### CAPACITÉ EFFECTIVE DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU CO<sub>2</sub> DANS LE BASSIN DES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT

INRSCO2-2012-V3.1

Rapport de recherche R-1331

Mars 2012

### SÉQUESTRATION GÉOLOGIQUE DU CO<sub>2</sub> Chaire de Recherche





Capacité effective de stockage géologique du CO<sub>2</sub> dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent

RAPPORT INRSCO2-2012-V3.1

Par

Karine Bédard, Félix-Antoine Comeau et Michel Malo

Soumis au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs Mars 2012 – Québec R-1331

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 : <u>chaireco2.ete.inrs.ca</u>

### TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE
1. INTRODUCTION
<ul> <li>1.1. Choix du bassin pour les calculs de capacité de stockage de CO<sub>2</sub></li></ul>
2. MODÈLE GÉOLOGIQUE 3D DES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT
2.1. Données de base10
2.2. Modélisation géologique 3D 10
3. CAPACITÉ EFFECTIVE DE STOCKAGE DES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT
3.1. Méthodologie de calcul de capacité effective de stockage
3.2. Spécificités de la méthodologie au Québec.       14         3.2.1. Profondeur.       14         3.2.2. Facteur d'efficacité       15         3.2.3. Porosité       15         3.2.4. Volume       15         3.2.5. Température       16         3.2.6. Pression       16         3.2.7. Densité du CO2       16         3.2.8. Capacités effectives de stockage du CO calculóes       18
A CONCLUSIONS
4. CONCLUSIONS

### 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  $CO_2$  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 2006-2012 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  $CO_2$  au Québec. Les objectifs principaux sont d'évaluer la capacité de stockage du  $CO_2$  au Québec, de tester quelques sites pour leur potentiel de rétention du  $CO_2$  après injection, et de former une expertise au Québec dans le domaine de la technologie du captage et de la séquestration du  $CO_2$  (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  $CO_2$  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  $CO_2$ ; 7) tester un ou deux sites avec suivi sur une période d'un à deux ans pour évaluer la capacité de rétention du  $CO_2$  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'estimation de la capacité de stockage du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent cadre dans le volet capacité de stockage.

### Sommaire

Le bassin sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent est celui qui présente le plus grand potentiel pour le stockage géologique du  $CO_2$  dans le sud du Québec. Ce bassin contient d'excellents ensembles réservoir-couverture, une grande quantité de données sismiques et de puits est disponible, l'accessibilité est facile et les infrastructures sont bien développées. De plus, des aquifères salins sont présents en profondeur au sein de la séquence sédimentaire et constituent les cibles pour le stockage du  $CO_2$ .

La capacité effective de stockage géologique du  $CO_2$  dans les aquifères salins du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent a été effectuée à l'aide d'un modèle géologique 3D qui a permis de calculer les volumes des unités d'intérêt de même que de calculer la densité du  $CO_2$  en tout point du modèle en fonction des gradients de température et de pression. La capacité effective des formations de Cairnside et de Covey Hill a été calculée à l'aide de la densité du  $CO_2$ , de la porosité moyenne des unités géologiques, du volume de ces unités et des facteurs d'efficacité pour le stockage du  $CO_2$  dans les aquifères salins. La Formation de Cairnside étant plus mince que la Formation de Covey Hill, sa capacité effective de stockage du  $CO_2$  est environ quatre fois moins importante. Pour l'ensemble du bassin, la capacité effective de stockage est estimée à 0,9 à 9,5 gigatonnes de  $CO_2$  en fonction des différents facteurs d'efficacité utilisés.

### 1. Introduction

Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ou IPCC:Intergovernmental Panel on Climate Change), le réchauffement climatique serait très probablement d'origine anthropique et aurait comme principale cause l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (IPCC, 2007). Le dioxyde de carbone  $(CO_2)$  est l'un de ces gaz à effet de serre émis par plusieurs types d'industries utilisant la combustion d'hydrocarbures. Plus du tiers des émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde est produit par des sources concentrées (centrales thermiques, cimenteries, raffineries...) qui vont encore continuer à utiliser des combustibles fossiles dans les prochaines années (IPCC, 2005).

Dans ce contexte, le captage et le stockage du CO<sub>2</sub> (CSC) représente une solution potentielle à courtmoyen terme pour réduire les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (Bachu, 2003; IPCC, 2005; IEA, 2008). En effet, la technologie pour stocker du CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> va 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 le stockage géologique du CO<sub>2</sub> et d'en déterminer leur capacité de stockage.

## 1.1. Choix du bassin pour les calculs de capacité de stockage de CO<sub>2</sub>

L'analyse du potentiel des bassins sédimentaires du sud du Québec pour le stockage géologique du  $CO_2$  a démontré que le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent est celui qui offre le potentiel le plus

intéressant et qu'il est le bassin à prioriser pour les études plus poussées (Bédard *et al.*, 2012; Malo et Bédard, sous presse). Ce rapport représente l'étape suivante de notre démarche, c'est-à-dire évaluer la capacité effective de stockage du bassin.

### 1.1.1. Critères favorables pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> dans les Basses-Terres du Saint-Laurent

Couvrant un territoire d'environ 20 000 km<sup>2</sup>, le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent se montre favorable pour la plupart des critères d'analyse du potentiel des bassins sédimentaires pour le stockage géologique du  $CO_2$  (Bédard *et al.*, 2012).

En effet, le bassin est relativement peu déformé, les roches-réservoirs et roches-couverture sont connues et elles se trouvent à des profondeurs adéquates de 800 à 3500 mètres dans la majeure partie du bassin. Grâce à une exploration pétrolière et gazière active dans le bassin depuis les années 1930, plusieurs données géologiques sont disponibles (dont des profils sismiques et plus de 250 puits) (Figure 1) permettant ainsi l'interprétation du bassin en profondeur. De cette manière, il est possible d'évaluer la géométrie des unités à l'échelle du bassin et donc d'en estimer leur volume. Une fois cette étape réalisée, il devient ensuite possible de calculer des capacités de stockage du  $CO_2$ .

Finalement, plusieurs grands émetteurs de  $CO_2$  sont situés directement à la surface du bassin, principalement entre Québec et Montréal (Figure 2). D'après les données d'Environnement Canada (2009), les grands émetteurs de  $CO_2$  émettent environ 20 millions de tonnes de  $CO_2$  par année au Québec, ce qui permet de croire qu'il y aurait des possibilités de captage du  $CO_2$  à peu de distance des réservoirs potentiels de stockage.



Projet INRSCO2-2012-V3.1 – Capacité de stockage du CO2 dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent



Figure 1 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et de l'ensemble des puits pétroliers et gaziers forés sur le territoire. P-C : permo-carbonifère. S-D : siluro-dévonien. C-O : cambro-ordovicien.



Figure 2 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et des émissions de  $CO_2$  par installation industrielle en 2009. P-C : permo-carbonifère. S-D : siluro-dévonien. C-O : cambro-ordovicien. Source des données pour les émissions de  $CO_2$  : Environnement Canada (2009). La ligne A-A' localise la ligne sismique M-2001 (Figure 4).

### 1.1.2. Géologie du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent

La succession de la plate-forme sédimentaire cambroordovicienne des Basses-Terres du Saint-Laurent a une épaisseur jusqu'à plus de 3000 mètres et repose en discordance sur le socle précambrien du Bouclier canadien (Globensky, 1987). Les roches réservoirs potentielles sont celles des grès du Groupe de Potsdam, des dolomies du Groupe de Beekmantown et des calcaires des groupes de Trenton, de Black River et de Chazy, tandis que les roches siliciclastiques à grains fins des groupes du Shale d'Utica, de Sainte-Rosalie et de Lorraine sont considérées comme des roches-couverture (Figure 3).

Les Basses-Terres du Saint-Laurent sont situées dans un environnement actuel de marge passive, c'est-àdire tectoniquement stable avec une faible sismicité (Bédard *et al.*, 2012). Des failles normales de direction SO-NE affectent la succession et le bassin devient plus profond vers le sud-est et se prolonge sous le bassin cambro-ordovicien des Appalaches (Castonguay *et al.*, 2010). La déformation varie de faible à modérée en allant vers la faille de Logan qui sépare le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent et celui des Appalaches, où les roches de la plate-forme se retrouvent imbriquées sous forme d'écailles de chevauchement. La Figure 4 montre l'architecture du bassin basée sur l'interprétation de la ligne sismique M-2001 de SOQUIP.

Dans le cadre de l'étude des capacités de stockage du bassin, seules les roches autochtones de la plate-forme sont modélisées et évaluées. Les roches des écailles de chevauchement ne sont donc pas incluses dans les calculs car la modélisation de leur géométrie est trop complexe pour en évaluer des volumes et l'on ne possède que trop peu de données à l'échelle du bassin. De plus, les analyses sont effectuées sur l'unité principalement calcaire regroupant les groupes de Trenton, de Black River et de Chazy, sur les formations de Beauharnois et de Theresa du Groupe de Beekmantown et sur les formations de Cairnside et de Covey Hill du Groupe de Potsdam.



Figure 3 - Colonne stratigraphique des Basses-Terres du Saint-Laurent (Comeau et al., 2012).



Figure 4 – Architecture du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent le long de la ligne sismique M-2001. Voir Figure 2 pour localisation. Modifiée de Castonguay *et al.* (2010).

### 2. Modèle géologique 3D des Basses-Terres du Saint-Laurent

### 2.1. Données de base

Les données de base utilisées pour la construction du modèle géologique 3D sont la carte géologique (Figure 5), la carte structurale du toit du socle précambrien (Figure 6) et les sommets de formation dans les puits.

La carte géologique du sud du Québec permet de connaître les unités géologiques présentes en affleurement et celles situées directement sous les dépôts meubles. Ceci permet de contraindre en surface les interprétations du modèle géologique 3D.

La carte structurale du toit du socle précambrien est une interprétation, réalisée par SOQUIP, des données sismiques illustrant la géométrie du socle précambrien dans le domaine temporel (en temps double) (MRNF, 2009). Ces données ne peuvent donc pas être utilisées telles quelles car il n'existe pas d'algorithme unique de conversion temps-profondeur qui permettrait de convertir ces données en profondeur. Il est cependant possible de les utiliser afin de contraindre en profondeur la géométrie du toit du socle précambrien dans le modèle 3D en profondeur. Ainsi, la géométrie reconnue sur les profils sismiques est transposée conformément aux profondeurs obtenues à partir des données de puits.

En effet, le sommet des formations rencontrées dans les puits est utilisé afin de contraindre la profondeur et l'épaisseur des unités interprétées dans le modèle 3D. Comme les données d'origine disponibles au Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) ont été acquises au cours des 50 dernières années et que les interprétations du bassin ont évolué avec le temps, une mise à jour et une uniformisation du jeu de données ont été nécessaires afin que les sommets des formations soient uniformisés au sein de tous les puits (Bédard *et al.*, 2010). Une fois ces données corrigées, elles ont été utilisées pour contraindre la profondeur des unités dans le modèle 3D. Les sommets analysés dans les puits sont les suivant :

Trenton/Black River/Chazy : identifié dans 123 puits

Beauharnois : identifié dans 78 puits

Theresa : identifié dans 57 puits

Cairnside : identifié dans 67 puits

Covey Hill : identifié dans 34 puits

Précambrien : identifié dans 37 puits

#### 2.2. Modélisation géologique 3D

La modélisation 3D du bassin a été réalisée avec le logiciel GOCAD® qui est spécialement conçu pour la modélisation géologique 3D.

La première étape de la modélisation consistait à construire la surface du sommet du socle précambrien (Figure 7), sur lequel repose le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent, à l'aide des données de puits et de la carte structurale du toit du socle en temps. En effet, la géométrie déterminée par la carte structurale du toit du socle a ensuite été contrainte à partir des profondeurs du socle précambrien obtenues au sein des puits. Ce positionnement a été effectué de façon indépendante pour chaque bloc de failles majeur qui

découpe le socle. Par la suite, les « trous » dans la surface et les endroits non couverts par la carte structurale du socle ont été modélisés à l'aide d'interprétations et de techniques d'interpolation en 3D à partir des données de puits. Cependant, pour des raisons d'efficacité et de simplicité, le modèle géologique 3D produit pour cette étude n'est pas concrètement découpé par les failles. Tout de même, la profondeur du socle augmente brusquement au niveau des failles, tel qu'au niveau de la faille de Yamaska, où un rejet vertical d'environ 500 mètres est visible à certains endroits (Figure 7).

Une fois la surface du toit du socle précambrien construite, les surfaces des sommets des unités géologiques ont par la suite été modélisées, essentiellement à l'aide des données de puits. Chacune des surfaces a été contraintes par rapport aux autres afin de s'assurer que les unités respectaient la séquence stratigraphique (Figure 3). Ceci permet, par exemple, d'éviter qu'une surface plus jeune ne passe au-dessous d'une surface plus vieille.

Lorsque toutes les surfaces des sommets des unités

géologiques sont modélisées, un modèle volumique est construit en remplissant l'espace entre chacune des surfaces avec des voxels (« *Volume element* », en référence au pixel (« *picture element* ») en deux dimensions) ayant des propriétés différentes selon l'unité qu'ils composent (Figure 8). Ce modèle volumique est utilisé pour calculer la capacité effective de stockage de  $CO_2$  du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent.

Comme les capacités de traitements des ordinateurs utilisés pour la modélisation 3D sont limitées, la quantité de cellules (voxels) du modèle devait être limitée. Compte tenu de cette contrainte, et afin de respecter la géométrie du bassin où les changements importants se produisent les plus avec l'approfondissement du bassin vers le sud-est, les voxels ne sont pas cubiques. Ils ont plutôt une longueur de 1500 mètres (NE-SO), une largeur de 750 mètres (NO-SE) et une épaisseur verticale de 10 mètres, ce qui permet de mieux représenter les changements brusques dans le bassin vers le sud-est et d'avoir tout de même une bonne résolution verticale.



Figure 5 - Carte géologique du sud-ouest du Québec (modifiée de MRNF, 2008).





Figure 6 - Carte structurale du toit du socle précambrien en temps (modifiée de MRNF, 2009).



Figure 7 – Profondeur du socle précambrien (échelle de couleur en mètres). Exagération verticale : 5x.



Figure 8 – Modèle géologique 3D volumique du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. Rouge : Socle précambrien. Orange : Covey Hill. Jaune : Cairnside. Mauve foncé : Theresa. Mauve pâle : Beauharnois. Bleu : Trenton/Black River/Chazy. Beige : roches-couverture. Exagération verticale : 5x.

### 3. Capacité effective de stockage des Basses-Terres du Saint-Laurent

## 3.1. Méthodologie de calcul de capacité effective de stockage

La méthodologie choisie est basée sur celle utilisée par le Ministère des Ressources naturelles du Canada pour calculer la capacité de stockage dans les aquifères salins des bassins sédimentaires du Canada dans le cadre du National Atlas of  $CO_2$  Geological Storage Potential and Capacity in Canada (ci-après le National Atlas of Canada) (Bachu et al., 2010).

Les résultats des travaux de ce rapport ont été présentés au *National Atlas of Canada* afin d'y être intégrés. Ils devraient également être inclus aux données du *North American Carbon Atlas Partnership* (http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon\_seq/global/nacap.html) qui présentera les capacités de stockage des différents bassins sédimentaires à l'échelle de l'Amérique du Nord.

La méthodologie utilisée pour calculer la capacité de stockage géologique du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent permet de calculer sa capacité effective de stockage de  $CO_2$  (masse de  $CO_2$ ) selon la pyramide techno-économique des ressources de Bachu *et al.* (2007) (Figure 9). La capacité effective est définie comme un sous-ensemble de la capacité totale du

bassin, soit la capacité théorique, que l'on obtient en restreignant cette capacité avec des limites techniques et géologiques.



Figure 9 – Pyramide des capacités de stockage géologique du  $CO_2$  (d'après Bachu *et al.*, 2007).

Selon la méthodologie adoptée par le *National Atlas of Canada*, la capacité effective de stockage d'un bassin est limitée par une profondeur minimale ainsi que par un facteur d'efficacité de stockage du  $CO_2$  dans les aquifères salins. Cette profondeur minimale est de 800 mètres et vise ainsi à assurer la sécurité des sites de stockage (Bachu *et al.*, 2010). Les facteurs d'efficacité permettent, quant à eux, d'avoir un estimé de la proportion du volume du bassin pouvant être occupé Projet INRSCO2-2012-V3.1 – Capacité de stockage du CO2 dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent

par du CO<sub>2</sub> injecté.

Le calcul volumétrique des capacités se fait à l'aide de l'équation ci-dessous :

$$M_{CO_2} = E_{salin} \times A \times h \times \varphi \times \rho_{CO_2}$$

 $M_{CO_2}$ : masse de CO<sub>2</sub> (kg)

- $E_{salin}$ : facteur d'efficacité de stockage du CO<sub>2</sub> pour les aquifères salins
- A: aire des réservoirs du bassin  $(m^2)$
- *h*: épaisseur des réservoirs du bassin (m)
- $\varphi$ : porosité des réservoirs du bassin (%)
- $\rho_{CO_2}$ : densité du CO<sub>2</sub> en profondeur (kg/m<sup>3</sup>)

Les différentes étapes de la méthodologie utilisée par le National Atlas of Canada s'effectuent avec le logiciel ArcGIS® à l'aide de données géographiques matricielles (grids, rasters) contenant des cellules de 5 kilomètres de côté. Ainsi, les différentes propriétés telles que l'épaisseur et la porosité des unités réservoirs de même que la densité du  $CO_2$  varient en fonction de la position dans le bassin. Les profondeurs et les épaisseurs des unités réservoirs sont interpolées ou krigées avec ArcGIS® à l'aide des données de puits. Selon la méthodologie suivie par le National Atlas of Canada, l'épaisseur des réservoirs équivaut à leur épaisseur effective déduite à partir des analyses de porosité, des données de puits, des épaisseurs nettes des intervalles productifs, etc. La densité du  $CO_2$  est calculée en fonction de la pression et de la température dans le bassin. Selon la méthodologie développée par le *National Atlas of Canada*, la pression est calculée à l'aide d'un gradient de pression (dérivé des données d'essais aux tiges dans les puits). Cette pression est toutefois augmentée de 10% pour tenir compte de l'augmentation possible de la pression dans les réservoirs suite à l'injection de  $CO_2$ .

## 3.2. Spécificités de la méthodologie au Québec

### 3.2.1. Profondeur

Tel que décrit ci-dessus, la capacité effective de stockage du  $CO_2$  est calculée à partir d'une profondeur minimale de 800 mètres. Ceci permet de s'assurer que le  $CO_2$  aura une densité élevée et qu'il ne sera plus à l'état gazeux.

Une profondeur maximale de 3500 mètres a également été imposée comme contrainte car, au-delà de cette profondeur, les coûts d'opération deviennent trop importants (Bachu, 2003). De plus, peu de données de puits existent au-delà de cette profondeur dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent et les interprétations géologiques sont marquées d'une plus grande incertitude. La Figure 10 montre le modèle volumique 3D entre les profondeurs de 800 et 3500 mètres tel qu'utilisé dans les calculs de capacité effective.



Figure 10 – Modèle 3D volumique du bassin montrant les unités analysées entre les profondeurs de 800 et 3500 mètres. Rouge : Socle précambrien. Orange : Covey Hill. Jaune : Cairnside. Mauve foncé : Theresa. Mauve pâle : Beauharnois. Bleu : Trenton/Black River/Chazy. Beige : roches-couverture. Exagération verticale : 5x.

### 3.2.2. Facteur d'efficacité

Les facteurs d'efficacité pour le stockage du  $CO_2$  dans les aquifères salins varient selon la lithologie des unités réservoirs. Les lithologies les plus propices pour le stockage du  $CO_2$  sont les dolomies, suivies par les roches clastiques puis par les calcaires.

Les facteurs d'efficacités calculés pour les aquifères salins profonds (DOE-NETL, 2010) tiennent compte de :

- la fraction de l'aquifère pouvant être occupée par du CO<sub>2</sub> ;
- la fraction de l'unité avec une porosité et une perméabilité adéquates pour l'injection de CO<sub>2</sub>;
- la fraction de la porosité qui est interconnectée ;
- l'efficacité de déplacement horizontal ;
- l'efficacité du déplacement vertical ;
- l'efficacité du déplacement à l'échelle des pores ;
- la flottabilité du CO<sub>2</sub>.

Tableau 1 – Facteurs d'efficacité pour les aquifères salins profonds (DOE-NETL, 2010, annexe 3).

Lithologie	Unités	E(P <sub>10</sub> )	E(P <sub>50</sub> )	E(P <sub>90</sub> )
Calcaire	Trenton Black River Chazy	0,40%	1,5%	4,1%
Dolomie	Beauharnois Theresa	0,64%	2,2%	5,5%
Clastique	Cairnside Covey Hill	0,51%	2,0%	5,4%

#### 3.2.3. Porosité

La porosité utilisée dans les calculs ne varie pas à l'intérieur des unités réservoirs. Comme relativement peu de données de porosité existent à l'échelle du bassin, une porosité moyenne a été calculée à l'aide des données disponibles dans les analyses de carottes.

On anticipe une surévaluation de la porosité calculée par rapport à la porosité moyenne réelle. Ceci est dû au choix même des intervalles de profondeur où les analyses ont été réalisées et qui sont choisies pour leur porosité élevée. Afin de diminuer cette surévaluation, les porosités calculées ont été arrondies vers le bas (Tableau 2). Tableau 2 – Porosité moyenne des différentes unités géologiques analysées.

Unité	Porosité moyenne (arithmétique)	Porosité utilisée pour les calculs	
Trenton Black River Chazy	0,90 %	Exclus	
Beauharnois	1,25 %	Exclus	
Theresa	1,50 %	Exclus	
Cairnside	3,75 %	3 %	
Covey Hill	6,10 %	5 %	

La porosité des unités géologiques analysées a été utilisée comme facteur d'élimination pour le calcul de leur capacité. Ainsi, seulement les unités géologiques ayant une porosité moyenne supérieure à 2% ont été retenues pour les calculs de capacité, c'est-à-dire les formations de Covey Hill (5%) et de Cairnside (3%) du Groupe de Potsdam. Les groupes de Beekmantown, Chazy, de Black River et de Trenton (Figure 3) ont été exclus des calculs de capacité de stockage dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent.

#### 3.2.4. Volume

Contrairement à la méthode utilisée par le *National Atlas of Canada* pour calculer la capacité de stockage, un modèle géologique 3D est utilisé pour faire les calculs pour le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. Ceci permet, entre autres, d'avoir une meilleure représentation du bassin et de contraindre les différentes unités les unes par rapport aux autres dans l'espace tridimensionnel.

Tableau 3 – Volume des différentes unités analysées.

Unité	Volume calculé (km <sup>3</sup> )	Volume calculé (m <sup>3</sup> )	
Cairnside	1451,1	1,4511 x 10 <sup>12</sup>	
Covey Hill	3439,6	3,4396 x 10 <sup>12</sup>	

Contrairement à la méthodologie du *National Atlas of Canada* qui calcule le volume des unités à l'aide de l'aire de la surface de leur sommet et de leur épaisseur, le volume des unités est calculé directement à l'aide du nombre de voxels contenus dans chacune de ces unités. De plus, le volume total des unités réservoirs est utilisé dans les calculs contrairement au volume effectif utilisé par le *National Atlas of Canada*. L'analyse des facteurs d'efficacité démontre en effet que, si on choisit les « saline formation efficiency factors for geologic and displacement terms », on doit utiliser le volume total des formations dans les calculs de capacités (DOE-NETL, 2010, appendix B). Ces facteurs d'efficacité tiennent compte du pourcentage du volume des pores qui peut être utilisé pour le stockage du CO<sub>2</sub>. Il n'aurait pas été possible et réaliste de déterminer avec certitude un volume effectif à l'échelle du bassin avec les données disponibles dans le cadre de cette étude.

### 3.2.5. Température

La densité du  $CO_2$  varie en fonction de la température qui varie elle-même avec la profondeur selon un gradient de température. La température est définie par l'équation :

 $T = T_s + (\Delta Z \times gradient \ géothermique)$ 

T: température en profondeur (en mètres)

 $T_s$ : température de surface (en mètres)

 $\Delta Z$ : profondeur par rapport à la surface (en mètres)

gradient : gradient géothermique calculé (en °C/m)

Dans le cas des Basses-Terres du Saint-Laurent, une température moyenne de surface de 8°C a été utilisée. Le gradient géothermique moyen du bassin a été évalué à l'aide des données de température au fond des puits et résulte en une valeur de 19,86°C/km ou 0,0199°C/m. L'équation utilisée pour déterminer la température en profondeur dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent est donc :

 $T = 8^{\circ}C + (\Delta Z \times 0.0199^{\circ}C/km)$ 

#### 3.2.6. Pression

La densité du  $CO_2$  varie en fonction de la pression qui varie elle-même avec la profondeur selon un gradient de pression. La pression est définie par l'équation :

$$P = \Delta Z \times gradient \ de \ pression \times 1,1$$

P : pression en profondeur (en MPa)

 $\Delta Z$  : profondeur par rapport à la surface (en mètres)

gradient : gradient de pression calculé (en MPa/m)

Tel que suggéré par la méthode du *National Atlas of Canada*, un facteur de 10% est ajouté à la pression pour tenir compte de l'augmentation de la pression dans le bassin suite à l'injection de CO<sub>2</sub>. Une pression de 0 MPa est assumée en surface, à 0 m de profondeur. Le gradient de pression a été estimé pour les Basses-Terres du Saint-Laurent à l'aide des données de puits lors des tests de pression et des essais aux tiges et équivaut à 0,0098 MPa/m, ce qui est similaire au gradient de pression de 0,0095 MPa/m qui est utilisé pour les calculs de capacité en Ontario (Shafeen *et al.*, 2004). L'équation utilisée pour déterminer la pression en profondeur dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent est donc :

$$P = \Delta Z \times 0,01078 Mpa$$

#### 3.2.7. Densité du CO<sub>2</sub>

Le modèle 3D permet de calculer les températures et pressions en tout point du modèle et non seulement de faire des moyennes en fonction de la profondeur des unités géologiques étudiées. La densité du  $CO_2$  est donc calculée pour chacune des cellules 3D du modèle à l'aide d'un programme écrit en Fortran développé à la Ruhr-Universität Bochum et basé sur les travaux de Span et Wagner (1996).

Avec les gradients de pression et de température moyens estimés dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent, le CO<sub>2</sub> subit un changement de phase de gaz à liquide à environ 500 mètres de profondeur et sa densité augmente drastiquement d'environ 173 à 793 kg/m<sup>3</sup>. Par la suite, la densité du CO<sub>2</sub> augmente légèrement avec la profondeur pour atteindre environ 817 kg/m<sup>3</sup> à 3500 mètres de profondeur (Figure 11 et Figure 12). Le CO<sub>2</sub> est donc dans un état liquide de 800 mètres à environ 1160 mètres où il passe à l'état supercritique jusqu'à la profondeur limite du modèle de 3500 mètres.



Figure 11 – Graphique de la densité du CO<sub>2</sub> en fonction de la profondeur dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent.



Figure 12 – Densité du  $CO_2$  entre 800 et 3500 mètres dans les formations de Covey Hill et de Cairnside. Échelle de couleurs : 802 à 818 kg/m<sup>3</sup>. Exagération verticale : 5x.

### **3.3.** Capacités effectives de stockage du CO<sub>2</sub> calculées

La capacité effective de stockage du  $CO_2$  dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent est donc calculée pour les formations de Covey Hill (porosité 5%) et de Cairnside (porosité 3%) entre les profondeurs de 800 et 3500 mètres avec les facteurs d'efficacité pour les lithologies clastiques (Figure 13).

À l'aide du modèle géologique 3D, la capacité effective de stockage du  $CO_2$  est calculée voxel par voxel pour plus de précision. L'agrégation des cellules individuelles permet, par la suite, d'obtenir une capacité effective de stockage du  $CO_2$  totale pour chacune des unités géologiques à l'étude. La Formation de Cairnside étant plus mince et moins poreuse que la Formation de Covey Hill, la capacité effective de stockage y est moins importante (Figure

### 13, Tableau 2 et Tableau 4).

Tableau 4 – Capacité effective de stockage de  $CO_2$ (en gigatonnes) des formations de Covey Hill et de Cairnside selon les différents facteurs d'efficacité pour les lithologies clastiques.

Unités	Capacité avec E(P <sub>10</sub> ) (gigatonne)	Capacité avec E(P <sub>50</sub> ) (gigatonne)	Capacité avec E(P <sub>90</sub> ) (gigatonne)
Cairnside	0,180	0,708	1,910
Covey Hill	0,713	2,796	7,550
TOTAL	0,893	3,504	9,460



Figure 13 – Modèle géologique 3D volumique montrant les unités utilisées pour les calculs de capacité entre les profondeurs de 800 et 3500 mètres. Rouge : socle précambrien. Orange : Covey Hill. Jaune : Cairnside. Exagération verticale : 5x.

Les Figure 14 et Figure 15 montrent la répartition générale des capacités effectives de stockage dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. Cependant, le modèle géologique ayant été créé à l'échelle du bassin, une grande prudence est de mise lorsque l'on souhaite faire des hypothèses à l'échelle locale car l'incertitude y est élevée. Ces cartes donnent un aperçu des régions probablement plus favorables au stockage du  $CO_2$  à l'aide de caractéristiques moyennes du bassin et peuvent être utilisées afin de cibler des sites pour réaliser des études plus poussées. Mais elles ne sont pas faites pour évaluer les capacités de stockage d'un site en particulier.



Figure 14 – Capacité effective de stockage du CO<sub>2</sub> dans la Formation de Cairnside dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent avec un facteur d'efficacité E(P<sub>50</sub>). Résolution des cellules : 5km x 5km.



Figure 15 – Capacité effective de stockage du  $CO_2$  dans la Formation de Covey Hill dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent avec un facteur d'efficacité  $E(P_{50})$ . Résolution des cellules : 5km x 5km.

### 4. Conclusions

La capacité effective de stockage géologique du  $CO_2$ dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent a été calculée selon la méthodologie utilisée par le *National Atlas of CO<sub>2</sub> Geological Storage Potential and Capacity in Canada.* Cependant, un modèle géologique 3D du bassin a été utilisé pour réaliser les calculs de capacités. Ceci a permis d'obtenir des capacités de stockage en fonction de la profondeur en tout point du bassin. De plus, les calculs ont été limités aux profondeurs de 800 à 3500 mètres pour respecter les contraintes de sécurité et de coûts d'opération.

Les estimations des gradients géothermiques et de pression ont permis de déterminer l'état du  $CO_2$  à toutes les profondeurs dans le bassin. Ainsi, le  $CO_2$  passe de l'état gazeux à l'état liquide dense à environ 500 mètres et passe ensuite à l'état supercritique à environ 1160 mètres de profondeur dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent en fonction des paramètres de pression et température. Ce qui implique que, dans les calculs de capacités, une partie du  $CO_2$  calculé est sous forme liquide, soit de 800 à 1160 mètres de profondeur. Malgré ce fait, le  $CO_2$  a tout de même une densité élevée, de l'ordre de 800 kg/m<sup>3</sup>, et on ne note pas de variation drastique de

densité au passage de l'état liquide à l'état supercritique.

La porosité est un facteur déterminant dans le choix des unités géologiques à privilégier pour les calculs de capacités de stockage du  $CO_2$ . Comme les unités de Trenton/Black River/Chazy, Beauharnois et Theresa démontrent des porosités moyennes de moins de 2%, elles ont été éliminées des calculs de capacités. Seules les formations de Cairnside et de Covey Hill, avec respectivement 3 et 5 %, ont été considérées dans les calculs.

La carte de distribution de la capacité effective totale de stockage du  $CO_2$  dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent donne des pistes pour la recherche de sites potentiels de stockage (Figure 16) :

- zone linéaire au sud de la Faille de Yamaska ;
- région au sud-ouest du bassin, dans les Cantons de l'Est, vers la frontière avec les États-Unis.

La Formation de Covey Hill étant plus épaisse, donc plus volumineuse, et plus poreuse que la Formation de Cairnside, sa capacité effective de stockage du  $CO_2$  est environ quatre fois plus importante. Ceci en fait la formation à prioriser pour les études futures pour la sélection de sites de stockage de  $CO_2$ .



Figure 16 – Capacité effective totale de stockage du  $CO_2$  dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent avec un facteur d'efficacité  $E(P_{50})$  et zones d'intérêts (tirets noirs). Résolution des cellules: 5km x 5km.

### Références

- Bachu, S. (2003) Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO2 in geological media in response to climate change. <u>Environmental Geology</u>, 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.
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P. et Mathiassen, O.M. (2007) CO2 storage capacity estimation: Methodology and gaps. <u>International Journal of</u> Greenhouse Gas Control, 1 (4), 430-443.
- Bachu, S., Burrowes, A., Davenport, P., Grasby, S., Hartling, A., Hewitt, A., Jensen, G., Keghley, D., MacDonald, J., Malo, M., Sanei, H. et Tzeng, P. (2010) Approach and Data Needs for the Production of the National Atlas of CO2 Geological Storage Potential and Capacity in Canada. Ressources naturelles Canada. Rapport interne.
- Bédard, K., Comeau, F.-A. et Malo, M. (2012) Évaluation du potentiel de séquestration géologique du CO2 des bassins sédimentaires du sud du Québec. Institut national de la recherche scientifique. R-1289. 25 pages.
- Bédard, K., Duchaine, Y. et Malo, M. (2010) Nouvelle analyse des données de puits gaziers et pétroliers dans la région de Sorel-Bécancour. Institut national de la recherche scientifique. R-1166. 73 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. <u>Bulletin of</u> <u>Canadian Petroleum Geology</u>, **58** (3), 219-234.
- Comeau, F.-A., Bédard, K. et Malo, M. (2012) Les régions de Nicolet et de Villeroy: état des connaissances pour la séquestration géologique du CO2. Institut national de la recherche scientifique. 50 pages.
- DOE-NETL (2010) 2010 Carbon Sequestration Atlas of the United States and Canada. Third edition. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. 162 pages.

- Environnement Canada. Émissions de GES par installation (2009) [en ligne]. Disponible sur: <u>http://www.ec.gc.ca/ges-</u> ghg/default.asp?lang=Fr&n=8044859A-1.
- Globensky, Y. (1987) Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. MM 85-02. 63 pages.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2005) IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the IPCC. [Metz, B., O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos et L. Meyer (eds)]. Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, USA. 442 pages.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the IPCC. [Core writing team : Pacauri, R.K. et A. Reisinger (eds)]. Geneva, Switzerland. 104 pages.
- International Energy Agency (IEA) (2008) CO<sub>2</sub> capture and storage - A key carbon abatement option. IEA/OECD. Paris, France. 261 pages.
- Malo, M. et Bédard, K. (sous presse) Basin-Scale Assessment for CO2 Storage Prospectivity in the Province of Québec, Canada. <u>Energy Procedia</u>, **6th Trondheim Conference of CCS (2011)**.
- MRNF (2008) Compilation pétrolière et gazière. Basses-Terres du Saint-Laurent et sud des Appalaches. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. Document AB\_CE\_250K\_C.
- MRNF (2009) Carte structurale du toit du socle précambrien, région Basses-Terres. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. Document AB\_CSP\_NAD83\_G.
- 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.
- Span, R. et Wagner, W. (1996) A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 25 (6), 1509-1596.