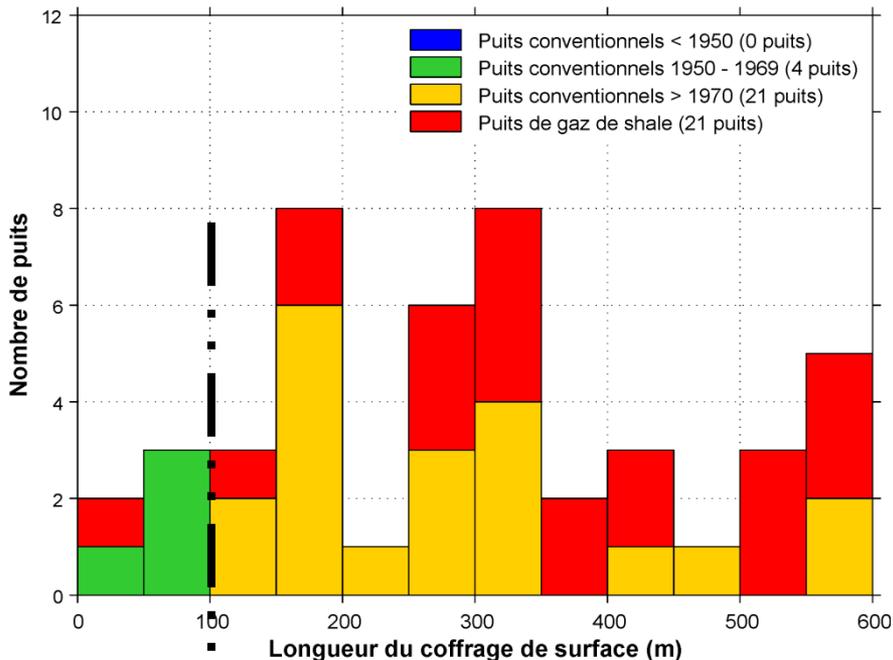
Coffrage de surface doit être fixé en-dessous de tout aquifère d'eau douce

# Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

Coffrage de surface :

10% de la profondeur vertical (TVD)

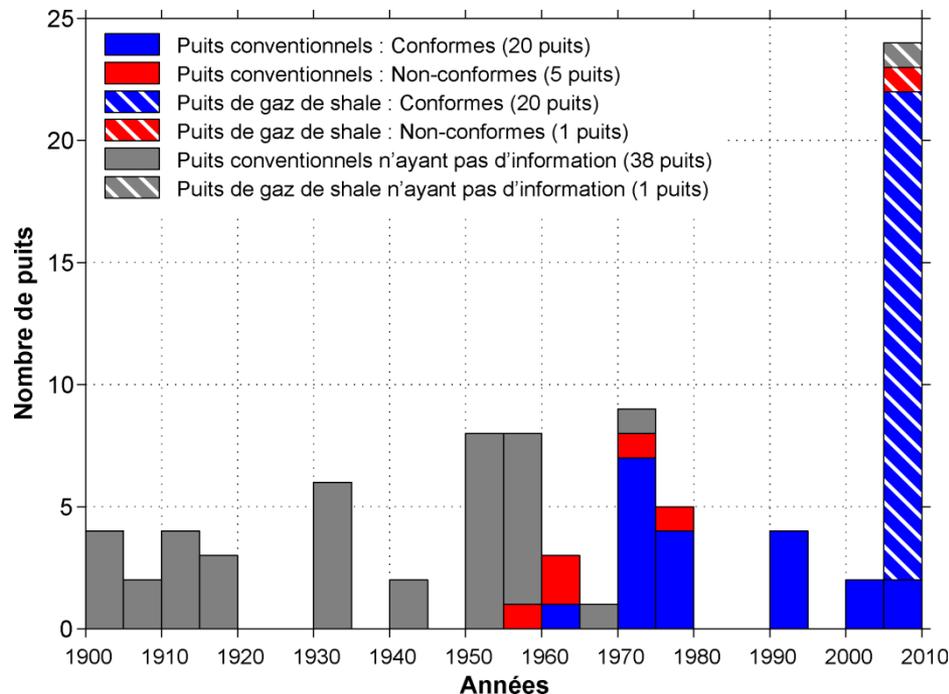
Longueur des coffrages de surface



Limite des eaux douces au Québec

Périodes	Conformes	Non-conformes	Pas d'information
< 1950 (21)	0	0	21
1950 – 1969 (20)	1	3	16
> 1970 (22)	19	2	1
Gaz de shale (22)	20	1	1
<b>Total (85)</b>	<b>40</b>	<b>6</b>	<b>39</b>

Longueur des coffrages de surface conforme au règlement actuel



## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

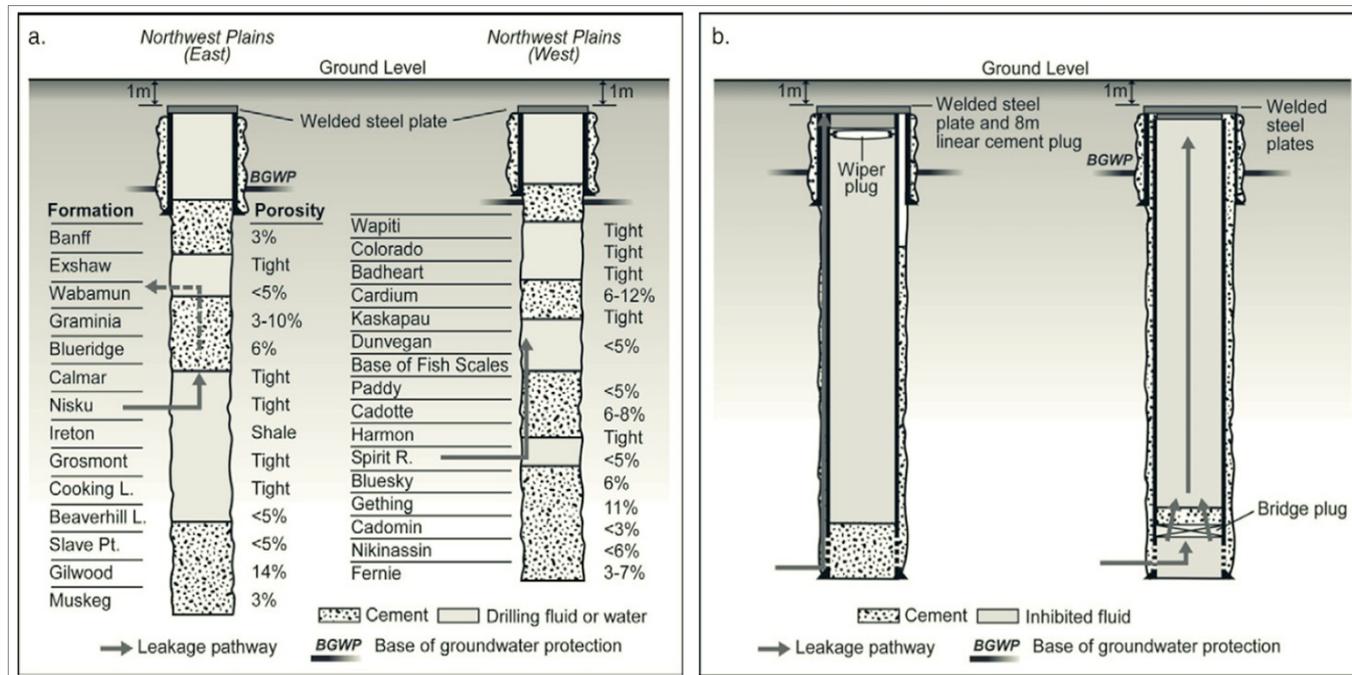
Abandon :

Puits ouvert (en anglais, « open hole ») :

Puits sans coffrage de production. Les unités productrices ne sont pas forcément coffrées

Puits coffré (en anglais, « cased hole ») :

Puits avec un coffrage de production



Watson et Bachu (2009)

Risque de fuite

## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

Abandon :

Puits ouvert (en anglais, « open hole ») :

Puits sans coffrage de production. Les unités productrices ne sont pas forcément coffrées

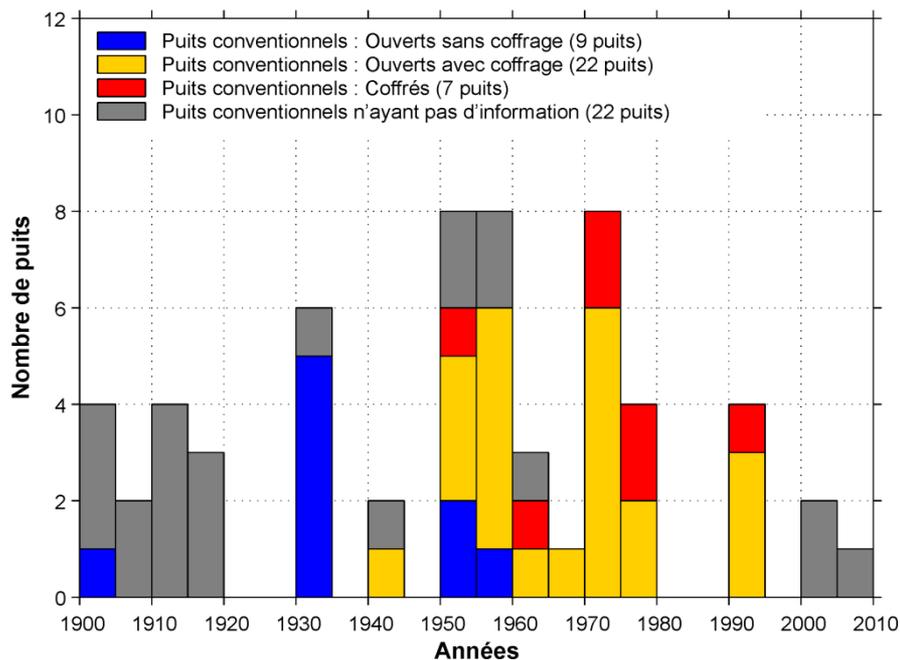
Puits coffré (en anglais, « cased hole ») :

Puits avec un coffrage de production

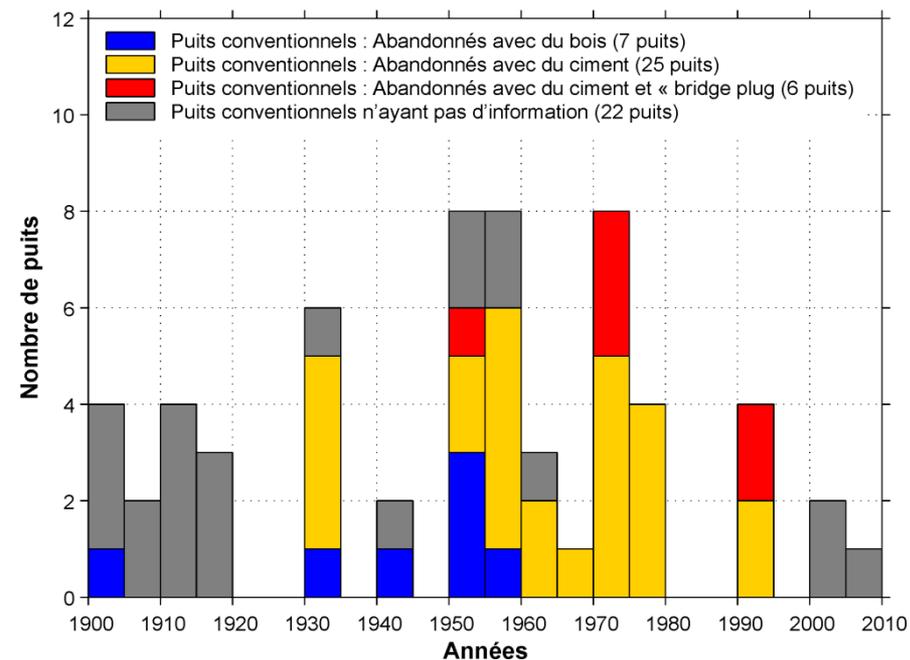
Dans le corridor 2 des BSTL :

60 puits conventionnels abandonnés (sur 85)

Statut d'abandon des puits



Type de bouchons utilisés lors de l'abandon des puits



## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

Abandon (Règlements) :

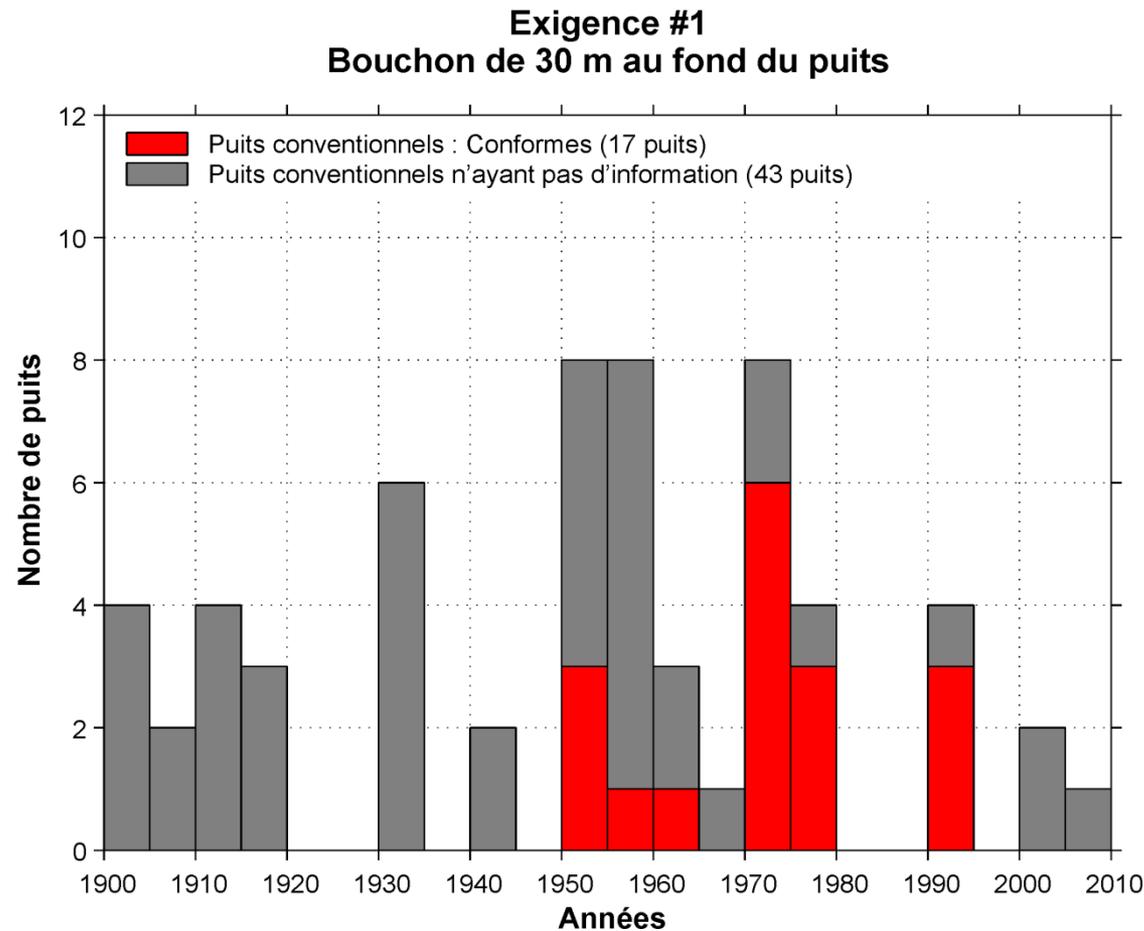
Québec (4 exigences):

1. Un bouchon de ciment d'une longueur minimale de 30 m doit être placé au fond du puits
- 2.1 Puits ouvert (« open hole ») : Chaque zone perméable du puits doit être isolée au moyen d'un bouchon de ciment, lequel ne doit pas être inférieur à 30 m de longueur
- 2.2 Puits coffré (« cased hole ») : Chaque zone perméable du puits doit être isolée au moyen d'un bouchon de ciment, lequel ne doit pas être inférieur à 10 m de longueur
3. Un bouchon de ciment d'une longueur minimale de 30 m doit être placé à travers le sabot du coffrage de surface lorsque ce coffrage représente la plus profonde coffrage
4. Dans le cas d'un puits sur terre, chaque coffrage doit être sectionné à 1 m au-dessous de la surface du sol, un bouchon de ciment doit remplir les 10 premiers mètres du tubage interne, et une plaque d'acier d'une épaisseur d'au moins 1 cm doit être soudée sur l'orifice du tubage extérieur

## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

Abandon :

Exigences 1 : Un bouchon de ciment d'une longueur minimale de 30 m doit être placé au fond du puits



## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

Abandon :

Exigences 2 : Chaque zone perméable du puits doit être isolée au moyen d'un bouchon de ciment, lequel ne doit pas être inférieur à 30 m de longueur (Puits ouvert ) et inférieur à 10 m de longueur (Puits coffré )

Définition de la zone poreuse ou perméable au Québec:

Chaque zone avec un DST (Drill stem test - Essais aux Tiges) ou un test de production

Définition de la zone poreuse ou perméable en Alberta :

Une zone de carbonate avec une porosité effective plus grande que 1% (Trenton – Black River – Chazy – Beekmantown)

Une zone de grés avec une porosité effective plus grande que 3% (Potsdam)

Une zone productrice (peu import sa porosité)

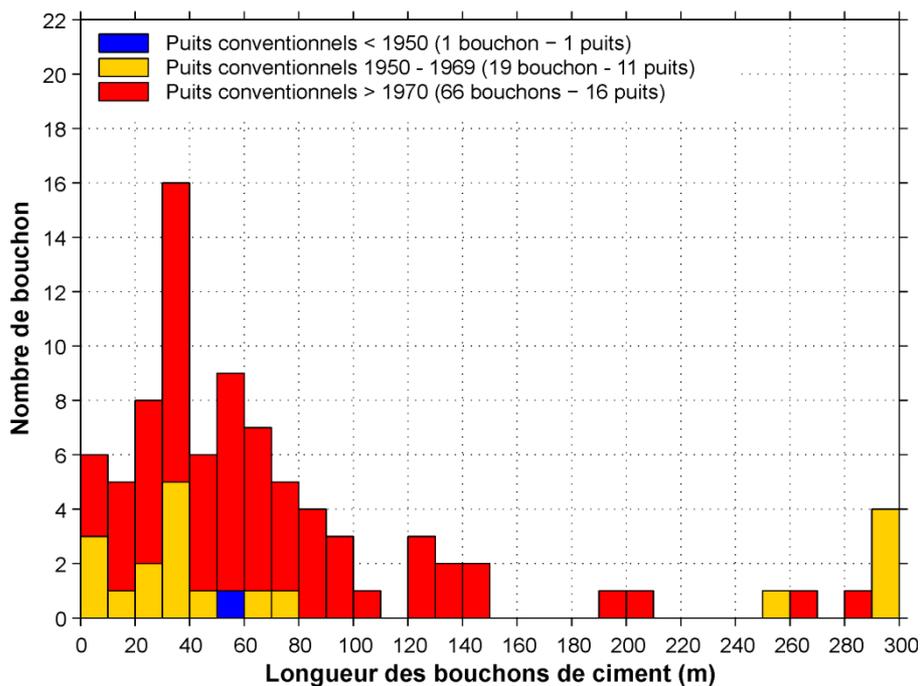
Chaque zone avec un DST (Drill stem test - Essais aux Tiges) produisant plus de 300 mètre linéaire de fluide de formation ou plus de 300 mètre cube (m<sup>3</sup>) de gaz

## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

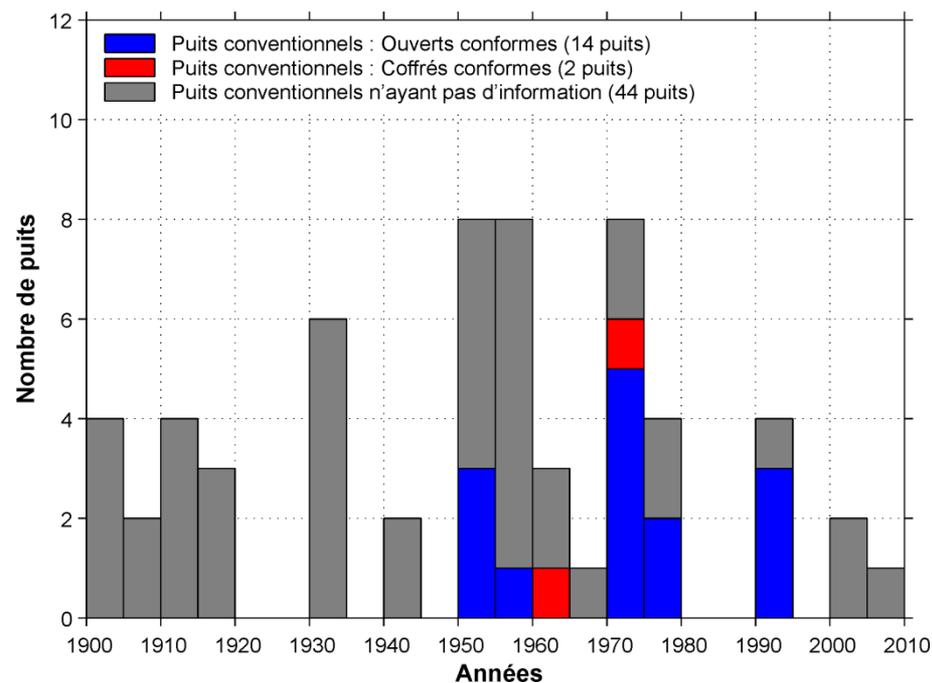
Abandon :

Exigences 2 : Chaque zone perméable du puits doit être isolée au moyen d'un bouchon de ciment, lequel ne doit pas être inférieur à 30 m de longueur (Puits ouvert) et inférieur à 10 m de longueur (Puits coffré)

Longueur des bouchons de ciment dans les puits



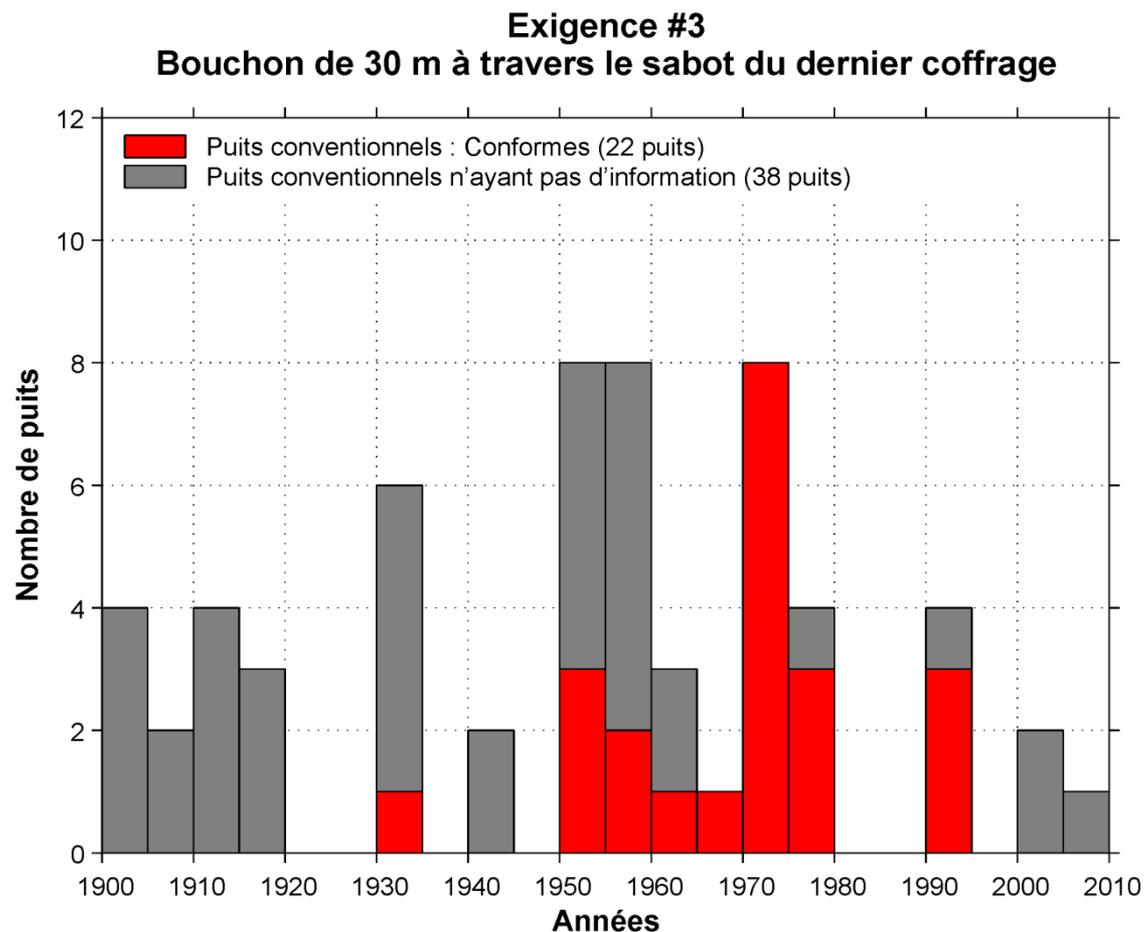
Exigence #2  
Bouchon de 10 ou 30 m sur les zones perméables



## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

Abandon :

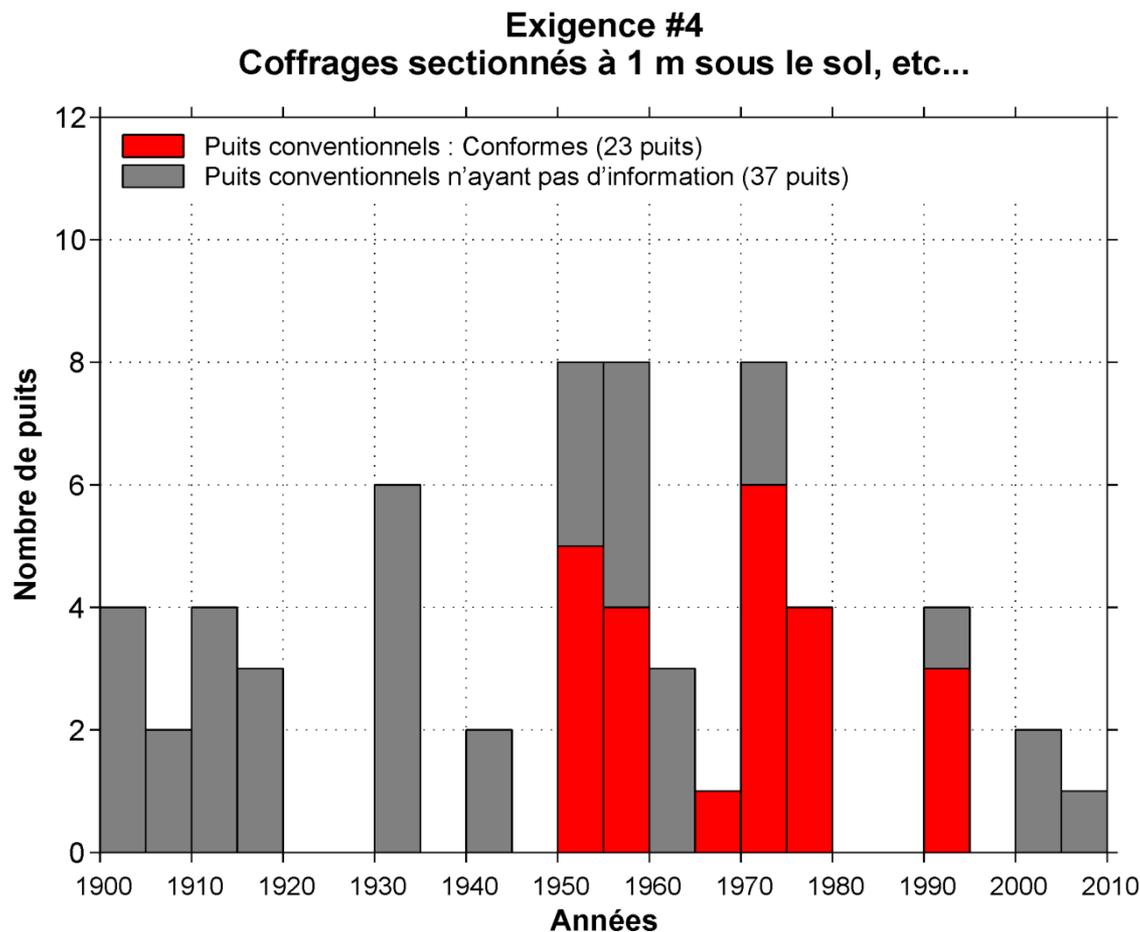
Exigences 3 : Un bouchon de ciment d'une longueur minimale de 30 m doit être placé à travers le sabot du coffrage de surface lorsque ce coffrage représente la plus profonde coffrage



## Puits type dans les BSTL (Corridor 2) :

Abandon :

Exigences 4 : Dans le cas d'un puits sur terre, chaque coffrage doit être sectionné à 1 m au-dessous de la surface du sol, un bouchon de ciment doit remplir les 10 premiers mètres du tubage interne, et une plaque d'acier d'une épaisseur d'au moins 1 cm doit être soudée sur l'orifice du tubage extérieur



## Problématiques environnementales :

Pour qu'il existe une fuite (ou une migration) des fluides, les conditions suivantes doivent être réunies : (Watson, 2004)

Un chemin d'écoulement :

Les fractures naturelles ou les failles : Faille Aston, Faille Yamaska et ...

Le puits : 280 puits = 251 conventionnels + 29 gaz de shale + futurs puits

Une force :

Gradient de pression : Gradient de 10 à 12 kPa/m  
(Konstantinovskaya et al., 2012; Séjourné et al., 2012 )

$$v = -\frac{k_r}{\mu} k (\nabla P - \rho g)$$

Densité (bouyancy) :  $\rho_{\text{CH}_4}(p = 1 \text{ bar}, T = 25^\circ\text{C}) = 0.676 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}(p = 1 \text{ bar}, T = 25^\circ\text{C}) = 996.99 \text{ kg/m}^3$

Une source :

Fluide de fracturation : Eau (90 – 95%) + Proppant (4 – 8%)  
+ Additifs chimiques (1 – 2%)

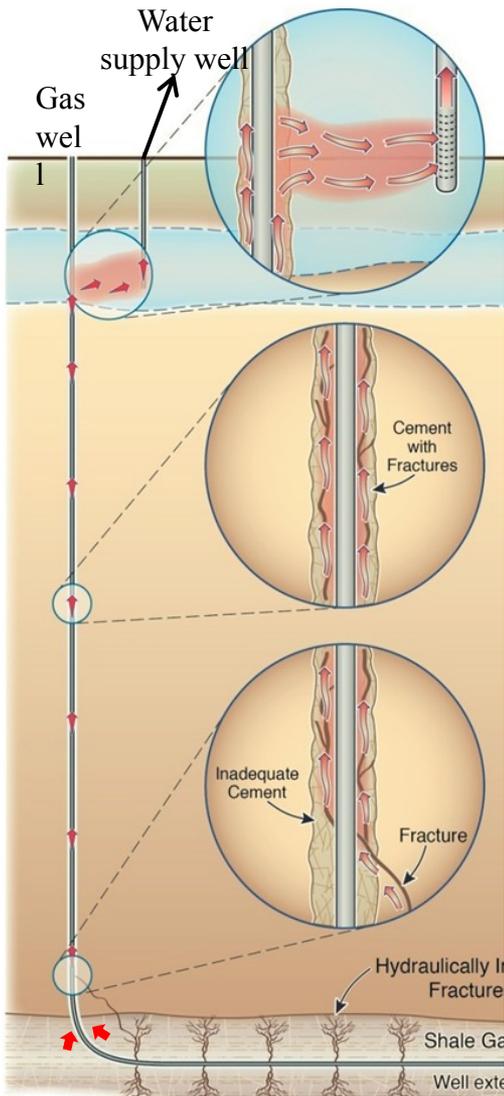
Fluide de formation (Saumure) : Eau + Salinité

Gaz :  $\text{CH}_4$  en phase gazeuse ou dissout dans la saumure

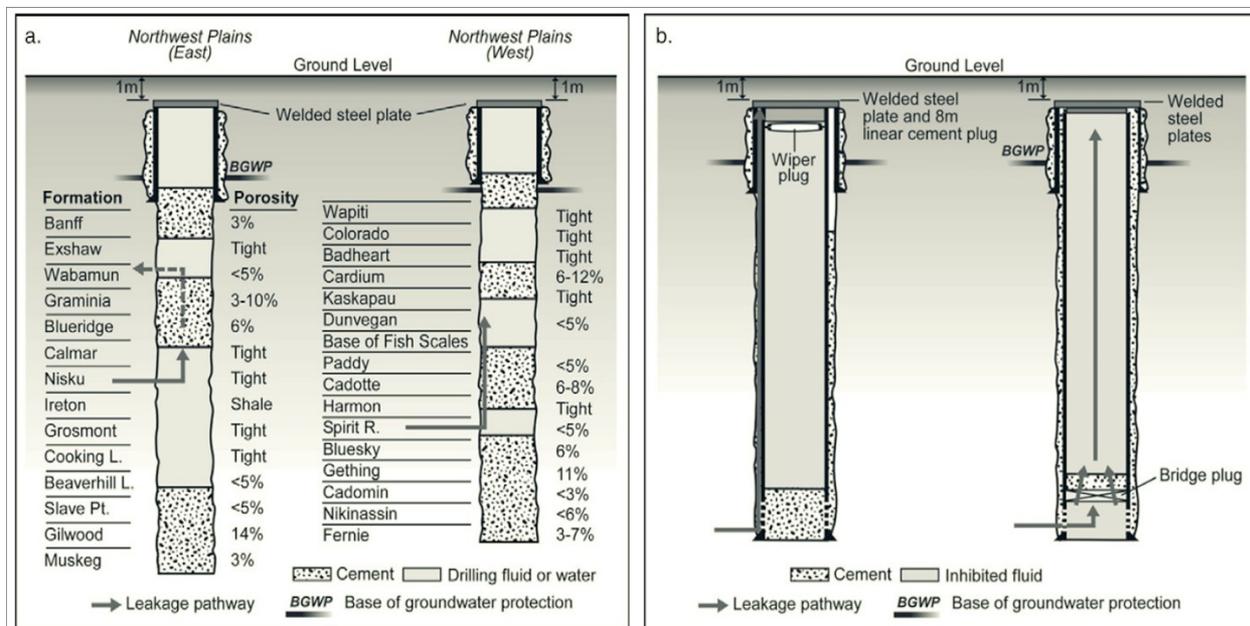
# Problématiques environnementales :

Construction de puits :

## Puits de production



## Puits abandonné



Watson et Bachu (2009)

## Problématiques environnementales :

Cause d'une cimentation inadéquate :

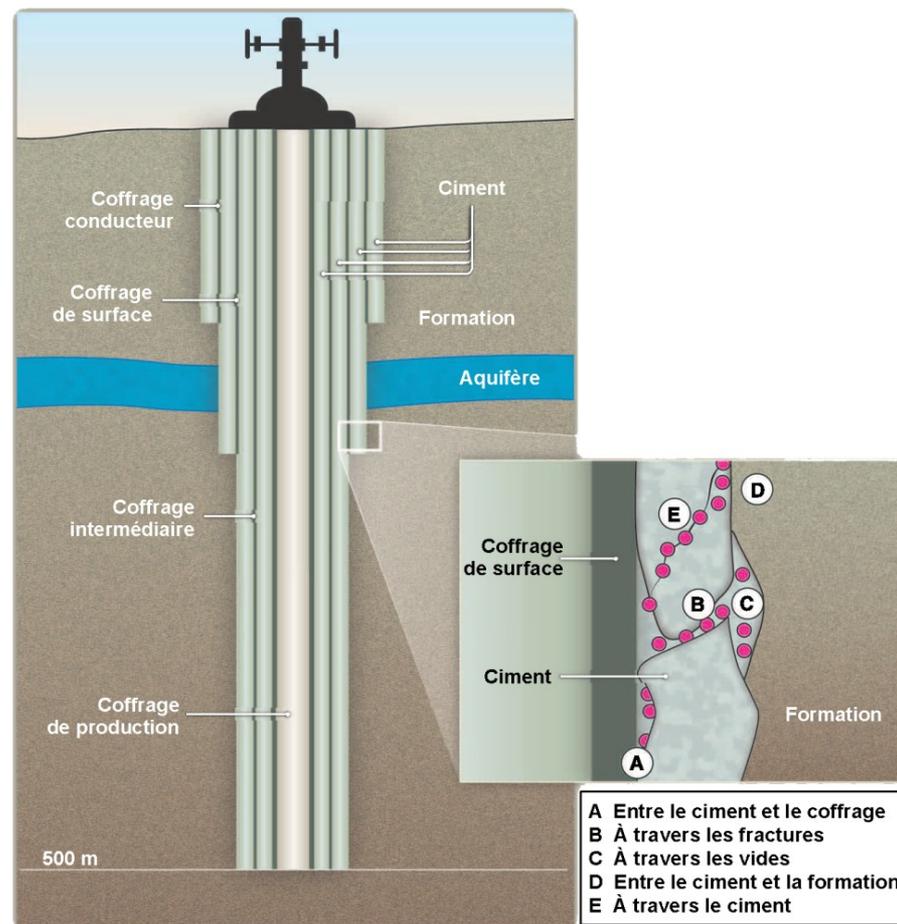
La perte de pression dans la colonne de ciment pendant le durcissement (Cooke et al., 1983)

La présence de boues de forage entre le coffrage et la formation pendant l'injection du ciment liquide (Bonett et Pafitis, 1996)

La présence possible du gaz à haute pression dans les formations proches de la surface (Bol et al., 1991)

La contraction du ciment lors de la prise (Dusseault et al, 2000)

La perte de ciment due à la pression hydrostatique très élevée de la colonne du ciment liquide (avant le durcissement) qui fracture la formation et cause la pénétration de ciment dans la formation (Vidic et al., 2013)



(Vidic et al., 2013)

## Problématiques environnementales :

Contrôle de la qualité de la cimentation :

La qualité du ciment entre le coffrage et la roche est généralement vérifiée à l'aide d'un test de pression ou d'un outil de diagraphie acoustique :

Diagraphie acoustique ne permet pas toujours de détecter les discontinuités :  
(Boyd et al., 2006)

Présence de micro-canaux

Position excentrée du coffrage

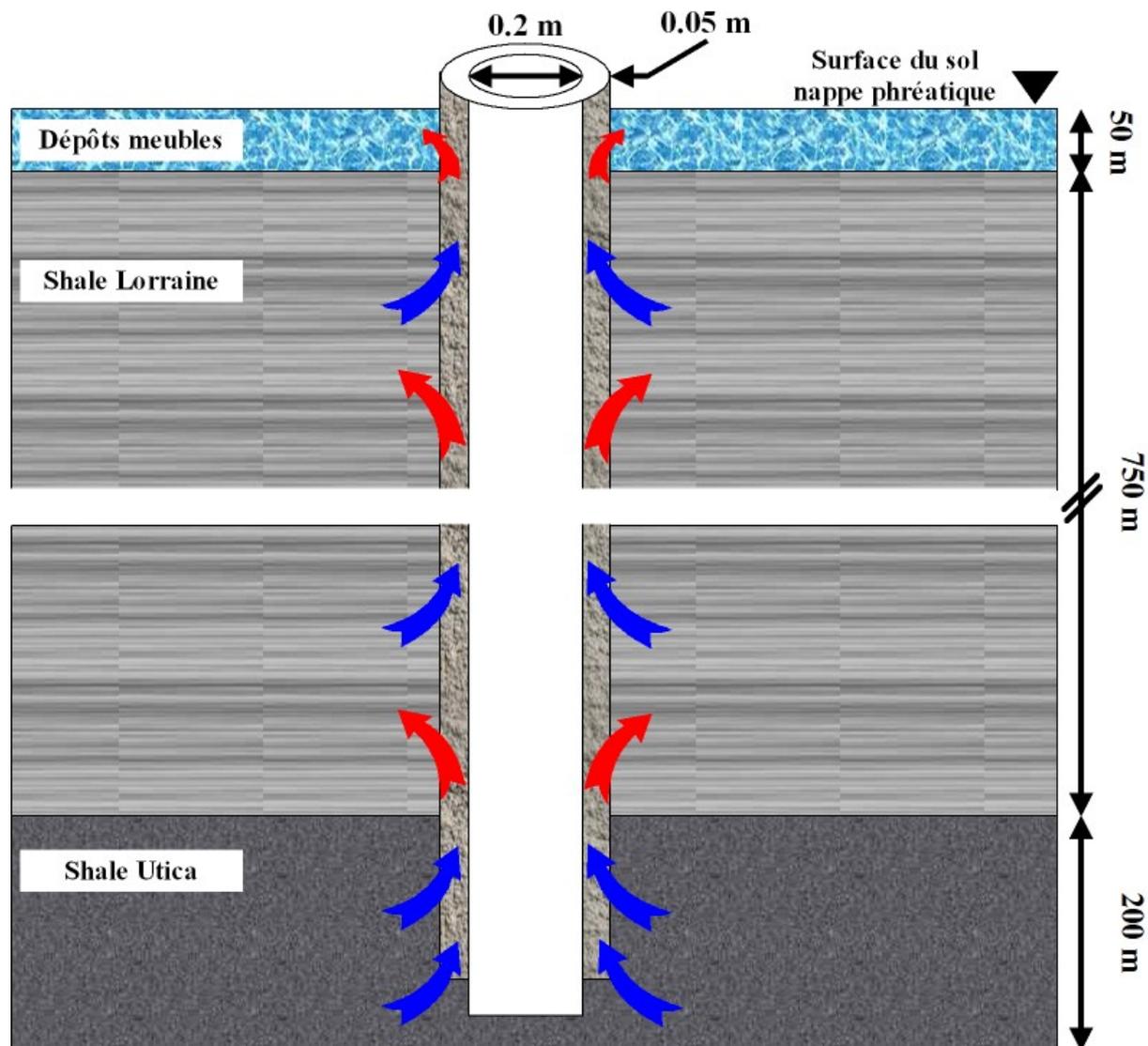
Présence des formation peu poreuses (ce qui est le cas des shales)

Présence de ciment à faible densité (ciment très poreux)

En cas d'identification des discontinuités, elles doivent être bouchées en réinjectant du ciment par un processus appelé "compression" (remedial cementing or squeezing).

## Problématiques environnementales :

Scénario Conceptuel :



## Propriétés Hydrodynamiques :

Shale :

Shale d'Utica : (Duchaine et al, 2013)

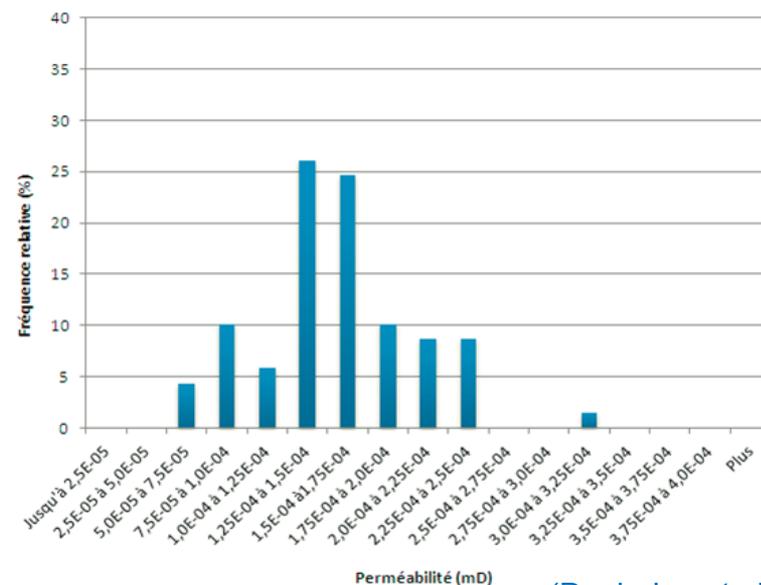
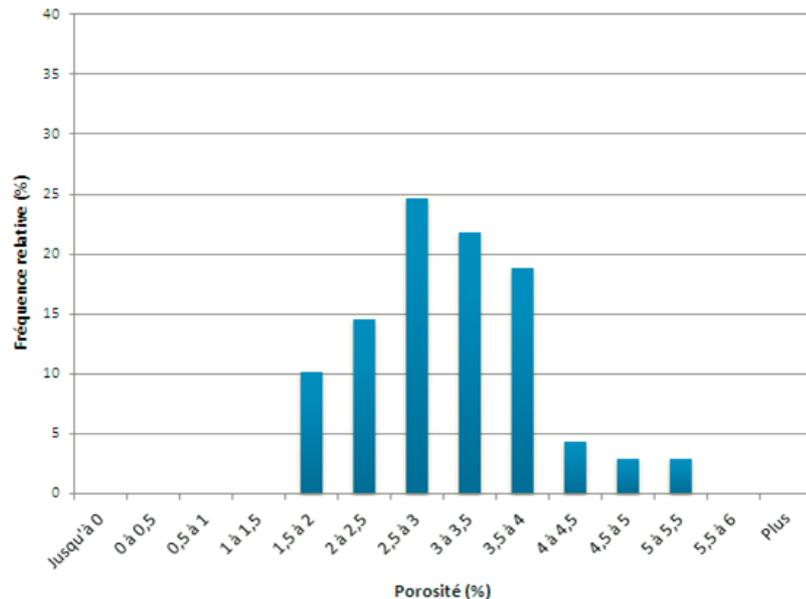
Porosité : 0.16 à 6.6% avec une porosité moyenne de 3.25%

Perméabilité :  $5 \times 10^{-5}$  à  $3.5 \times 10^{-4}$  mDarcy avec une perméabilité moyenne de  $1.5 \times 10^{-4}$  mDarcy

Groupe de lorraine : (Séjourné et al., 2012)

Porosité : 0.12 à 6.1% avec une porosité moyenne de 3%

Perméabilité :  $2 \times 10^{-12}$  à  $3.5 \times 10^{-4}$  mDarcy



## Propriétés Hydrodynamiques :

Shale :

Shale d'Utica : (Duchaine et al, 2013)

Porosité : 0.16 à 6.6% avec une porosité moyenne de 3.25%

Perméabilité :  $5 \times 10^{-5}$  à  $3.5 \times 10^{-4}$  mDarcy avec une perméabilité moyenne de  $1.5 \times 10^{-4}$  mDarcy

Groupe de Lorraine : (Séjourné et al., 2012)

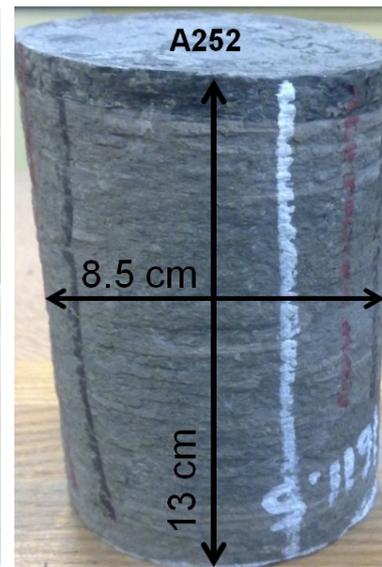
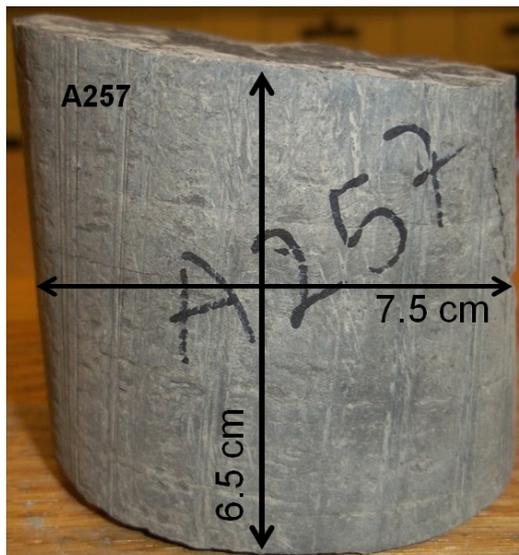
Porosité : 0.12 à 6.1% avec une porosité moyenne de 3%

Perméabilité :  $2 \times 10^{-12}$  à  $3.5 \times 10^{-4}$  mDarcy

Porosimétrie au mercure (Département de géologie et de génie géologique – Université LAVAL)

A257 Junex, Saint-Augustin-de-Desmaures (Shale Utica)

A252 Talisman Energy, Gentilly (Shale Lorraine)



## Propriétés Hydrodynamiques :

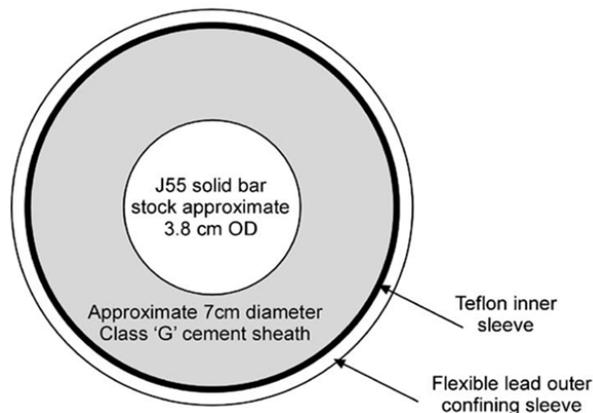
### Ciment :

Propriétés de la matrice du ciment en cas d'une cimentation adéquate : (e.g., Mehta et Manmohan, 1980; Reinhardt et Gaber, 1990; Jacobs et Wittmann, 1992)

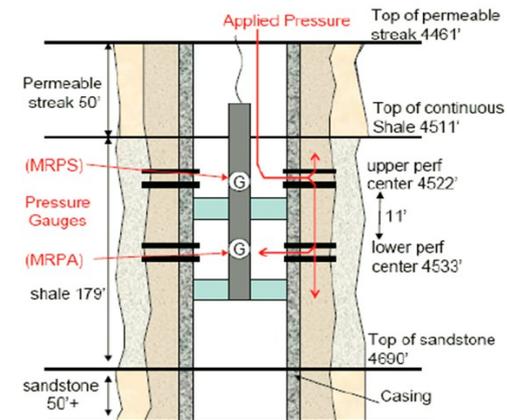
Une fonction du rapport E/C, du degré ou de la durée d'hydratation, de la température et la pression d'hydratation et du type du ciment

Propriétés équivalentes de espace annulaire entre le coffrage et la formation en cas d'une cimentation inadéquate

Echantillon fabriqué au laboratoire  
(Bachu and Bennion, 2009)



Test directement sur le puits  
(Crow et la., 2010; Gasda et al., 2013)



$10^{-4}$  mDarcy

100 mDarcy

Cimentation adéquate

Cimentation Inadéquate

## Simulation Numérique :

Code DuMux : (<http://www.dumux.org/>)

(Helmig, 1997; Bastien et al., 2008)

2 phases (Gaz (g) et Liquide (l))

2 composants (H<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub>)

3D, Advection et Diffusion

Pas de dispersion

Pas de réaction chimique

Inconnus :  $P$  and  $X$  or  $P$  and  $S$

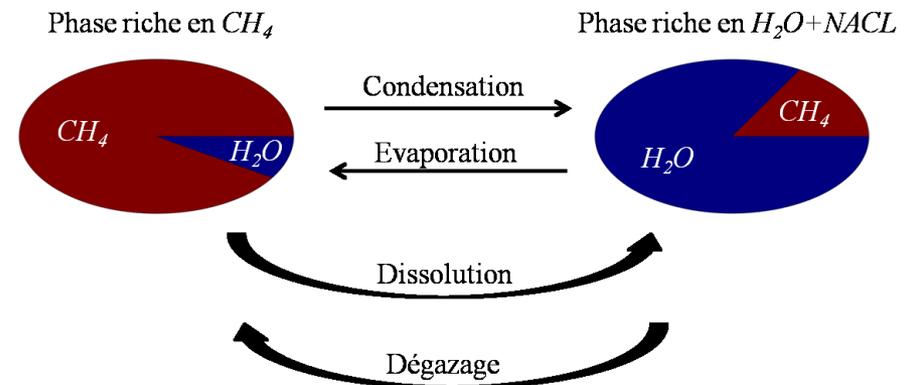
Equilibre thermodynamique :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{\text{CH}_4}^l = \frac{\varphi_{\text{CH}_4} (1 - x_{\text{H}_2\text{O}}^g) p}{\gamma_{\text{CH}_4} H_{\text{CH}_4}(1, T)} \exp\left(-\frac{v_{\text{CH}_4}^\infty (p-1)}{RT}\right) \\ x_{\text{H}_2\text{O}}^g = \frac{K_{\text{H}_2\text{O}}^0 (1 - x_{\text{CH}_4}^l - x_{\text{NaCl}}^l)}{\varphi_{\text{H}_2\text{O}} p} \exp\left(\frac{v_{\text{H}_2\text{O}}^\infty (p-1)}{RT}\right) \end{array} \right.$$

$$\phi \frac{\partial (\sum_{\alpha} \rho_{\alpha} X_{\alpha}^C S_{\alpha})}{\partial t} - \sum_{\alpha} \text{div} \left\{ \rho_{\alpha} X_{\alpha}^C \frac{k_{r\alpha}}{\mu_{\alpha}} k(\text{grad } P_{\alpha} - \rho_{\alpha} \mathbf{g}) \right\} - \sum_{\alpha} \text{div} \{ D_{\alpha}^C \rho_{\alpha} \text{grad } X_{\alpha}^C \} - \sum_{\alpha} q_{\alpha}^C = 0$$

$$\alpha \in (\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}, \text{CH}_4) \quad C \in (\text{H}_2\text{O}, \text{CH}_4)$$

$$\sum_{\alpha} X_{\alpha}^C = 1 \quad | \quad \sum_{\alpha} S_{\alpha} = 1 \quad | \quad P_c = P_{\text{CH}_4} - P_b$$



## Simulation Numérique :

### Système de fluides :

#### Eau

The International Association for the Properties of Water and Steam, ([Wagner et Pruess, 1997](#))

#### Saumure

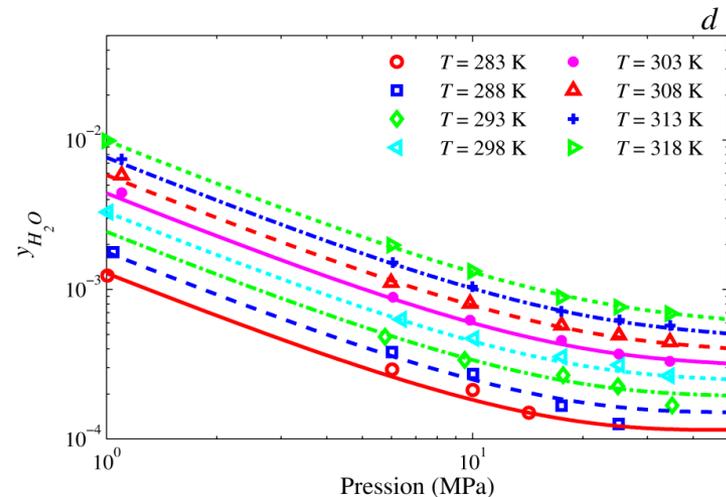
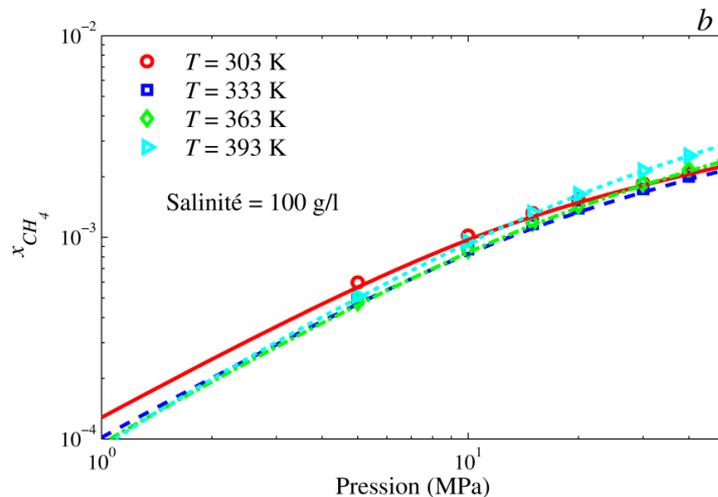
Seismic properties of pore fluids ([Batzle et Wang, 1992](#))

#### CH<sub>4</sub>

A New Equation of State and Tables of Thermodynamic Properties for Methane, ([Setzmann et Wagner, 1991](#))

#### Mélange saumure/méthane

([pycher et al. \(2003\)](#), [Spycher et Pruess \(2005\)](#) et [Zirrahi et al. \(2012\)](#), [Duffy et al., 1961](#); [Duan et la., 1992](#); [Duan et Mao, 2006](#); [Zirrahi et al, 2012](#))



## Simulation Numérique :

### Hypothèses :

Couches homogènes et isotropes

Salinité constante (150 g/l)

Ecoulement radiale

Gradient géothermique imposé et constant

### Propriétés Hydrodynamiques :

Groupe de lorraine :

Porosité : 3%

Perméabilité :  $10^{-4}$  mDarcy

### Condition initiale :

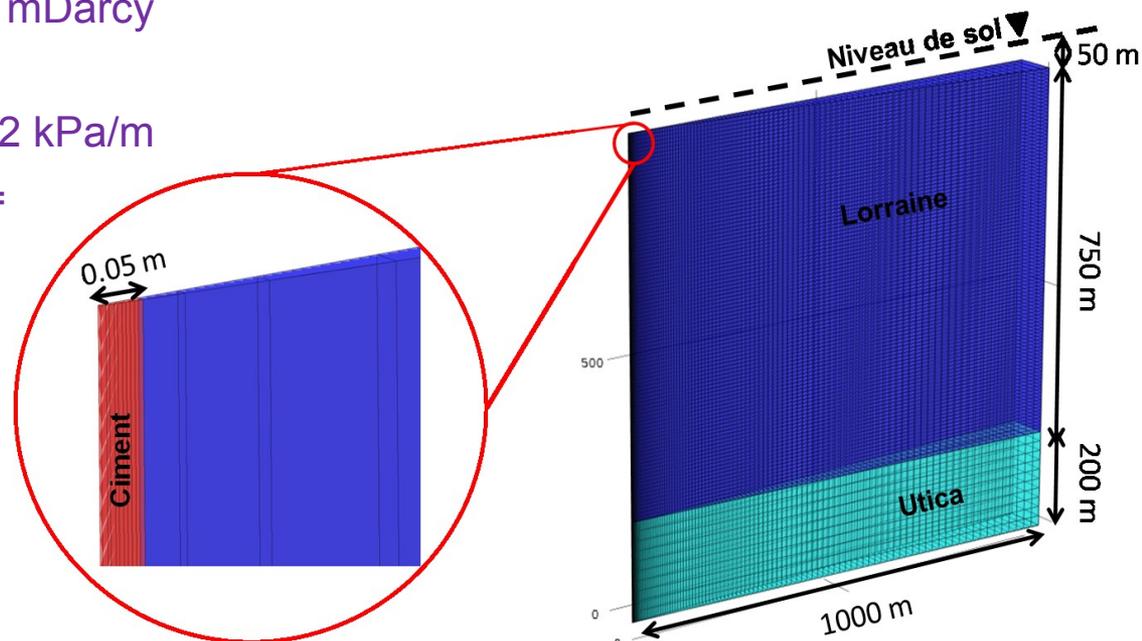
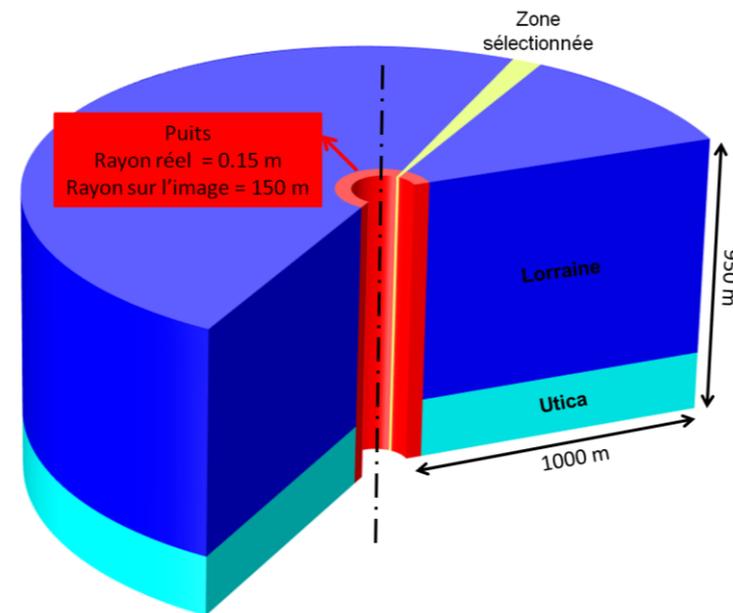
Gradient de pression : 12 kPa/m

Saturation en gaz  $S_{CH_4} =$

Ciment : 0%

Utica : 30%

Lorraine : 10%



## Simulation Numérique :

Condition aux limites :

Surface du maillage (sommet du Groupe de Lorraine) :

Pression constante pour la phase liquide et condition limite libre pour le transport

Base du shale d'Utica :

Pression et saturation constante

Surface latérale à  $r = 0.1 \text{ m}$  :

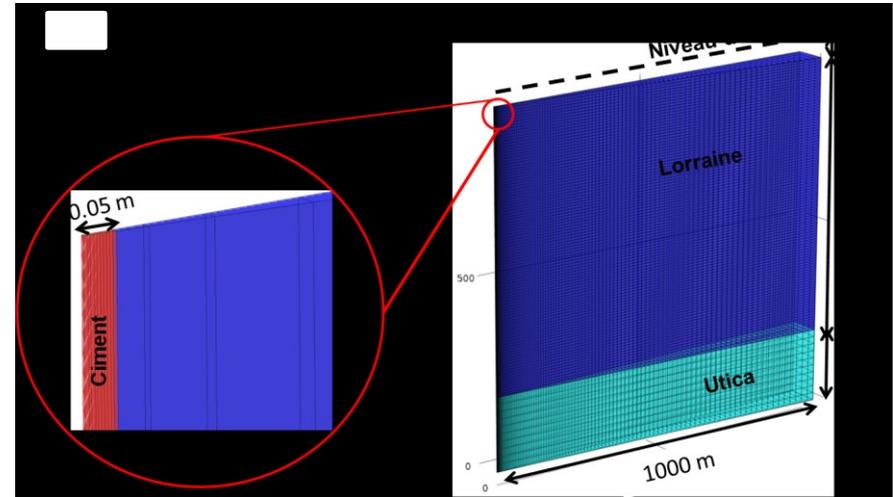
Flux horizontal nul pour les deux phases

Surface latérale à  $r = 1000 \text{ m}$  :

Pression et saturation constante

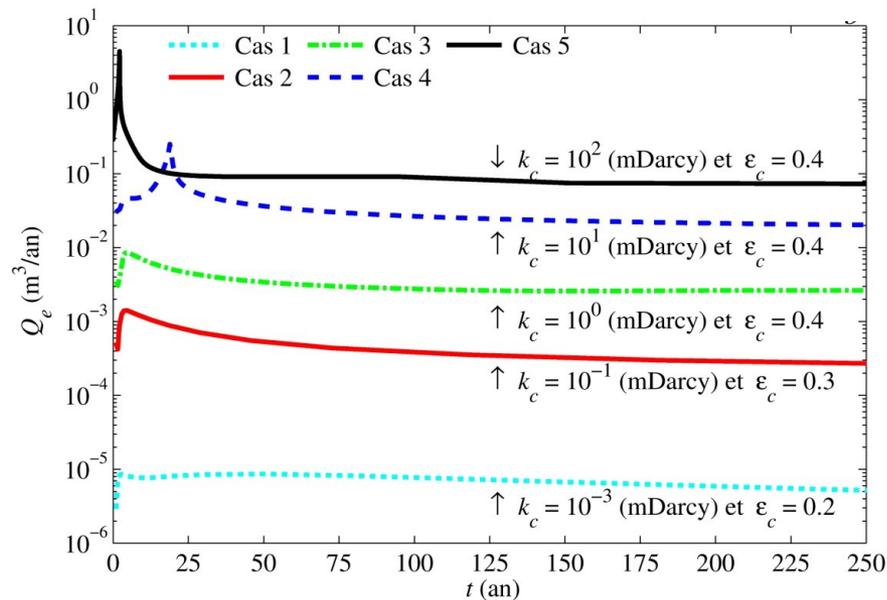
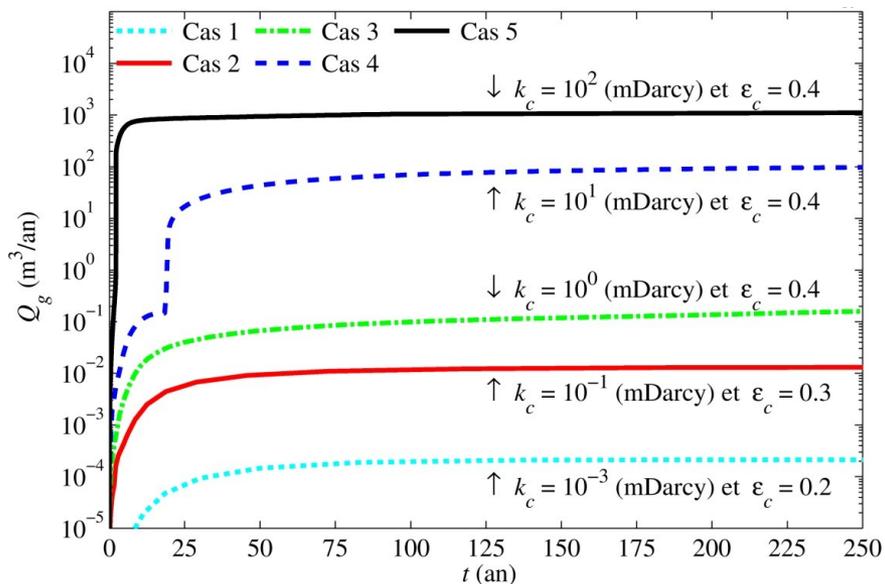
Autres surfaces latérales :

Flux nul dans la direction normale à la surface (écoulement radial symétrique)

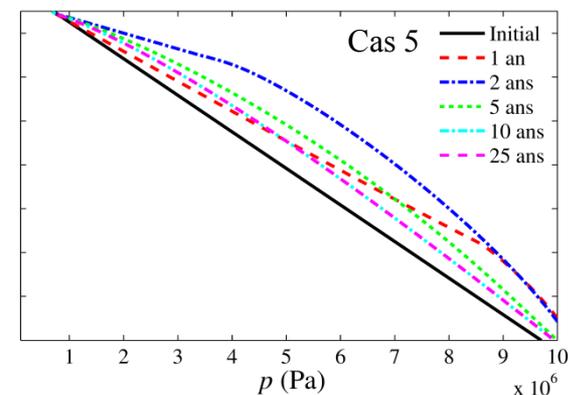
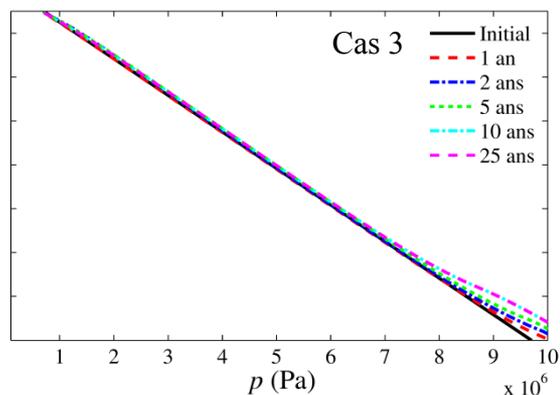
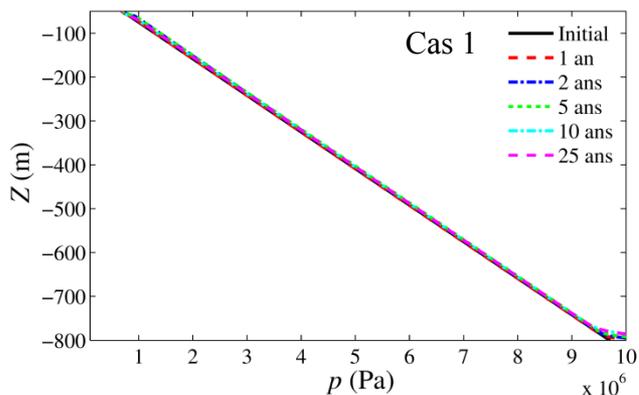


## Simulation Numérique :

Résultats : (shale Utica :  $k = 10^{-3}$  mDarcy et  $\varepsilon = 3\%$ )

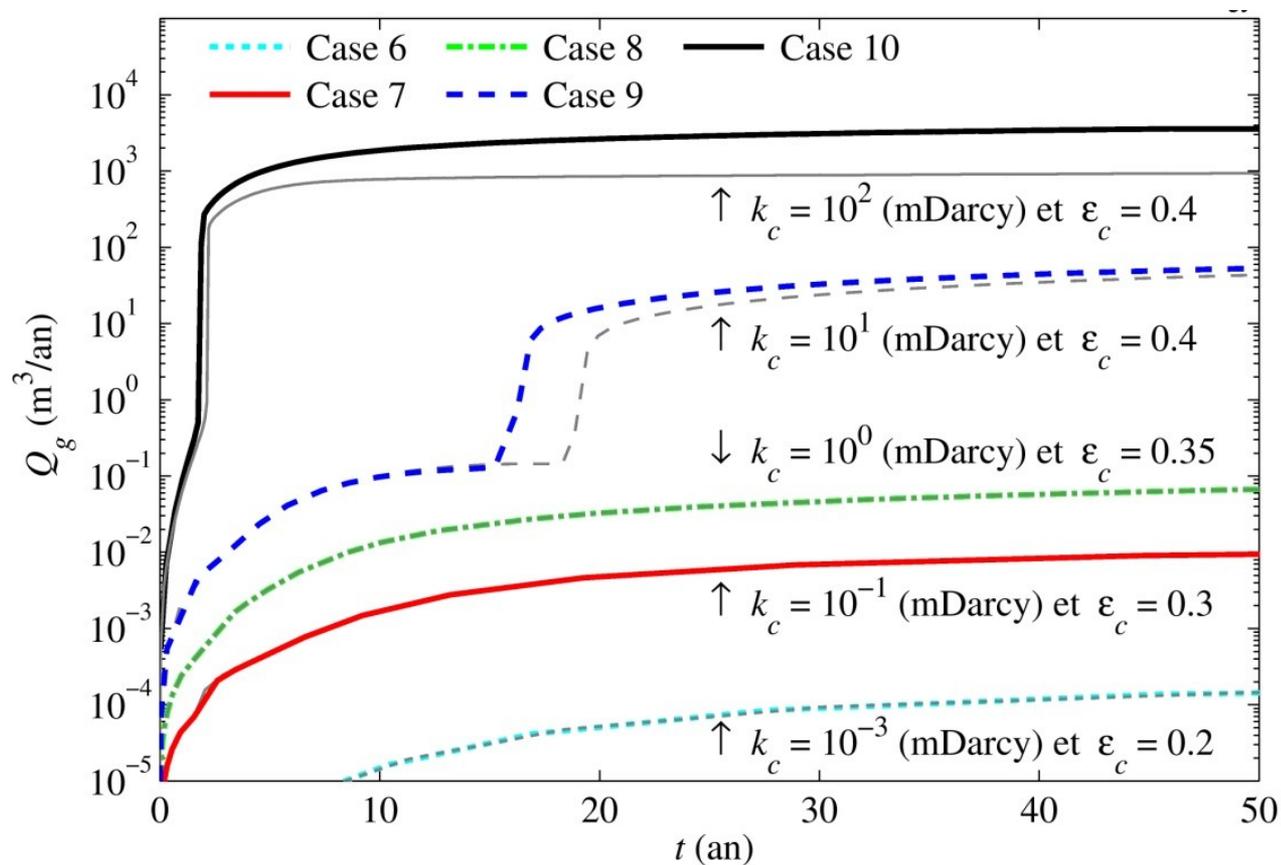


## Profile de pression de la phase liquide dans le ciment



## Simulation Numérique :

Résultats : (shale Utica :  $k = 10^{-1}$  mDarcy et  $\varepsilon = 7\%$ )



## Conclusion :

Étude E3-3 : Évaluation générale de l'intégrité des puits dans les BSTL :

	Éléments à évaluer	Périodes			Gaz de shale
		< 1950	1950-1969	> 1970	
<b>Coffrages</b>	Informations disponibles				
	Grade API				
	Longueur du coffrage de surface				
<b>Ciment</b>	Informations disponibles				
	Classe API				
<b>Abandon</b>	Informations disponibles				N/A
	Type de bouchon				N/A
	Exigences #1-2-3-4				N/A

Insuffisant	
Peu	
Moyennement	
Bien	

## Conclusion :

### Étude E3-10 :

#### Propriétés hydrodynamiques :

Plus d'expérience pour définir les Propriétés hydrodynamiques du shale

#### Les résultats de simulation suggèrent que :

La présence d'un ciment frais de bonne qualité et bien installé dans la section annulaire ne pose pas de problématique de fuites du gaz à long terme ( $Q_g = 1.97 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{an}$  après une période de 250)

Une mauvaise mise en place du ciment ou bien sa dégradation à long terme pourrait donner lieu à des fuites notables de méthane dans les aquifères superficiels.  $Q_g = 1000 \text{ m}^3/\text{an}$  (13  $\text{m}^3/\text{jour}$ ) 5 ans après l'abandon du puits

Réaliser des simulation pour des perméabilité plus important de la section annulaire

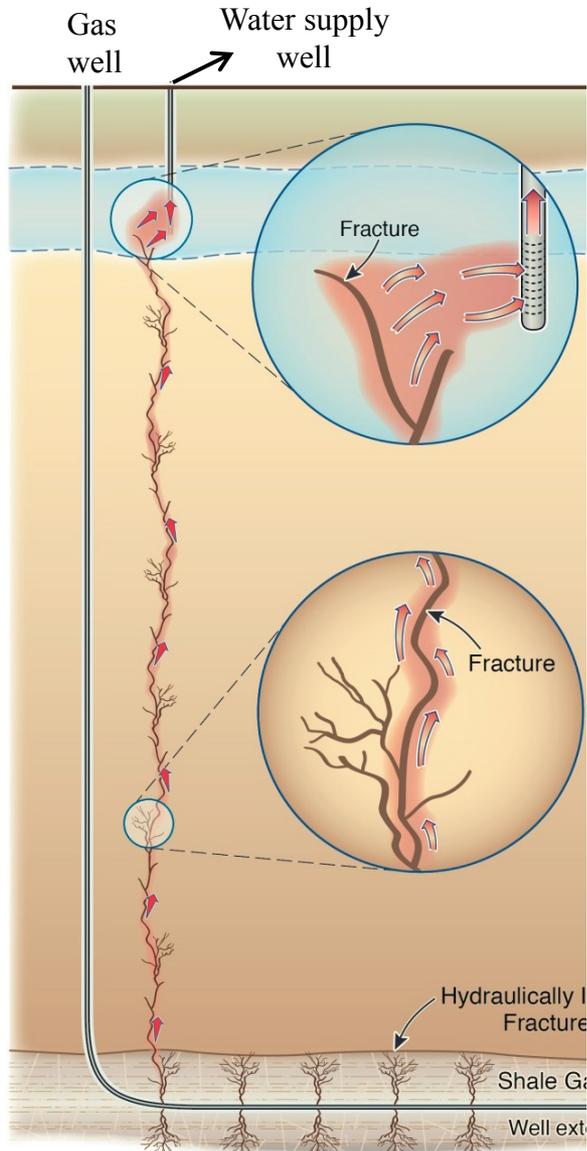
Certaines fuites pourraient être détectées seulement plusieurs années suivant à la fermeture du puits

Le profile de pression dans le coffrage peut être utilisé pour détecter l'arrivé du gaz vers la surface

**Merci pour votre attention**

## Problématiques environnementales :

Présence des fractures naturelles ou des failles :



Extension des fractures : (Davies et al., 2012)

Fracturation hydraulique :

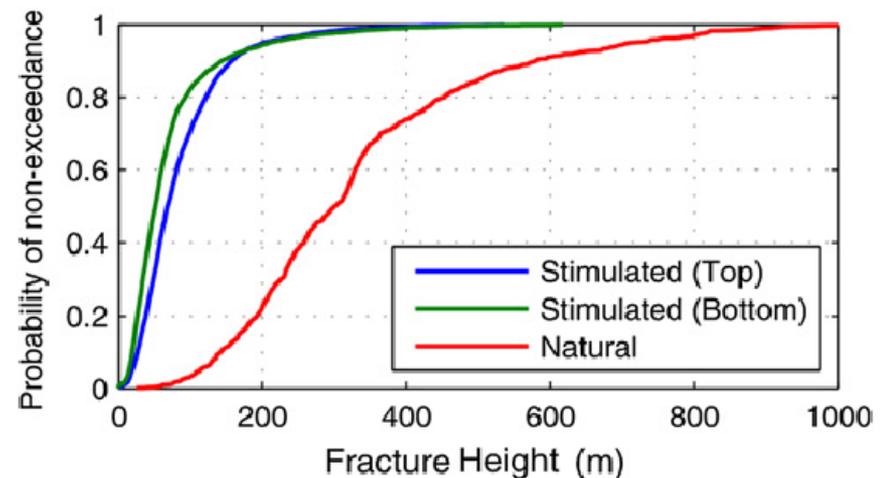
Shale Marcellus, Barnett, Woodford

Extension moyenne : 3 à 100 mètres

Fracture naturelles :

Europe, Afrique et Amérique du nord

Extension moyenne : 200 à 400 mètres

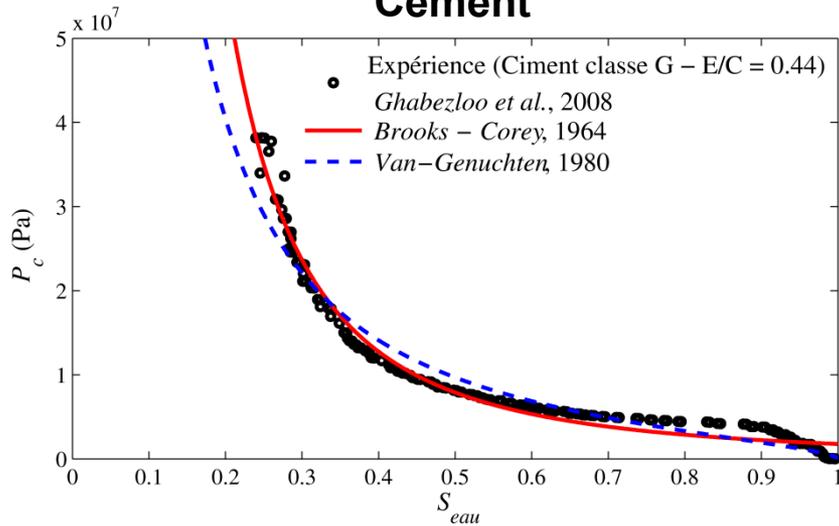


# Future works

Simulations for higher casing annulus equivalent permeability ( $k > 100$  mDarcy).

Experiments to define shale two-phase flow properties.

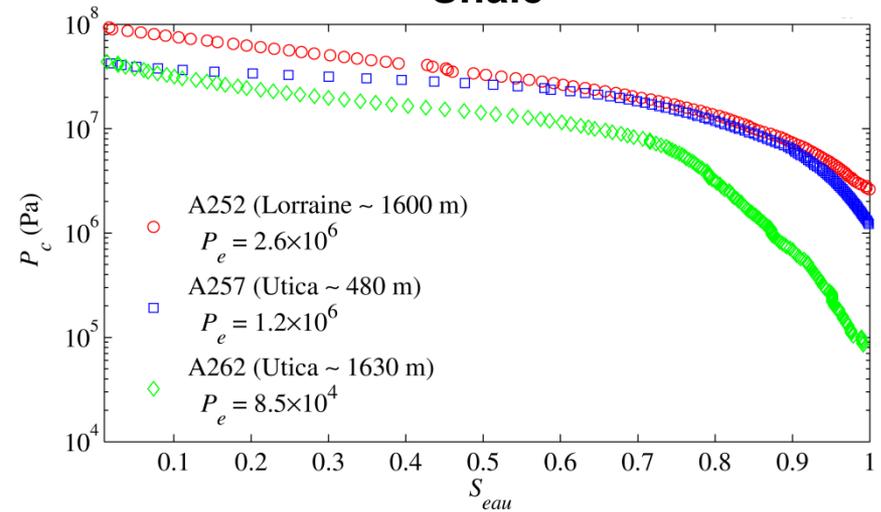
## Cement



Brooks & Corey :

$$\begin{cases} P_c = P_e S_e^{-1/\lambda} \\ S_e = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{nwr}} \end{cases}$$

## Shale



$$k_{rw} = S_e^{(2+3\lambda)/\lambda}$$

$$k_{rw} = (1 - S_e)^2 (1 - S_e^{(2+\lambda)/\lambda})$$