

**Évaluation du potentiel de stockage géologique du CO₂
des bassins sédimentaires du sud du Québec.
Mise à jour et évaluation complémentaire du
bassin siluro-dévonien de la Gaspésie.**

Par

**Karine Bédard, Félix-Antoine Comeau,
Michel Malo et Erwan Gloaguen**

Septembre 2017 – Québec

R-1762

TABLE DES MATIÈRES

PRÉAMBULE	3
SOMMAIRE	4
1. INTRODUCTION	5
2. MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES BASSINS	5
2.1. CONCEPTS	5
2.2. CRITÈRES GÉOLOGIQUES	7
2.3. CRITÈRES PRATIQUES	9
3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	10
3.1. PLATE-FORME DU SAINT-LAURENT	10
3.1.1. <i>Bassin cambro-ordovicien des Basses-Terres du Saint-Laurent</i>	10
3.1.2. <i>Bassin ordovicien-silurien d'Anticosti</i>	11
3.2. PROVINCE DES APPALACHES	11
3.2.1. <i>Bassin cambro-ordovicien des Appalaches</i>	11
3.2.2. <i>Bassin siluro-dévonien de la Gaspésie</i>	12
3.2.3. <i>Bassin permo-carbonifère de Madeleine</i>	12
4. ÉVALUATION DES BASSINS SÉDIMENTAIRES DU SUD DU QUÉBEC	13
4.1. PLATE-FORME DU SAINT-LAURENT	16
4.1.1. <i>Bassin cambro-ordovicien des Basses-Terres du Saint-Laurent</i>	16
4.1.2. <i>Bassin ordovicien-silurien d'Anticosti</i>	17
4.2. PROVINCES DES APPALACHES	18
4.2.1. <i>Bassin cambro-ordovicien des Appalaches</i>	18
4.2.2. <i>Bassin siluro-dévonien de la Gaspésie</i>	18
4.2.3. <i>Bassin permo-carbonifère de Madeleine</i>	19
5. ANALYSE COMPLÉMENTAIRE DU BASSIN SILURO-DÉVONIEN DE LA GASPÉSIE	20
5.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	20
5.1.1. <i>Structure</i>	20
5.1.2. <i>Stratigraphie</i>	21
5.2. RÉGION DE GASPÉ	23
5.2.1. <i>Particularités géologiques</i>	23
5.3. STRUCTURE DE BONAVENTURE	24
5.3.1. <i>Particularités géologiques</i>	24
6. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS	26
6.1. ÉVALUATION DU POTENTIEL DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU CO ₂ DES BASSINS SÉDIMENTAIRES DU SUD DU QUÉBEC	26
6.2. ÉVALUATION COMPLÉMENTAIRE DU BASSIN SILURO-DÉVONIEN DE LA GASPÉSIE	26
RÉFÉRENCES	27

TABLE DES FIGURES

Figure 1 - Diagramme de phase du CO₂ avec des exemples de comportement du CO₂ dans les bassins froids et chauds (modifiée de Bachu, 2003). 8

Figure 2 – Bassins sédimentaires du sud du Québec. BTSL : Basses-Terres du Saint-Laurent. P-C : permo-carbonifère. S-D : siluro-dévonien. O-S : ordovicien-silurien. C-O : cambro-ordovicien. 10

Figure 3 – Architecture des bassins cambro-ordoviens des BTSL et des Appalaches sur la ligne sismique M-2001 (modifiée de Castonguay *et al.*, 2006). La ligne sismique est localisée sur la Figure 2, ligne rouge A-B. 11

Figure 4 – Coupe géologique montrant l’architecture du bassin ordovicien-silurien d’Anticosti (modifiée de Castonguay *et al.*, 2005). La coupe est localisée sur la Figure 2, ligne rouge C-D. 11

Figure 5 – Coupe géologique montrant l’architecture du bassin siluro-dévonien de la Gaspésie (modifiée de Castonguay *et al.*, 2004). La coupe est localisée sur la Figure 2, ligne rouge E-F. 12

Figure 6 – Coupe géologique montrant l’architecture du bassin permo-carbonifère de Madeleine dans le Golfe du Saint-Laurent (modifiée de Lavoie *et al.*, 2009). La coupe est localisée sur la Figure 2, ligne rouge G-H-I. 12

Figure 7 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et des épices des séismes entre 1985 et 2017. Ellipses rouges : zones d’activité sismique plus importantes. Sources de données: Séismes Canada (2017). 14

Figure 8 – Carte géothermale du nord-est de l’Amérique du Nord (modifiée de Blackwell et Richards, 2004). Les couleurs bleues représentent des gradients géothermiques plutôt faibles tandis que les couleurs rouges-oranges représentent des gradients élevés. 14

Figure 9 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et de l’ensemble des puits pétroliers et gaziers forés ainsi que les lignes sismiques acquises sur le territoire. 15

Figure 10 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et des émissions de CO₂ par installation industrielle en 2015. Source des données pour les émissions de CO₂ : Environnement Canada (2015). 15

Figure 11 – Colonne stratigraphique simplifiée du bassin des BTSL. 16

Figure 12 – Colonne stratigraphique simplifiée du bassin d’Anticosti. 17

Figure 13 – Colonne stratigraphique simplifiée du bassin de Madeleine (modifiée de Lavoie *et al.*, 2009). 19

Figure 14 – Carte des bassins sédimentaires de la Gaspésie. Ensemble des puits pétroliers et gaziers forés ainsi que les lignes sismiques acquises sur le territoire. Émissions de CO₂ par installation industrielle en 2015 (Environnement Canada, 2015). Ellipses rouges : zones d’exploration pétrolière et gazière d’intérêt. RG : Région de Gaspé. SB : Structure de Bonaventure. 20

Figure 15 – Domaines structuraux du Bassin de la Gaspésie. Ellipses rouges : zones d’intérêt. RG : Région de Gaspé. SB : Structure de Bonaventure. Modifiée de Bourque *et al.* (2001). 21

Figure 16 – Stratigraphie du bassin de la Gaspésie. La stratigraphie de *South Gaspé* correspond à celle de de la structure de Bonaventure et celle de *North Gaspé* correspond à celle de la région de Gaspé. Gaspé SST : Gaspé Sandstones ou Grès de Gaspé. Upper Gaspé LST : Upper Gaspé Limestones ou Calcaires supérieurs de Gaspé. APL/AC : Anse à Pierre-Loiselle/Anse Cascon. BP : Battery Point. For : Forillon. IC : Indian Cove. IP : Indian Point. M : Malbaie. Ship : Shiphead. WP : West Point. YR : York River. Modifiée de Lavoie *et al.* (2009). 22

Figure 17 – Corrélation entre les sommets des formations basée sur les diagraphies pour la coupe B-B' au sud de la faille du Bras Nord-Ouest (BNO) et C-C' au nord de la faille. Modifiée de Hu et Lavoie (2008). 23

Figure 18 – Coupe géologique de l’est de la Gaspésie. Les ellipses noires montrent la région de Gaspé. Modifiée de Castonguay *et al.* (2005). 24

Figure 19 – Carte géologique de la région de la structure de Bonaventure et localisation des lignes sismiques interprétées à la Figure 20. Modifiée de Tovar (2014). 25

Figure 20 - Interprétation sismique en profondeur. (1) socle protérozoïque ; (2) sommet du cambro-ordovicien métamorphique ; (3) discordance taconienne ; sommet du bassin des Appalaches ; (4) sommet de la Fm. de Neckwick-Arsenault ; (5) sommet de la Fm. de Garin ; (6) sommet de la Fm. de Pabos ; (8) base de la Fm. de Weir ; (10) sommet de la Fm. de la Vieille. AD : anticlinal de Duval ; ALM : anticlinal du Lac Ménard ; AR : anticlinal de Robidoux ; ASHC : anticlinal de Sainte Hélène de la Croix ; FSJS : Faille de Saint-Jogues Sud ; FGP : faille du Grand Pabos ; FRG : faille de la Rivière Garin ; SBC : Synclinal de la Baie des Chaleurs. Modifiée de Tovar (2014). 25

Préambule

L'analyse des bassins sédimentaires du Québec pour leur potentiel de stockage du CO₂ avait démontré un potentiel certain pour le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent (Bédard *et al.*, 2011), tandis que le bassin de la Gaspésie montrait un intérêt mitigé. Ce sont les critères pratiques qui avaient abaissé la cote du bassin de la Gaspésie par rapport à celui des Basses-Terres du Saint-Laurent (Bédard *et al.*, 2011), principalement à cause de l'absence de grands émetteurs de CO₂ en 2011.

L'ouverture de la cimenterie McInnis, prévue en 2018, incite à ré-évaluer le bassin de la Gaspésie pour son potentiel de stockage et analyser le potentiel de stockage du réservoir souterrain le plus près de la cimenterie dans la structure de Bonaventure. Les différents critères géologiques et pratiques du bassin sédimentaire de la Gaspésie sont analysés afin d'établir son potentiel pour le stockage géologique du CO₂ et cerner les régions plus propices pour ce type de stockage.

Sommaire

Le sud du Québec est divisé en cinq bassins sédimentaires qui sont analysés afin de déterminer lesquels offrent le plus grand potentiel pour le stockage géologique du CO₂. La méthodologie pour évaluer le potentiel des bassins utilise des critères qualitatifs à la fois géologiques et pratiques auxquels on a assigné des valeurs numériques normalisées afin de pouvoir faire une comparaison quantitative objective entre les bassins.

Les bassins analysés sont :

- Bassin cambro-ordovicien des Basses-Terres du Saint-Laurent ;
- Bassin cambro-ordovicien des Appalaches ;
- Bassin ordovicien-silurien d'Anticosti ;
- Bassin siluro-dévonien de la Gaspésie ;
- Bassin permo-carbonifère de Madeleine.

Le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent démontre le plus grand potentiel pour le stockage géologique du CO₂. Le bassin de la Gaspésie démontre un potentiel intéressant pour le stockage du CO₂ car il présente des critères pratiques favorables, mais un contexte géologique un peu plus défavorable (déformation modérée, ensembles réservoir-couverture incertains). Les bassins d'Anticosti et de Madeleine démontrent un potentiel intéressant du point de vue géologique, mais les critères pratiques (en mer, infrastructures, accessibilité, sources de CO₂) sont moins favorables au développement de projets de stockage du CO₂. Finalement, le bassin des Appalaches offre un faible potentiel de par sa géologie plus complexe et l'intensité de la déformation des roches.

1. Introduction

Le captage et le stockage du CO₂ (CSC) représente une solution potentielle à court-moyen terme viable pour réduire les émissions anthropiques de CO₂ dans l'atmosphère (IPCC, 2005; IEA, 2008). En effet, la technologie pour stocker du CO₂ dans les réservoirs de gaz et de pétrole ainsi que dans les aquifères salins profonds est maintenant prête à être appliquée dans le contexte du CSC (Bachu, 2008). À l'échelle mondiale, la recherche de sites potentiels pour le stockage géologique du CO₂ s'effectue principalement dans les bassins sédimentaires déjà connus pour la qualité de leurs réservoirs géologiques. La première étape de ces recherches consiste à identifier les bassins offrant un potentiel adéquat pour le stockage du CO₂.

Ainsi, ce rapport présente les résultats de recherche sur le potentiel des différents bassins sédimentaires du sud du Québec pour le stockage géologique du CO₂ et représente une mise à jour du rapport (Bédard *et al.*, 2011) en fonction des informations disponibles en 2017.

2. Méthodologie d'évaluation des bassins

2.1. Concepts

La méthodologie suivie afin d'évaluer le potentiel des bassins sédimentaires pour le stockage géologique du CO₂ se base sur les travaux de Bachu (2003) et du CO2CRC (2008).

Tableau 1 – Critères d'évaluation du potentiel des bassins sédimentaires pour le stockage géologique du CO₂. Modifié de Malo et Bédard (2012), Bachu (2003) et CO2CRC (2008).

Critères	Classes				
	<i>j</i> =1	<i>j</i> =2	<i>j</i> =3	<i>j</i> =4	<i>j</i> =5
<i>i</i> =1 Sismicité (environnement tectonique)	Très élevée (ex: zones de subduction)	Élevée (ex: syn-rift, décrochement)	Intermédiaire (ex: avant-pays)	Bas (ex: marge passive)	Très bas (ex: craton)
<i>i</i> =2 Taille	<1000 km ²	1000-5000 km ²	5000-25 000 km ²	25 000-50 000 km ²	>50 000 km ²
<i>i</i> =3 Profondeur	Très peu profond (<300 m)	Peu profond (300-800 m)	Profond (>3500 m)	Intermédiaire (800-3500 m)	
<i>i</i> =4 Déformation	Importante	Modérée	Faible		
<i>i</i> =5 Ensembles réservoir-couverture	Pauvre	Intermédiaire	Excellent		
<i>i</i> =6 Géothermie	Bassin chaud (>40 °C/km)	Bassin modéré (30-40 °C/km)	Bassin froid (<30 °C/km)		
<i>i</i> =7 Potentiel en hydrocarbures	Aucun	Limité	Moyen	Grand	
<i>i</i> =8 Évaporites	Aucune	Dômes	Lits		
<i>i</i> =9 Charbon	Aucun	Profond (>800 m)	Peu profond (200-800 m)		
<i>i</i> =10 Maturité d'exploration	Non exploré	En exploration	En développement	Mature	Très mature
<i>i</i> =11 On/Off shore	En mer profonde	En mer peu profonde	En mer peu profonde et sur terre	Sur terre	
<i>i</i> =12 Climat	Arctique	Subarctique	Désertique	Tropical	Tempéré
<i>i</i> =13 Accessibilité	Inaccessible	Difficile	Acceptable	Facile	
<i>i</i> =14 Infrastructures	Aucune	Mineures	Modérées	Importantes	
<i>i</i> =15 Émetteurs de CO ₂	Aucun	Peu de grands émetteurs	Plusieurs grands émetteurs	Un très grand émetteur	Plusieurs très grands émetteurs

Le potentiel d'un bassin sédimentaire pour le stockage géologique du CO₂ est déterminé à l'aide de plusieurs de ses caractéristiques géologiques et pratiques. La méthodologie utilisée permet de convertir ces caractéristiques qualitatives afin d'évaluer certains critères spécifiques de façon quantitative. L'analyse des bassins est basée sur un ensemble de critères et de classes qui sont présentés dans le Tableau 1. La première étape de l'analyse consiste à déterminer à quelle classe qualitative ($j=1, \dots, n$) appartient le bassin pour chacun des quinze critères d'évaluation ($i=1, \dots, 15$). De trois à cinq classes ($n=3, 4, 5$) sont utilisées pour évaluer chacun des critères. Les données géologiques et géophysiques existantes de même que la connaissance géologique et géographique du bassin sont essentielles afin d'évaluer correctement chacun des critères.

Chacune des classes de tous les critères possède une valeur individuelle ($F_{i,j}$) permettant de passer de valeurs qualitatives (les caractéristiques du bassin) à

des valeurs quantitatives comparables. Les classes les moins et les plus favorables possèdent respectivement les valeurs les plus faibles et les plus élevées. La valeur individuelle de chacune des classes est déterminée en fonction de leur importance pour le stockage géologique du CO₂. De cette façon, si les classes ont une importance similaire, une variation linéaire de la valeur des classes est utilisée. Si, au contraire, les classes les plus favorables ont une importance beaucoup plus élevée que les autres, la variation des valeurs aura plutôt un caractère exponentiel.

Le Tableau 2 présente les valeurs des différentes classes utilisées dans le cadre de l'analyse des bassins du sud du Québec. Les valeurs individuelles des classes ($F_{i,j}$) et les poids assignés aux critères (w_i) ont été adaptées afin de tenir compte des caractéristiques intrinsèques des bassins sédimentaires du sud du Québec.

Tableau 2 – Valeurs et poids des critères et des classes pour l'évaluation des bassins sédimentaires du sud du Québec pour le stockage géologique du CO₂. Modifié de Bachu (2003).

Critères	Classes					Poids (w_i)
	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$	
$i=1$ Sismicité	1	3	7	15	15	0,10
$i=2$ Superficie	1	3	5	7	9	0,06
$i=3$ Profondeur	1	2	5	10		0,10
$i=4$ Déformation	1	4	10			0,09
$i=5$ Ensembles réservoir-couverture	1	5	10			0,10
$i=6$ Géothermie	1	4	10			0,08
$i=7$ Potentiel en hydrocarbures	1	3	7	11		0,04
$i=8$ Évaporites	1	2	3			0,01
$i=9$ Charbon	1	2	3			0,04
$i=10$ Maturité d'exploration	1	3	4	8	10	0,08
$i=11$ On/Offshore	1	5	10	15		0,11
$i=12$ Climat	1	2	4	7	10	0,04
$i=13$ Accessibilité	1	3	6	10		0,04
$i=14$ Infrastructures	1	3	7	10		0,05
$i=15$ Sources de CO ₂	1	3	7	11	15	0,06

Afin de pouvoir comparer les différentes valeurs des classes de chacun des critères d'évaluation pour un bassin k , les valeurs individuelles ($F_{i,j}$) sont normalisées selon l'équation :

$$P_i^k = \frac{F_{i,j} - F_{i,1}}{F_{i,n} - F_{i,1}}$$

Cette équation permet de distribuer les valeurs des classes entre 0 et 1. Ainsi, pour tous les critères d'évaluation, la classe la moins favorable a toujours une valeur P_i de 0 et la classe la plus favorable, une valeur P_i de 1. Chaque bassin k est donc caractérisé par 15 valeurs individuelles normalisées P_i^k .

Chaque critère a une importance différente dans l'évaluation des bassins. Ainsi, un critère ayant une forte incidence sur le potentiel de stockage du CO₂ aura un poids (w_i) plus élevé par rapport à un critère moins significatif. Les poids des critères sont présentés dans le Tableau 2. Les poids satisfont la condition suivante :

$$\sum_1^{15} w_i = 1$$

Le score final des bassins (R^k) est finalement calculé à l'aide d'une moyenne pondérée des valeurs individuelles normalisées et du poids des critères correspondants :

$$R^k = \sum_1^{15} w_i P_i^k$$

Le bassin obtenant le score final le plus élevé est celui démontrant le plus fort potentiel pour le stockage géologique du CO₂. Il est donc possible de déterminer quels sont les bassins qui méritent d'être étudiés plus en détail et de passer à l'évaluation de sites spécifiques pour le stockage géologique du CO₂.

2.2. Critères géologiques

En plus de ceux décrits ci-dessous, d'autres critères géologiques peuvent être utilisés pour évaluer le potentiel de stockage géologique du CO₂ d'un bassin, tels que les conditions hydrogéologiques, le gradient de pression et le type de charbon. Cependant, comme ces données ne sont pas disponibles pour les bassins à l'étude, elles n'ont pas été prises en compte.

Sismicité (environnement tectonique)

L'environnement tectonique actuel dans lequel les bassins sédimentaires se retrouvent est important car il est directement lié à la sismicité et donc à la stabilité des réservoirs potentiels. Les bassins tectoniquement moins stables (ex. : zones de subduction au Japon et en Californie) sont plus à risque de subir des séismes de

grande magnitude pouvant compromettre l'intégrité des réservoirs et ainsi augmenter le risque de fuites de CO₂ (Bachu, 2000, 2003). Les données sur l'activité sismique passée doivent donc être prises en compte lors de l'analyse des bassins sédimentaires (CO2CRC, 2008). Les bassins sédimentaires situés dans des environnements tectoniques stables (ex. : marges continentales divergentes des océans Atlantique, Indien et Arctique), sont à prioriser.

Superficie

La superficie du bassin est un indice primordial de la capacité de stockage d'un bassin sédimentaire. En effet, plus un bassin est vaste, plus il y a de probabilité de trouver des ensembles réservoir-couverture adéquats étendus latéralement (CO2CRC, 2008).

Profondeur

La profondeur des ensembles réservoir-couverture est critique pour déterminer dans quel état sera le CO₂ dans son lieu de stockage. Une profondeur minimale de 800 mètres est nécessaire pour pouvoir stocker le CO₂ à l'état supercritique. C'est-à-dire que le CO₂ est alors dense comme un liquide tout en se comportant comme un gaz au niveau de la diffusion. Une fois séquestré dans un réservoir géologique à l'état supercritique, le CO₂ prend environ 300 fois moins d'espace qu'à la surface de la Terre. Il est donc possible de stocker de grandes quantités de CO₂ dans un plus petit volume, ce qui représente un avantage majeur du stockage géologique du CO₂. Cependant, une trop grande profondeur (plus de 3500 mètres) engendre une hausse exponentielle des coûts d'opération et de forage (Bachu, 2003). Le stockage géologique du CO₂ est impossible entre 0 et 300 mètre car le CO₂ n'est pas assez dense pour y être stocké en grande quantité et les risques de fuites vers l'atmosphère sont plus élevés. Finalement, entre 300 et 800 mètres, le stockage géologique du CO₂ n'est possible que dans les veines de charbon (CO2CRC, 2008).

Déformation

L'intensité de la déformation (plis, fractures et failles) influence le volume du réservoir et son étanchéité. De plus, plus un réservoir est faillé, plus grands sont les risques de fuites de CO₂ hors des réservoirs prévus. Un bassin très faillé, mais dont les failles sont étanches, est divisé en plusieurs réservoirs plus petits ce qui a pour effet de diminuer le volume potentiel de stockage (CO2CRC, 2008). En outre, un bassin très plissé et faillé est beaucoup plus difficile à interpréter et la géométrie des ensembles réservoir-couverture est moins certaine.

Ensembles réservoir-couverture

L'identification des ensembles réservoir-couverture est critique pour l'analyse des bassins pour le stockage géologique. Les roches réservoirs représentent les « contenants » où l'on peut injecter le CO₂ tandis que les roches couvertures imperméables empêchent le CO₂ de remonter à la surface et donc le piègent en profondeur (CO2CRC, 2008; IPCC, 2005). Plus il y a d'ensembles réservoir-couverture de qualité connus, meilleure sera la probabilité de pouvoir stocker en grande quantité du CO₂ dans le bassin sédimentaire.

Géothermie

Le gradient géothermique joue aussi un rôle important dans la sélection de sites potentiels car il influence la profondeur minimale à laquelle on peut stocker le CO₂ et la quantité que l'on peut injecter. Les bassins chauds atteignent des conditions de pression et température minimales (7,38 MPa et 31,1°C) pour stocker le CO₂ à l'état supercritique à des profondeurs moindres. Comme, la pression augmente sensiblement de la même manière avec la profondeur dans tous les bassins sédimentaires, la température est donc le facteur qui influence le plus l'état du CO₂ en profondeur. Ainsi, généralement la pression critique est atteinte à des profondeurs de l'ordre de 750 mètres. Cependant, à cette profondeur, la température critique n'est pas toujours atteinte comme c'est le cas dans les bassins froids (voir la Figure 1).

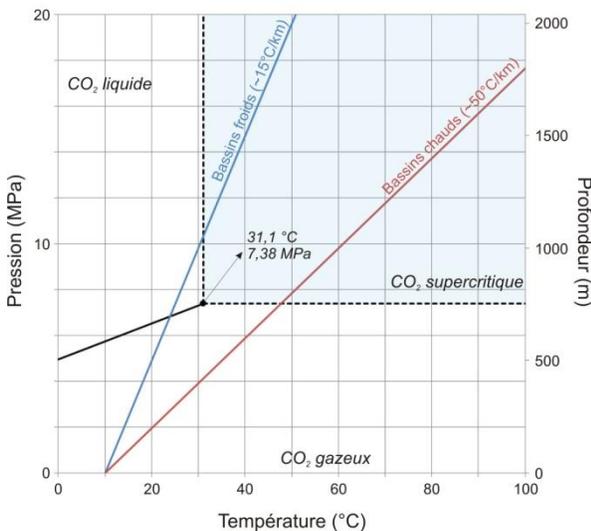


Figure 1 - Diagramme de phase du CO₂ avec des exemples de comportement du CO₂ dans les bassins froids et chauds (modifiée de Bachu, 2003).

Par contre, à une même profondeur, comme la température est plus faible dans les bassins froids que dans les bassins chauds, le CO₂ est plus dense, ce qui signifie qu'une plus grande quantité de CO₂ peut y être

stocké (CO2CRC, 2008). De plus, comme il est plus dense, sa flottabilité est moindre et les risques de fuites vers le haut sont diminués (Bachu, 2003). Donc, malgré le fait que la profondeur minimale de stockage du CO₂ supercritique soit plus grande dans les bassins froids, ces derniers sont plus intéressants pour le stockage géologique du CO₂.

Potentiel en hydrocarbures

Le potentiel en hydrocarbures est un critère à la fois positif et négatif. En effet, un bassin qui démontre un bon potentiel en hydrocarbure est très certainement un bassin où l'on pourrait stocker du CO₂ car les ensembles réservoir-couverture sont souvent les mêmes. Cependant, si les hydrocarbures ne sont pas encore exploités, leur future exploitation pourrait entrer en compétition avec le stockage du CO₂ (CO2CRC, 2008). Le stockage géologique du CO₂ pourrait malgré tout être envisagé pour la récupération assistée des hydrocarbures ce qui représente un avantage important. Les valeurs associées aux différentes classes ont été modifiées par rapport à l'évaluation précédente (Bédard *et al.*, 2011). En effet, il a été jugé que la différence entre un potentiel grand et géant était négligeable au point de vue du potentiel de stockage du CO₂ au Québec et la classe $j=5$ a ainsi été supprimée. La valeur de la classe $j=4$ (Grand) a aussi été changée pour $F_{7,4}=11$ car il a été jugé que la différence entre un potentiel moyen et grand était mieux représentée par un écart de 7 à 11.

Évaporites

La présence d'évaporites dans le bassin, particulièrement en lits continus, est un point positif car elles représentent les meilleures roches couverture (CO2CRC, 2008).

Charbon

La présence de charbon dans le bassin offre une option supplémentaire pour le stockage géologique du CO₂ (CO2CRC, 2008; IPCC, 2005). En effet, le charbon peut adsorber des quantités significatives de CO₂ surtout lorsque sa perméabilité est élevée, généralement à de faibles profondeurs. Les valeurs associées aux différentes classes ont été modifiées par rapport à l'évaluation précédente (Bédard *et al.*, 2011). En effet, comme il est peu probable que le stockage du CO₂ se fasse dans des veines de charbons au Québec, la valeur de la classe $j=3$ (Peu profond) est de 3.

Maturité d'exploration

Finalement, la maturité de l'exploration est reliée à la quantité de données disponibles afin de caractériser le bassin, aux infrastructures en place ainsi qu'au niveau de connaissance des ensembles réservoir-couverture. Ainsi, si un bassin a été très exploré pour les

hydrocarbures dans le passé, il existe très certainement une grande quantité de données (de puits, de sismique, etc.) disponibles et les caractéristiques géologiques du bassin sont ainsi bien connues. De plus, dans les régions très explorées, les gisements d'hydrocarbures ont probablement déjà été découverts, ce qui limite les risques de contamination lors de l'injection de CO₂ et permettrait potentiellement l'utilisation des réservoirs d'hydrocarbures épuisés pour le stockage du CO₂ (CO2CRC, 2008; IPCC, 2005).

2.3. Critères pratiques

On/Offshore

La localisation sur terre ou en mer d'un site de stockage géologique de CO₂ est un critère important car il implique des problèmes d'accessibilité et d'infrastructures (Bachu, 2003). De plus, l'implantation d'un site sur terre sera certainement plus économique et plus facile techniquement qu'une implantation en mer (CO2CRC, 2008). Finalement, on note que les bassins en mer sont souvent moins explorés donc leur maturité d'exploration est généralement plus faible que les bassins sur terre.

Climat

Les conditions climatiques affectent la température de surface et, par le fait même, les conditions géothermales (CO2CRC, 2008). De plus, un climat très froid ou très chaud rend les opérations techniques de captage, de transport et d'injection de CO₂ plus difficiles à réaliser (Bachu, 2003).

Accessibilité et infrastructures

L'accessibilité et les infrastructures reflètent la faisabilité technique et la facilité des développements futurs (CO2CRC, 2008). Plus l'accessibilité d'une région est difficile et/ou moins il y a d'infrastructures, plus difficiles sont les développements techniques car tout doit être construit ou amené sur place lors de l'implantation.

Sources de CO₂

La proximité de grands émetteurs de CO₂ (émettant plus de 100 000 tonnes de CO₂ par année) permet d'assurer un apport constant en CO₂ avec un faible coût de transport (Bachu, 2003). Les différentes classes ont été modifiées par rapport à l'évaluation précédente (Bédard *et al.*, 2011). La présence de très grands émetteurs (émettant plus de 1 000 000 tonnes de CO₂ par année) est maintenant considérée car ces derniers pourraient assurer un grand apport de CO₂ dans une même installation et réduire ainsi les coûts de captage du CO₂. De plus, les émetteurs de CO₂ localisés dans les provinces limitrophes au Québec ont aussi été considérés ce qui n'avait pas été le cas dans

l'évaluation précédente. Les émetteurs de CO₂ localisés dans un rayon de 100 kilomètres des bassins sédimentaires sont considérés dans le cadre de cette étude peu importe la province. Cette distance a été choisie car un pipeline de moins de 100 kilomètres ne nécessite généralement pas de station de compression intermédiaire et les coûts sont donc réduits (SNC-Lavalin, 2011).

Législation

Le régime législatif est aussi un critère qui peut être utilisé pour évaluer la faisabilité du stockage géologique du CO₂. Comme tous les bassins analysés sont sous la même juridiction, les mêmes lois et règlements s'appliqueraient pour le stockage géologique du CO₂. Cependant, on doit noter qu'il n'y a pas, à ce jour, au Québec, de loi ou règlement spécifique à cette technologie (Moutenet et Malo, 2011). Si un projet-pilote devait y être implanté rapidement, les «Loi sur la qualité de l'environnement» et «Loi sur les mines» actuellement en vigueur seraient certainement utilisées pour l'encadrer.

3. Contexte géologique

Le sud du Québec est divisé en trois provinces géologiques : le Bouclier canadien, au nord du Fleuve Saint-Laurent, la Plate-forme du Saint-Laurent juste au sud du fleuve et la chaîne de montagnes des Appalaches plus au sud (Brisebois et Brun, 1994). Le Bouclier canadien, composé de roches ignées et métamorphiques d'âge Précambrien, n'est pas favorable au stockage géologique du CO₂ qui s'effectue principalement dans les bassins sédimentaires (Bachu, 2000, 2003; CO2CRC, 2008; IPCC, 2005; NETL, 2010; Shafeen *et al.*, 2004). En contrepartie, la chaîne de montagne des Appalaches,

consiste en différentes successions de roches sédimentaires paléozoïques pouvant démontrer un certain potentiel pour le stockage géologique du CO₂. La Plate-forme du Saint-Laurent comprend deux des cinq bassins sédimentaires du sud du Québec : le bassin cambro-ordovicien des Basses-Terres du Saint-Laurent (BTSL) et le bassin ordovicien-silurien d'Anticosti (Figure 2). Les trois autres bassins se situent dans les Appalaches : le bassin cambro-ordovicien des Appalaches, le bassin siluro-dévonien de la Gaspésie et le bassin permo-carbonifère de Madeleine (Figure 2). Chacun des cinq bassins sédimentaires est décrit et évalué plus bas pour son potentiel de stockage géologique du CO₂.

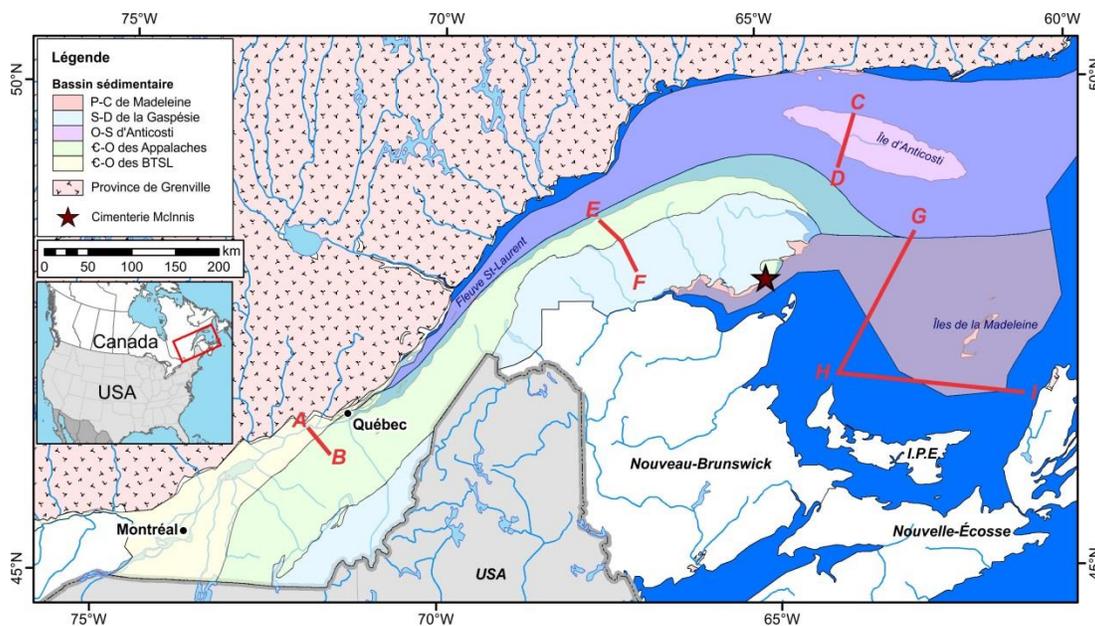


Figure 2 – Bassins sédimentaires du sud du Québec. BTSL : Basses-Terres du Saint-Laurent. P-C : permo-carbonifère. S-D : siluro-dévonien. O-S : ordovicien-silurien. C-O : cambro-ordovicien.

3.1. Plate-forme du Saint-Laurent

La Plate-forme du Saint-Laurent est composée de roches du Cambrien au Silurien inférieur reposant en discordance sur le socle précambrien du Bouclier canadien. De plus, la Plate-forme du Saint-Laurent est chevauchée au sud-est par les Appalaches; la limite entre ces deux provinces géologiques est marquée par la faille Logan qui est une importante faille de chevauchement.

3.1.1. Bassin cambro-ordovicien des Basses-Terres du Saint-Laurent

La succession sédimentaire du bassin des BTSL est composée de roches du Cambrien à l'Ordovicien supérieur avec des faciès silicoclastiques à la base surmontés de faciès carbonatés de plus en plus

argileux vers le haut de la succession. Des failles normales de direction SO-NE affectent le bassin qui s'approfondit ainsi par paliers vers le sud-est en se prolongeant sous les Appalaches et atteignant une épaisseur totale pouvant dépasser 5000 mètres dans la partie sud-est du bassin (Bédard *et al.*, 2013; Castonguay *et al.*, 2006; Castonguay *et al.*, 2010; Konstantinovskaya *et al.*, 2009; Séjourné *et al.*, 2003). Toutefois, la plupart de ces failles normales n'affectent que le Précambrien et les unités inférieures de la séquence des BTSL et n'atteignent pas la surface (Figure 3). La coupe A-B (Figure 3) montre l'architecture du bassin ainsi que sa relation avec les Appalaches basées sur l'interprétation de la ligne sismique M-2001 (Castonguay *et al.*, 2006; 2010).

3.1.2. Bassin ordovicien-silurien d'Anticosti

Le bassin d'Anticosti se compose de roches de l'Ordovicien supérieur au Silurien inférieur qui reposent en discordance sur le socle précambrien du Bouclier canadien. La succession sédimentaire est principalement composée de faciès carbonatés avec

une faible proportion de faciès silicoclastiques (Desrochers *et al.*, 2010). La succession est peu déformée, n'étant affectée que par des failles normales synsédimentaires et affichant un léger pendage vers le sud-ouest. La coupe C-D (Figure 4) montre l'architecture du bassin.

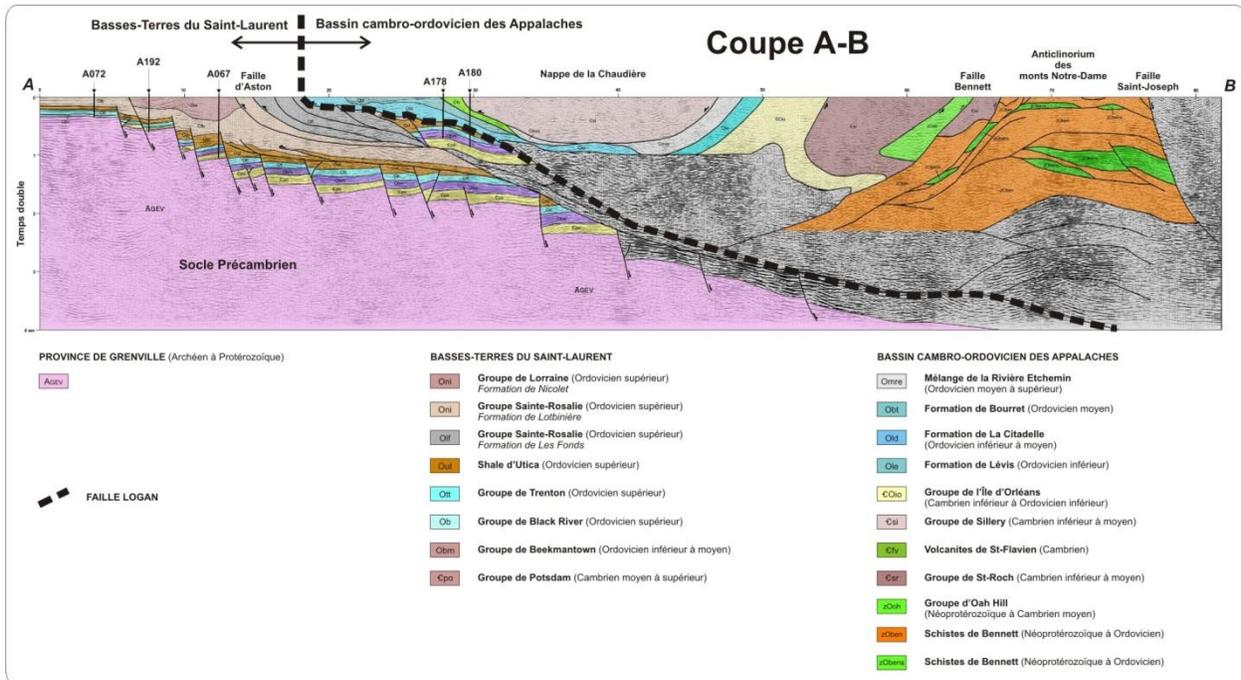


Figure 3 – Architecture des bassins cambro-ordoviciens des BTSL et des Appalaches sur la ligne sismique M-2001 (modifiée de Castonguay *et al.*, 2006). La ligne sismique est localisée sur la Figure 2, ligne rouge A-B.

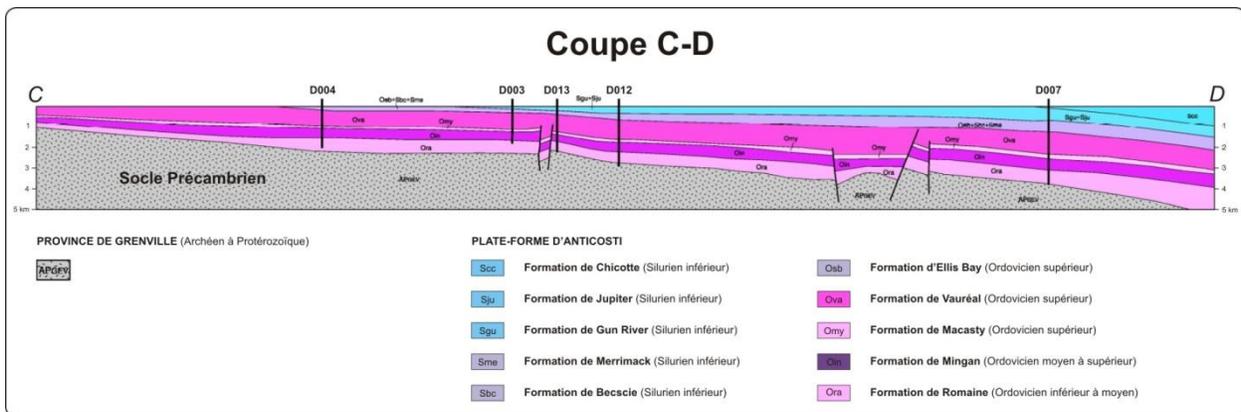


Figure 4 – Coupe géologique montrant l'architecture du bassin ordovicien-silurien d'Anticosti (modifiée de Castonguay *et al.*, 2005). La coupe est localisée sur la Figure 2, ligne rouge C-D.

3.2. Province des Appalaches

3.2.1. Bassin cambro-ordovicien des Appalaches

Le bassin des Appalaches correspond à la ceinture plissée et chevauchée de Humber-Dunnage (Williams,

1995) qui est formée de roches du Cambrien à l'Ordovicien supérieur. Le bassin est une bande de moins de 100 kilomètres de largeur principalement localisée au sud du Fleuve Saint-Laurent, du sud de Montréal jusqu'à l'est de la Gaspésie dans le Golfe du

Saint-Laurent (Figure 2). Le bassin est caractérisé par des unités ayant subi plusieurs phases de déformation, dont les orogénies taconienne, salinique et acadienne. Ces unités se trouvent structuralement au-dessus de la succession de la Plate-forme du Saint-Laurent desquelles elles sont séparées par la faille Logan (Séjourné *et al.*, 2003). La coupe A-B (Figure 3) montre l'architecture du bassin et sa relation avec le bassin des BTSL sur l'interprétation de la ligne sismique M-2001.

3.2.2. Bassin siluro-dévonien de la Gaspésie

Le bassin de la Gaspésie, mieux connu sous le nom de Ceinture de Gaspé (Bourque *et al.*, 1995), est constitué majoritairement de roches sédimentaires ainsi que de quelques unités volcaniques de l'Ordovicien supérieur au Dévonien inférieur (Lavoie *et al.*, 2009). Le bassin est présent dans la partie sud de la péninsule de la Gaspésie de même que dans les Cantons-de-l'Est (Figure 2). Il repose en discordance sur le bassin des Appalaches. Il s'agit du bassin successeur de

l'orogénie taconienne qui a été plissé et faillé principalement par l'orogénie acadienne. La coupe E-F (Figure 5) montre l'architecture du bassin et sa relation avec la Plate-forme du Saint-Laurent et le bassin cambro-ordovicien des Appalaches.

3.2.3. Bassin permo-carbonifère de Madeleine

Au Québec, le bassin de Madeleine est localisé principalement en mer dans le Golfe du Saint-Laurent. La succession sédimentaire est composée de roches du Dévonien supérieur au Permien inférieur et atteint jusqu'à 12 000 mètres d'épaisseur dans le centre-est du Golfe (Lavoie *et al.*, 2009). La coupe E-F (Figure 6) montre l'architecture du bassin de Madeleine dans le Golfe du Saint-Laurent. Les strates sont subhorizontales et très peu déformées par des failles normales et des décrochements actifs lors de la formation du bassin (Dunning *et al.*, 2002). Des diapirs de sel synsédimentaires sont communs dans le bassin et ont localement généré des structures dépositionnelles complexes (Lavoie *et al.*, 2009).

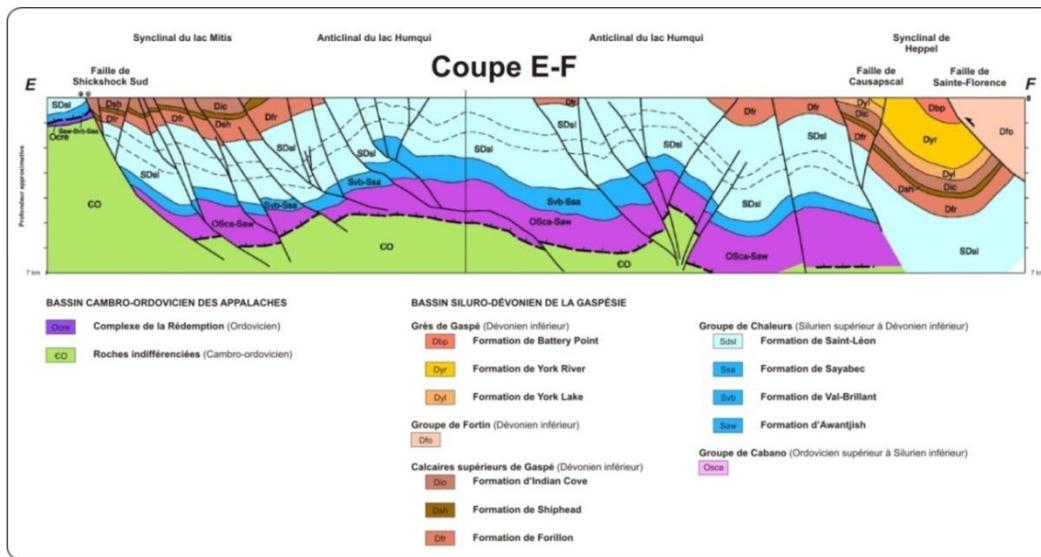


Figure 5 – Coupe géologique montrant l'architecture du bassin siluro-dévonien de la Gaspésie (modifiée de Castonguay *et al.*, 2004). La coupe est localisée sur la Figure 2, ligne rouge E-F.

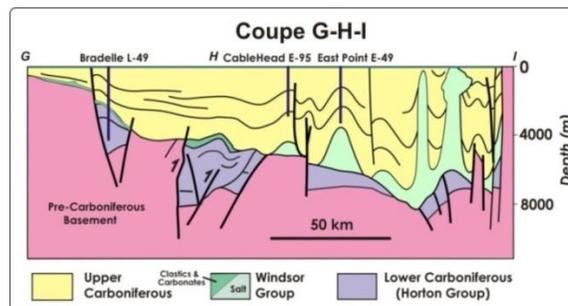


Figure 6 – Coupe géologique montrant l'architecture du bassin permo-carbonifère de Madeleine dans le Golfe du Saint-Laurent (modifiée de Lavoie *et al.*, 2009). La coupe est localisée sur la Figure 2, ligne rouge G-H-I.

4. Évaluation des bassins sédimentaires du sud du Québec

L'évaluation des bassins du sud du Québec pour le stockage géologiques du CO₂ a été réalisée en suivant la méthode décrite à la section 2 de ce rapport. Les caractéristiques de chacun des bassins sont résumées

de façon quantitative dans le Tableau 3. Ceci permet de calculer le score final des bassins et ainsi mieux les comparer de façon objective. Les caractéristiques des bassins sont détaillées dans les sections suivantes. Les figures 7 à 10 illustrent les caractéristiques des bassins pour les critères de sismicité, de géothermie, de maturité et des sources de CO₂.

Tableau 3 – Évaluation des critères et classement des bassins du sud du Québec pour le stockage géologique du CO₂.

	€-O des BTSL	O-S d'Anticosti	€-O des Appalaches	S-D de la Gaspésie	P-C de Madeleine
Sismicité	4	4	4	4	4
Superficie	3	5	5	4	4
Profondeur	4	4	N/A	4	4
Déformation	3	3	1	2	3
Ensembles réservoir-couverture	3	3	1	2	3
Géothermie	3	3	3	3	3
Potentiel en hydrocarbures	3	3	1	3	2
Évaporites	1	1	1	1	2
Charbon	1	1	1	1	2
Maturité d'exploration	2	2	2	3	2
On/Offshore	4	3	4	4	2
Climat	5	5	5	5	5
Accessibilité	4	2	4	4	2
Infrastructures	4	2	4	4	2
Sources de CO ₂	5	1	4	5	2
Score général (Rk)	0,84	0,70	0,54	0,75	0,67
Classement	1	3	5	2	4

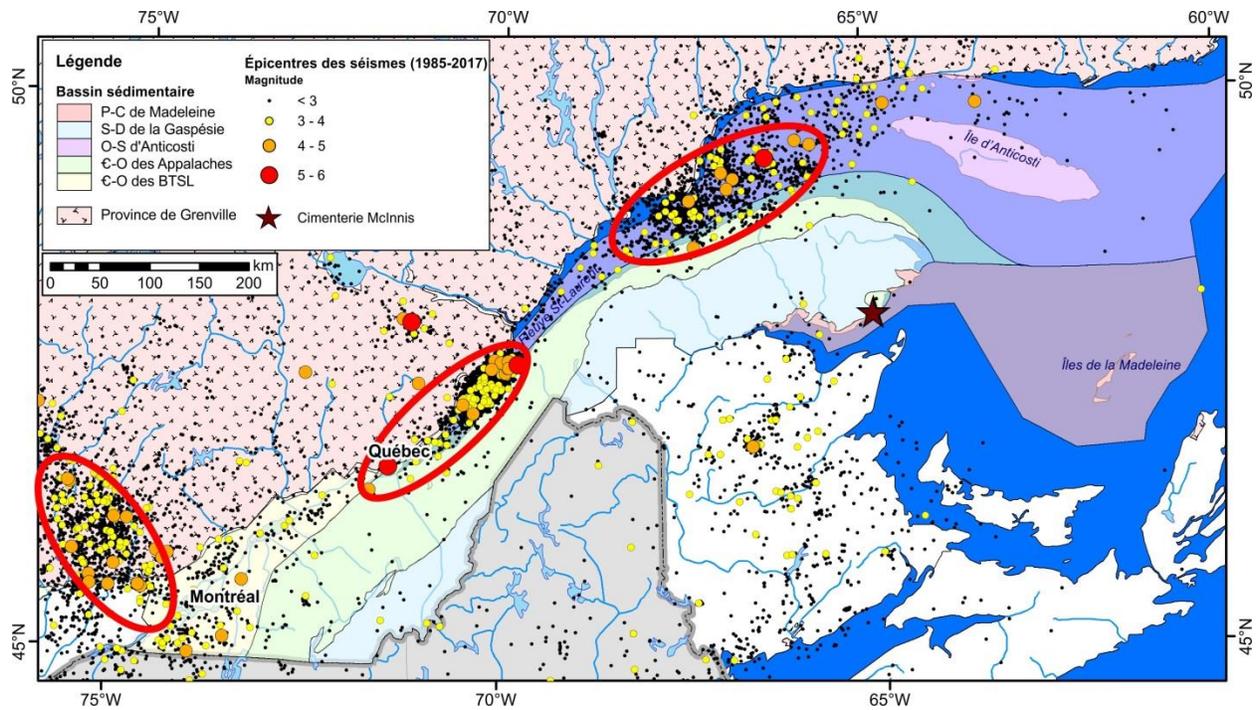


Figure 7 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et des épicentres des séismes entre 1985 et 2017. Ellipses rouges : zones d'activité sismique plus importantes. Sources de données: Séismes Canada (2017).

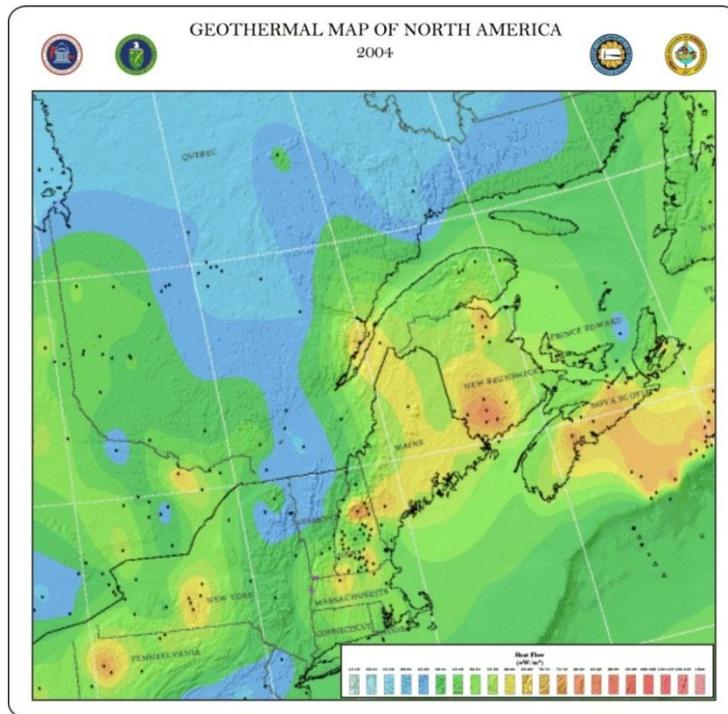


Figure 8 – Carte géothermale du nord-est de l'Amérique du Nord (modifiée de Blackwell et Richards, 2004). Les couleurs bleues représentent des gradients géothermiques plutôt faibles tandis que les couleurs rouges-oranges représentent des gradients élevés.

Évaluation du potentiel de stockage géologique de la Gaspésie

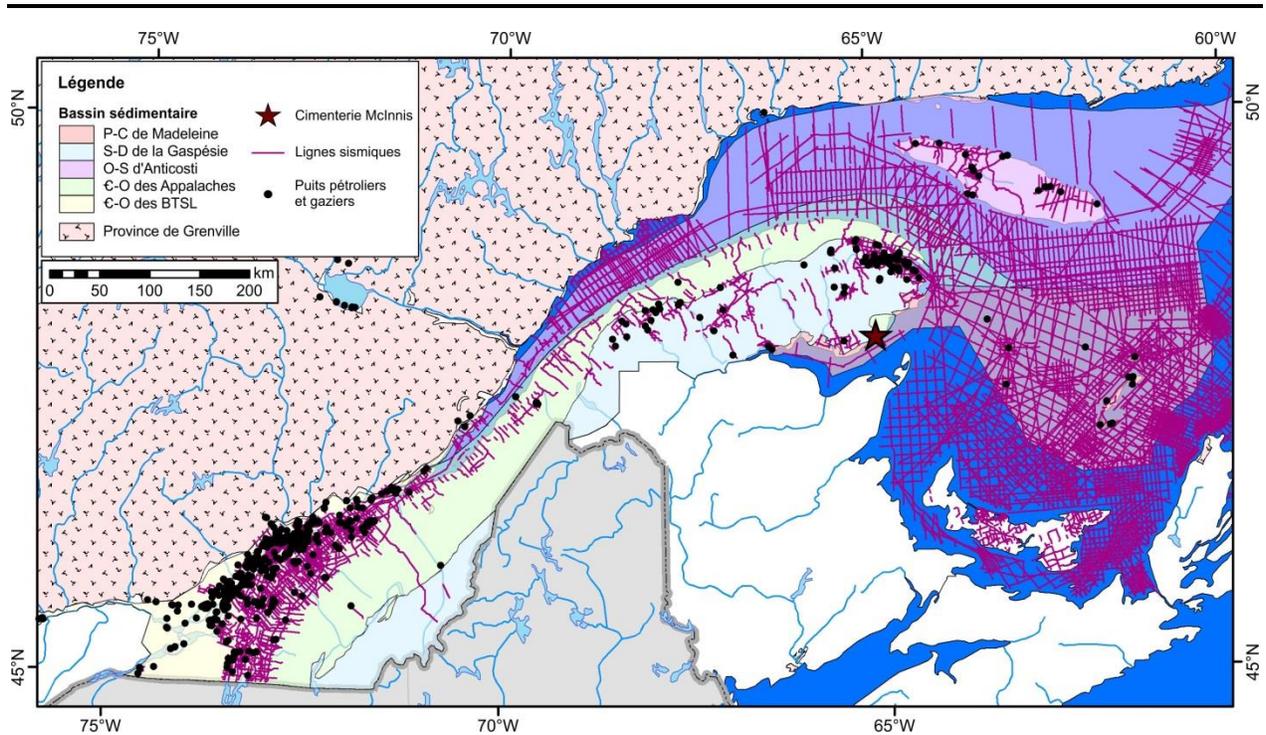


Figure 9 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et de l'ensemble des puits pétroliers et gaziers forés ainsi que les lignes sismiques acquises sur le territoire.

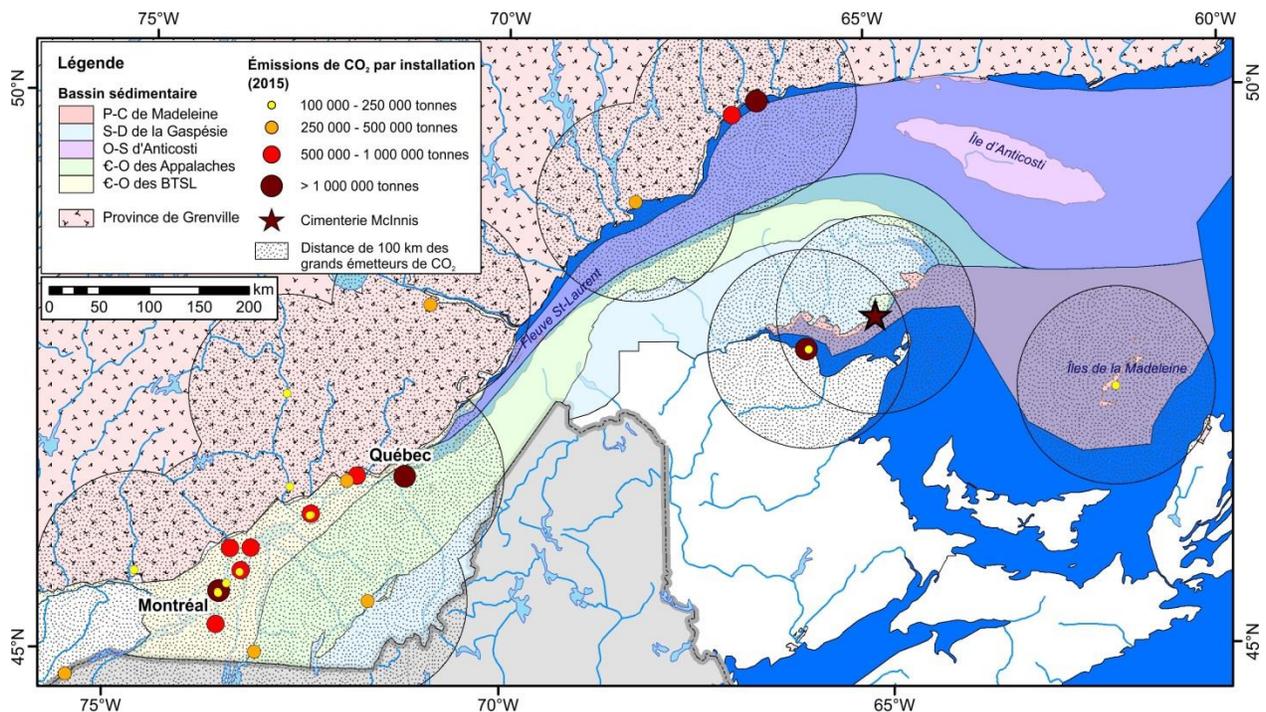


Figure 10 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et des émissions de CO₂ par installation industrielle en 2015. Source des données pour les émissions de CO₂ : Environnement Canada (2015).

4.1. Plate-forme du Saint-Laurent

4.1.1. Bassin cambro-ordovicien des Basses-Terres du Saint-Laurent

Les BTSL sont situées dans un environnement actuel de marge passive, c'est-à-dire tectoniquement stable avec une faible sismicité. Comme le montre la Figure 7, on note une activité sismique plus importante dans la région à l'ouest de Montréal vers l'Outaouais. L'extrême ouest du bassin des BTSL n'est donc pas considéré pour le stockage géologique du CO₂. La superficie couverte par le bassin est d'environ 20 000 km².

La déformation varie de faible à modérée en allant vers la faille Logan, où les roches de la plate-forme se retrouvent imbriquées sous forme d'écaillés de chevauchement (Figure 3). Les roches réservoirs démontrant le meilleur potentiel sont celles du Groupe de Potsdam, tandis que celles des groupes de Beekmantown et de Trenton montrent un potentiel plus limité (Figure 11) (Konstantinovskaya *et al.*, 2014; Tran Ngoc *et al.*, 2014). Les unités des groupes de Sainte-Rosalie/Lorraine ainsi que du Shale d'Utica sont considérées comme des roches couvertures probables (Konstantinovskaya *et al.*, 2014). La profondeur des roches réservoirs varie de 0 à plus de 5000 mètres, mais la zone montrant le plus grand potentiel se situe à une profondeur intermédiaire de 800 à environ 3500 mètres au sud du Fleuve Saint-Laurent.

Les données de température au fond des puits des BTSL montre un gradient géothermique de l'ordre de 24 °C/km, ce qui en fait un bassin froid (Bedard *et al.*, 2014).

Les BTSL sont présentement en phase d'exploration pour le gaz et le pétrole et on note un potentiel en hydrocarbures moyen mais plutôt important lorsque l'on considère les ressources non-conventionnelles des gaz de shale. Les écaillés chevauchés de la plate-forme, entre la faille d'Aston et la faille Logan, démontrent aussi un certain potentiel pour les hydrocarbures (voir Figure 3). La Figure 9 montre l'ensemble des puits d'exploration pétrolière et gazière forés jusqu'à ce jour dans le sud du Québec. On note que la plus importante activité d'exploration se situe dans le bassin des BTSL. La partie sud-est du bassin est relativement bien couverte par un réseau de lignes sismiques. On n'y trouve ni évaporites, ni charbon.

Les critères pratiques sont tous favorables. Le bassin est complètement sur terre et le climat y est tempéré. L'accessibilité est facile et les infrastructures sont importantes car la densité de population y est la plus élevée. Finalement, plusieurs grands émetteurs de CO₂ et deux très grands émetteurs sont présents directe-

ment sur le bassin, principalement entre Québec et Montréal (Figure 10).

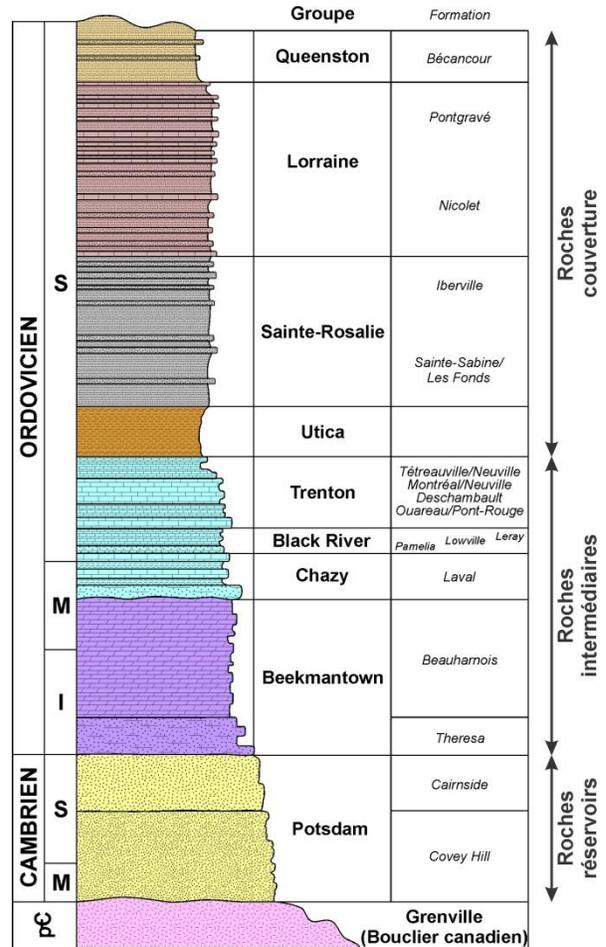


Figure 11 – Colonne stratigraphique simplifiée du bassin des BTSL.

4.1.2. Bassin ordovicien-silurien d'Anticosti

Le bassin d'Anticosti est situé dans un environnement actuel de marge passive, c'est-à-dire tectoniquement stable avec une faible sismicité. Comme le montre la Figure 7, on note une activité sismique plus importante dans la région de Charlevoix et dans l'estuaire du Saint-Laurent entre la Gaspésie et la Côte-Nord. Ces régions ne sont donc pas considérées pour le stockage géologique du CO₂. La superficie couverte par le bassin est d'environ 90 000 km².

Le bassin n'est affecté que par des failles normales synsédimentaires et l'intensité de la déformation y est faible (Figure 4). Les roches réservoirs potentielles sont des dolomies hydrothermales que l'on retrouve dans les formations de Romaine, de Mingan, de Black River et de Trenton. Les roches couvertures potentielles sont les shales de la Formation de Macasty (voir Figure 12). La profondeur des roches réservoirs varie de 0 à plus de 3500 mètres, mais la zone montrant le plus de potentiel se situe à une profondeur intermédiaire (800 à 3500 mètres).

Selon les données des diagaphies des puits sur l'Île d'Anticosti, le gradient géothermique est de l'ordre de 20°C/km, ce qui en fait un bassin froid.

Le bassin est présentement en phase d'exploration et on suppose un potentiel en hydrocarbures moyen. La Figure 9 montre l'ensemble des puits d'exploration pétrolière et gazière forés dans le sud du Québec et on note une vingtaine de puits forés sur l'Île d'Anticosti. Il existe cependant un réseau de lignes sismiques qui ont été acquises sur l'Île d'Anticosti, mais surtout dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Les données sismiques indiquent qu'une importante portion du bassin est située en mer dans le Golfe du Saint-Laurent où aucun puits n'a été foré jusqu'à présent. On ne trouve ni évaporites, ni charbon dans le bassin.

Les critères pratiques sont peu favorables au stockage géologique du CO₂ dans le bassin d'Anticosti, mis à part le climat qui est tempéré. Le fait que le bassin soit majoritairement en mer peu profonde et que sa partie terrestre soit une île constitue un point négatif qui rend par le fait même l'accessibilité difficile. Les infrastructures sont mineures aussi parce que la densité de population sur l'Île d'Anticosti y est très faible. Finalement, il existe deux grands émetteurs de CO₂ et un très grand émetteur sur la Côte-Nord à la limite nord du bassin mais ils ne sont pas considérés dans l'évaluation car ils sont trop éloignés de la partie centrale du bassin où le stockage du CO₂ pourrait être réalisé (Figure 10).

Age	Formation	Description	
SILURIEN	INFÉRIEUR	Chicotte	Calcaire crinoïdal à biohermes
		Jupiter	Calcaires
		Gun River	Calcaires
		Merrimack	Shale calcaireux
		Becscie	Calcaires
	SUPÉRIEUR	Ellis Bay	Calcaire et shale calcaireux à gréseux
		Vauréal	Calcaire et shale calcaireux
		Macasty	Shale noir
		Trenton	Calcaires plus ou moins argileux
		MOYEN	Black River
Mingan			Calcaires, shales et grès
ORDOVICIEN	INFÉRIEUR	Romaine	Dolomies
PRÉCAMBRIEN	Socle Précambrien		

Figure 12 – Colonne stratigraphique simplifiée du bassin d'Anticosti.

4.2. Provinces des Appalaches

4.2.1. Bassin cambro-ordovicien des Appalaches

Le bassin des Appalaches est situé dans un environnement actuel de marge passive, c'est-à-dire tectoniquement stable avec une faible sismicité (Figure 7). La superficie couverte par le bassin est d'environ 50 000 km².

Le bassin a été très déformé par plusieurs générations de failles et de plis comme le montre la Figure 3. De ce fait, les interprétations géologiques en profondeur sont difficiles et les ensembles réservoir-couverture ne peuvent toujours pas, à ce jour, être déterminés avec certitude. La profondeur des roches réservoirs potentielles est donc très incertaine.

Comme peu de données de température de puits existent dans le bassin des Appalaches, le gradient géothermique est estimé à l'aide des valeurs obtenues dans les BTSL et la carte géothermale de l'Amérique du Nord (Figure 8) qui montre le flux de chaleur dérivé à partir de données de puits. En effet, les variations de flux de chaleur entre les deux bassins ne sont pas tellement importantes. Le bassin des Appalaches doit avoir un gradient géothermique un peu plus élevé que celui des BTSL mais pas assez pour être considéré comme modéré (entre 30 et 40 °C/km). On le classe donc parmi les bassins froids.

Le bassin des Appalaches n'a pratiquement pas été exploré pour les hydrocarbures et la plupart des puits forés ciblaient des roches réservoirs de la plateforme du Saint-Laurent transportée dans des écailles de chevauchement (ex. écaille de Saint-Flavien) ou en place sous ces écailles (Figure 3 et Figure 9). Les lignes sismiques sont très éparées dans le bassin et surtout concentrées au sud du bassin des BTSL. On ne trouve ni évaporites, ni charbon dans le bassin.

Les critères pratiques sont tous favorables dans le bassin des Appalaches. Il est presque complètement sur terre et le climat est considéré comme tempéré. L'accessibilité est facile et les infrastructures sont importantes car la densité de population y est élevée. Finalement, quelques grands émetteurs de CO₂ et un très grand sont présents directement dans le bassin et en périphérie de celui-ci (Figure 10).

4.2.2. Bassin siluro-dévonien de la Gaspésie

Le bassin de la Gaspésie est situé dans un environnement actuel de marge passive, c'est-à-dire tectoniquement stable avec une faible sismicité (Figure 7). Comme le montre la Figure 7, on note une activité sismique plus importante dans la région de Charlevoix et dans l'estuaire du Saint-Laurent entre la Gaspésie et la Côte-Nord. Ces régions ne sont donc pas considérées pour le stockage géologique du CO₂. La

superficie couverte par le bassin est d'environ 35 000 km² au Québec

L'intensité de la déformation du bassin est modérée comme le montre la Figure 5. Les roches réservoirs potentielles connues sont, par exemple, les grès des formations de Val-Brillant, de York River et de Battery Point ainsi que les carbonates des formations de Sayabec et de West Point et des Calcaires supérieurs de Gaspé (Figure 5). Les calcaires récifaux de la Formation de West Point ne sont pas présents dans la région de l'est de la Gaspésie, au niveau de la coupe géologique de la Figure 5. Ils sont toutefois présents dans le nord-est et le sud de la Gaspésie. Ces récifs du Silurien supérieur et du Dévonien inférieur constituent une roche réservoir potentielle recouverte de roches silicoclastiques à grains fins constituant la roche couverture. Les nombreuses zones ou intervalles stratigraphiques de roches silicoclastiques de mudstone et siltstone sont les roches couvertures potentielles pour le bassin de la Gaspésie. La profondeur des roches réservoirs varie de 0 à plus de 3500 mètres, mais la zone montrant le plus de potentiel de situe à une profondeur intermédiaire (800 à 3500 mètres).

Selon les données des diagraphies de 20 puits dans l'ensemble de la Gaspésie, le gradient géothermique moyen est de l'ordre de 24,9 °C/km (Chabot-Bergeron *et al.*, 2016), ce qui en fait un bassin froid.

Le bassin de la Gaspésie est relativement peu exploré pour les hydrocarbures, mis à part la partie nord-est du bassin où plusieurs puits ont été forés et plusieurs lignes sismiques acquises (Figure 9). On considère que la maturité d'exploration est en développement car des projets d'exploitation de gaz et pétrole sont en cours dans l'est de la Gaspésie. On considère que le bassin possède un potentiel en hydrocarbures moyen et on n'y trouve pas d'évaporites, et que de très rares minces lits de charbon dans le Dévonien.

Les critères pratiques sont plutôt favorables dans le bassin de la Gaspésie. Il est complètement sur terre et le climat est considéré comme tempéré. L'accessibilité est facile et les infrastructures sont relativement importantes car la densité de population y est assez élevée. Avec l'ouverture prochaine de la cimenterie McInnis à Port-Daniel-Gascons, on retrouvera deux très grands émetteurs de CO₂ dans le bassin et en périphérie de celui-ci. (Figure 10). La cimenterie McInnis devrait produire plus de 1,5 millions de tonnes de CO₂ par année lors de sa mise en opération et potentiellement plus de 2 millions de tonnes au sommet de sa production (Genivar, 2013).

4.2.3. Bassin permo-carbonifère de Madeleine

Le bassin de Madeleine est situé dans un environnement actuel de marge passive, c'est-à-dire tectoniquement stable avec une faible sismicité. Comme le montre la Figure 7, on note une très faible activité sismique dans l'ensemble du bassin. La superficie couverte par le bassin est d'environ 40 000 km² au Québec.

Comme le montre la Figure 6, le bassin n'a été affecté que par des failles normales et coulissantes synsédimentaires et l'intensité de la déformation y est faible. Les roches réservoirs potentielles sont des roches carbonatées et silicoclastiques grossières tandis que les roches couvertures potentielles sont des shales et des évaporites ayant des extensions latérales et verticales importantes. Les grès du Groupe de Horton et les carbonates à biohermes à la base du Groupe de Windsor qui sont tous recouverts par des évaporites du Groupe de Windsor sont un exemple d'un bon ensemble réservoir-couverture. Les grès recouverts de shales épais dans le Groupe de Pictou représentent un autre ensemble réservoir-couverture dans le bassin. La Figure 13 montre les relations stratigraphiques entre ces différentes unités du bassin de Madeleine. La profondeur des roches réservoirs varie de 1000 à plus de 3500 mètres, mais la zone montrant le plus de potentiel se situe à une profondeur intermédiaire (800 à 3500 mètres).

Peu de données de température de puits existent dans le bassin de Madeleine, le gradient géothermique est donc estimé à l'aide des valeurs obtenues dans les BTSL et la carte géothermale de l'Amérique du Nord (Figure 8) qui montre le flux de chaleur dérivé à partir de données de puits. En effet, les variations de flux de chaleur entre les deux bassins ne sont pas tellement importantes. Le bassin de Madeleine doit avoir un gradient géothermique un peu plus élevé que celui des BTSL mais pas assez pour être considéré comme modéré (entre 30 et 40 °C/km). On le classe donc parmi les bassins froids.

Le bassin est toujours en phase d'exploration et on suppose un potentiel moyen en hydrocarbures. La Figure 9 montre l'ensemble des puits d'exploration pétrolière et gazière forés dans le sud du Québec et on note une quinzaine de puits forés dans le golfe du Saint-Laurent et aux Îles-de-la-Madeleine. On trouve un réseau assez complet de lignes sismiques couvrant l'ensemble du bassin. La présence de dômes de sel a été le moteur de l'exploration pétrolière et gazière dans le bassin. On note aussi la présence de lits de charbons profonds.

Les critères pratiques ne sont pas favorables au stockage géologique du CO₂ dans le bassin de Madeleine, mis à part le climat qui est tempéré. Le fait

que le bassin soit majoritairement en mer peu profonde est un point négatif qui rend par le fait même l'accessibilité difficile. Les infrastructures sont mineures car la densité de population y est très faible. Finalement, il n'existe à peu près pas d'émetteurs de CO₂ présents directement dans le bassin, mise à part la centrale thermique à moteur diesel des Îles-de-la-Madeleine (Figure 10). Les très grands émetteurs de la Gaspésie et du Nouveau-Brunswick ne sont pas considérés car ils sont trop éloignés de la partie centrale du bassin.

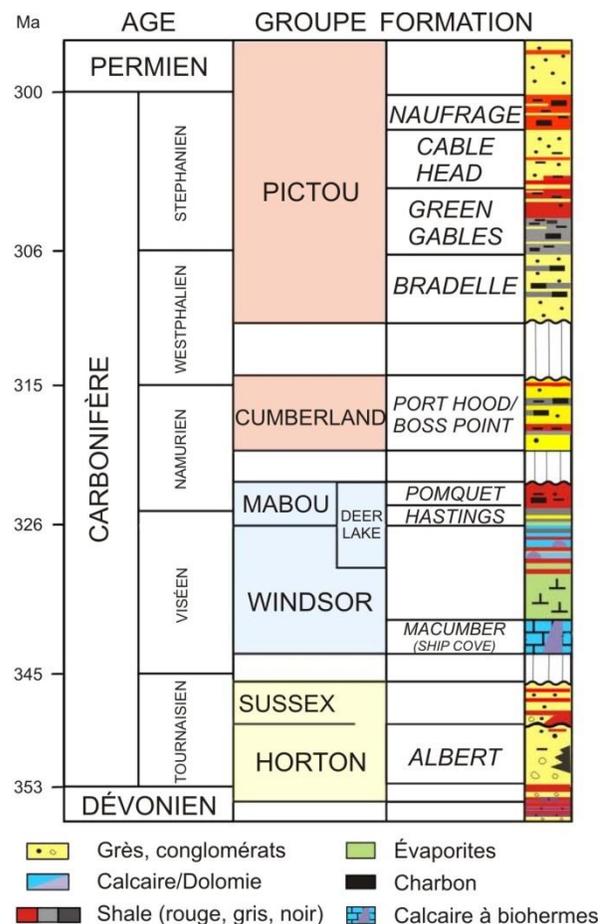


Figure 13 – Colonne stratigraphique simplifiée du bassin de Madeleine (modifiée de Lavoie *et al.*, 2009).

5. Analyse complémentaire du bassin siluro-dévonien de la Gaspésie

La mise à jour de l'évaluation du potentiel de stockage du CO₂ démontre un potentiel intéressant pour le stockage du CO₂ pour le bassin de la Gaspésie. En effet, la mise en fonction de la cimenterie McInnis à Port-Daniel-Gascons représente l'arrivée d'un très grand émetteur de CO₂ dans la région ce qui est un facteur favorable au stockage du CO₂. De plus, comme les émetteurs de CO₂ des autres provinces sont maintenant considérés, on note la présence d'un deuxième très grand émetteur au Nouveau-Brunswick, la centrale thermique *Belledune Thermal Generating Station* qui produit de l'électricité à partir de charbon et de coke de pétrole. Ceci incite à évaluer de façon plus poussée deux régions du bassin de la Gaspésie où des données géologiques sont disponibles et qui sont à moins de 100 km de ces deux très grands émetteurs (Figure 14).

On doit cependant noter que les technologies de captage du CO₂ émis par des cimenteries sont encore à l'étape de recherche et de projets pilotes (ENGO network on CCS, 2015; Global CCS Institute, 2016; IEAGHG, 2013). Malgré les recherches en cours, il ne serait donc pas possible à très court terme de capter une quantité importante de CO₂ à la cimenterie McInnis. D'un autre côté, les technologies de captage à grande échelle du CO₂ émis par les centrales thermiques sont de plus en plus efficaces et sont utilisées dans plusieurs centrales dans le monde (Global CCS Institute, 2016).

L'évaluation qualitative des deux sites d'intérêts est basée sur des critères de faisabilité du stockage géologique du CO₂ et se veut un outil de comparaison entre les sites. Elle permet aussi de mettre en évidence les lacunes dans la connaissance géologique des sites et permet ainsi d'orienter les recherches futures.

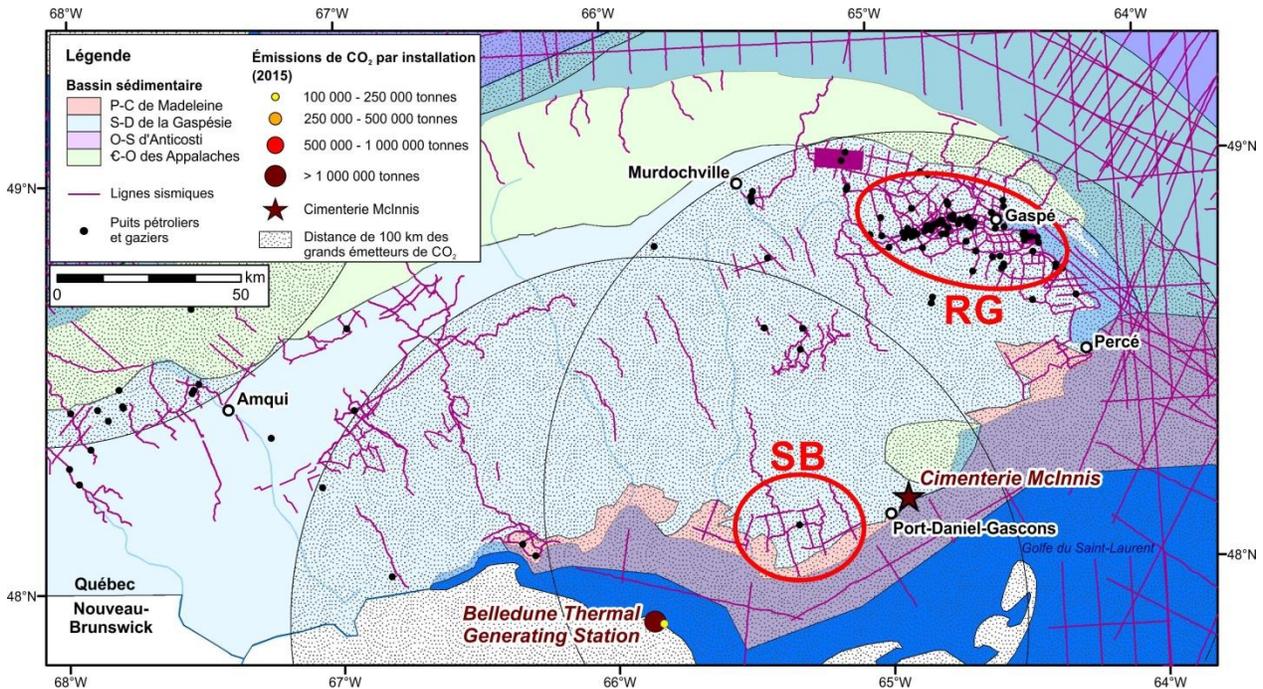


Figure 14 – Carte des bassins sédimentaires de la Gaspésie. Ensemble des puits pétroliers et gaziers forés ainsi que les lignes sismiques acquises sur le territoire. Émissions de CO₂ par installation industrielle en 2015 (Environnement Canada, 2015). Ellipses rouges : zones d'exploration pétrolière et gazière d'intérêt. RG : Région de Gaspé. SB : Structure de Bonaventure.

5.1. Contexte géologique

Le bassin de la Gaspésie, mieux connu sous le nom de Ceinture de Gaspé (Bourque *et al.*, 1995), est constitué majoritairement de roches sédimentaires ainsi que de quelques unités volcaniques de l'Ordovicien supérieur au Dévonien inférieur (Lavoie *et al.*, 2009). Il s'agit du bassin successeur de l'orogénie taconienne qui a

été plissé et faillé par l'orogénie acadienne.

5.1.1. Structure

Le bassin de la Gaspésie est divisé en trois grands domaines présents dans la péninsule gaspésienne. Du nord au sud, ces domaines sont : 1) le synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé, 2) l'anticlinorium d'Aroostook-Percé et 3) le synclinorium de la Baie des

Chaleurs (Figure 15). La région de Gaspé se situe à la limite nord du synclinorium de Connecticut Valley Gaspé tandis que la structure de Bonaventure est localisée à la limite sud du synclinorium de la Baie des Chaleurs.

Dans le bassin de la Gaspésie, les plis sont ouverts à moyennement serrés. Les failles majeures sont des failles inverses à vergence nord-ouest dans le synclinorium de Connecticut-Valley, des failles inverses à vergence sud-est dans le synclinorium de la Baie des Chaleurs, tandis que l'anticlinorium d'Aroostook-Percé est disséqué par des failles de décrochement de direction est-ouest.

Les réservoirs potentiels sont généralement localisés dans des structures anticlinales ou limités par des failles imperméables. On s'attend à ce que les transitions entre les intervalles altérés hydrothermalement et les carbonates non poreux agissent comme des barrières de migration (Lavoie *et al.*, 2009).

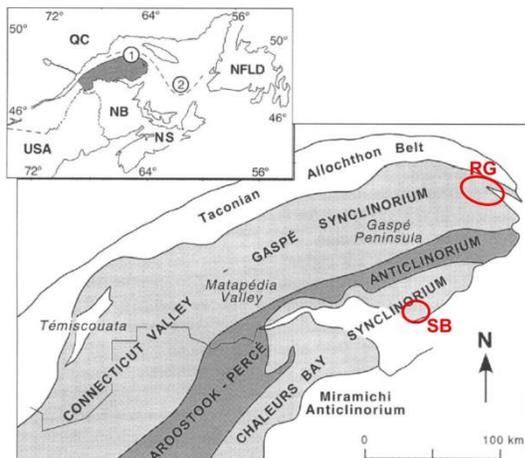


Figure 15 – Domaines structuraux du Bassin de la Gaspésie. Ellipses rouges : zones d'intérêt. RG : Région de Gaspé. SB : Structure de Bonaventure. Modifiée de Bourque *et al.* (2001).

5.1.2. Stratigraphie

La description de la stratigraphie est basée sur les synthèses de Lavoie (1992), Malo et Bourque (1993), Bourque *et al.* (1995), Bourque (2001), Bourque *et al.* (2001) et Lavoie *et al.* (2009) et elle est synthétisée dans la Figure 16 qui contient la colonne stratigraphique des deux régions d'intérêt : la colonne *South Gaspé* pour la région de la structure de Bonaventure, et la colonne *North Gaspé* pour la région de Gaspé. La stratigraphie du bassin de la Gaspésie est complexe avec de nombreux changements de faciès du nord vers le sud et de l'ouest vers l'est. Ce n'est que les unités stratigraphiques des deux régions d'intérêt qui sont décrites brièvement plus bas.

Groupes d'Honorat et de Matapédia

L'assemblage inférieur de la succession stratigraphique correspond à la sédimentation en eau profonde qui a rempli le bassin successeur de l'orogénie taconienne (Bourque *et al.*, 2001).

Le Groupe d'Honorat repose en discordance sur le bassin cambro-ordovicien des Appalaches. C'est une unité silicoclastique composée de mudstones, siltstones, grès et conglomérats.

Le Groupe de Matapédia contient deux formations carbonatées plus ou moins argileuses : les formations de Pabos et de White Head.

Groupe de Chaleurs

Le Groupe de Chaleurs repose en concordance sur le Groupe de Matapédia dans le centre et le sud de la Gaspésie (région de la structure de Bonaventure) mais repose en discordance sur le bassin cambro-ordovicien des Appalaches dans la partie nord (région de Gaspé).

Les formations inférieures sont des successions silicoclastiques passant des mudstones de la Formation de Clemville aux grès lithiques et quartzeux des formations de Weir, Anse Cascon et Val Brillant.

L'assemblage intermédiaire est composé de calcaires péritidaux, récifaux et d'eau plus profonde des formations de Sayabec au nord et de La Vieille au sud. Ces calcaires montrent localement une porosité importante associée à une dolomitisation hydrothermale (Lavoie et Chi, 2006; Lavoie et Morin, 2004). Cependant, lorsque non fracturés ou altérés hydrothermalement, ces deux formations pourraient agir comme roches couvertures (Lavoie *et al.*, 2009).

Les formations supérieures du Groupe de Chaleurs sont composées de mudstones, de grès, de conglomérats et de calcaires (formation de Saint-Léon, Gascons et Indian Point). De la porosité associée à des dolomies hydrothermales est présente dans les calcaires récifaux de la Formation de West Point et représentent des réservoirs potentiels. Les faciès à grain fins de la Formation d'Indian Point pourraient agir comme barrière à la migration latérale et verticale des fluides présents dans les réservoirs de la Formation de West Point (Lavoie *et al.*, 2009).

Calcaires supérieurs de Gaspé

Les Calcaires supérieurs de Gaspé sont seulement présents dans le synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé. Ils comprennent les formations de Forillon, Shiphead et Indian Cove qui sont composées de calcaires à grains fins argileux et dolomitiques de plate-forme profonde. De la porosité de fractures est observée en association avec les failles (Lavoie *et al.*, 2009).

5.2. Région de Gaspé

La grande région de Gaspé est la plus explorée du bassin siluro-dévonien de la Gaspésie. On y trouve en effet plusieurs puits forés ainsi qu'un réseau assez dense de lignes sismiques (Figure 14) qui fournissent une quantité importante de données géologiques nécessaires à la compréhension du bassin.

La Figure 17 et la Figure 18 montrent l'architecture des unités géologiques dans la région de Gaspé.

5.2.1. Particularités géologiques

Dans la région de Gaspé, les formations supérieures du Groupe de Chaleurs reposent en discordance sur le bassin cambro-ordovicien des Appalaches. Elles sont surmontées des Calcaires supérieurs de Gaspé et des Grès de Gaspé.

Les calcaires récifaux de la Formation de West Point à la base de la séquence pourraient représenter des réservoirs potentiels. Les faciès à grain fins de la Formation d'Indian Point pourraient agir comme roches couvertures (Lavoie *et al.*, 2009).

Dans la région d'intérêt, le West Point se trouve à des profondeurs d'environ 1600 à 3200 mètres avec des épaisseurs de nulle à environ 200 mètres. On note cependant qu'il devient de moins en moins profond au nord de la faille du Bras Nord-Ouest jusqu'à affleurer

en surface au nord de la région. À première vue, la structure au nord de la faille ne semble pas être propice au stockage du CO₂ car l'unité réservoir n'est pas complètement confinée par une unité couverture (Figure 18). Le synclinal de la Rivière York semble offrir un meilleur potentiel. La Formation d'Indian Point recouvre de façon continue la Formation de West Point au sud de la faille du Bras Nord-Ouest et constitue la roche-couverture avec profondeurs d'environ 1100 à 3200 mètres et une épaisseur d'environ 150 à 400 mètres.

Les formations de York River et de Battery Point, même si elles démontrent un potentiel de réservoir, ne sont pas assez profondes dans la région de Gaspé pour offrir un potentiel de stockage du CO₂.

La région de Gaspé est découpée par des failles majeures profondes qui atteignent la surface (Figure 18). Ces failles représentent un risque potentiel pour le stockage du CO₂ et devront être étudiées plus en détails. Cependant, le synclinal de la Rivière York est une structure non faillée (Figure 18) qui pourrait représenter un site d'intérêt pour le stockage du CO₂. Il faudrait cependant s'assurer que le CO₂ ne remonte par le long des flancs du synclinal pour rejoindre des failles principales à moins que ces failles ne jouent le rôle de barrières imperméables.

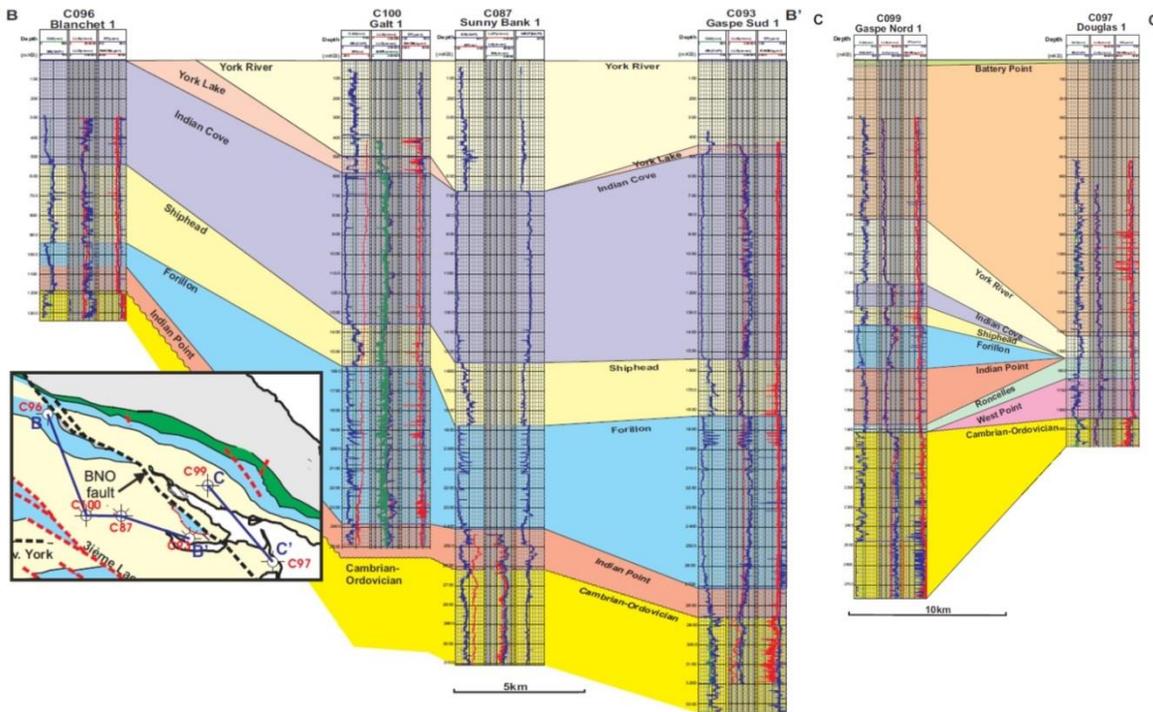


Figure 17 – Corrélation entre les sommets des formations basée sur les diagraphies pour la coupe B-B' au sud de la faille du Bras Nord-Ouest (BNO) et C-C' au nord de la faille. Modifiée de Hu et Lavoie (2008).

La Formation de West Point, même si elle démontre un potentiel de réservoir, n'est pas assez profonde dans la structure de Bonaventure pour offrir un potentiel de stockage du CO₂.

La Formation d'Indian Point est trop peu profonde et continue pour offrir une barrière efficace contre la remontée du CO₂ dans la structure de Bonaventure. Même si plusieurs autres formations montrent des intervalles de sédiments à grains fins qui semblent peu perméables, aucune n'est considérée comme une roche couverture dans son ensemble. Une attention

importante devrait être portée à ce facteur contraignant lors de travaux futurs de caractérisation pour le stockage du CO₂. Ainsi la Formation de Gascons devrait être analysée plus en détail afin d'évaluer son potentiel de couverture.

Les anticlinaux de Duval et de Robidoux pourraient représenter des pièges stratigraphiques potentiels pour le stockage du CO₂, mais peu d'information est disponible sur la profondeur et les caractéristiques des formations géologiques. (Figure 20).

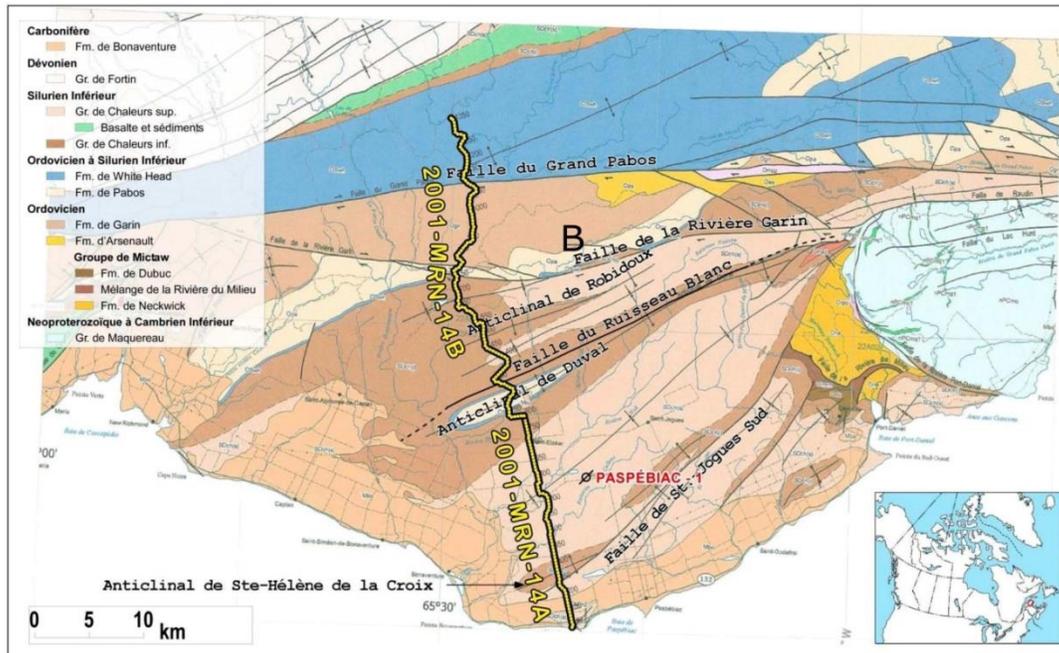


Figure 19 – Carte géologique de la région de la structure de Bonaventure et localisation des lignes sismiques interprétées à la Figure 20. Modifiée de Tovar (2014).

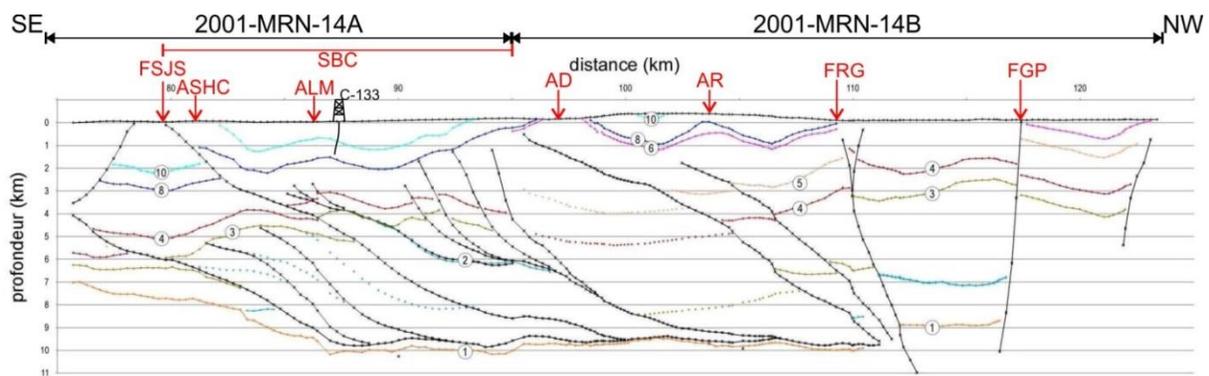


Figure 20 - Interprétation sismique en profondeur. (1) socle protérozoïque ; (2) sommet du cambro-ordovicien métamorphique ; (3) discordance taconienne ; sommet du bassin des Appalaches ; (4) sommet de la Fm. de Neckwick-Arsenault ; (5) sommet de la Fm. de Garin ; (6) sommet de la Fm. de Pabos ; (8) base de la Fm. de Weir ; (10) sommet de la Fm. de la Vieille. AD : anticlinal de Duval ; ALM : anticlinal du Lac Ménard ; AR : anticlinal de Robidoux ; ASHC : anticlinal de Sainte Hélène de la Croix ; FSJS : Faille de Saint-Jogues Sud ; FGP : faille du Grand Pabos ; FRG : faille de la Rivière Garin ; SBC : Synclinal de la Baie des Chaleurs. Modifiée de Tovar (2014).

6. Discussions et conclusions

6.1. Évaluation du potentiel de stockage géologique du CO₂ des bassins sédimentaires du sud du Québec.

L'analyse du potentiel des bassins sédimentaires du sud du Québec pour le stockage géologique du CO₂ a permis de mettre en évidence le potentiel intéressant du bassin des BTSL. En effet, son score final de 0,84 (Tableau 3) se démarque de celui des autres bassins et en fait le bassin à prioriser pour les études plus poussées afin d'identifier des sites et des réservoirs spécifiques pour l'injection de CO₂.

Le bassin de la Gaspésie démontre un potentiel intéressant pour le stockage du CO₂ avec un score final de 0,75. Le bassin présente des critères pratiques favorables, mais un contexte géologique un peu plus défavorable de par sa déformation modérée et l'incertitude sur la position et la géométrie des ensembles réservoir-couverture. Une étude plus détaillée des régions où des données existent permettrait de déterminer l'intérêt à poursuivre les recherches sur le stockage du CO₂ dans ce bassin.

Les bassins d'Anticosti et de Madeleine, malgré des critères pratiques peu favorables, démontrent un potentiel tout de même intéressant avec des scores finaux de 0,70 et 0,67 respectivement. Ils offrent des caractéristiques géologiques très favorables au stockage géologique du CO₂ qui compensent le fait que les bassins soient en grande partie en mer, qu'il n'y ait que très peu d'infrastructures, que l'accessibilité soit difficile et que peu de grands émetteurs de CO₂ soient présents. Ces bassins pourraient être étudiés plus en détail dans le futur pour déterminer leur capacité de stockage. Les probabilités qu'un projet de stockage géologique du CO₂ soit implanté dans ces bassins à court ou moyen termes sont toutefois plutôt faibles.

Finalement, le bassin des Appalaches, avec un score final de 0,54, ne présente pas un potentiel assez élevé pour que plus d'études soient entreprises pour le stockage géologique du CO₂. Le manque de données et la géologie complexe rendent l'analyse plus poussée du bassin très difficile à réaliser de manière rigoureuse.

6.2. Évaluation complémentaire du bassin siluro-dévonien de la Gaspésie.

Les régions de Gaspé et de la structure de Bonaventure sont évaluées pour leur potentiel de stockage du CO₂. L'évaluation préliminaire permet de déterminer que la région de Gaspé possède des critères géologiques plus favorables au stockage du CO₂, mais que la structure de Bonaventure est mieux localisée par rapport aux grands émetteurs.

La quantité d'information géologique disponible pour les deux régions d'intérêt est à la fois un avantage et un inconvénient. En effet, dans la région de Gaspé, il existe plusieurs lignes sismiques et puits forés qui donnent beaucoup d'information sur la géologie de la région. En revanche, la présence de plusieurs anciens puits pétroliers et gaziers abandonnés dont on ne connaît pas exactement l'état actuel est une incertitude pour le confinement en profondeur lors d'un stockage de CO₂. Ce problème ne se pose pas dans la structure de Bonaventure car un seul puits est présent. En revanche, la connaissance géologique de la région est limitée.

La région de Gaspé offre, à première vue, de meilleurs ensembles réservoir/couverture aux profondeurs appropriées que la structure de Bonaventure où les roches couvertures ne sont pas bien définies en profondeur. Cependant, la structure de Bonaventure est moins faillée et la structure y est plus simple, ce qui pourrait faciliter l'identification d'un site de stockage du CO₂.

Les critères pratiques sont plutôt favorables dans les deux régions d'intérêt car elles sont semblables et localisées à moins de 100 kilomètres de distance l'une de l'autre très près de la côte de la Gaspésie.

La différence principale est la proximité avec les grands émetteurs qui sont localisés à Port-Daniel-Gascons (cimenterie) et à Belledune au Nouveau-Brunswick (centrale thermique). La structure de Bonaventure est à environ 20 km de la cimenterie et 40 km de la centrale thermique à vol d'oiseau. La région de Gaspé est à environ 75 km de la cimenterie et 150 km de la centrale thermique. La structure de Bonaventure a donc un avantage d'un point de vue pratique de par sa proximité avec deux grands émetteurs de CO₂.

Références

- Bachu, S. (2000) Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management*, 41 (9), 953-970.
- Bachu, S. (2003) Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change. *Environmental Geology*, 44 (3), 277-289.
- Bachu, S. (2008) Legal and regulatory challenges in the implementation of CO₂ geological storage: An Alberta and Canadian perspective. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2 (2), 259-273.
- Bédard, K., Comeau, F.-A. et Malo, M. (2011) *Évaluation du potentiel de séquestration géologique du CO₂ des bassins sédimentaires du sud du Québec*. Institut national de la recherche scientifique. Québec. Rapport de recherche R-1289 (INRSCO2-2011-V1.2). 25 pages. <http://espace.inrs.ca/529/>
- Bédard, K., Comeau, F.-A. et Malo, M. (2013) *Modélisation 3D du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent*. Institut national de la recherche scientifique. Québec. Rapport de recherche R-1439 (INRSCO2-2013-V1.5). 30 pages. <http://espace.inrs.ca/1643/>
- Bedard, K., Raymond, J., Malo, M., Konstantinovskaya, E. et Minea, V. (2014) St. Lawrence Lowlands bottom-hole temperatures: various correction methods. *GRC Transactions*, 38, 351-355.
- Blackwell, D.D. et Richards, M. (2004) *Geothermal map of North America*. American Association of Petroleum Geologists (AAPG). 1 sheet, scale 1:6,500,000.
- Bourque, P.-A. (2001) Sea level, synsedimentary tectonics, and reefs: implications for hydrocarbon exploration in the Silurian–lowermost Devonian Gaspé Belt, Québec Appalachians. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 49 (2), 217-237.
- Bourque, P.-A., Brisebois, D. et Malo, M. (1995) Gaspé Belt. Dans: Williams, H. [ed.] *Geology of the Appalachian/Caledonian Orogen in Canada and Greenland*. Geological Survey of Canada, Geology of Canada, no. 6. pp. 316-354.
- Bourque, P.-A., Malo, M. et Kirkwood, D. (2001) Stratigraphy, tectono-sedimentary evolution and paleogeography of the post-Taconian–pre-Carboniferous Gaspé Belt: an overview. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 49 (2), 186-201.
- Brisebois, D. et Brun, J. (1994) La plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches. Dans: Hocq, M., P. Verpaalst, F. Chartrand et al [eds] *Géologie du Québec*. Ministère des Ressources naturelles, Québec. MM 94-01. pp. 95-120.
- Castonguay, S., Carroll, J.I., Pinet, N., Brisebois, D. et Malo, M. (2004) *Compilation géologique, Matane-Restigouche, Les ponts géologiques de l'est du Canada, Transect 3, Québec-Nouveau-Brunswick*. Commission géologique du Canada. Dossier public 4628.
- Castonguay, S., Dietrich, J., Shinduke, R. et Laliberté, J.-Y. (2006) *Nouveau regard sur l'architecture de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches du sud du Québec par le retraitement des profils de sismique réflexion M-2001, M-2002 et M-2003*. Geological Survey of Canada. Open File 5328. 19 pages.
- Castonguay, S., Lavoie, D., Dietrich, J. et Laliberte, J.-Y. (2010) Structure and petroleum plays of the St. Lawrence Platform and Appalachians in southern Quebec: insights from interpretation of MRNQ seismic reflection data. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 58 (3), 219-234.
- Castonguay, S., Wilson, R.A., Brisebois, D., Desrochers, A. et Malo, M. (2005) *Compilation géologique, Anticosti-Gaspé-Campbelton, Les ponts géologiques de l'est du Canada, Transect 4, Québec-Nouveau-Brunswick*. Commission géologique du Canada. Dossier public 4883.
- Chabot-Bergeron, A., Raymond, J., Malo, M. et Comeau, F.-A. (2016) *Évaluation du potentiel de génération d'électricité géothermique en Gaspésie: régions de la vallée de la Matapédia et de Gaspé*. Institut national de la recherche scientifique. Québec. Rapport de recherche R-1661. 69 pages. <http://espace.inrs.ca/4029/>
- CO2CRC (2008) *Storage Capacity Estimation, Site Selection and Characterisation for CO₂ Storage Projects*. Cooperative Research Center for Greenhouse Gas Technologies. Canberra, Australie. CO2CRC Report No. RPT08-1001. 52 pages.
- Desrochers, A., Farley, C., Achab, A., Asselin, E. et Riva, J.F. (2010) A far-field record of the end Ordovician glaciation: The Ellis Bay Formation, Anticosti Island, Eastern Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 296 (3-4), 248-263.
- Dunning, G.R., Barr, S.M., Giles, P.S., McGregor, D.C., Pe-Piper, G. et Piper, D.J.W. (2002) Chronology of Devonian to early Carboniferous rifting and igneous activity in southern Magdalen Basin based on U-Pb (zircon) dating. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 39 (8), 1219-1237.
- ENGO network on CCS (2015) *Closing the gap on*

- climate - Why CCS is a vital part of the solution.* ENGO network on CCS. 53 pages.
- Environnement Canada. *Données recueillies auprès des installations sur les gaz à effet de serre (2015)* [en ligne]. Disponible sur: <http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=Fr&n=8044859A-1>.
- Genivar (2013) *Projet d'implantation d'une cimenterie sur le territoire de Port-Daniel-Gascon. Mise à jour de l'étude de répercussions sur l'environnement.* Dossier 121-20440-00. 233 pages.
- Global CCS Institute (2016) *The Global Status of CCS: 2016. Summary Report.* Global CCS Institute. 26 pages.
- Hu, K. et Lavoie, D. (2008) *Porosity and permeability evaluation and geological interpretations from core data and geophysical well logs for 18 wells in the Paleozoic successions of eastern Canada and implications for hydrocarbon exploration.* Geological Survey of Canada. Open File 5485. 106 pages.
- IEAGHG (2013) *Deployment of CCS in the cement industry.* International Energy Agency. Report: 2013/19.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [ed.] (2005) *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the IPCC.* Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, USA. 442 pages.
- International Energy Agency (IEA) (2008) *CO₂ capture and storage: A key carbon abatement option.* OECD Publishing. Paris, France. 261 pages.
- Junex (2008) *Rapport de fin de forage - Junex Paspébiac No 1 (C-133).* Junex. Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec - 2007OC133-02. 37 pages.
- Konstantinovskaya, E., Rodriguez, D., Kirkwood, D., Harris, L.B. et Thériault, R. (2009) Effects of Basement Structure, Sedimentation and Erosion on Thrust Wedge Geometry: An Example from the Quebec Appalachians and Analogue Models. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 57 (1), 34-62.
- Konstantinovskaya, E., Rutqvist, J. et Malo, M. (2014) CO₂ storage and potential fault instability in the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin (Quebec, Canada): Insights from coupled reservoir-geomechanical modeling. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 22, 88-110.
- Lavoie, D. (1992) Carbonate sedimentation in an extensional tectonic regime: the Lower Devonian Upper Gaspé Limestones, Quebec Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 29 (1), 118-128.
- Lavoie, D. et Chi, G. (2006) Hydrothermal dolomitization in the Lower Silurian La Vieille Formation in northern New Brunswick: geological context and significance for hydrocarbon exploration. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 54 (4), 380-395.
- Lavoie, D. et Morin, C. (2004) Hydrothermal dolomitization in the Lower Silurian Sayabec Formation in northern Gaspé – Matapédia (Québec): constraint on timing of porosity and regional significance for hydrocarbon reservoirs. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 52 (3), 256-269.
- Lavoie, D., Pinet, N., Dietrich, J., Hannigan, P., Castonguay, S., Hamblin, A.P. et Giles, P. (2009) *Petroleum Resource Assessment, Paleozoic successions of the St. Lawrence Platform and Appalachians of eastern Canada.* Geological Survey of Canada. Open File 6174. 273 pages.
- Malo, M. et Bédard, K. (2012) Basin-Scale Assessment for CO₂ Storage Prospectivity in the Province of Québec, Canada. *Energy Procedia*, 23, 487-494.
- Malo, M. et Bourque, P.-A. (1993) Timing of the deformation events from Late Ordovician to Mid-Devonian in the Gaspé Peninsula. *Geological Society of America Special Papers*, 275, 101-122.
- Moutenet, J.-P. et Malo, M. (2011) *Panorama de l'encadrement juridique de la séquestration géologique du CO₂ en Alberta : un exemple pour le Québec.* Institut national de la recherche scientifique. Québec. Rapport de recherche R1264 (INRSCO2-2011-V5.2). 19 pages. <http://espace.inrs.ca/526/>
- NETL (2010) *Best Practices for: Geologic Storage Formation Classification: Understanding its Importance and Impacts on CCS Opportunities in the United States - 1st edition.* National Energy Technology Laboratory - U.S. Department of Energy. 54 pages.
- Séismes Canada. *Tremblements de terre Canada - Commission Géologique du Canada, Bulletin en direct* [en ligne]. Disponible sur: <http://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/stndon/NEDB-BNDS/bull-fra.php>.
- Séjourné, S., Dietrich, J. et Malo, M. (2003) Seismic characterization of the structural front of southern Quebec Appalachians. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 51 (1), 29-44.
- Shafeen, A., Croiset, E., Douglas, P.L. et Chatzis, I. (2004) CO₂ sequestration in Ontario, Canada. Part I: Storage evaluation of potential reservoirs. *Energy Conversion and Management*, 45 (17), 2645-2659.
- SNC-Lavalin (2011) *Geological sequestration of CO₂ - Part 2: Cost analysis for an industrial CCS*

complex in Bécancour, Québec. SNC-Lavalin, Division Environnement. Rapport interne à l'INRS, projet 607967. 44 pages.

- Tovar, D. (2014) *Reconstruction de la géométrie du synclinorium de la Baie des Chaleurs au nord de Bonaventure par l'intégration des données géologiques et géophysiques.* Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement, Sciences de la Terre. Québec, Canada. M.Sc. 101 pages.
- Tran Ngoc, T.D., Lefebvre, R., Konstantinovskaya, E. et Malo, M. (2014) Characterization of deep saline aquifers in the Bécancour area, St. Lawrence Lowlands, Québec, Canada: implications for CO2 geological storage. *Environmental Earth Sciences*, 72 (1), 119-146.
- Williams, H. (1995) Divisions temporelles et spatiales. Dans: Commission géologique du Canada [ed.] *Géologie de l'orogène appalachien-calédonien au Canada et au Groenland - Géologie du Canada no 6.* Chapitre 2. pp. 21-47.