





Évaluation du potentiel de séquestration géologique du CO₂ des bassins sédimentaires du sud du Québec

RAPPORT FINAL INRSCO2-2011-V1.2

Par

Karine Bédard, Félix-Antoine Comeau et Michel Malo

Soumis au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs 1^{er} octobre 2011 – Québec

R-1289

Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, 490 de la Couronne, Québec, Qc, G1K 9A9

Téléphone : (418) 654-2535 ; Télécopieur : (418) 654-2600 ; Site internet : chaireco2.ete.inrs.ca

TABLE DES MATIÈRES

PR	ÉAMB	ULE		3
So	MMAI	IRE		4
1.	INT	RODU	JCTION	5
2.	Mé	THOD	OOLOGIE D'ÉVALUATION DES BASSINS	5
:	2.1.	Cor	ncepts	5
	2.2.		tères géologiques	
	2.2.		Sismicité (environnement tectonique)	
	2.2.		Superficie	
	2.2.	.3.	Profondeur	
	2.2.	.4.	Déformation	
	2.2.	.5.	Ensembles réservoir-couverture	8
	2.2.	.6.	Géothermie	8
	2.2.	. <i>7</i> .	Potentiel en hydrocarbures	
	2.2.	.8.	Évaporites	
	2.2.		Charbon	
	2.2.	.10.	Maturité d'exploration	8
:	2.3.	Crit	tères pratiques	9
	2.3.	.1.	On/Offshore	9
	2.3.	.2.	Climat	
	2.3.	_	Accessibilité et infrastructures	
	2.3.		Sources de CO ₂	
	2.3.	_	Législation	
3.	Cor	NTEXT	TE GÉOLOGIQUE	10
	3.1.	Évc	olution des bassins sédimentaires du sud du Québec	10
	3.3.	Bas	ssin de la plate-forme du Saint-Laurent	13
	3.3.		Sous-bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent	
	3.3.	.2.	Sous-bassin d'Anticosti	
	3.4.	Bas	ssin cambro-ordovicien des Appalaches	
	3.5.		ssin siluro-dévonien de la Gaspésie	
	3.6.		ssin permo-carbonifère de Madeleine	
4.	ÉVA		TION DES BASSINS SÉDIMENTAIRES DU SUD DU QUÉBEC	
	4.1.		ssin de la plate-forme du Saint-Laurent	
•	+.1. 4.1.		Sous-bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent	
	4.1.		Sous-bassin d'Anticosti	
	4.2.		ssin cambro-ordovicien des Appalaches	
	4.3.		sin siluro-dévonien de la Gaspésie	
•	4.4.		sin permo-carbonifère de Madeleine	
5.	Cor	NCLUS	SIONS	23
Rŕ	FÉRFN	ICFS		24

Préambule

Le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) a octroyé une subvention à l'INRS-ETE pour mettre en place une chaire de recherche sur la séquestration géologique du CO₂ au Québec. Le décret n° 714-2008 approuvant l'octroi a été adopté le 25 juin 2008. La subvention d'une durée de cinq ans (exercices financiers 2008-2009 à 2012-2013) provient du Fonds vert. La création de la chaire s'inscrit dans l'action 20 du Plan d'action 2006-20012 sur les changements climatiques intitulé « Le Québec et les changements climatiques, un défi pour l'avenir ».

Les travaux de la chaire permettront d'explorer les principales options de séquestration géologique du CO₂ au Québec. Les objectifs principaux sont d'évaluer la capacité de stockage du CO₂ au Québec, de tester quelques sites pour leur potentiel de rétention du CO₂ après injection, et de former une expertise au Québec dans le domaine de la technologie du captage et de la séquestration du CO₂ (CSC). Les objectifs secondaires pour arriver à répondre aux objectifs principaux sont de: 1) faire l'inventaire des réservoirs géologiques potentiels au Québec; 2) faire l'inventaire des sources majeures d'émission de CO₂ au Québec; 3) compiler les travaux réalisés ailleurs dans le monde sur la technologie du CSC; 4) caractériser les paramètres géologiques et géophysiques des réservoirs potentiels; 5) évaluer leur capacité de stockage; 6) choisir des sites potentiels pour réaliser des essais d'injection de CO₂; 7) tester un ou deux sites avec suivi sur une période d'un à deux ans pour évaluer la capacité de rétention du CO₂ et les risques de fuite. En marge de l'atteinte des objectifs mentionnés plus haut, les travaux complémentaires concernent l'évaluation des enjeux socio-économiques de l'implantation de la technologie du CSC au Québec (lois, sécurité, etc.) et des études technico-économiques pour l'implantation d'une usine pilote.

Les cinq volets de recherche suivants permettront d'atteindre les objectifs et de réaliser les travaux complémentaires :

- 1. Inventaire
- 2. Caractérisation
- 3. Capacité de stockage
- 4. Test-pilote
- 5. Enjeux socio-économiques

Le présent rapport sur l'évaluation des bassins sédimentaires pour la séquestration géologique du CO_2 cadre dans le volet inventaire.

Sommaire

Le sud du Québec est divisé en quatre bassins sédimentaires qui sont analysés afin de déterminer lesquels offrent le plus grand potentiel pour la séquestration 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 de la plate-forme du Saint-Laurent ;
 - O Sous-bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent ;
 - o Sous-bassin d'Anticosti;
- Bassin cambro-ordovicien des Appalaches ;
- Bassin siluro-dévonien de la Gaspésie ;
- Bassin permo-carbonifère de Madeleine.

Le sous-bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent démontre, de loin, le plus grand potentiel pour la séquestration géologique du CO₂. Le sous-bassin d'Anticosti et le bassin permocarbonifère 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 séquestration du CO₂. Finalement, les bassins cambro-ordovicien des Appalaches et siluro-dévonien de la Gaspésie offrent un faible potentiel de par leur géologie plus complexe et l'intensité de la déformation des roches.

1. Introduction

Le captage et la séquestration du CO₂ (CSC) gagnent présentement en intérêt car ils représentent 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 séquestrer 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 la séquestration géologique du CO₂ va donc bon train 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 la séquestration du CO₂.

Lorsque les bassins appropriés sont identifiés, des études plus poussées peuvent être menées afin de cibler des sites de séquestration spécifiques.

Ainsi, ce rapport présente les résultats de recherche sur le potentiel des différents bassins sédimentaires du sud du Québec pour la séquestration géologique du CO₂.

2. Méthodologie d'évaluation des bassins

2.1. Concepts

La méthodologie suivie afin d'évaluer le potentiel des bassins sédimentaires pour la séquestration géologique du CO_2 se base sur les travaux de Bachu (2003) et du CO2CRC (2008).

Tableau 1 – Critères d'évaluation du potentiel des bassins sédimentaires pour la séquestration géologique du CO_2 . Modifié de 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	Élevée	Intermédiaire	Faible	Très faible		
i=2	Superficie	$<1000 \text{ km}^2$	$1000-5000 \text{ km}^2$	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=4	Déformation	Importante	Modérée	Faible				
<i>i</i> =5	Ensembles réservoir- couverture	Faible	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	Faible	Moyen	Élevé	Géant		
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	Super mature		
i=11	On/Offshore	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=14	Infrastructures	Aucune	Mineures	Modérées	Importantes			
<i>i</i> =15	Sources de CO ₂	Aucune	Peu	Modérées	Significatives	Plusieurs		

Le potentiel d'un bassin sédimentaire pour la séquestration 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,...,n) appartient le bassin pour chacun des quinze critères d'évaluation (i=1,...,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 la séquestration 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 la séquestration géologique du CO₂. Modifié de Bachu (2003).

Critères		Classes				Poids	
		<i>j</i> =1	<i>j</i> =2	<i>j</i> =3	<i>j</i> =4	<i>j</i> =5	(w_i)
<i>i</i> =1	Sismicité	1	3	7	15	15	0,10
i=2	Superficie	1	3	5	8	10	0,06
i=3	Profondeur	1	2	6	10		0,10
i=4	Déformation	1	4	10			0,09
i=5	Ensembles réservoir-couverture	1	4	10			0,10
i=6	Géothermie	1	4	10			0,08
i=7	Potentiel en hydrocarbures	1	3	7	14	21	0,04
i=8	Évaporites	1	2	3			0,01
<i>i</i> =9	Charbon	1	2	5			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>i</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>i</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 séquestration du CO_2 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 la séquestration 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 la séquestration 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 séquestration 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, ils n'ont pas été pris en compte.

2.2.1. 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.

2.2.2. Superficie

La superficie du bassin est un indice primordial de la capacité de séquestration 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).

2.2.3. Profondeur

La profondeur des ensembles réservoir-couverture est critique pour déterminer la phase de séquestration du CO₂. Une profondeur minimale de 800 mètres est nécessaire pour pouvoir séquestrer 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 séquestrer de grandes quantités de CO2 dans un plus petit volume, ce qui représente un avantage majeur de la séquestration 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). La séquestration géologique du CO₂ est impossible entre 0 et 300 mètre car le CO₂ n'est pas assez dense pour y être séquestré en grande quantité et les risques de fuites vers l'atmosphère sont plus élevés. Finalement, entre 300 et 800 mètres, la séquestration géologique du CO2 n'est possible que dans les veines de charbon (CO2CRC, 2008).

2.2.4. Déformation

L'intensité de la déformation (plis et failles) influence le volume du réservoir et son étanchéité. Plus un réservoir est faillé, plus grands sont les risques de fuites de CO₂ hors des réservoirs prévus. De plus, un bassin très faillés, mais dont les failles sont étanches, est divisé en plusieurs réservoirs plus petits ce qui a pour effet de diminuer le volume potentiel de séquestration (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.

2.2.5. Ensembles réservoir-couverture

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

2.2.6. 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 séquestrer 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 séquestrer 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).

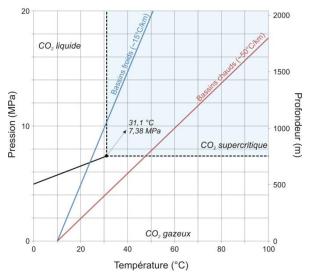


Figure 1 - Digramme de phase du CO_2 avec des exemples de comportement du CO_2 dans les bassins froids et chauds (modifiée de Bachu, 2003).

Par contre, à une même profondeur, comme la température est plus faible dans les bassins froids que dans les bassins chauds, le CO_2 est plus dense, ce qui

signifie qu'une plus grande quantité de CO₂ peut y être séquestré (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 séquestration du CO₂ supercritique soit plus grande dans les bassins froids, ces derniers sont plus intéressants pour la séquestration géologique du CO₂.

2.2.7. 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 séquestrer 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 la séquestration du CO₂ (CO2CRC, 2008). La séquestration géologique du CO₂ pourrait malgré tout être envisagée pour la récupération assistée des hydrocarbures ce qui représente un avantage important.

2.2.8. Évaporites

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

2.2.9. Charbon

La présence de charbon dans le bassin offre une option supplémentaire pour la séquestration géologique du CO₂ (IPCC, 2005; CO2CRC, 2008). En effet, le charbon peut adsorber des quantités significatives de CO₂ surtout lorsque sa perméabilité est élevée, généralement à de faibles profondeurs.

2.2.10. 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 la séquestration du CO₂ (IPCC, 2005; CO2CRC, 2008).

2.3. Critères pratiques

2.3.1. On/Offshore

La localisation sur terre ou en mer d'un site de séquestration géologique de CO_2 est un critère important car il implique des problèmes d'accessibilité et d'infrastructure (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.

2.3.2. 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).

2.3.3. 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.

2.3.4. Sources de CO₂

La proximité de grands émetteurs de CO_2 permet d'assurer un apport constant en CO_2 avec un faible coût de transport (Bachu, 2003). Si la construction d'un pipeline long de plusieurs centaines de kilomètres est nécessaire afin d'acheminer le CO_2 au site de séquestration, les coûts de transport seront plus élevés par rapport à une source de CO_2 localisée tout près.

2.3.5. Législation

Le régime législatif est aussi un critère qui peut être utilisé pour évaluer la faisabilité de la séquestration géologique du CO₂. Comme tous les bassins analysés sont sous la même juridiction, les mêmes lois et règlements s'appliqueraient pour la séquestration 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. 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 deux provinces géologiques : le Bouclier canadien au nord et la chaîne de montagnes des Appalaches au sud. Le Bouclier canadien, composé de roches ignées métamorphiques d'âge Précambrien, n'est favorables à la séquestration géologique du CO2 qui s'effectue principalement dans les bassins sédimentaires (Bachu, 2000, 2003; Shafeen et al., 2004; IPCC, 2005; CO2CRC, 2008; NETL, 2010). En contrepartie, la chaîne de montagne des Appalaches, consiste en différentes successions de roches sédimentaires paléozoïques pouvant démontrer un certain potentiel pour la séquestration géologique du CO₂. Les Appalaches peuvent être divisées en quatre bassins: le bassin de la plate-forme du Saint-Laurent, le bassin cambro-ordovicien des Appalaches (ou bassin Taconien), le bassin siluro-dévonien de la Gaspésie (ou bassin Acadien) et le bassin permocarbonifère de Madeleine. La Figure 2 localise les différents bassins sédimentaires du sud du Québec.

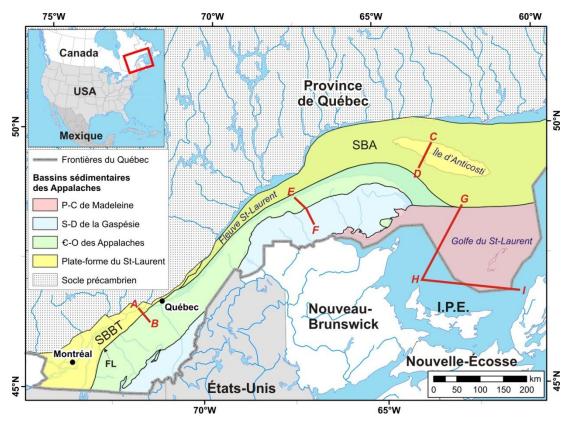


Figure 2 – Bassins sédimentaires du sud du Québec. SBBT : sous-bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. SBA : sous-bassin d'Anticosti. P-C : permo-carbonifère. S-D : siluro-dévonien. €-O : cambro-ordovicien. FL : Faille Logan

3.1. Évolution des bassins sédimentaires du sud du Québec

La Figure 3 montre l'échelle de temps géologique relative à la période de formation des bassins sédimentaires du sud du Québec.

Au début du Cambrien (~550 Ma), une accumulation de chaleur sous le continent Rodina soulève celui-ci et développe progressivement des rifts continentaux qui donnent naissance à l'océan Iapetus. Rodina est alors séparé en deux continents: Laurentia et Gondwana

(Figure 4A et B). L'expansion de l'océan Iapetus se poursuit au Cambrien et permet le dépôt de sédiments sur le plateau continental de Laurentia, pour ainsi débuter la formation du bassin de la plate-forme du Saint-Laurent. Plus au large, de grandes quantités de sédiments provenant de l'érosion du continent Laurentia se déposent au pied du talus continental, créant ainsi le bassin cambro-ordovicien des Appalaches (Figure 4B et C) (Hiscott, 1995; Bourque, 2010).

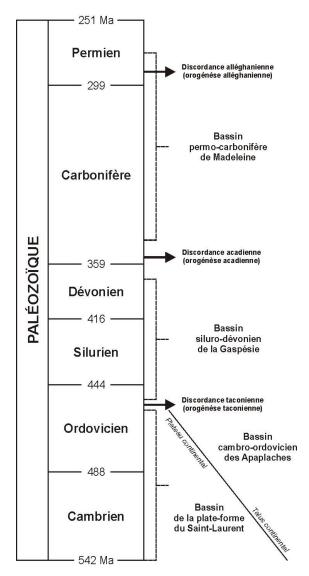


Figure 3 – Échelle de temps géologique (Walker et Geissman, 2009) avec les principaux évènements liés à la mise en place des bassins sédimentaires du sud du Ouébec.

À la fin du Cambrien (~500 Ma), un enfoncement de la croûte océanique au large de Laurentia forme une zone de subduction et induit un arc insulaire volcanique (Figure 4C), puis l'océan Iapetus commence à se refermer. Vers la fin de l'Ordovicien (~450 Ma), l'océan continue à se refermer et l'arc volcanique insulaire entre en collision avec Laurentia, entraînant la superposition progressive d'unités sédimentaires déposées au pied du talus continental, soit le bassin cambro-ordovicien des Appalaches (Figure 4D). Ces unités se mettent en place sous forme de grandes nappes de charriage et d'écailles avec une vergence orientée vers le continent Laurentia. L'empilement de ces structures conduit à l'émergence

de la chaîne taconienne, la première phase majeure de la formation des Appalaches. Jouxtant la chaîne taconnienne, on trouve alors une zone de roches non déformées, le bassin de la plate-forme du Saint-Laurent, correspondant aux sédiments déposés sur le plateau continental. Une grande partie de la chaîne taconnienne, soit le bassin cambro-ordovicien des Appalaches, a été transportée au-dessus du bassin de la plate-forme du Saint-Laurent, à la faveur d'une grande zone de chevauchement, la faille Logan qui sépare les deux bassins (Hiscott, 1995; Bourque, 2010). La déformation tectonique taconienne de l'Ordovicien tardif s'est poursuivie pendant le Silurien tardif dans les Appalaches du sud du Québec (Castonguay et al., 2001) et est associée à l'orogenèse salinique reconnue ailleurs dans les Appalaches canadiennes.

Au Silurien (~400 Ma), la majeure partie de la chaîne taconienne émergée est soumise à un régime d'érosion intense, qui est suivie par une transgression marine entraînant le dépôt de roches sédimentaires en discordance sur les roches plissées du bassin cambroordovicien des Appalaches, pour former le bassin siluro-dévonien de la Gaspésie (Figure 4E). Au Dévonien, l'océan Iapetus disparait progressivement sous la marge d'un microcontinent, Avalonia, qui entre en collision avec le continent Laurentia (Figure 4E et F). Les sédiments déposés au Silurien et au Dévonien dans l'océan Iapetus sont soulevés et déformés pour constituer l'orogenèse acadienne (~375 Ma), la seconde phase majeure de la formation des Appalaches, qui est venue se superposer à la chaîne taconienne (Figure 4F) (Bourque et al., 1995).

Les reliefs émergés au cours de l'orogenèse acadienne sont soumis à une forte érosion dès la fin du Dévonien et pendant le Carbonifère (~325 Ma) et une grande quantité de sédiments est déposée dans l'océan Rhéïque, en discordance sur le bassin siluro-dévonien de la Gaspésie. Les roches ont été l'objet d'un basculement et d'un affaissement causés par des failles normales et forment le bassin permo-dévonien de Madeleine. À la fin du Carbonifère (~275 Ma), la mer rétrécit et la croûte océanique disparaît progressivement sous le continent Laurentia (Figure 4G). Cette convergence aboutit à la collision entre les continents Laurentia et Gondwana et correspond à l'orogenèse alléghanienne, troisième et ultime phase de formation des Appalaches. Le bassin permocarbonifère de Madeleine subit par la suite une sédimentation continentale qui vient conclure la mise en place des bassins sédimentaires du sud du Québec (van de Poll, 1995).

Les relations actuelles entre les différents bassins sédimentaires du Québec sont montrées à la Figure 4H.

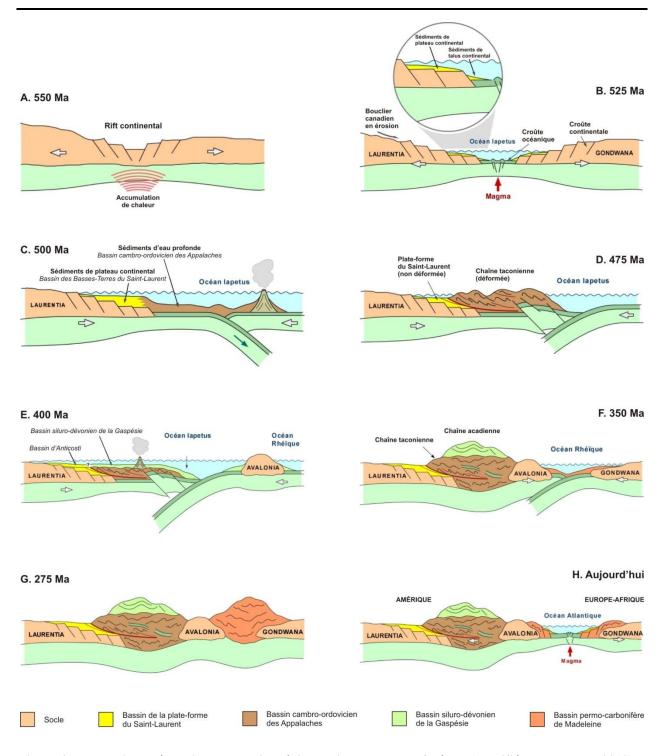


Figure 4 – Formation et évolution des bassins sédimentaires du sud du Québec. (Modifiée de Bourque, 2010)

3.3. Bassin de la plate-forme du Saint-Laurent

La plate-forme du Saint-Laurent est composée de roches du Cambrien au Silurien inférieur (Figure 3) reposant en discordance sur le socle précambrien du Bouclier canadien, soit l'ancienne marge laurentienne. Le bassin est donc limité au nord-ouest par cette discordance tandis que la frontière sud-est du bassin est définie par une importante faille de chevauchement, la faille Logan, qui marque le contact avec le bassin cambro-ordovicien des Appalaches (Figure 2). Pour une meilleure évaluation, la plateforme du Saint-Laurent est divisée en deux sousbassins distincts : le sous-bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent au sud-ouest et le sous-bassin d'Anticosti au nord-est (voir Figure 2).

3.3.1. Sous-bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent

La succession de la plate-forme sédimentaire cambroordovicienne des Basses-Terres du Saint-Laurent a une épaisseur allant jusqu'à 3000 mètres et repose en discordance sur le socle précambrien du Bouclier canadien (Globensky, 1987). Des failles normales de direction SO-NE affectent la succession dont la profondeur augmente vers le sudest jusqu'à se prolonger sous le bassin cambro-ordovicien des Appalaches (Castonguay *et al.*, 2006). La coupe A-B (Figure 5) montre l'architecture du sous-bassin basée sur l'interprétation de la ligne sismique M-2001 de SOQUIP.

3.3.2. Sous-bassin d'Anticosti

Le sous-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 séquence sédimentaire est principalement composée de faciès carbonatés avec une faible proportion de faciès silico-clastiques (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 6) montre l'architecture du sous-bassin.

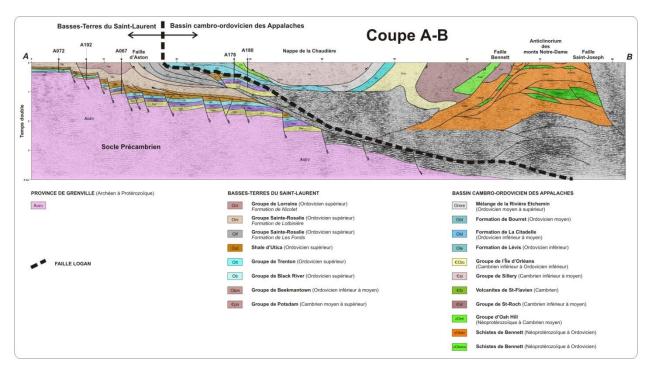


Figure 5 – Architecture des du sous-bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent et du bassin cambroordovicien des Appalaches sur la ligne sismique M-2001 (modifiée de Castonguay *et al.*, 2006). La ligne sismique est localisée sur la Figure 2, ligne rouge A-B.

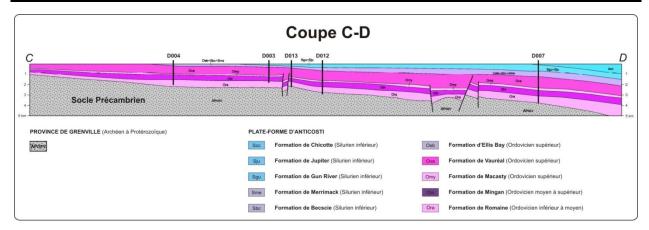


Figure 6 – Coupe géologique montrant l'architecture du sous-bassin d'Anticosti (modifiée de Castonguay *et al.*, 2005). La coupe est localisée sur la Figure 2, ligne rouge C-D.

3.4. Bassin cambro-ordovicien des Appalaches

Le bassin cambro-ordovicien 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 (Figure 3). 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. Le bassin est caractérisé par des unités ayant subi plusieurs phases de déformation, dont les orogenèses taconienne et acadienne. Ces unités se trouvent structuralement au-dessus de la succession de la plateforme du Saint-Laurent desquelles elles sont séparées par la faille Logan (Séjourné et al., 2003). La coupe A-B (Figure 5) montre l'architecture du bassin et sa relation avec le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent sur l'interprétation de la ligne sismique M-2001 de SOQUIP.

3.5. Bassin siluro-dévonien de la Gaspésie

Le bassin siluro-dévonien 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) (Figure 3). Le bassin est présent dans la partie sud de la péninsule de la Gaspésie de même que dans les Cantons-de-l'Est. Il repose en discordance sur le bassin cambro-ordovicien des Appalaches. Il s'agit du bassin successeur de l'orogénie taconienne qui a été plissé et faillé par l'orogénie acadienne. La coupe E-F (Figure 7) montre l'architecture du bassin et sa relation avec la plateforme du Saint-Laurent et le bassin cambro-ordovicien des Appalaches.

3.6. Bassin permo-carbonifère de Madeleine

Au Québec, le bassin permo-carbonifère de Madeleine est localisé principalement en mer dans le Golfe du Saint-Laurent. Les roches s'étendent du Dévonien supérieur au Permien inférieur (Figure 3) et la succession sédimentaire atteint jusqu'à 12 000 mètres d'épaisseur dans le centre-est du Golfe (Lavoie *et al.*, 2009). La coupe E-F (Figure 8) 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).

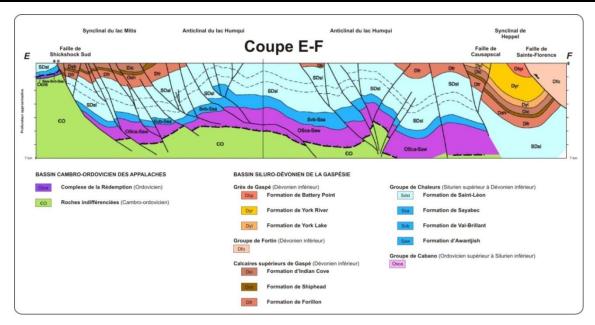


Figure 7 – Coupe géologique montrant l'architecture du bassin siluro-dévonien de la Gaspésie (modifiée de Castonguay *et al.*, 2004). La coupe est localisée sur la Figure 2, ligne rouge E-F.

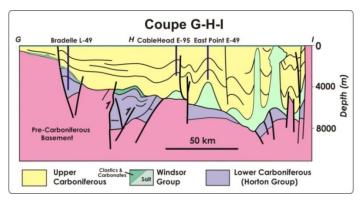


Figure 8 – Coupe géologique montrant l'architecture du bassin permo-carbonifère de Madeleine dans le Golfe du Saint-Laurent (modifiée de Lavoie *et al.*, 2009). La coupe est localisée sur la Figure 2, ligne rouge G-H-I.

4. Évaluation des bassins sédimentaires du sud du Québec

L'évaluation des bassins du sud du Québec pour la séquestration géologiques du CO_2 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 9 à 12 illustrent les caractéristiques des bassins pour les critères de sismicité, de géothermie, de maturité et des sources de CO_2 .

Tableau 3 – Évaluation des critères et classement des bassins du sud du Québec pour la séquestration géologique du CO_2 .

	Plate-forme du St-Laurent				
	Basses-Terres	Anticosti	C-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	1	3
Ensembles réservoir-couverture	3	3	1	1	3
Géothermie	3	3	3	3	3
Potentiel en hydrocarbures	3	3	1	2	4
Évaporites	1	1	1	1	2
Charbon	1	1	1	1	2
Maturité d'exploration	3	2	1	2	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	2	3	1	2
Score général (R ^k)	0,84	0,70	0,51	0,59	0,68
Classement	1	2	5	4	3

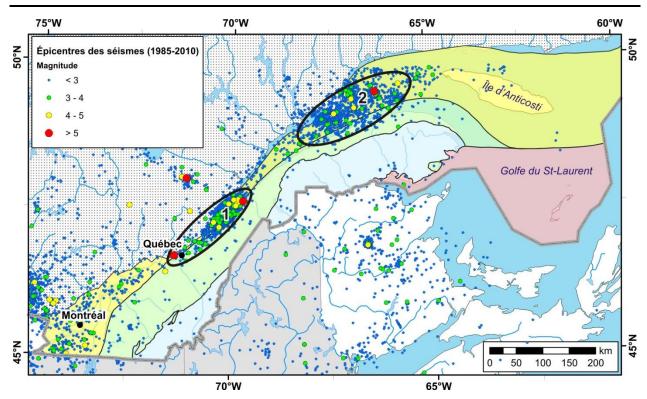


Figure 9 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et des épicentres des séismes entre 1985 et 2010. Cercles noirs 1 et 2 : zones d'activité sismique plus importantes. Source des données pour les séismes : Tremblement de terre Canada (2010).

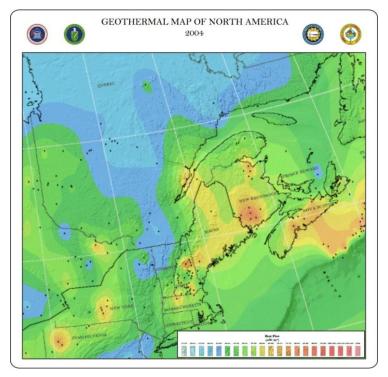


Figure 10 – Carte géothermale du nord-est de l'Amérique du Nord (modifiée de Blackwell et Richards, 2004). Les couleurs bleues représentent des gradients géothermiques plutôt faibles tandis que les couleurs rouges-oranges représentent des gradients élevés.

17

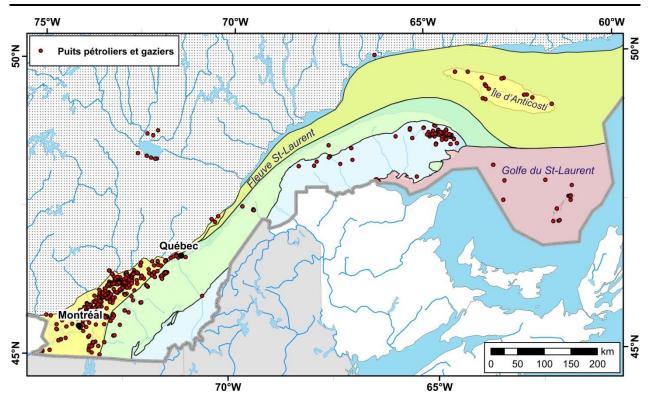


Figure 11 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et de l'ensemble des puits pétroliers et gaziers forés sur le territoire.

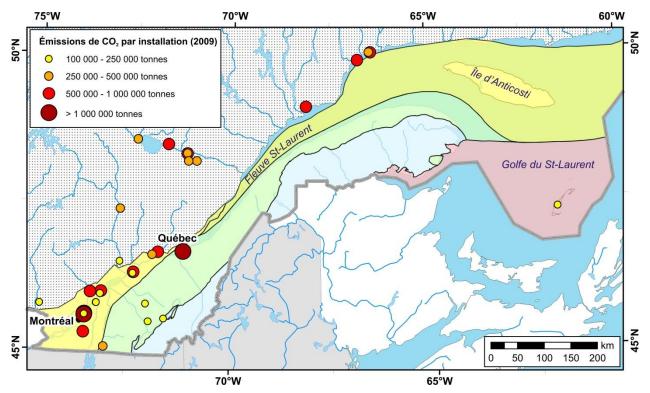


Figure 12 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et des émissions de CO_2 par installation industrielle en 2009. Source des données pour les émissions de CO_2 : Environnement Canada (2009).

18

4.1. Bassin de la plate-forme du Saint-Laurent

4.1.1. Sous-bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent

Les Basses-Terres du Saint-Laurent sont situées dans un environnement actuel de marge passive, c'est-àdire tectoniquement stable avec une faible sismicité. Comme le montre la Figure 9, on ne note pas d'activité sismique de grande magnitude. 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'écailles de chevauchement (Figure 5). Les roches réservoirs potentielles sont celles des groupes de Potsdam, de Beekmantown et de Trenton tandis que les unités des groupes de Sainte-Rosalie/Lorraine ainsi que du Shale d'Utica sont considérées comme des roches de couverture probables (voir Figure 13). La profondeur des roches réservoirs varie de 0 à plus de 3500 mètres, mais la zone montrant le plus grand potentiel de situe à une profondeur intermédiaire de 800 à plus de 3500 mètres au sud du Fleuve Saint-Laurent.

Les données de température au fond des puits des Basses-Terres du Saint-Laurent montre un gradient géothermique de l'ordre de 20 °C/km, ce qui en fait un bassin froid (SNC, 1979; Lefebvre et Trempe, 1980).

L'exploration gazière et pétrolière est présentement en développement dans les Basses-Terres du Saint-Laurent et on note un potentiel en hydrocarbures moyen mais plutôt important lorsque l'on considère les ressources non-conventionnelles des gaz de shale. Les écailles chevauchées de la plate-forme, entre la faille d'Aston et la faille Logan, démontrent aussi un certain potentiel pour les hydrocarbures (voir Figure 5). La Figure 11 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 sous-bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. On ne trouve ni évaporites, ni charbon dans ce bassin.

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 sont présents directement sur le bassin, principalement entre Québec et Montréal (Figure 12).

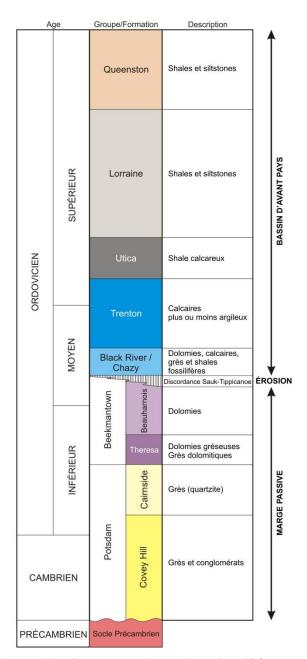


Figure 13 – Colonne stratigraphique simplifiée des Basses-Terres du Saint-Laurent.

4.1.2. Sous-bassin d'Anticosti

Le sous-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 9, on note une activité sismique plus importante dans la région de Charlevoix (cercle noir 1) et dans l'estuaire du Saint-Laurent entre la Gaspésie et la Côte-Nord (cercle noir 2). Ces régions ne sont donc pas considérées pour la séquestration géologique du CO_2 . 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 6). 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 de couverture potentielles sont les shales de la Formation de Macasty (voir Figure 14). 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 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 11 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. Les données sismiques indiquent qu'une importante portion du sous-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 à la séquestration géologique du CO_2 dans le sous-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 peu de grands émetteurs de CO_2 présents à proximité du bassin et aucun directement dans le bassin (Figure 12).

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

Figure 14 – Colonne stratigraphique simplifiée du sous-bassin d'Anticosti.

4.2. Bassin cambro-ordovicien des Appalaches

Le bassin cambro-ordovicien des Appalaches est situé dans un environnement actuel de marge passive, c'està-dire tectoniquement stable avec une faible sismicité (Figure 9). 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 5. 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 cambro-ordovicien des Appalaches, le gradient géothermique est estimé à l'aide des valeurs obtenues dans les Basses-Terres du Saint-Laurent et la carte géothermale de l'Amérique du Nord (Figure 10) 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 cambro-ordovicien des Appalaches doit avoir un gradient géothermique un peu plus élevé que celui des Basses-Terres du Saint-Laurent mais pas assez pour être considéré comme modéré (entre 30 et 40 °C/km). On le classe donc parmi les bassins froids.

Le bassin cambro-ordovicien 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 5 et Figure 11). On ne trouve ni évaporites, ni charbon dans le bassin.

Les critères pratiques sont tous favorables dans le bassin cambro-ordovicien 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 sont présents directement dans le bassin et en périphérie de celui-ci (Figure 12).

4.3. Bassin siluro-dévonien de la Gaspésie

Le bassin siluro-dévonien de la Gaspésie est situé dans un environnement actuel de marge passive, c'est-àdire tectoniquement stable avec une faible sismicité (Figure 9). La superficie couverte par le bassin est d'environ 35 000 km² au Québec

L'intensité de la déformation du bassin varie de modérée à élevée comme le montre la Figure 7. 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 7). 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 7. 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 de couverture. Les nombreuses zones ou intervalles stratigraphiques de roches silicoclastiques de mudstone et siltstone sont les roches de couverture potentielles pour le bassin siluro-dévonien 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 des puits dans l'est de la Gaspésie, le gradient géothermique est de l'ordre de 20°C/km, ce qui en fait un bassin froid.

Le bassin siluro-dévonien de la Gaspésie n'a pratiquement pas été exploré pour les hydrocarbures, mis à part la partie nord-est du bassin dans la région de Gaspé où plusieurs puits ont été forés (Figure 11). On considère que le bassin possède un faible potentiel en hydrocarbures et on n'y trouve ni évaporites, ni charbon.

Les critères pratiques sont plutôt favorables dans le bassin siluro-dévonien de la Gaspésie. Il est 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 assez élevée. Cependant, on ne trouve aucun grand émetteur de CO₂ directement dans le bassin et très peu en périphérie de celui-ci (Figure 12).

4.4. Bassin permo-carbonifère de Madeleine

Le bassin permo-carbonifère de Madeleine est situé dans un environnement actuel de marge passive, c'està-dire tectoniquement stable avec une faible sismicité. Comme le montre la Figure 9, on note une très faible activité sismique. La superficie couverte par le bassin est d'environ 40 000 km² au Québec.

Comme le montre la Figure 8, 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 de couverture 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 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 15 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 de situe à une profondeur intermédiaire (800 à 3500 mètres).

Peu de données de température de puits existent dans le bassin permo-carbonifère de Madeleine, le gradient géothermique est donc estimé à l'aide des valeurs obtenues dans les Basses-Terres du Saint-Laurent et la carte géothermale de l'Amérique du Nord (Figure 10) 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 permo-carbonifère de Madeleine doit avoir un gradient géothermique un peu plus élevé que celui des Basses-Terres du Saint-Laurent 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, malgré le moratoire imposé sur l'ensemble du bassin, on suppose un grand potentiel en hydrocarbures. La Figure 11 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. 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 à la séquestration géologique du CO₂ dans le bassin

permo-carbonifère 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 12).

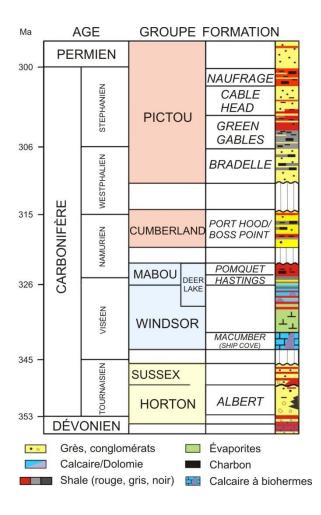


Figure 15 – Colonne stratigraphique simplifiée du bassin permo-carbonifère de Madeleine (modifiée de Lavoie *et al.*, 2009).

5. Conclusions

L'analyse du potentiel des bassins sédimentaires du sud du Québec pour la séquestration géologique du CO_2 a permis de mettre en évidence le potentiel intéressant du sous-bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. 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 réservoirs spécifiques pour l'injection de CO_2 . Les autres travaux de la Chaire de recherche se concentrent donc présentement sur ce bassin, afin de mieux le caractériser. Une des tâches à réaliser sera d'évaluer la capacité de séquestration du bassin en collaboration avec le *National Atlas of CO_2 Geological Storage Potential and Capacity in Canada*.

Les bassins d'Anticosti et de Madeleine, malgré des critères pratiques peu favorables, démontrent un potentiel intéressant avec des scores finaux de 0,70 et 0,68 respectivement. Les caractéristiques géologiques de ces deux bassins sont très favorables à la séquestration géologique du CO₂ et compensent en grande partie le fait que les bassins soient majoritairement 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. Ils pourraient être étudiés plus en détail dans le futur pour déterminer leurs capacités de séquestration. Cependant, les probabilités qu'un projet de séquestration géologique du CO₂ soit implanté dans un de ces bassins à court ou moyen termes sont plutôt faibles.

Finalement, les bassins siluro-dévonien de la Gaspésie et cambro-ordovicien des Appalaches, avec des scores finaux de 0,59 et 0,51, ne présentent pas un potentiel assez élevé pour que plus d'études soient entreprises pour la séquestration géologique du CO₂ au Québec. Le manque de données et la géologie complexe rendent l'analyse plus poussée du bassin très difficile à réaliser de manière rigoureuse.

Références

- Bachu, S. (2000) Sequestration of CO2 in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. <u>Energy Conversion and Management</u>, **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. <u>International Journal of Greenhouse Gas Control</u>, **2** (2), 259-273.
- 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. *Planète Terre* [**en ligne**]. Disponible sur:

 http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html. (consulté le 29/06/2011)
- Bourque, P.-A., Brisebois, D. et Malo, M. (1995) Ceinture de Gaspé. *Dans: Géologie de l'orogène* appalachien-calédonien au Canada et au Groenland - Géologie du Canada no 6. Commission géologique du Canada. **Chapitre 4:** 348-387.
- 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. Commission géologique du Canada. Dossier public 5328. 19 pages.
- Castonguay, S., Ruffet, G., Tremblay, A. et Féraud, G. (2001) Tectonometamorphic evolution of the southern Quebec Appalachians: 40Ar/39Ar evidence for Middle Ordovician crustal thickening and Silurian–Early Devonian exhumation of the internal Humber zone. Geological Society of America Bulletin, 113 (1), 144-160.

- 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.
- CO2CRC (2008) Storage Capacity Estimation, Site Selection and Characterisation for CO2 Storage Projects. Cooperative Research Center for Greenhouse Gas Technologies. Canberra, Australie. 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.
- Environnement Canada. Émissions de GES par installation (2009) [en ligne]. Disponible sur: http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=Fr&n=8044859A-1. (consulté le 01-02-2011)
- Globensky, Y. (1987) *Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent*. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. MM 85-02. 63 pages.
- Hiscott, R.N. (1995) Roches clastiques de l'Ordovicien moyen de la Zone de Humber et de la Plate-forme du Saint-Laurent. *Dans: Géologie de l'orogène appalachien-calédonien au Canada et au Groenland Géologie du Canada no 6*. Commission géologique du Canada. **Chapitre 3:** 96-109.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2005) *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, USA. 442 pages.
- International Energy Agency (IEA) (2008) CO_2 capture and storage A key carbon abatement option. IEA/OECD. Paris, France. 261 pages.

- 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. Commission géologique du Canada. Dossier public 6174.
- Lefebvre, P. et Trempe, R. (1980) *Gradient géothermique dans les Basses-Terres Février* 1980 Rapport #9206. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec. 1980TA000-01. 9 pages.
- 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.
- Séjourné, S., Dietrich, J. et Malo, M. (2003) Seismic characterization of the structural front of southern Quebec Appalachians. <u>Bulletin of Canadian</u> 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.

 <u>Energy Conversion and Management</u>, **45** (17), 2645-2659.

- SNC (1979) Rapport sur le potentiel en énergie géothermique de basse énergie dans les Basses Terres du St-Laurent Contrat 4275 (SOQUIP 2078) Préparé pour SOQUIP Rapport #10337. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec. 1979TA000-04. 150 pages.
- Tremblement de terre Canada. *Bulletin en direct* [en ligne]. Disponible sur: http://seismescanada.rncan.gc.ca. (consulté le 01-10-2010)
- van de Poll, H.W. (1995) Paléozoïque supérieur -Nouveau-Brunswick, île-du-Prince-Édouard et îles de la Madeleine. *Dans: Géologie de l'orogène* appalachien-calédonien au Canada et au Groenland - Géologie du Canada no 6. Commission géologique du Canada. **Chapitre 5:** 502-545.
- Walker, J.D. et Geissman, J.W. (2009) *Geologic Time Scale*. Geological Society of America.
- Williams, H. (1995) Divisions temporelles et spatiales. Dans: Géologie de l'orogène appalachiencalédonien au Canada et au Groenland - Géologie du Canada no 6. Commission géologique du Canada. Chapitre 2: 21-47.