

**Comparaison entre les modèles géologiques
3D faillé et non-faillé pour les calculs de
capacités effectives de stockage géologique
du CO₂ dans le bassin des Basses-Terres du
Saint-Laurent**

R-1440

Juin 2013



SÉQUESTRATION GÉOLOGIQUE DU CO₂
CHAIRE DE RECHERCHE

INRS
Institut national de la recherche scientifique



**Comparaison entre les modèles géologiques 3D faillé et non-faillé
pour les calculs de capacités effectives de stockage géologique du
CO₂ dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent**

**RAPPORT FINAL
INRSCO2-2013-V3.2**

Par

Karine Bédard, Félix-Antoine Comeau et Michel Malo

Soumis au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs

Juin 2013 – Québec

R-1440

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

PRÉAMBULE	5
SOMMAIRE	6
1. INTRODUCTION	7
1.1. Choix du bassin pour les calculs de capacité de stockage de CO ₂	7
1.1.1. Critères favorables pour le stockage géologique du CO ₂ dans les Basses-Terres du Saint-Laurent	7
1.2. Géologie du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent.....	9
2. MODÈLES GÉOLOGIQUES 3D DES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT	11
2.1. Modèle géologique 3D non-faillé.....	11
2.3. Modèle géologique 3D faillé	13
3. CAPACITÉ EFFECTIVE DE STOCKAGE DES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT.....	16
3.1. Méthodologie de calcul de la capacité effective de stockage	16
3.2. Spécificités de la méthodologie au Québec	17
3.2.1. Profondeur	17
3.2.2. Facteur d'efficacité.....	18
3.2.3. Porosité	18
3.2.4. Volume	18
3.2.5. Température	20
3.2.6. Pression	20
3.2.7. Densité du CO ₂	20
3.3. Capacités effectives de stockage du CO ₂ calculées.....	22
4. CONCLUSIONS.....	25
RÉFÉRENCES	28



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 2006-2012 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 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'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 CO₂ 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 CO₂.

La capacité effective de stockage géologique du CO₂ dans les aquifères salins du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent a été évaluée à l'aide de modèles géologiques 3D qui ont permis de calculer les volumes des unités d'intérêt de même que la densité du CO₂ en tout point du modèle en fonction des gradients de température et de pression. À des fins de comparaisons, deux modèles ont été utilisés : un modèle non-faillé et un modèle faillé plus complexe. L'objectif étant de déterminer si la construction et l'utilisation d'un modèle plus complexe et plus près de la réalité s'avèrent pertinentes pour l'évaluation des capacités de stockage à l'échelle d'un bassin.

La capacité effective des formations de Cairnside et de Covey Hill a été calculée à l'aide de la densité du CO₂, de la porosité moyenne des unités géologiques, du volume de ces unités et des facteurs d'efficacité pour le stockage du CO₂ dans les aquifères salins. La Formation de Cairnside étant plus mince et moins poreuse que la Formation de Covey Hill, sa capacité effective de stockage du CO₂ est moindre peu importe le modèle 3D utilisé. Pour l'ensemble du bassin, la capacité effective de stockage est estimée à 0,7 à 8,58 gigatonnes de CO₂ en fonction des différents facteurs d'efficacité utilisés et des modèles 3D. Étant donné que les grands émetteurs génèrent près de 20 millions de tonnes de CO₂ par année dans la province de Québec, le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent peut théoriquement emmagasiner les émissions de CO₂ de la province pour une période allant de 35 à 429 ans. En général, les capacités effectives calculées à l'aide du modèle non-faillé sont environ 13% inférieures à celles obtenues à l'aide du modèle faillé plus complexe.

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 (CO₂) 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 CO₂ 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 CO₂ (CSC) représente une solution potentielle à court-moyen terme pour réduire les émissions anthropiques de CO₂ dans l'atmosphère (Bachu, 2003; IPCC, 2005; IEA, 2008). En effet, la technologie pour stocker du CO₂ dans les réservoirs de gaz et de pétrole ainsi que dans les aquifères salins profonds est maintenant prête à être appliquée dans le contexte du CSC (Bachu, 2008). À l'échelle mondiale, la recherche de sites potentiels pour le stockage géologique du CO₂ 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 CO₂ et d'en déterminer leur capacité de stockage.

1.1. Choix du bassin pour les calculs de capacité de stockage de CO₂

L'analyse du potentiel des bassins sédimentaires du sud du Québec pour le stockage géologique du CO₂ 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.*, 2011; Malo et

Bédard, 2012; Trần Ngọc *et al.*, 2012). Ce rapport représente l'étape suivante de notre démarche, c'est-à-dire évaluer la capacité effective de stockage du bassin. L'objectif de cette étape est de déterminer si le bassin offre une capacité de stockage intéressante pour le stockage du CO₂ et, si oui, quels sont les régions à cibler pour des analyses plus poussées.

1.1.1. Critères favorables pour le stockage géologique du CO₂ dans les Basses-Terres du Saint-Laurent

Couvrant un territoire d'environ 20 000 km², 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 CO₂ (Bédard *et al.*, 2011).

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 CO₂.

Finalement, plusieurs grands émetteurs de CO₂ 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 CO₂ émettent environ 20 millions de tonnes de CO₂ par année au Québec, ce qui permet de croire qu'il y aurait des possibilités de captage du CO₂ à peu de distance des réservoirs potentiels de stockage.

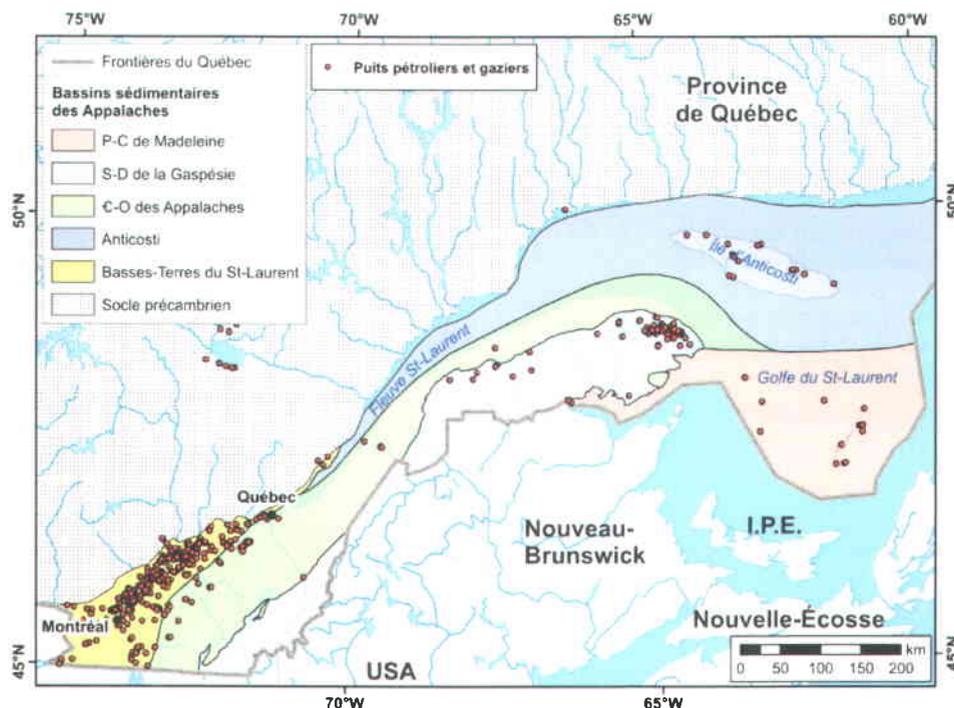


Figure 1 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et de l'ensemble des puits pétroliers et gaziers forés sur le territoire. P-C : permo-carbonifère. S-D : siluro-dévonien. C-O : cambro-ordovicien.

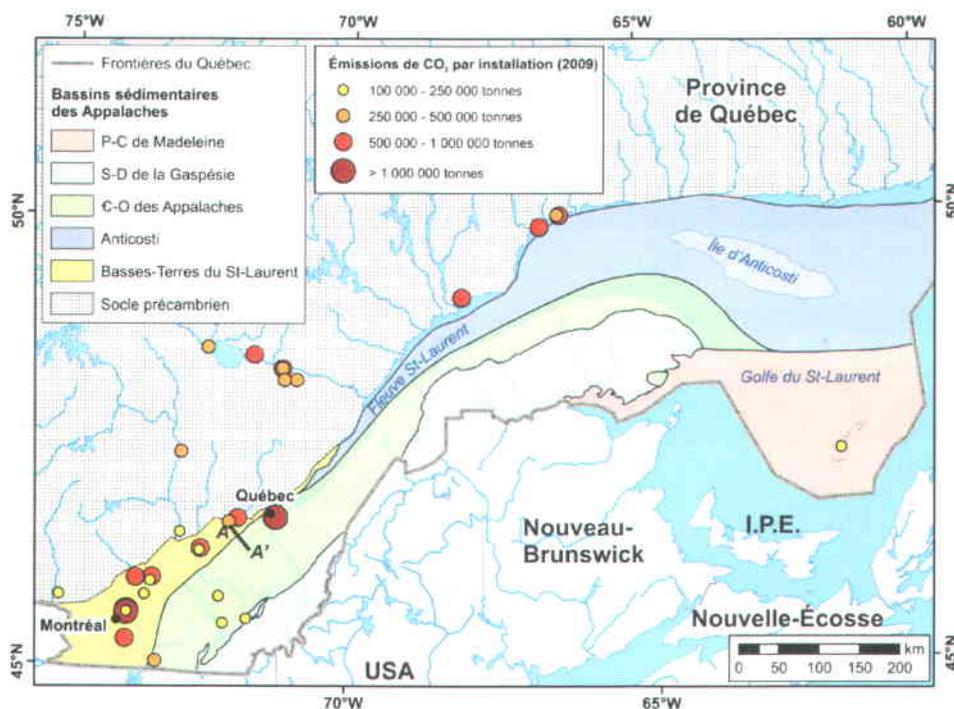


Figure 2 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec et des émissions de CO₂ par installation industrielle en 2009. P-C : permo-carbonifère. S-D : siluro-dévonien. C-O : cambro-ordovicien. Source des données pour les émissions de CO₂ : Environnement Canada (2009). La ligne A-A' localise la ligne sismique M-2001 (Figure 4).

1.2. Géologie du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent

Le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent est localisé dans le sud-ouest du Québec (Figure 1 et Figure 3). Il est limité par le socle précambrien de la Province de Grenville au nord-ouest et par le bassin cambro-ordovicien des Appalaches au sud-est. 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 faille de Logan 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'écaillés de chevauchement. La Figure 4 montre l'architecture du bassin basée sur l'interprétation de la ligne sismique M-2001 de SOQUIP.

La succession de la plate-forme sédimentaire cambro-ordovicienne 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 Chazy, de Black River et de Trenton, tandis que les roches silicoclastiques à grains fins des groupes du Shale d'Utica, de Sainte-Rosalie et de Lorraine sont considérées comme des roches-couverture (Figure 5).

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 écaillés 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.

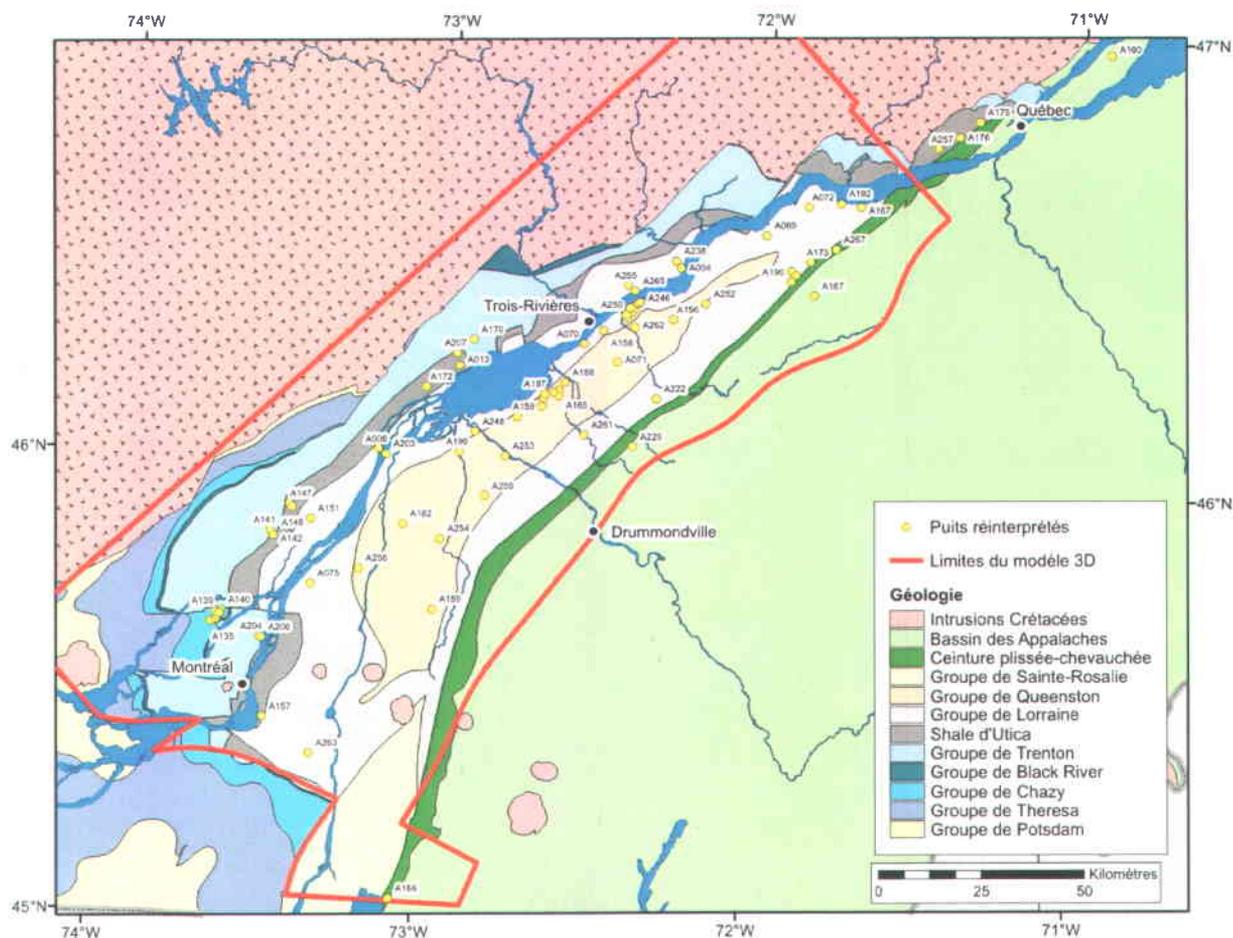


Figure 3 – Carte géologique du sud-ouest du Québec (adaptée de Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG), 2008). Localisation des puits réinterprétés et limites du modèle géologique 3D.

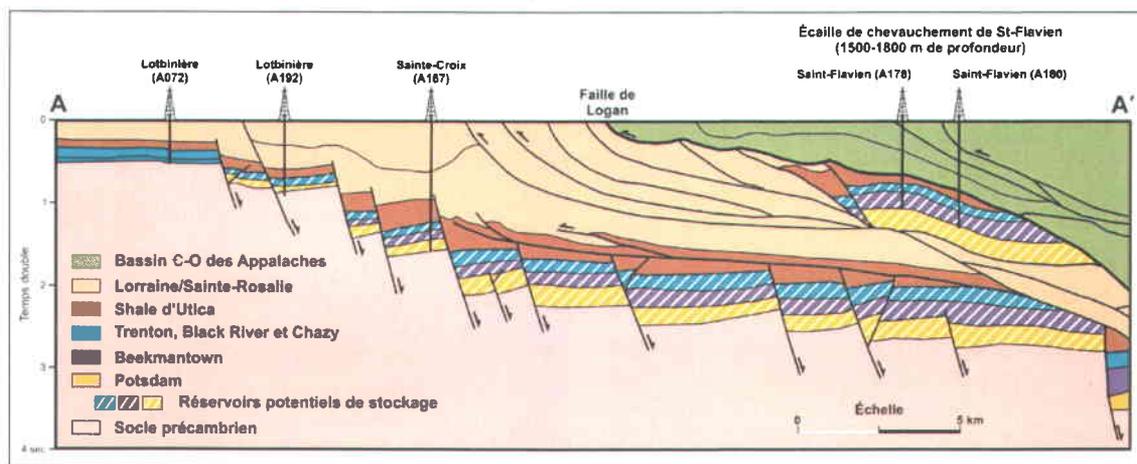


Figure 4 – Architecture du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent le long de la ligne sismique M-2001. Voir Figure 2 pour localisation. Adaptée de Castonguay *et al.* (2010).

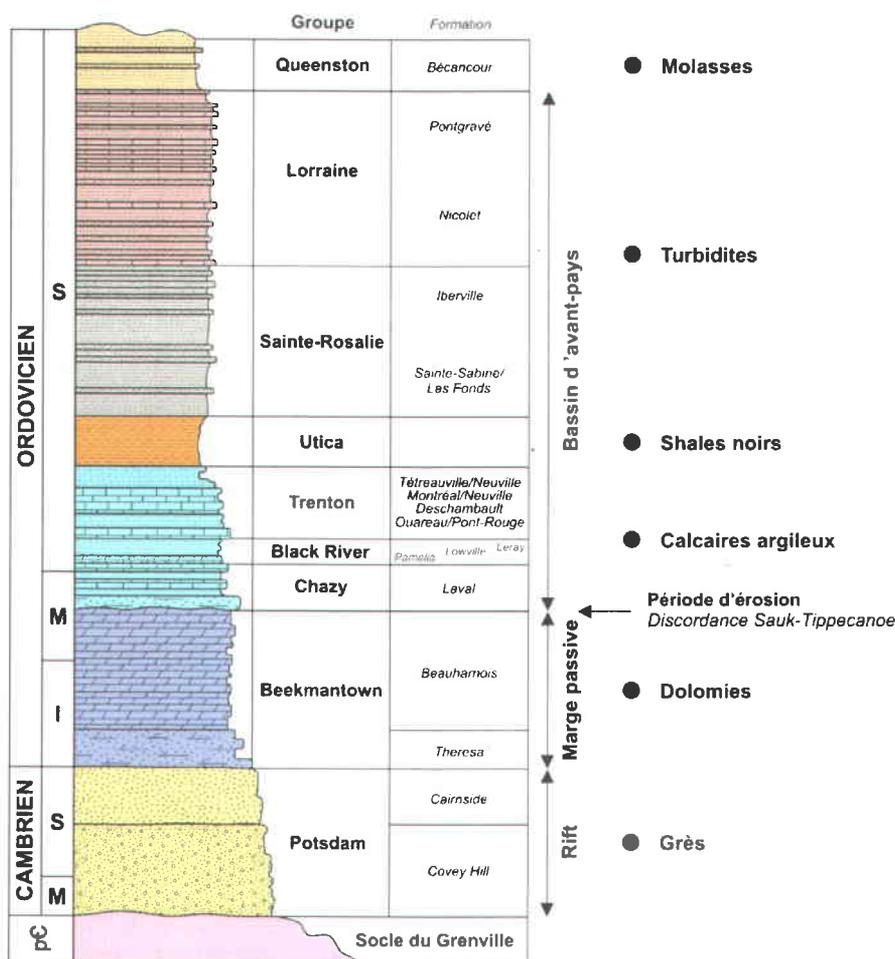


Figure 5 – Colonne stratigraphique des Basses-Terres du Saint-Laurent (Comeau *et al.*, 2012).

2. Modèles géologiques 3D des Basses-Terres du Saint-Laurent

Le modèle géologique 3D du bassin a été réalisée avec le logiciel GOCAD® qui est spécialement conçu pour la modélisation géologique 3D. La méthodologie de la construction des modèles géologiques 3D est détaillée dans le rapport de la Chaire INRSCO2-2012-V1.5 (Bédard et Malo, 2012).

Deux modèles géologiques 3D ont été construits afin de réaliser les calculs de capacité de stockage de CO₂ dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. L'objectif était de comparer les capacités calculées afin de déterminer si l'utilisation d'un modèle plus complexe, faillé dans ce cas-ci, est pertinente pour les calculs à l'échelle du bassin. En effet, les modèles plus complexes représentent plus précisément la réalité mais sont plus longs à construire ce qui n'est peut-être pas essentiel à cette étape de l'évaluation des bassins.

Les modèles géologiques 3D construits dans le cadre de cette étude ont les mêmes dimensions, soit une longueur de 240 km (NE-SO), une largeur de 130 km (NO-SE) et une hauteur de 7500 m.

2.1. Modèle géologique 3D non-faillé

La surface du sommet de chacune des unités géologiques d'intérêt a été modélisée essentiellement à l'aide des données de puits (Figure 6). Cependant, la surface du sommet du socle précambrien a aussi été contrainte à l'aide des données de la carte structurale du toit du socle précambrien (Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG), 2009). De plus, les surfaces ont été contraintes à l'aide des contacts de la carte géologique et des connaissances géologiques du bassin qui indiquent la présence ou l'absence de certaines unités dans certaines régions spécifiques. Finalement, chacune des surfaces a été contrainte par rapport aux autres afin de s'assurer que les unités respectaient la séquence stratigraphique (Figure 5).

Lorsque toutes les surfaces des sommets des unités géologiques ont été modélisées, un modèle volumique est construit en remplissant l'espace entre chacune des surfaces avec des voxels ayant des propriétés différentes selon l'unité qu'ils composent (Figure 6). Le voxel (« *Volume element* ») est l'équivalent en trois dimensions du pixel (« *picture element* »).

Comme la capacité de traitement des ordinateurs utilisés pour la modélisation 3D est limitée, la quantité de cellules (voxels) du modèle devait donc être limitée. Compte tenu de cette contrainte, et afin de respecter la forme du bassin où les changements géométriques les plus importants sont associés à l'approfondissement du bassin vers le sud-est, les voxels ne sont pas cubiques. Ils ont plutôt une longueur de 1000 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.

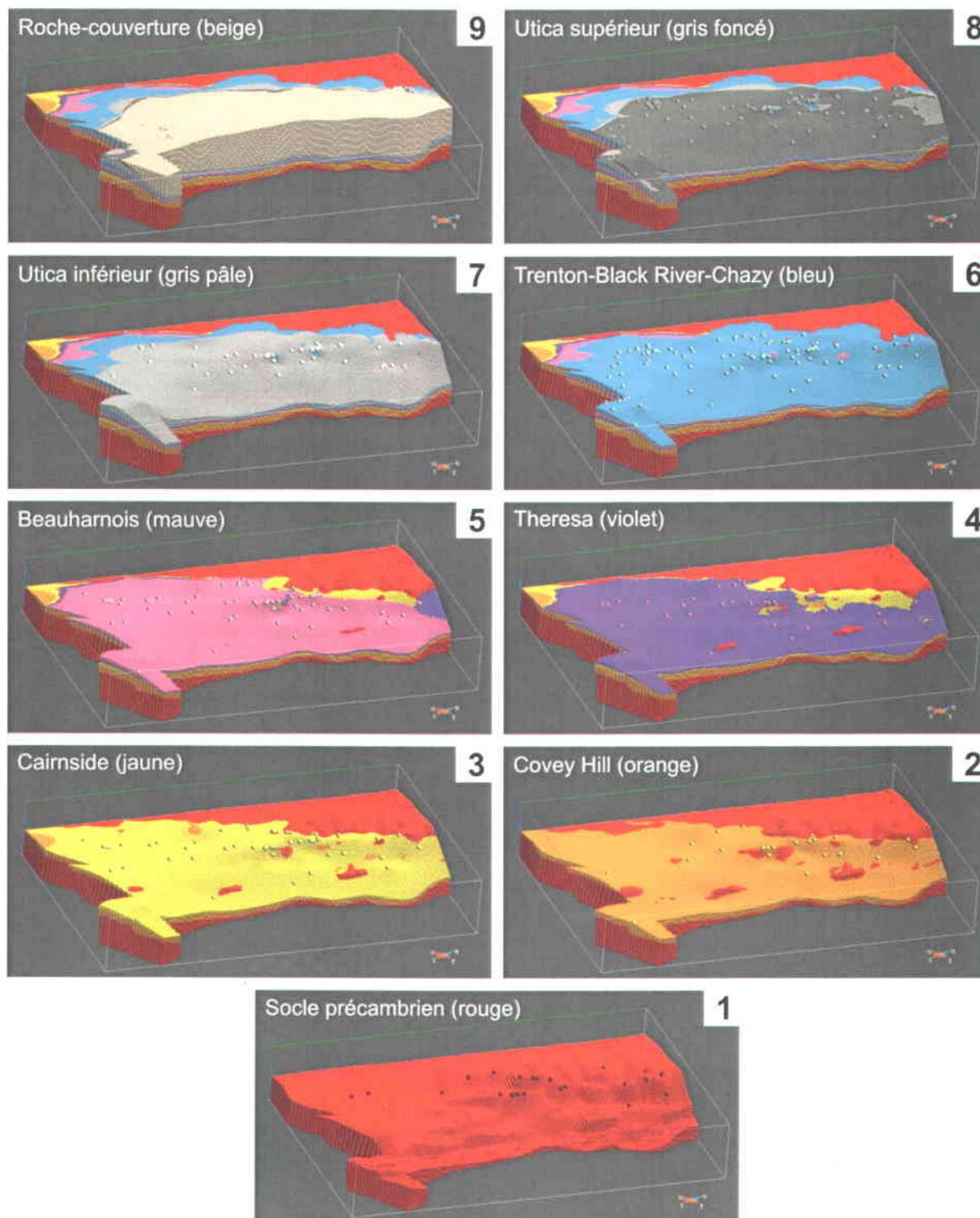


Figure 6 – Modèle géologique 3D volumique non-faillé du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les points de couleurs représentent les positions des sommets des unités dans les puits. Exagération verticale : 5X.

2.3. Modèle géologique 3D faillé

Un modèle géologique faillé a aussi été construit dans le but de comparer les capacités de stockage entre deux modèles de complexités différentes à l'échelle du bassin. La méthodologie suivie pour la construction du modèle faillé est généralement la même que pour le modèle non-faillé ou uniforme, mis à part la présence des failles qui viennent découper les surfaces des sommets des unités. Les deux modèles géologiques 3D ont exactement les mêmes dimensions et les mêmes unités géologiques y sont modélisées.

Treize (13) failles normales ont été intégrées dans le modèle géologique 3D faillé (Figure 7 et Figure 8). Ces failles ont été modélisées car elles sont associées à des déplacements verticaux importants. Comme peu d'informations existent sur le pendage des failles dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, elles ont toutes été modélisées avec un pendage régulier de 60° perpendiculaire au tracé des failles.

Ces failles ont été modélisées afin de bien représenter la structure en escalier du bassin qui s'approfondit vers le sud-est par l'action des failles normales orientées SO-NE. Le nombre de failles présentes est

plus élevé dans la réalité mais la modélisation de l'ensemble des failles à l'échelle du bassin n'était pas pertinente. Il a été décidé de ne modéliser que les failles présentant les déplacements verticaux les plus significatifs afin de simplifier la modélisation à l'échelle du bassin.

Les failles de chevauchement associées à la déformation du bassin cambro-ordovicien des Appalaches n'ont pas été modélisées car peu de données sont disponibles afin de contraindre leur position et leur profondeur. De plus, elles n'étaient pas d'un intérêt particulier pour cette étude qui se concentre sur le domaine autochtone non déformé par les failles de chevauchement.

La surface du sommet de chacune des unités géologiques d'intérêt a été modélisée en suivant la même méthodologie que pour le modèle non-faillé. Chaque surface est cependant découpée en bloc de failles et chaque partie est modélisée séparément en s'assurant d'un déplacement vertical normal entre chaque faille.

Le modèle volumique est aussi construit en suivant la même méthode que le modèle non-faillé et les voxels ont les mêmes dimensions.

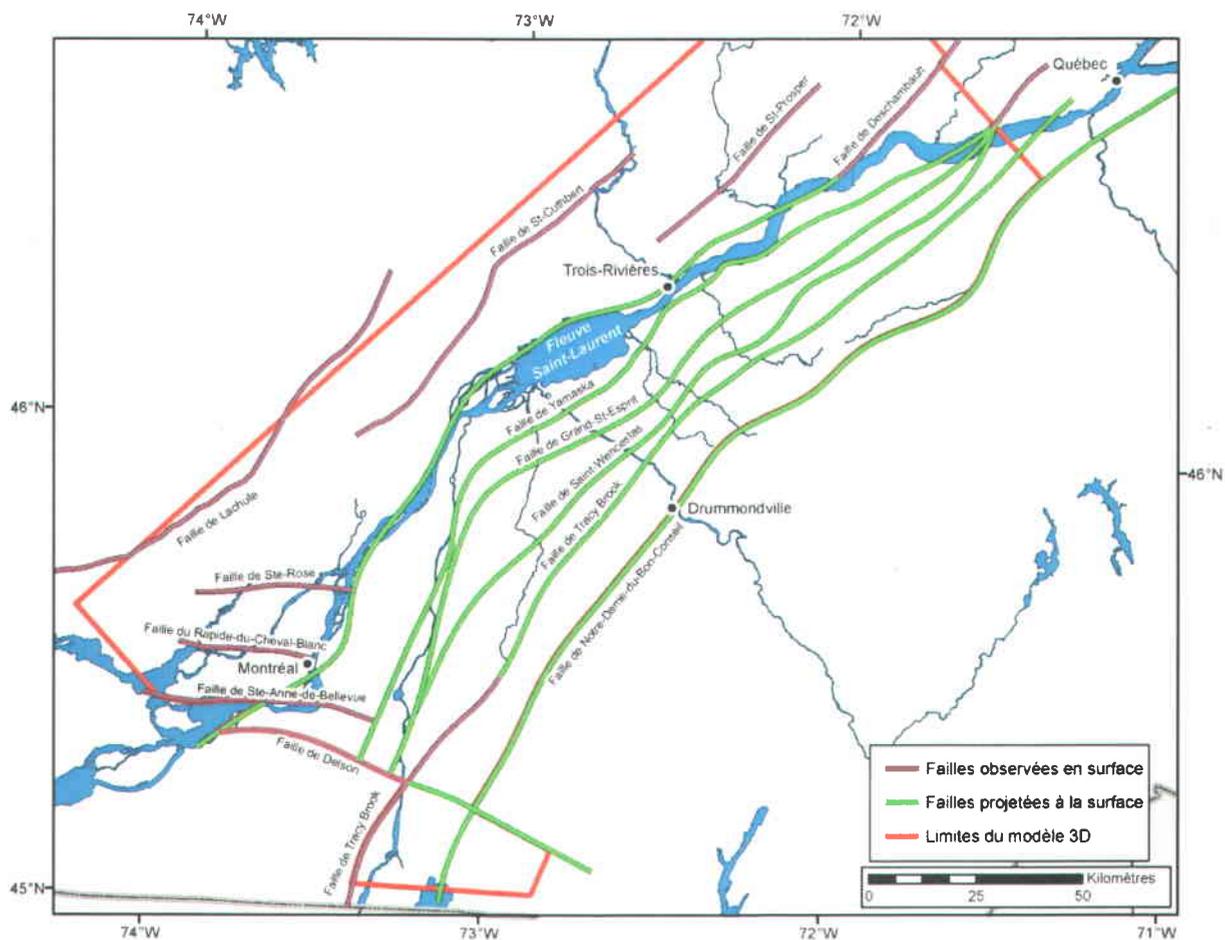


Figure 7 – Projection à la surface des failles normales interprétées et modélisées.

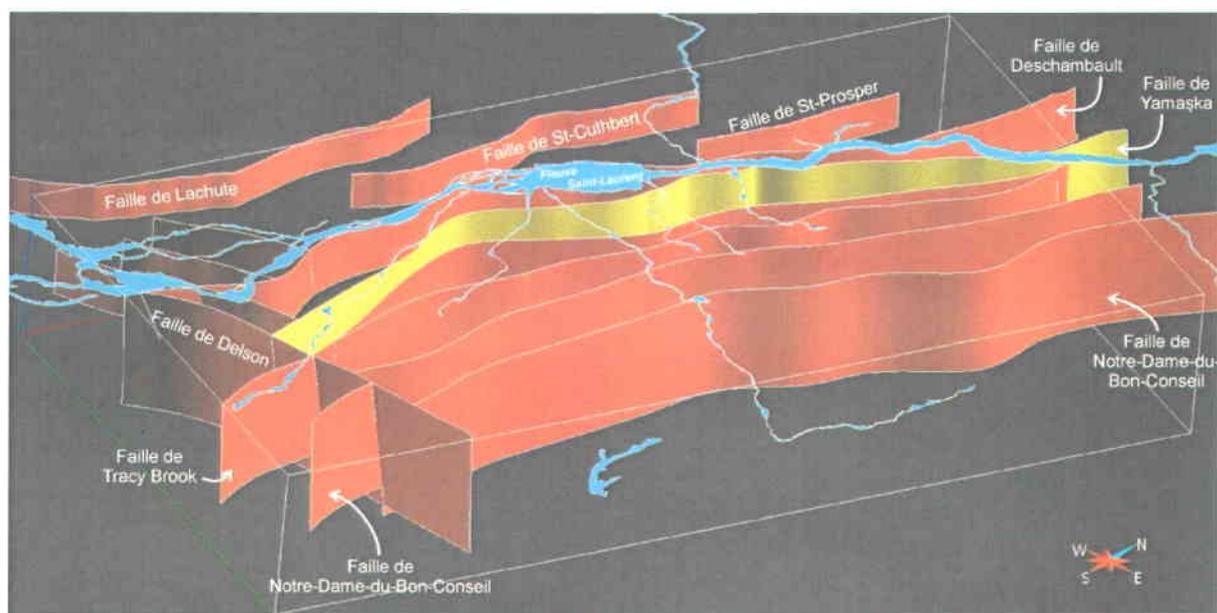


Figure 8 – Ensemble des failles normales modélisées en 3D. La surface jaune représente la faille de Yamaska. Les surfaces bleues représentent les cours d'eau principaux de la région. Exagération verticale : 5X.

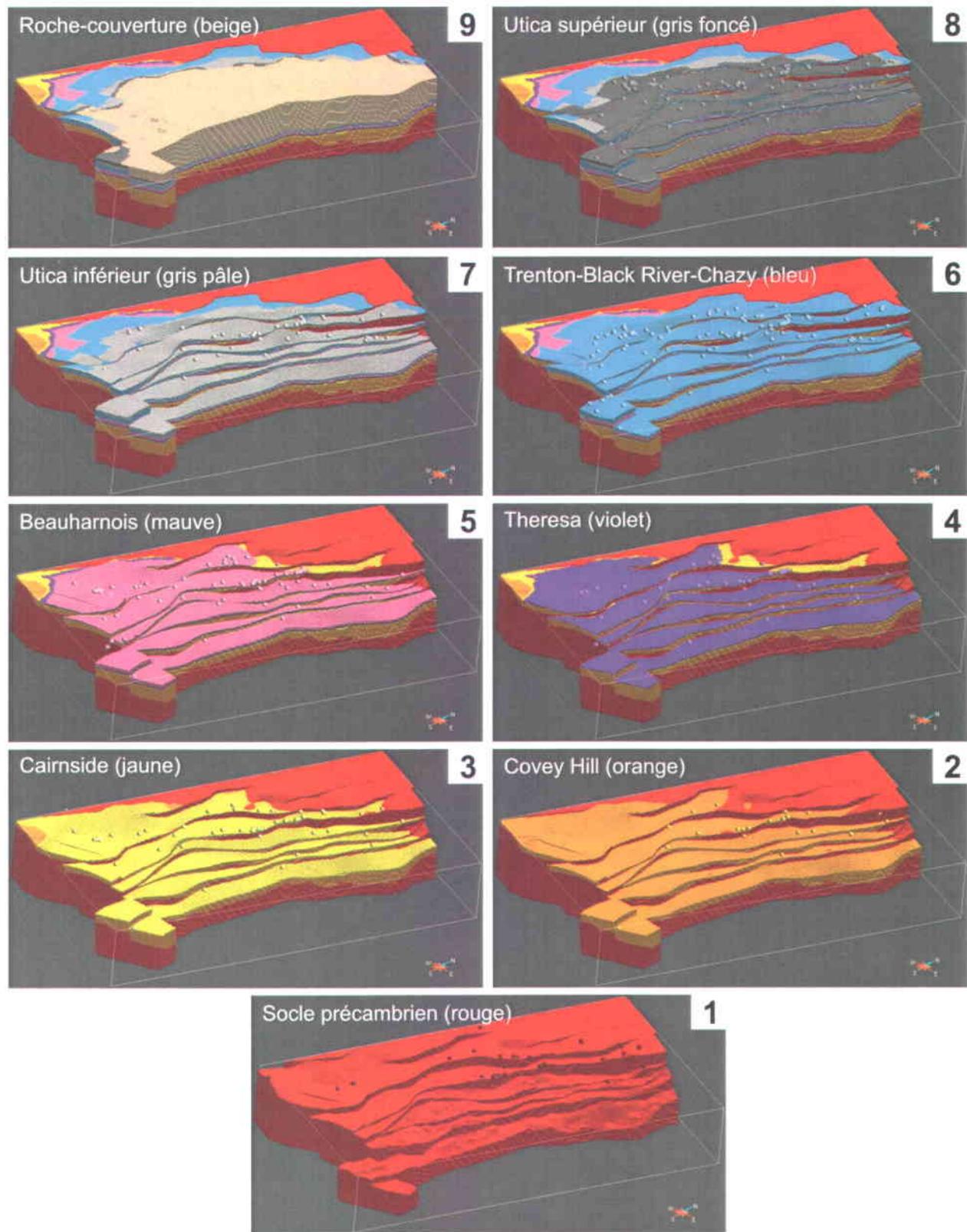


Figure 9 – Modèle géologique 3D volumique faillé du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les points de couleurs représentent les positions des sommets des unités dans les puits. Exagération verticale : 5X.

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

3.1. Méthodologie de calcul de la 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 CO₂ Geological Storage Potential and Capacity in Canada* (ci-après le *National Atlas of Canada*) (Bachu et al., 2010).

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 CO₂ (masse de CO₂) selon la pyramide techno-économique des ressources de Bachu et al. (2007) (Figure 10). 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.

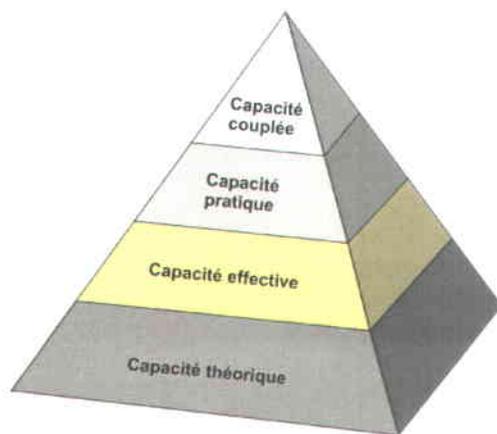


Figure 10 – Pyramide des capacités de stockage géologique du CO₂ (d'après Bachu et al., 2007).

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 CO₂ 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 par du CO₂ 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 CO₂ (kg)

E_{salin} : facteur d'efficacité de stockage du CO₂ pour les aquifères salins

A : aire des réservoirs du bassin (m²)

h : épaisseur des réservoirs du bassin (m)

φ : porosité des réservoirs du bassin (%)

ρ_{CO_2} : densité du CO₂ en profondeur (kg/m³)

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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂.

3.2. Spécificités de la méthodologie au Québec

3.2.1. Profondeur

Tel que décrit ci-dessus, la capacité effective de stockage du CO₂ est calculée à partir d'une profondeur minimale de 800 mètres. Ceci permet de s'assurer que le CO₂ 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 11 montre les deux modèles volumiques 3D entre les profondeurs de 800 et 3500 mètres tels qu'utilisés dans les calculs de capacité effective.

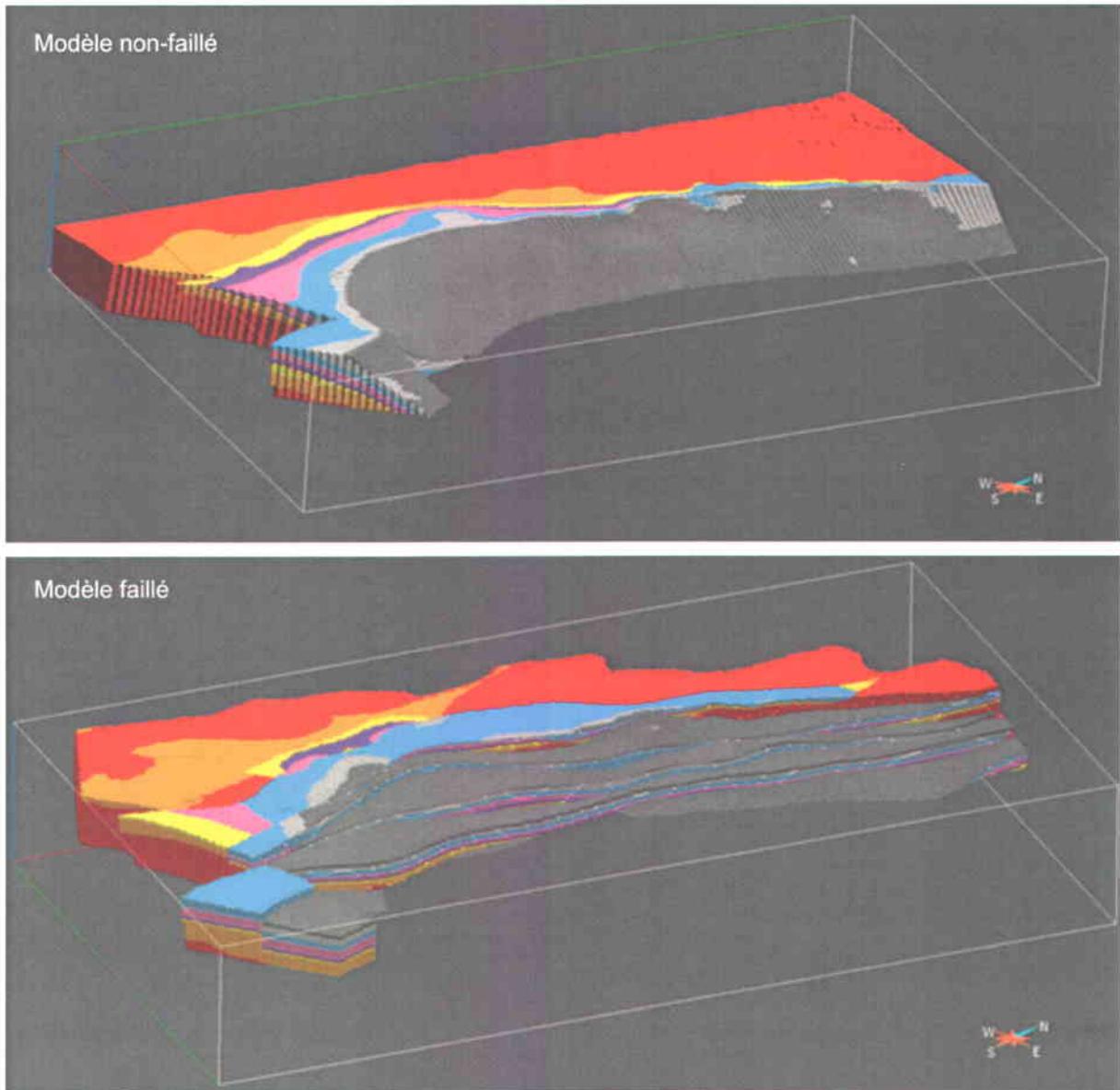


Figure 11 – Modèles 3D volumiques non-faillé et faillé du bassin montrant les unités analysées entre les profondeurs de 800 et 3500 mètres. Rouge : Socle précambrien. Orange : Covey Hill. Jaune : Cairnside. Mauve foncé : Theresa. Mauve pâle : Beauharnois. Bleu : Trenton/Black River/Chazy. Exagération verticale : 5x.

3.2.2. Facteur d'efficacité

Les facteurs d'efficacité pour le stockage du CO₂ dans les aquifères salins varient selon la lithologie des unités réservoirs. Les lithologies les plus propices pour le stockage du CO₂ sont les dolomies, suivies par les roches clastiques puis par les calcaires.

Les facteurs d'efficacité pour les aquifères salins profonds (Tableau 1) tiennent compte de :

- la fraction de l'aquifère pouvant être occupée par du CO₂ ;
- la fraction de l'unité avec une porosité et une perméabilité adéquates pour l'injection de CO₂ ;
- la fraction de la porosité qui est interconnectée ;
- l'efficacité du déplacement horizontal ;
- l'efficacité du déplacement vertical ;
- l'efficacité du déplacement à l'échelle des pores ;
- la flottabilité du CO₂.

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

Lithologie	Unités	E(P ₁₀)	E(P ₅₀)	E(P ₉₀)
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). 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 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%). Les groupes de Beekmantown et de Chazy-Black River-Trenton (Figure 5) ont été exclus des calculs de capacité de stockage.

Tableau 2 – Porosité moyenne des différentes unités géologiques analysées.

Unité	Porosité moyenne	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 %

3.2.4. Volume

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 modèle géologique 3D. 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. 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 capacité (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 CO₂. 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.

Les Tableau 3 Tableau 4 montrent les volumes calculés pour chacune des formations entre les profondeurs de 800 et 3500 mètres dans les deux modèles 3D. On note que la Formation de Covey Hill est plus volumineuse que la Formation de Cairnside car son épaisseur est plus importante sur tout le territoire modélisé. Dans le modèle non-faillé, entre 800 et 3500 mètre de profondeur, la Formation de Cairnside a une épaisseur moyenne de 170 mètres tandis que la Formation de Covey Hill a une épaisseur moyenne de 360 mètres. Dans le modèle faillé, la Formation de Cairnside a une épaisseur moyenne de 110 mètres et la Formation de Covey Hill de 430 mètres. Malgré les différences d'épaisseur des formations entre les deux modèles, l'épaisseur totale du Groupe de Potsdam est similaire, 530 et 540 mètres.

Tableau 3 – Volume des différentes unités analysées entre 800 et 3500 mètres de profondeur dans le modèle non-faillé.

Unité	Volume calculé (km ³)	Volume calculé (m ³)
Cairnside	1342,7	1,342 x 10 ¹²
Covey Hill	2918,9	2,919 x 10 ¹²
Total Potsdam	4260,91	4,261 x 10¹²

Tableau 4 – Volume des différentes unités analysées entre 800 et 3500 mètres de profondeur dans le modèle faillé.

Unité	Volume calculé (km ³)	Volume calculé (m ³)
Cairnside	866,3	8,663 x 10 ¹¹
Covey Hill	3387,0	3,387 x 10 ¹²
Total Potsdam	4253,37	4,253 x 10¹²

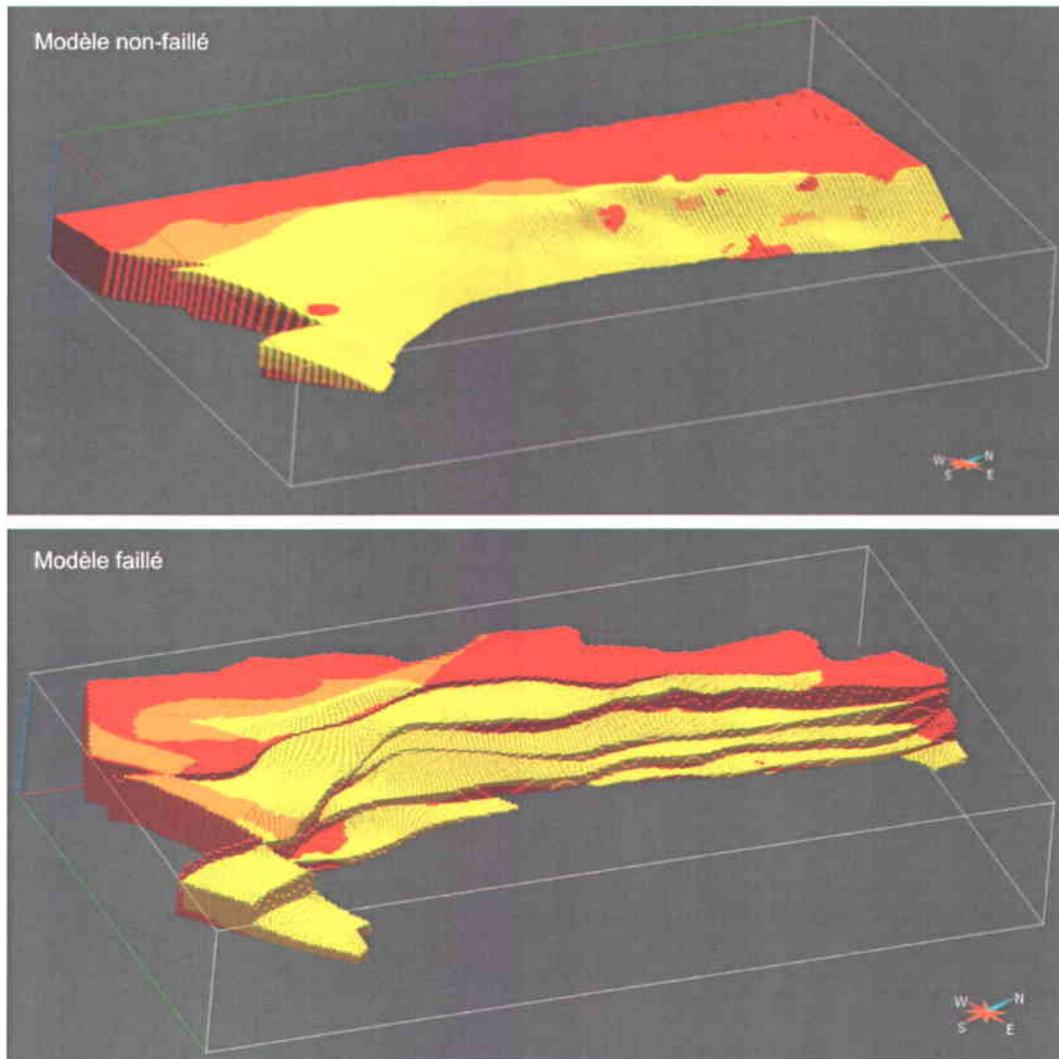


Figure 12 – Modèles géologiques 3D volumiques non-faillé et faillé montrant les unités utilisées pour les calculs de capacité entre les profondeurs de 800 et 3500 mètres. Rouge : socle précambrien. Orange : Covey Hill. Jaune : Cairnside. Exagération verticale : 5x.

3.2.5. Température

La densité du CO₂ 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 :

$$T = T_s + (\Delta Z \times \text{gradient}_T)$$

T : température en profondeur (en mètres)

T_s : température de surface (en mètres)

ΔZ : profondeur par rapport à la surface (en mètres)

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

Dans le cas du bassin 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 :

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

3.2.6. Pression

La densité du CO₂ 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 :

$$P = \Delta Z \times \text{gradient}_p \times 1,1$$

P : pression en profondeur (en MPa)

ΔZ : profondeur par rapport à la surface (en mètres)

gradient_p : 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 CO₂. Une pression de 0 MPa est approximée en surface, à 0 m de profondeur. Le gradient de pression a été estimé pour le bassin des 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 :

$$P = \Delta Z \times 0,01078 \text{ Mpa}$$

3.2.7. Densité du CO₂

Les modèles 3D permettent de calculer la température et la pression en tout point des modèles et non seulement de faire des moyennes en fonction de la profondeur des unités géologiques étudiées. La densité du CO₂ est donc calculée pour chacune des cellules 3D des modèles 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 CO₂ 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/m³. Par la suite, la densité du CO₂ augmente légèrement avec la profondeur pour atteindre environ 817 kg/m³ à 3500 mètres de profondeur (Figure 13). Le CO₂ 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.

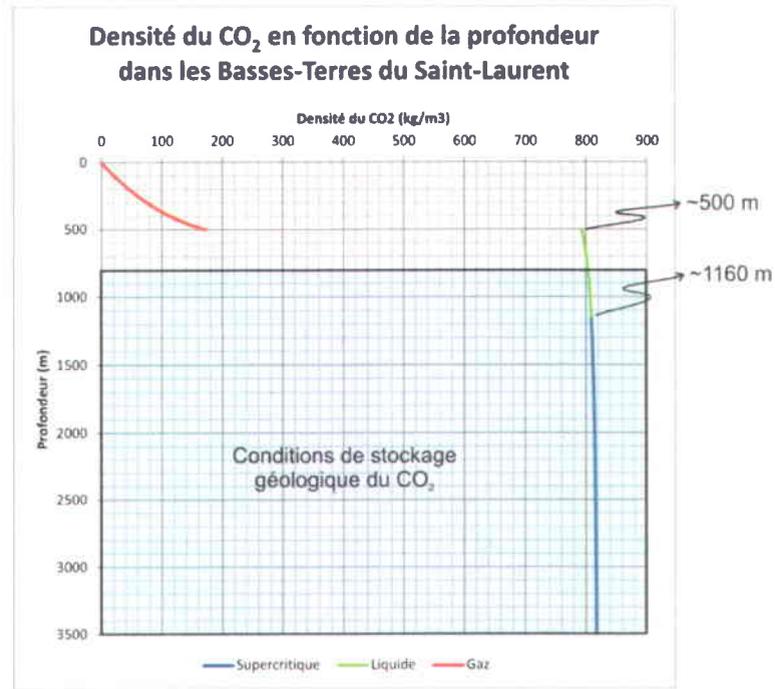


Figure 13 – Graphique de la densité moyenne du CO₂ en fonction de la profondeur dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. La zone bleue est comprise entre les profondeurs de 800 à 3500 mètres.

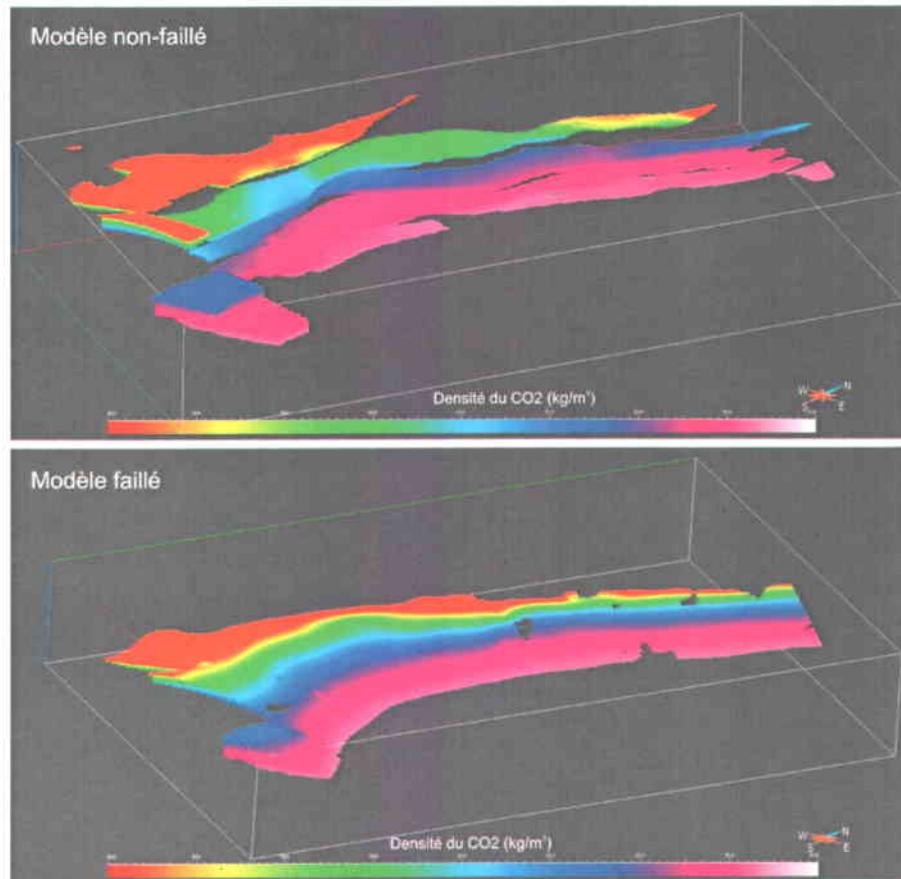


Figure 14 – Densité du CO₂ entre 800 et 3500 mètres dans les formations de Covey Hill et de Cairnside dans le modèle 3D faillé et non-faillé. Échelle de couleurs : 802 à 818 kg/m³. Exagération verticale : 5x.

3.3. Capacités effectives de stockage du CO₂ calculées

La capacité effective de stockage du CO₂ dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent est 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 (Tableau 1).

À l'aide des modèles géologiques 3D faillé et non-faillé, la capacité effective de stockage du CO₂ 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 CO₂ 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

Tableau 5 – Capacité effective de stockage de CO₂ (en gigatonnes) des formations de Covey Hill et de Cairnside selon les différents facteurs d'efficacité pour les lithologies clastiques dans le modèle géologique 3D non-faillé.

Unités	Capacité avec E(P ₁₀) (gigatonne)	Capacité avec E(P ₅₀) (gigatonne)	Capacité avec E(P ₉₀) (gigatonne)
Cairnside	0,16	0,65	1,74
Covey Hill	0,54	2,11	5,69
TOTAL	0,70	2,76	7,43

capacité effective de stockage y est moins importante (Tableau 2, Tableau 5Tableau 6).

Les Figure 15 et Figure 16 montrent la répartition générale des capacités effectives de stockage dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent dans les deux formations à l'étude. 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 CO₂ 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.

Tableau 6 – Capacité effective de stockage de CO₂ (en gigatonnes) des formations de Covey Hill et de Cairnside selon les différents facteurs d'efficacité pour les lithologies clastiques dans le modèle géologique 3D faillé.

Unités	Capacité avec E(P ₁₀) (gigatonne)	Capacité avec E(P ₅₀) (gigatonne)	Capacité avec E(P ₉₀) (gigatonne)
Cairnside	0,11	0,42	1,14
Covey Hill	0,70	2,76	ti44
TOTAL	0,81	3,18	8,58

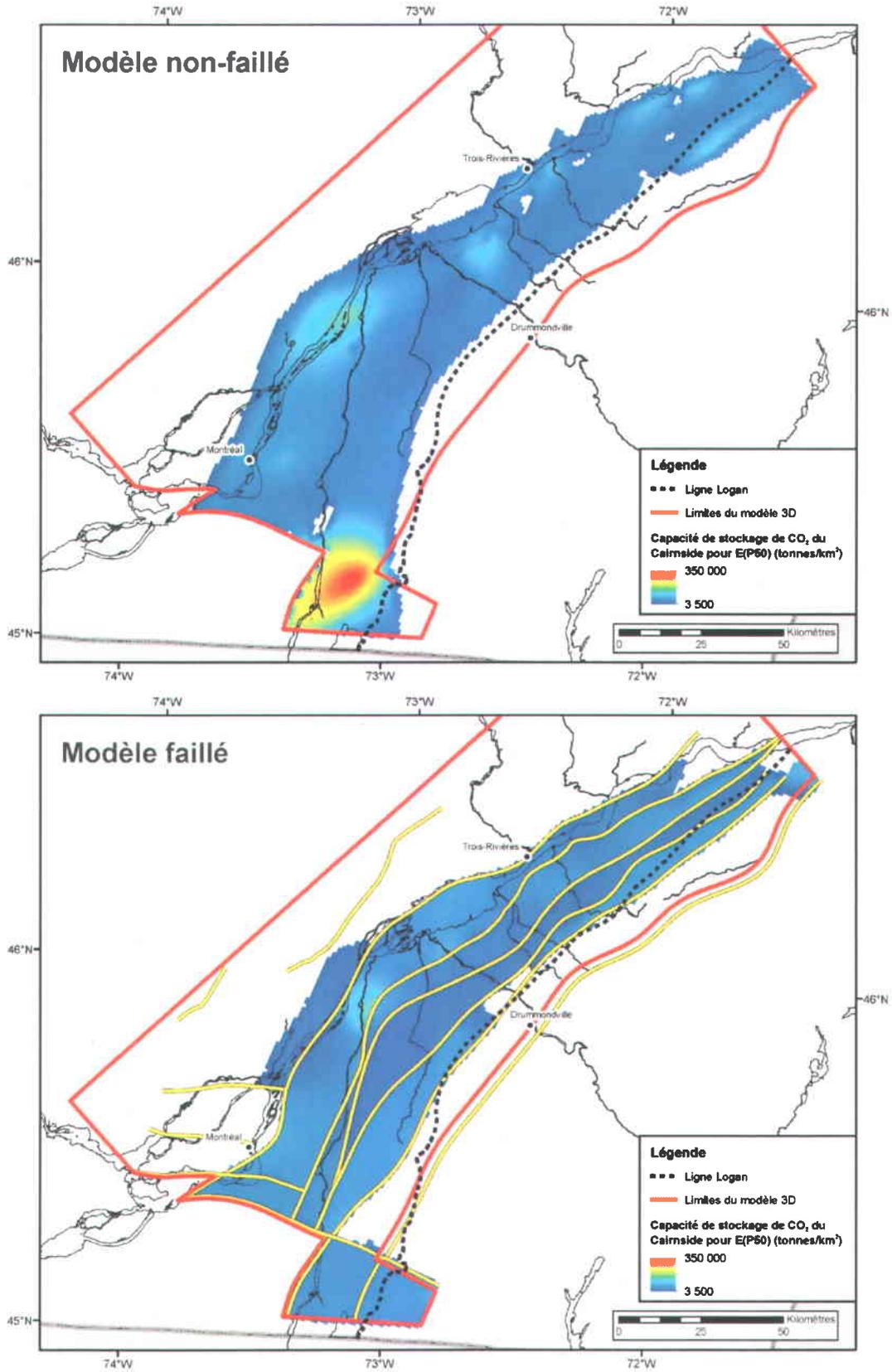


Figure 15 – Capacité effective de stockage du CO₂ dans la Formation de Cairnside dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent calculée à l'aide des modèles 3D non-faillé et faillé avec un facteur d'efficacité $E(P_{50})$. Résolution des cellules: 1km x 1km.

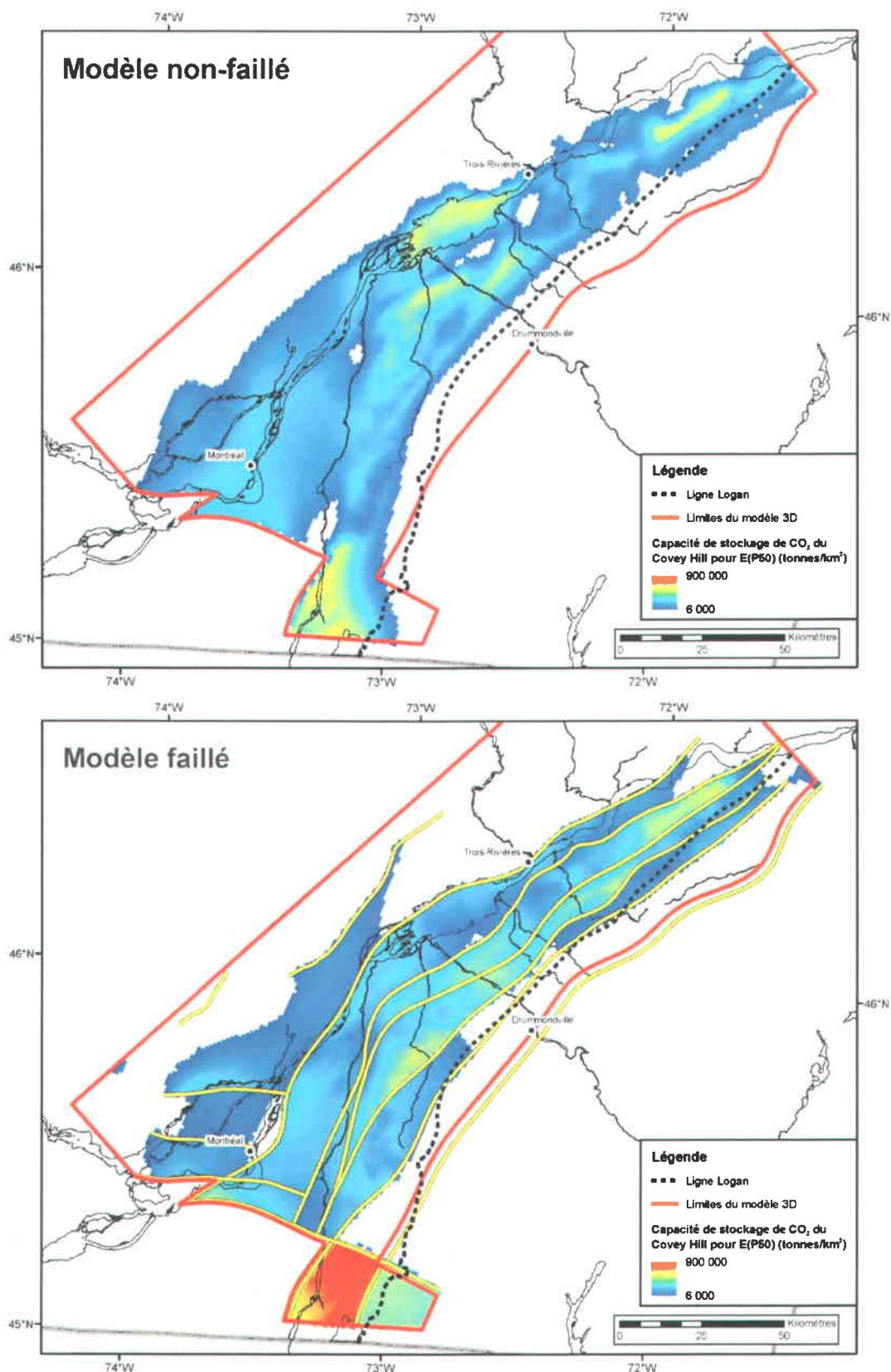


Figure 16 – Capacité effective de stockage du CO₂ dans la Formation de Covey Hill dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent à l'aide des modèles 3D non-faillé et faillé avec un facteur d'efficacité E(P₅₀). Résolution des cellules: 1km x 1km.

4. Conclusions

La capacité effective de stockage géologique du CO₂ dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent a été calculée selon la méthodologie utilisée par le *National Atlas of CO₂ Geological Storage Potential and Capacity in Canada* (Bachu et al., 2010). Cependant, deux modèles géologiques 3D du bassin ont été utilisés pour réaliser les calculs de capacité. 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 CO₂ à toutes les profondeurs dans le bassin. Ainsi, le CO₂ 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 de température. Ce qui implique que, dans les calculs de capacité, une partie du CO₂ calculé est sous forme liquide, soit de 800 à 1160 mètres de profondeur. Malgré ce fait, le CO₂ a tout de même une densité élevée, de l'ordre de 800 kg/m³, 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 capacité de stockage du CO₂. Comme les unités du Trenton/Black River/Chazy, du Beauharnois et du Theresa démontrent des porosités moyennes de moins de 2%, elles ont été éliminées des calculs de capacité. Seules les formations de Cairnside et de Covey Hill, avec des porosités de 3 et 5 % respectivement, ont été considérées dans les calculs.

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 CO₂ 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 CO₂.

Les cartes de distribution de la capacité effective totale de stockage du CO₂ dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent donnent des pistes pour la recherche de sites potentiels de stockage, où quatre régions se démarquent particulièrement (voir les numéros 1 à 4 sur la Figure 17) :

1) zone linéaire au nord-est du bassin dans la région de Sainte-Croix et Lotbinière, au sud de la faille de Yamaska ;

- 2) au nord de la faille de Yamaska, on note un certain potentiel au sud-ouest du Lac Saint-Pierre, dans la région de Sorel ;
- 3) zone centrale du modèle, entre les failles de Yamaska et de Saint-Wenceslas ;
- 4) région au sud du bassin, aux alentours de la Baie Missisquoi (Lac Champlain) et de la région de Lacolle, vers la frontière avec les États-Unis.

Afin de mieux illustrer l'ordre de grandeur des capacités de stockage calculées, il est utile de les comparer à la quantité de CO₂ émise par le secteur industriel du Québec. Les grands émetteurs (ceux qui émettent plus de 100 000 tonnes de CO₂ par année) génèrent près de 20 millions de tonnes de CO₂ par année dans la province de Québec (Environnement Canada, 2010).

Ainsi, le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent peut théoriquement emmagasiner les émissions de CO₂ de la province pour une période allant de 35 à 429 ans, ce qui correspond respectivement aux capacités de stockage calculées pour le modèle non-faillé avec un facteur d'efficacité pour P₁₀ et pour le modèle faillé avec un facteur d'efficacité pour P₉₀ (Tableau 5 et Tableau 6).

La nécessité d'utiliser un modèle faillé plus complexe pour les calculs de capacité à l'échelle du bassin ne peut pas être démontrée avec les résultats obtenus dans cette étude. En effet, les capacités calculées à l'aide des deux modèles sont similaires avec une différence d'environ 13%. Cette différence n'est pas réellement significative en comparaison avec l'incertitude liée à la construction des modèles géologiques 3D. Les capacités obtenues à l'aide des deux modèles sont donc aussi valides les unes que les autres, d'autant plus qu'elles sont du même ordre de grandeur. Cependant, l'utilisation d'un modèle faillé plus complexe permet de mieux cibler les zones d'intérêt en fonction des structures géologique connues comme les failles.

Ainsi, si l'on souhaite obtenir rapidement des capacités de stockage de CO₂ pour un bassin sédimentaire, l'utilisation d'un modèle géologique 3D simple mais rigoureux s'avère une bonne option. On obtient ainsi des chiffres valables rapidement. Toutefois, si l'on souhaite pousser les analyses plus loin et identifier des zones d'intérêt à prioriser pour des études plus poussées, un modèle plus complexe peut s'avérer un choix intéressant et pertinent car plus d'informations géologiques sont prises en compte lors de la construction du modèle 3D.

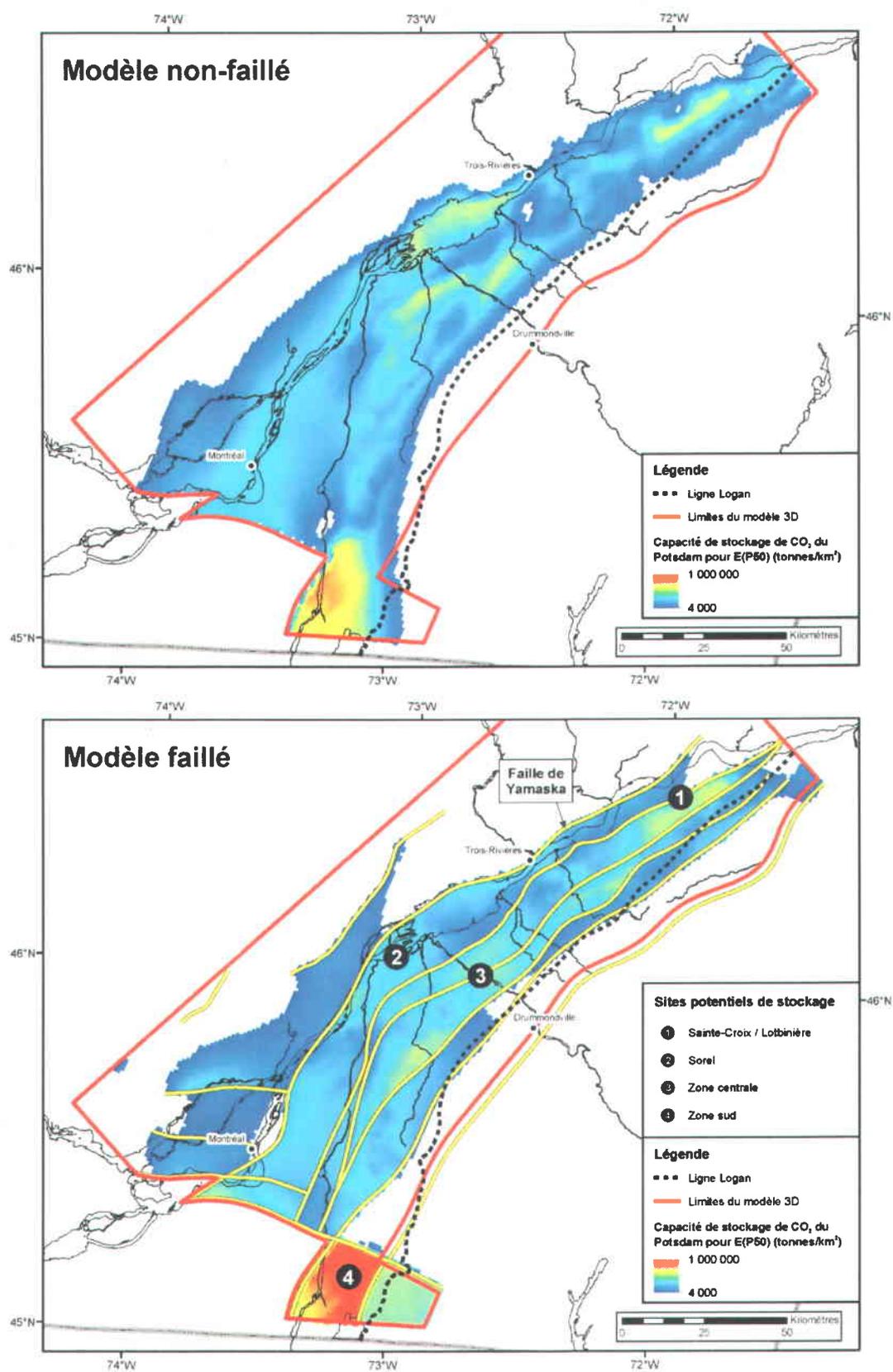


Figure 17 – Capacité effective totale de stockage du CO₂ dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent à

l'aide des modèles 3D non-faillé et faillé avec un facteur d'efficacité $E(P_{50})$. Résolution des cellules: 1km x 1km.

Références

- 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, <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-003-0762-9>
- Bachu, S. (2008) Legal and regulatory challenges in the implementation of CO₂ geological storage: An Alberta and Canadian perspective. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2 (2), 259-273, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2007.12.003>
- 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. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1 (4), 430-443, [http://dx.doi.org/10.1016/S1750-5836\(07\)00086-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00086-2)
- 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. 47 pages.
- Bédard, K., Comeau, F.-A. et Malo, M. (2011) *Évaluation du potentiel de séquestration géologique du CO₂ des bassins sédimentaires du sud du Québec*. Institut national de la recherche scientifique, Québec. R-1289 (INRSCO2-2011-V1.2). 25 pages.
- Bédard, K. et Malo, M. (2012) *Modélisation géologique 3D du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent*. Institut national de la recherche scientifique, Québec. R-xxxx. xx pages.
- Castonguay, S., Lavoie, D., Dietrich, J. et Laliberte, J.-Y. (2010) Structure and petroleum plays of the St. Lawrence Platform and Appalachians in southern Quebec: insights from interpretation of MRNQ seismic reflection data. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 58 (3), 219-234, <http://dx.doi.org/10.2113/gscpgbull.58.3.219>
- 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, Québec, Québec. R-1332 (INRSCO2-2012-V1.3). 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: <http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=Fr&n=8044859A-1>.
- Environnement Canada. *Données recueillies auprès des installations sur les gaz à effet de serre (2010)* [en ligne]. Disponible sur: <http://www.ec.gc.ca/ges-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, 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) *CO₂ capture and storage - A key carbon abatement option*. IEA/OECD. Paris, France. 261 pages, ISBN: 978-92-64-04140-0
- Malo, M. et Bédard, K. (2012) Basin-Scale Assessment for CO₂ Storage Prospectivity in the Province of Québec, Canada. *Energy Procedia*, 23 (0), 487-494, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.031>
- Shafeen, A., Croiset, E., Douglas, P.L. et Chatzis, I. (2004) CO₂ sequestration in Ontario, Canada. Part I: Storage evaluation of potential reservoirs. *Energy Conversion and Management*, 45 (17), 2645-2659, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2003.12.003>
- 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, <http://dx.doi.org/10.1063/1.555991>

Systeme d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG) (2008) *Compilation pétrolière et gazière. Basses-Terres du Saint-Laurent et sud des Appalaches*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. Document AB_CE_250K_C.

Systeme d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG) (2009) *Carte structurale du toit du socle précambrien (Vue 2D), Basses-Terres*. Ministère des Ressources naturelles et

de la Faune, Québec. Document AB_CSP_NAD83_G.

Trần Ngọc, T.D., Lefebvre, R., Malo, M. et Doughty, C. (2012) Feasibility of CO₂ injection in the deep saline aquifers of the Bécancour region, Québec (Canada). Proceedings TOUGH Symposium 2012, Berkeley, California, September 17-19.

