

SÉQUESTRATION GÉOLOGIQUE DU CO₂
CHAIRE DE RECHERCHE

INRS
Université d'avant-garde



Modèle géologique des aquifères salins profonds de la région de Bécancour pour la séquestration du CO₂.

RAPPORT INRSCO2-2011-V2-11

Par

**Maxime Claprood
Bernard Giroux
Erwan Gloaguen
Mathieu Duchesne
Elena Konstantinovskaya
et
Michel Malo**

R-1322

**Soumis au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
2011 – Québec**

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

Préambule

Le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) du Québec 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 permettent d'explorer les principales options de séquestration géologique du CO₂ au Québec. Les objectifs principaux des travaux de la chaire 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 du CO₂ au Québec; 3) compiler les travaux réalisés ailleurs dans le monde sur la technologie du CSC; 4) caractériser les propriétés géologiques et géophysiques des réservoirs potentiels; 5) évaluer leur capacité de stockage; 6) choisir des sites potentiels pour réaliser des essais d'injection du 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 (de tels essais vont nécessiter l'utilisation d'autres ressources financières que celles dont dispose la chaire). En marge de l'atteinte des objectifs de la chaire, des travaux complémentaires portent sur l'évaluation des enjeux socio-économiques de l'implantation de la technologie du CSC au Québec (lois, sécurité, etc.) et sur des études technico-économiques pour l'implantation d'une usine pilote de captage et d'injection du CO₂.

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

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

Le présent rapport documente des travaux réalisés dans le cadre du volet de recherche Caractérisation. Ces travaux ont porté sur la construction d'un modèle 3D des unités géologiques de la succession sédimentaire de la plate-forme du Saint-Laurent dans la région de Bécancour. Cette région présente un intérêt particulier puisqu'elle pourrait faire l'objet d'un éventuel test-pilote d'injection du CO₂.

Sommaire

De toutes les options de séquestration géologique du CO₂, un grand intérêt est porté aux aquifères salins profonds à cause de leur répartition géographique dans les bassins sédimentaires à l'échelle planétaire et leur important volume estimé de stockage. Cette étude s'intéresse à trouver une façon optimale de caractériser les limites des unités géologiques contenant les aquifères salins profonds qui jouent un rôle de réservoir pour la séquestration du CO₂ dans la région de Bécancour, dans la plate-forme du Saint-Laurent, Québec. Dans cette étude, la modélisation exacte des unités stratigraphiques sur tout le domaine d'étude n'est pas réaliste à cause de la quantité limitée de puits d'observation et de lignes sismiques disponible. Afin d'optimiser les données éparses disponibles, les toits de formation géologiques identifiés dans le domaine de la profondeur à 11 puits sont krigés en utilisant les horizons sismiques modélisés dans le domaine du temps à partir de 25 lignes sismiques 2D comme dérive externe. Les résultats obtenus sur les horizons géologiques montrent un bon compromis entre la structure spatiale globale exprimée par les variogrammes et les variations spatiales exprimées par la dérive externe évaluée sur les horizons modélisés en temps. Le modèle géologique 3D final contient des cellules de dimensions 100 m x 100 m, ayant une épaisseur variant entre 20 m et 60 m dépendant de l'unité géologique modélisée. Les étendues latérales du modèle sont de 13.6 km x 10.5 km, pour une profondeur totale de 3200 m sous le niveau de la mer. Le modèle géologique 3D sera utilisé comme la structure de base pour la modélisation géostatistique des propriétés pétro-physiques (porosité, perméabilité) dans les aquifères salins profonds de la région de Bécancour.

TABLE DES MATIÈRES

Préambule.....	iii
Sommaire	iv
1. Introduction	7
2. Données géophysiques	8
2.1. Sismique	8
2.2. Diagraphies de forage.....	9
3. Méthodologie.....	9
3.1. Identification des toits de formation à partir des diagraphies de forage.....	9
3.2. Pointé des horizons sismiques	10
3.3. Création des tables de conversion temps-profondeur.....	12
3.4. Modélisation des surfaces géologiques en temps-double.....	12
3.5. Krigeage par dérive externe.....	14
4. Résultats : Modèle 3D en profondeur.....	16
5. Discussion.....	18
6. Conclusions	19
7. Remerciements	19
Références	20

1. Introduction

Les aquifères salins profonds sont classés comme une des principales options pour la séquestration géologique du CO₂ par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Des aquifères salins profonds sont identifiés à plusieurs niveaux stratigraphiques dans la région de Bécancour et sont exploités industriellement par la société Junex (<http://www.junex.ca/avantages-environnementaux>).

Trois niveaux stratigraphiques sont « producteurs » de saumure : les calcaires du Groupe de Trenton, les grès dolomitiques du Groupe de Beekmantown (Formation de Theresa) et les grès quartzeux du Groupe de Potsdam (Formation de Cairnside) (Figure 1). Le rapport de Géostock concernant un projet de stockage de gaz naturel dans la région de Bécancour (<http://www.junex.ca/fr/storage/natural-gas.php>)

démontre qu'il existe des niveaux réservoirs ayant de bonnes propriétés pétro-physiques, une roche couverture efficace, et des structures fermées au niveau des grès à la base du Trenton.

Le but de cette étude est de construire un modèle 3D des principales unités géologiques qui servira de cadre pour la modélisation des propriétés pétro-physiques de chaque unité géologique, afin de simuler et évaluer le potentiel de stockage de CO₂ dans les aquifères salins de Bécancour. La construction d'un modèle géologique 3D des unités réservoirs est la première étape afin d'évaluer la capacité de stockage de CO₂ (Dubrule, 2003).

Les données de sismique réflexion et de diagraphies de puits de forage sont les principales données géophysiques utilisées pour la caractérisation de réservoir. La contrainte principale à laquelle nous faisons face pour construire le modèle 3D de Bécancour est la rareté des données sismiques et de diagraphies de qualité dans la région. Trente lignes sismiques 2D, acquises entre 1970 et 2008, sont disponibles et fournissent une caractérisation géophysique disséminée de la région.

Chaque puits contient son propre éventail de

diagraphies, dépendant de l'année où ils furent forés. La région d'intérêt est située dans une zone industrielle, restreignant la possibilité d'acquérir de nouvelles données sismiques 3D, habituellement nécessaire pour la caractérisation de réservoirs.

Le principal défi de ce projet est d'optimiser l'utilisation des données éparées que nous possédons afin de caractériser les aquifères salins profonds de la région de Bécancour. L'utilisation de méthodes géostatistiques est essentielle aux fins de ce projet. Ces méthodes permettent également d'évaluer la variabilité et l'incertitude sur le modèle géologique.

Dans ce rapport, nous présentons la méthodologie suivie afin de construire le modèle 3D des unités géologiques dans la région de Bécancour. Cinq grandes étapes sont reconnues pour construire le modèle 3D : 1) l'identification des toits de formations aux puits; 2) l'interprétation des horizons sismiques; 3) la génération de tables de conversion temps-profondeur; 4) la modélisation des surfaces géologiques 2D dans le domaine du temps; et 5) le krigeage des toits de formation avec les surfaces en temps comme dérive externe. Le modèle géologique 3D en profondeur est ensuite construit selon les résultats du krigeage. Les étapes 1 à 3 furent décrites dans le rapport no. INRSCO2-2010-V2.1; (http://chaireco2.ete.inrs.ca/q=fr/publications_fr), nous éviterons toutes répétitions et référons le lecteur à ce rapport pour une description plus détaillée de ces étapes. Le présent rapport traite en détail des étapes 4 et 5 menant à la construction du modèle 3D des unités géologiques à Bécancour.

La première étape de la modélisation de réservoir est l'identification des unités possédant des propriétés hydrauliques différentes. Comme c'est fréquemment le cas, les propriétés hydrauliques des réservoirs profonds sont intimement liées à la géologie. Neuf horizons sont identifiés sur les profils sismiques, correspondant aux toits de formation identifiés à partir des diagraphies de forage. Ces neuf horizons sismiques sont identifiés par les lignes rouges sur la Figure 1.

Stratigraphie des Basses-Terres du Saint-Laurent

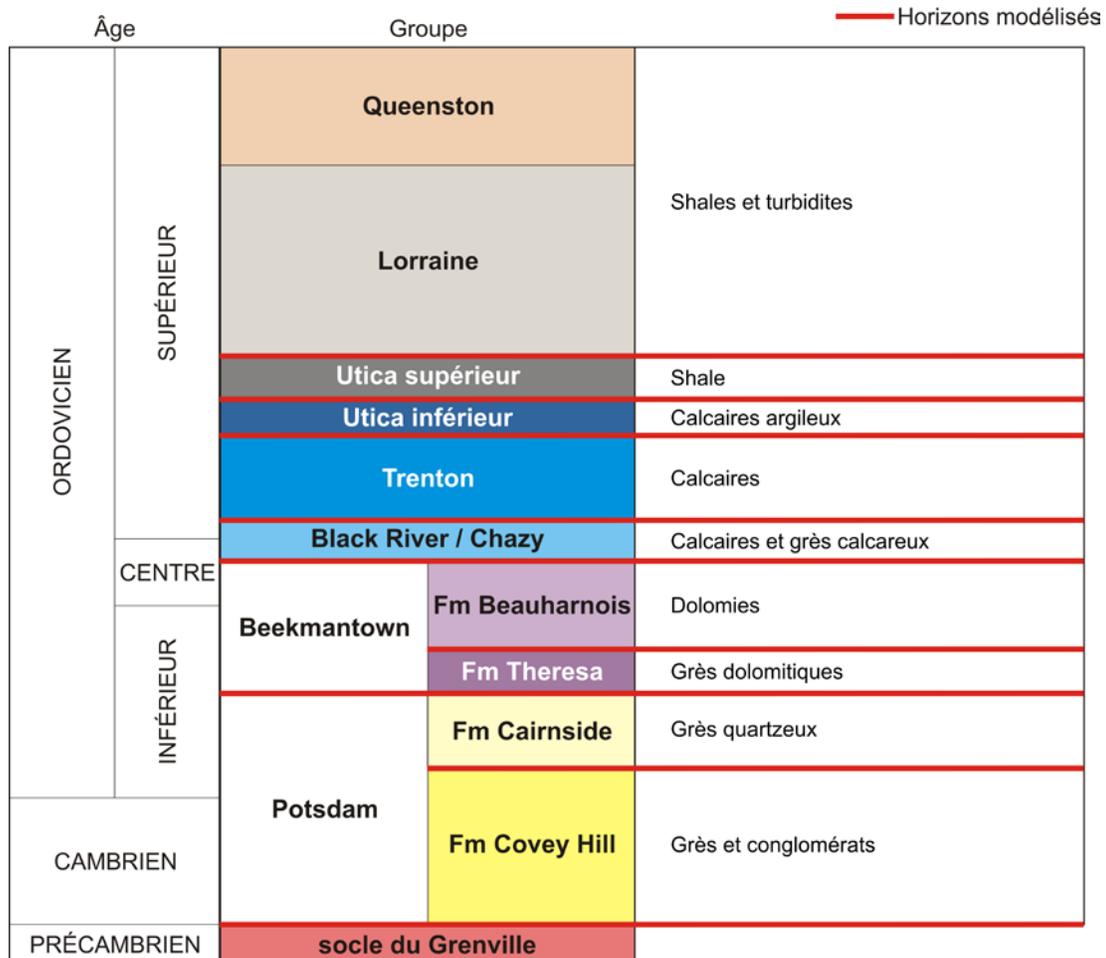


Figure 1. Stratigraphie simplifiée des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les lignes rouges sont les 9 horizons sismiques modélisés, qui représentent des changements majeurs dans la séquence stratigraphique. Notons que les groupes de Chazy et de Black River, possédant des propriétés physiques trop similaires, ne peuvent être différenciés sur les profils sismiques.

2. Données géophysiques

La position des lignes sismiques et des puits utilisés pour la construction du modèle 3D des unités géologiques à Bécancour est présentée à la Figure 2.

2.1. Sismique

Un total de 123 km de sections sismiques 2D, correspondant à 30 lignes acquises dans la région de Bécancour entre 1970 et 2008, est utilisé pour délimiter les variations latérales et verticales de 9 horizons correspondant aux changements lithologiques dans les

unités stratigraphiques (Figure 1). Seules les données après-sommation sont disponibles limitant la possibilité de re-traitement et restreignant le type d'analyse pouvant être effectuée sur les données (Yilmaz, 2001). La qualité des données est très variable d'un levé à l'autre dépendant de l'année d'acquisition. Cela complique grandement les liens entre les lignes sismiques enregistrées pendant différents levés. Sur les 30 lignes sismiques disponibles dans la région de Bécancour, 25 sont utilisées (total de 99.4 km) pour construire le modèle 3D. Cinq lignes sismiques sont mises de côté parce que leur couverture est trop faible et qu'elles ne rajoutent pas suffisamment d'information, ou parce que certains levés ont été effectués à la même position que des lignes plus

anciennes, avec une qualité d'enregistrement améliorée. D'autres levés n'offrent pas la résolution nécessaire pour l'identification des éléments stratigraphiques ou structuraux.

2.2. Diagraphies de forage

Un éventail de diagraphies de forage (électrique, sonique, radiations gamma, porosité, densité) a été acquis à 18 puits dans la région de Bécancour. Onze

puits possèdent la diagraphie sonique nécessaire pour générer les tables de conversion temps-profondeur liant la sismique et les puits. Les autres diagraphies sont utilisés pour la localisation verticale des toits de formation et ainsi améliorer les pointés sismiques. Les horizons sismiques, sur les autres sections sismiques pour lesquelles les diagraphies soniques sont incomplètes ou absentes, ont été tracés en respectant la continuité des horizons entre les différentes lignes sismiques. (Leguijt, 2009; Claprood et al., 2010).

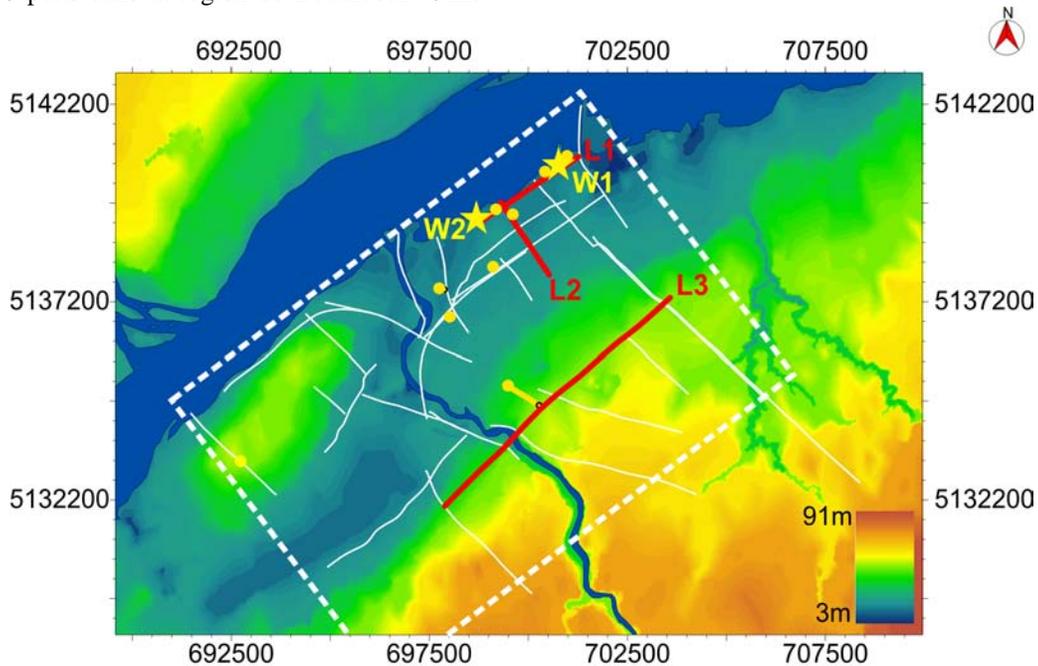


Figure 2. Carte représentant l'élévation de la région de Bécancour. Les lignes blanches représentent la position des lignes sismiques 2D. Lignes rouges sont les lignes sismiques présentées à la Figure 4. Les points jaunes montrent la position des 11 puits où les diagraphies de sonique (DT) sont disponibles. Le carré blanc en pointillés présente les limites horizontales approximatives du modèle 3D (13.6 km x 10.5 km).

3. Méthodologie

La méthodologie suivie pour construire le modèle géologique 3D de la région de Bécancour comporte cinq étapes :

1. Identification des toits de formation en profondeur ;
2. Pointé des horizons sismiques en temps-double;
3. Création des tables de conversion temps-profondeur ;
4. Modélisation des surfaces géologiques en temps-double et ;

5. Krigeage par dérive externe.

Les étapes 1 et 2 ont été décrites dans le rapport no. INRSCO2-2010-V2.1 (Konstantinovskaya et al., 2010a) tandis que l'étape 3 est décrite dans Claprood et al. 2010. Seul un résumé des étapes 1 à 3 est présenté dans ce rapport et le lecteur est référé aux deux documents cités ci-haut pour davantage de détails.

3.1. Identification des toits de formation en profondeur

Plusieurs diagraphies ainsi que des analyses de retailles de roches et de carottes sont utilisées pour calculer les volumes relatifs de quatre minéraux principaux (quartz,

carbonate, dolomie, shale) constituant la roche et pour identifier les changements majeurs de lithologie. Les diagraphies de radiations gamma, densité globale, porosité-densité ou porosité-neutron, et facteur photo-électrique sont les diagraphies les plus utilisés selon la méthode de Doveton (1986) et appliquée à Bécancour par Konstantinovskaya et al. (2010a,b).

Les toits de formation sont identifiés à 11 puits où la diagraphie sonique a été acquise à Bécancour. Les toits de formation étant la seule information disponible en profondeur dans le modèle, ils sont considérés comme la variable primaire dans la méthode de krigeage par

dérive externe (KED) utilisée pour construire le modèle 3D des unités géologiques. La Figure 3 présente les toits de formation identifiés à Bécancour. La visualisation en trois dimensions des 11 puits dans la région à l'étude à Bécancour (le cube avec arêtes blanches à la Figure 3) met bien en relief le peu d'information disponible en profondeur pour bien comprendre les variations latérales des horizons géologiques. Cela démontre la nécessité d'utiliser de l'information complémentaire (horizons sismiques en temps-double) afin de mieux caractériser les variations spatiales des unités géologiques.

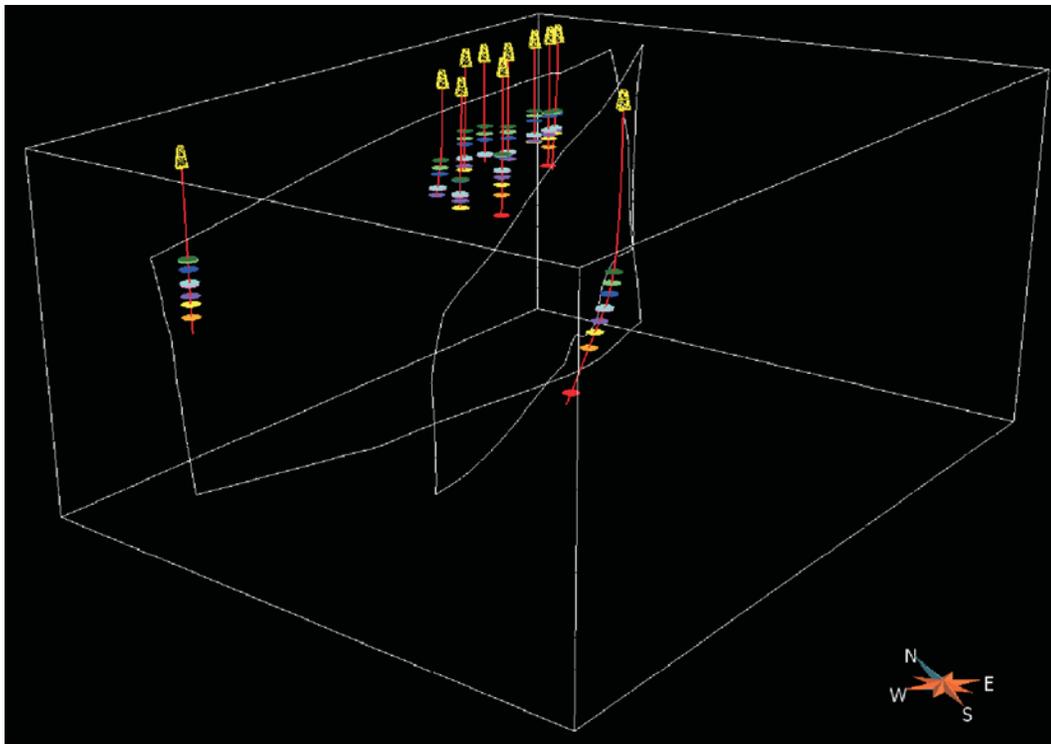


Figure 3. Toits de formation identifiés à 11 puits dans la région de Bécancour. Le code de couleur utilisé pour les toits de formation est, de bas en haut : socle du Grenville (rouge); Groupe de Potsdam – Formation du Covey Hill (orange); Groupe de Potsdam – Formation du Cairnside (jaune); Groupe de Beekmantown – Formation de Thérèse (mauve); Groupe de Beekmantown – Formation de Beauharnois (rose); groupes de Black River – Chazy (bleu pâle); Groupe de Trenton (bleu foncé); Utica inférieur – Trenton supérieur (vert pâle); et le Shale d'Utica (vert foncé). Les polygones délimités par les lignes blanches sont les deux failles principales incluses dans le modèle 3D. Le cube avec arêtes blanches représente les limites du modèle 3D de dimensions 13.6 km x 10.5 km x 3.2 km.

3.2. Pointé des horizons sismiques

Les données de sismique réflexion sont utilisées pour définir la continuité latérale des interfaces entre les unités géologiques et pour identifier la présence

d'éléments structuraux tels que les failles et les plis. L'interprétation de données sismiques s'effectue dans le domaine du temps-double (TWT pour « two-way arrival time »). La sismique réflexion image les contrastes d'impédance acoustique souvent situés à l'interface de deux couches géologiques possédant des

propriétés physiques distinctes (vitesse et densité). Certaines lignes furent ré-interprétées pour assurer une meilleure continuité entre toutes les lignes sismiques disponibles dans la région. Les trois profils identifiés

L1, L2, et L3 sur la Figure 2 sont présentés à la Figure 4, avec l'interprétation des horizons et des éléments structuraux majeurs.

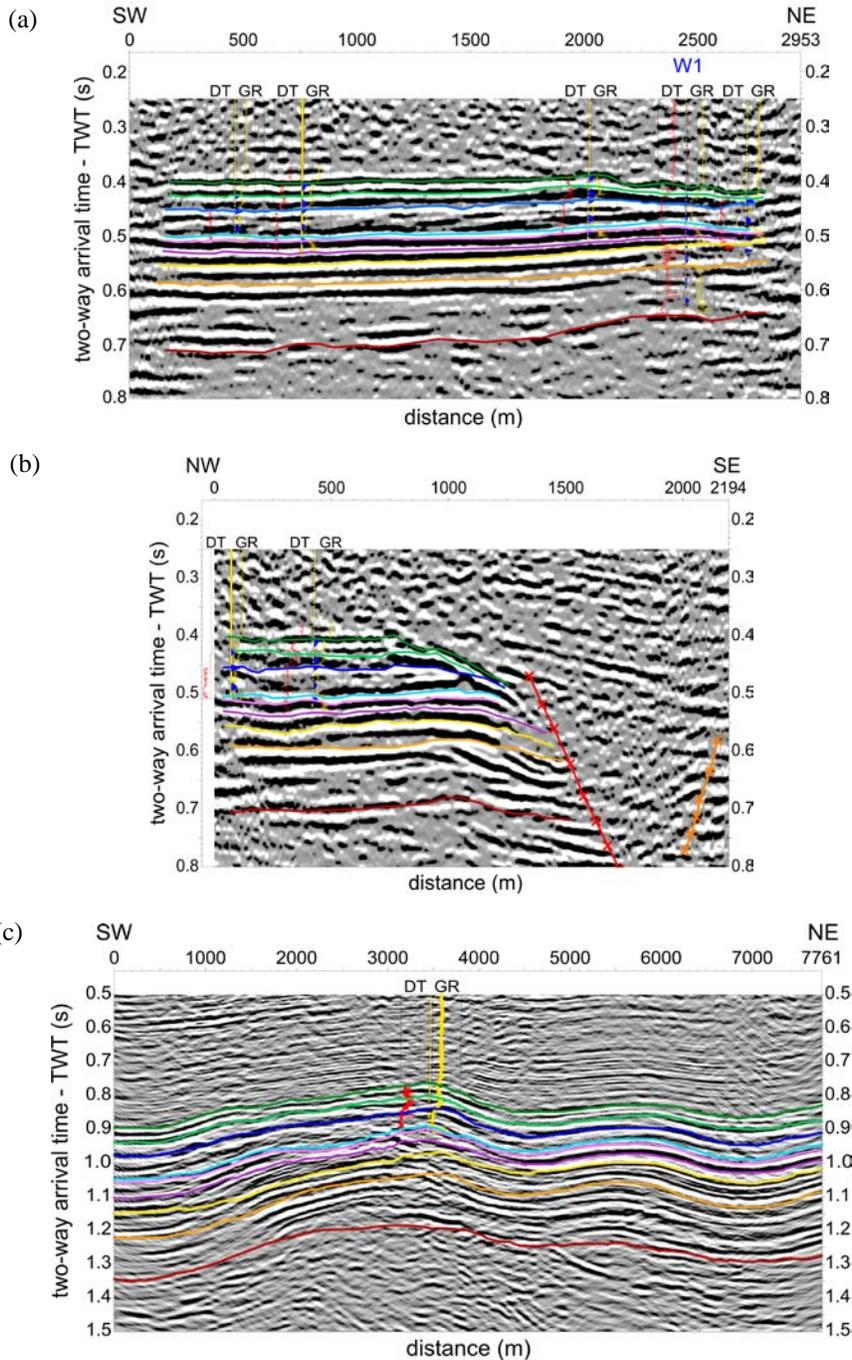


Figure 4. Lignes sismiques a) L1, b) L2 et c) L3 acquises dans la région de Bécancour. Le code de couleur des horizons est le même que celui utilisé pour les toits de formation à la Figure 3. Les diagraphies soniques (rouge, de 150 $\mu\text{s/m}$ (droite) à 350 $\mu\text{s/m}$ (gauche)) et de radiations gamma (jaune, de 0 gapi (gauche) à 200 gapi (droite)) des puits situés à proximité des lignes sismiques sont présentées. Les lignes rouge et orange avec croix en b) représentent

respectivement la faille de Yamaska inclinée vers le sud-est et une faille de pendage nord-ouest.

La faille de Yamaska est une faille normale dont le toit s'est affaissé au sud du plan de faille de pendage sud-est. Elle divise la région de Bécancour en deux zones. La zone située au nord de la faille possède une plus grande densité de lignes sismiques et de diagraphies. Les unités géologiques dans le mur de la faille, au nord, sont situées à plus faible profondeur. Moins de profils sismiques sont acquis au sud de la faille, augmentant

ainsi l'incertitude sur les horizons géologiques modélisés dans cette zone. Ces levés sismiques sont cependant acquis plus récemment, offrant une meilleure résolution verticale pour l'identification des horizons. La Figure 5 présente le pointé des neuf horizons géologiques et des principaux éléments structuraux identifiés en temps-double sur 25 lignes sismiques.

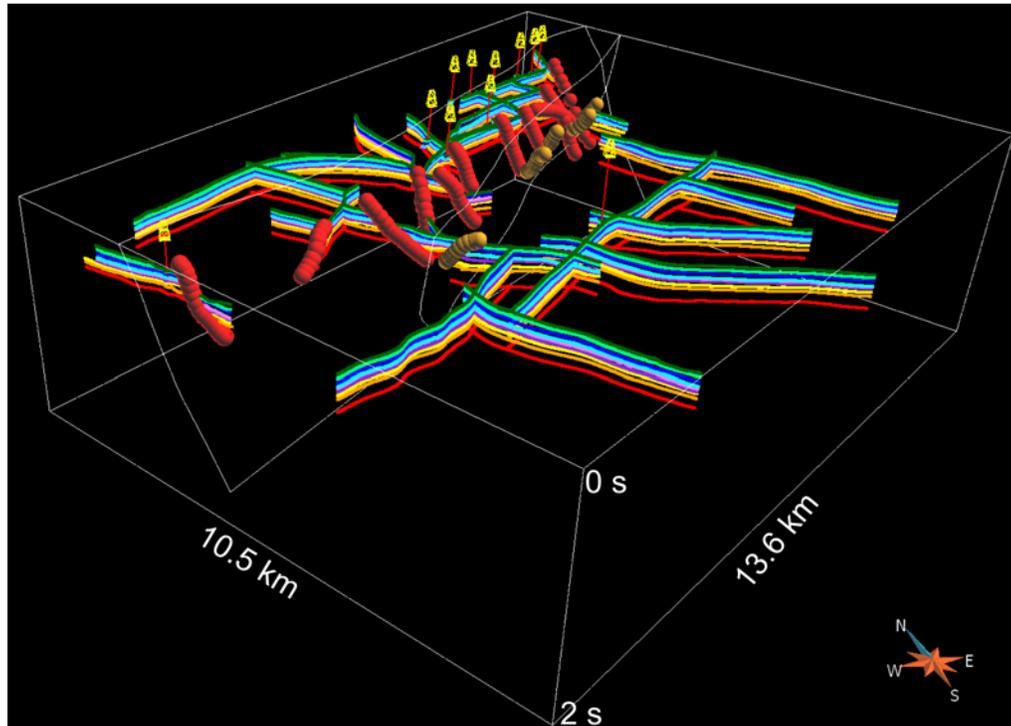


Figure 5. Horizons et failles identifiés sur 25 lignes sismiques dans la région de Bécancour. L'axe vertical est en temps-double (TWT de 0 à 2 s). Les sphères rouges et oranges sont les pointés de la faille de Yamaska et de la faille secondaire à pendage nord-ouest, respectivement. Le code de couleur des horizons est le même que celui utilisé pour les toits de formation à la Figure 3.

3.3. Création des tables de conversion temps-profondeur

Cette étape de la méthodologie consiste à associer les interfaces des unités géologiques identifiées aux puits à leur réflexion sismique correspondante. Des tables de conversion temps-profondeur sont créées aux 11 puits possédant la diagraphie sonore. Ces tables de conversion sont nécessaires pour lier l'information sismique, enregistrée en temps-double, aux toits de formations identifiés en profondeur sur les diagraphies.

3.4. Modélisation des surfaces géologiques en temps-double

La modélisation de surfaces 2D se fait à partir des horizons sismiques pointés en temps-double. Les horizons géologiques sont interpolés entre les pointés sismiques par l'algorithme DSI (*Discrete Smooth Interpolator*) (Mallet, 2002) tel qu'implémenté dans le logiciel SKUA (*Subsurface Knowledge Unified Approach*) fourni par Paradigm, qui permet d'obtenir des surfaces interpolées lisses à partir de données géographiques éparses (Süss et Shaw, 2003). Les

surfaces géologiques sont modélisées sur une grille géologique dont la dimension verticale représente le temps d'arrivée en temps-double. Des cellules de 100 m x 100 m sont utilisées avec une épaisseur-temps de 20 ms (à l'exception des grès de la Formation du Covey Hill qui sont modélisés sur des cellules de 40 ms d'épaisseur-temps). Les dimensions totales du modèle sont de 13.6 km x 10.5 km. La grille est orientée selon un azimut de 53°N. Toutes les surfaces interpolées respectent parfaitement les toits de formation identifiés aux 11 puits où les tables conversion de temps-profondeur ont été créées.

Les neuf horizons sont modélisés simultanément afin qu'aucun horizon ne se croise, suivant ainsi le principe de superposition des unités stratigraphiques. Les mouvements induits par les deux failles incluses dans le modèle sont aussi pris en compte en définissant la faille Yamaska comme faille normale et la faille de pendage nord-ouest comme une faille inverse dans les paramètres de modélisation. La Figure 6 présente les surfaces modélisées en temps-double pour les neuf horizons.

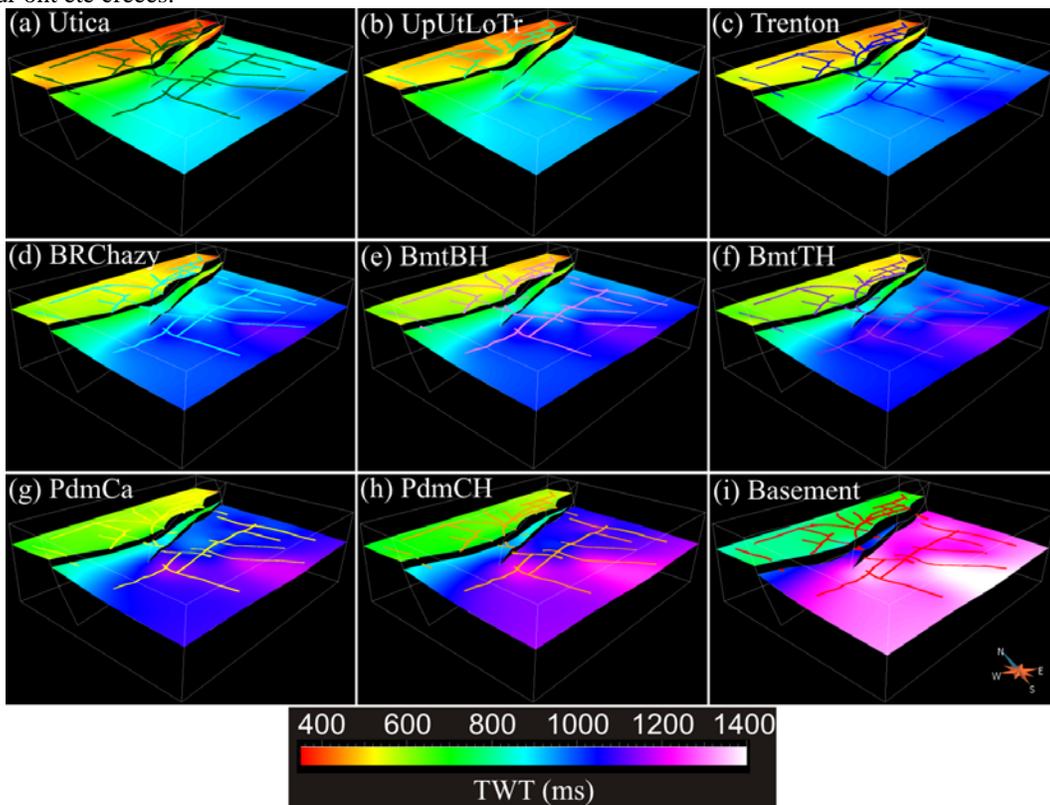


Figure 6. Surfaces modélisées en temps-double (TWT) des neuf horizons dans la région de Bécancour. a) Shale d'Utica (Utica); b) Utica Inférieure – Trenton Supérieure (UpUtLoTr); c) Groupe de Trenton (Trenton); d) groupes de Black River – Chazy (BRChazy); e) Groupe de Beekmantown – Formation de Beauharnois (BmtBH); f) Groupe de Beekmantown – Formation de Thérèse (BmtTH); g) Groupe de Potsdam – Formation de Cairnside (PdmCa); h) Groupe de Potsdam – Formation de Covey Hill (PdmCH); i) Socle du Grenville (Basement). Cube avec arêtes blanches représente le modèle de dimensions 13.6 km x 10.5 km x 1.75 s. Les lignes de couleur représentent les pointés sur les lignes sismiques 2D.

Les surfaces modélisées en temps-double sont utilisées comme dérive externe pour guider le krigeage des horizons géologiques en profondeur à partir des toits de formation identifiés aux puits. Cette méthodologie était d'un usage commun par l'industrie pétrolière et gazière avant l'avènement de l'acquisition de sismique 3D

(Delhomme et al., 1981), et est l'option préférée pour construire un modèle géologique à partir de données sismiques 2D éparses et des diagraphies de puits disponibles à Bécancour (Dubrule, 2003). L'intégration géostatistique rend également la méthodologie indépendante de l'utilisateur en offrant un cadre rigoureux, et permet une intégration facile de nouvelles

données dans le modèle.

3.5. Krigeage par dérive externe

Le krigeage est une méthode géostatistique déterministe générant des solutions non-biaisées tout en minimisant la variance d'estimation sous les conditions de stationnarité et d'ergodicité. Le krigeage est utilisé pour l'interpolation d'une variable dite primaire en tous points d'une grille à partir d'un ensemble de points de données initiaux (Dubrule, 2003). Trois principales composantes sont prises en compte pendant le krigeage : la distance entre les points de données initiaux par la matrice de covariance; la distance entre les points de données initiaux et les points à estimer; et la structure de la variable à estimer par une tendance et le variogramme. La variable primaire à estimer ici est la profondeur de tous les horizons, identifiée par les toits de formation à un maximum de 11 puits dans la région à l'étude. Lorsque la variable primaire est connue à un nombre restreint de points, comme c'est le cas à Bécancour, il devient avantageux de prendre en compte des données d'une source alternative pour améliorer l'estimation.

Le krigeage par dérive externe (KED) est développé spécifiquement pour la conversion temps – profondeur de données sismiques et est utilisé à Bécancour pour convertir les surfaces modélisées dans le domaine du temps au domaine de la profondeur. Par exemple, à Bécancour, les surfaces représentant les horizons sismiques modélisés en temps-double peuvent être considérées comme une composante basse fréquence remplaçant la tendance dans le procédé du krigeage. Le KED est une option intéressante car il permet de tenir compte des variations spatiales représentées par les surfaces modélisées à partir des pointés sismiques par un terme appelé « dérive externe », tout en assurant que les profondeurs krigées des horizons respectent les profondeurs des toits de formation évaluées aux puits.

La première étape du procédé de krigeage est de calculer un variogramme spatial définissant la structure géométrique de la variable primaire (toits de formation). Dans le cas de Bécancour, puisqu'il n'y a pas suffisamment de puits disponibles (11 maximum) pour calculer des statistiques fiables, les variogrammes sont définis à partir des pointés sismiques en temps-double. Cette approche est valide si on impose l'hypothèse que la structure des variations définies sur les horizons sismiques 2D en temps-double est représentative des variations actuelles en profondeur des toits de formation. La variance est mise à l'échelle automatiquement grâce à la corrélation entre les temps d'arrivée et la profondeur. La Figure 7 présente les variogrammes expérimentaux et modélisés, calculés sur quatre azimuts sélectionnés à partir des pointés sismiques du Groupe de Trenton.

Le calage des modèles de variogrammes est effectué pour des distances limitées (portée de 2000 m maximum). Cette distance correspond au premier plateau observé sur les variogrammes expérimentaux orientés parallèles à la faille de Yamaska. Le calage des variogrammes sur des distances limitées se veut un bon compromis afin de bien représenter les grandes longueurs d'onde par la dérive externe et les petites longueurs d'onde autour des puits par le variogramme. L'effet de la dérive est clairement identifiable par l'absence de plateau sur les variogrammes expérimentaux présentés à la Figure 7. Seule la dérive externe, définie à partir des horizons modélisés en temps-double, est prise en compte pour estimer les profondeurs lorsque le plateau du variogramme modélisé est atteint.

Les modèles de variogramme sont définis indépendamment pour chaque horizon et sont utilisés pour estimer la profondeur des neuf horizons inclus dans le modèle 3D des unités stratigraphiques à Bécancour (Figure 8).

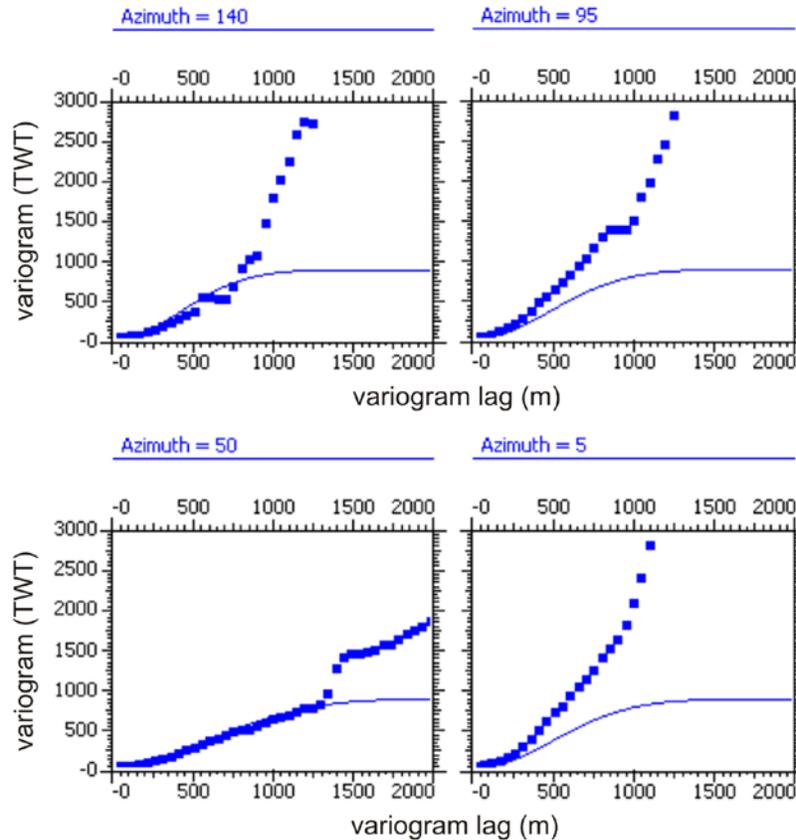


Figure 7. Variogrammes horizontaux expérimentaux (carrés bleus) et modélisés (lignes bleues) calculés à partir des pointés sismiques du Groupe de Trenton. Le variogramme modélisé est de type gaussien avec anisotropie géométrique, de portée maximale $a_1 = 1482$ m à un azimut de 48° , de portée minimale $a_2 = 1007$ m, et un plateau = 882 ms.

On observe sur la Figure 8 que les surfaces krigées en profondeur coïncident exactement avec les toits de formation identifiés aux puits. Les variations spatiales à une distance plus grande que les portées des variogrammes sont exprimées par la dérive externe représentée par les surfaces modélisées en temps-double (Figure 6). Les surfaces krigées en profondeur

présentent donc les mêmes variations spatiales que les surfaces modélisées en temps-double lorsque les points de la surface sont situés à grande distance des puits. À une distance plus petite que la portée des variogrammes, la surface krigée est conjointement influencée par l'effet du variogramme et par la dérive externe.

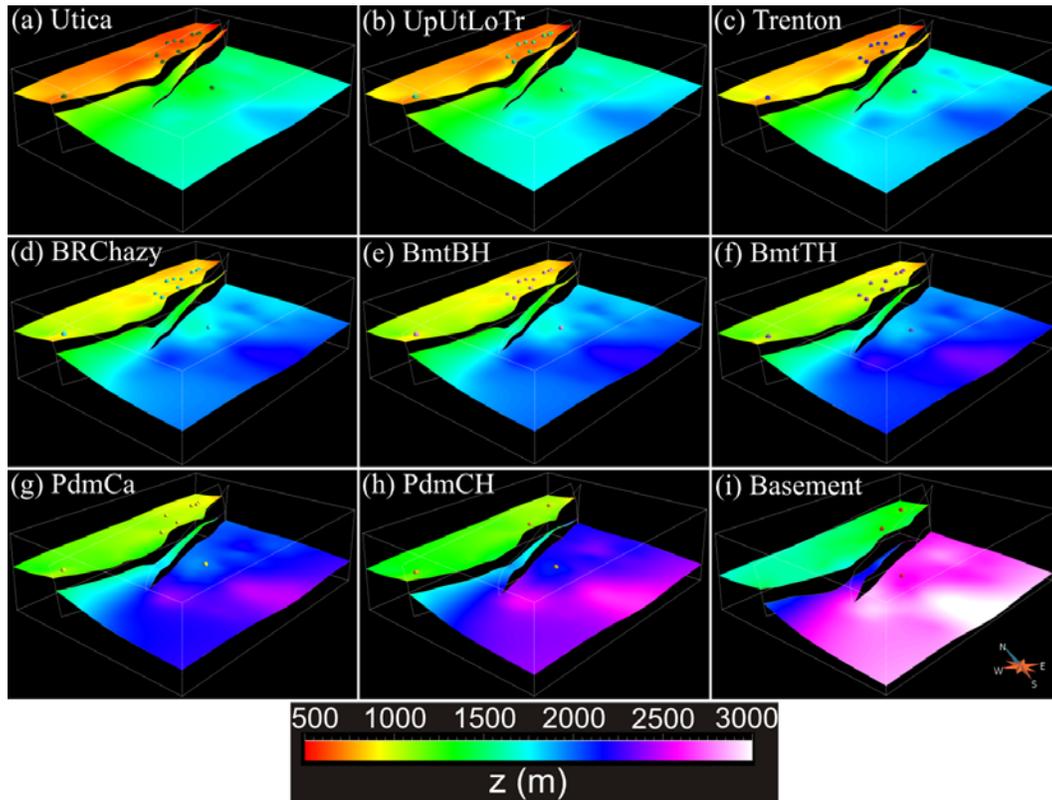


Figure 8. Surfaces krigées représentant les neuf horizons de la région de Bécancour en profondeur sous le niveau de la mer. Le cube défini par les arêtes blanches est de dimensions 13.6 km x 10.5 km x 3.2 km. Les points de couleurs sont les variables primaires du KED, représentant les toits de formation identifiés aux puits.

4. Résultats : Modèle 3D en profondeur

Le modèle 3D final des unités stratigraphiques est défini sur une grille géologique à partir des surfaces krigées en profondeur représentant les neuf horizons. Les cellules de la grille sont de dimensions 100 m x 100 m, avec une épaisseur de 60 m pour les cellules se

trouvant entre le niveau de la surface et la limite supérieure du Shale d'Utica, de 40 m pour le grès de la Formation de Covey Hill, et de 20 m pour les autres unités géologiques. Le modèle 3D a une épaisseur totale de 3200 m et contient 1 835 125 cellules. Le modèle 3D final est présenté à la Figure 9 avec un code de couleurs représentant les différentes formations.

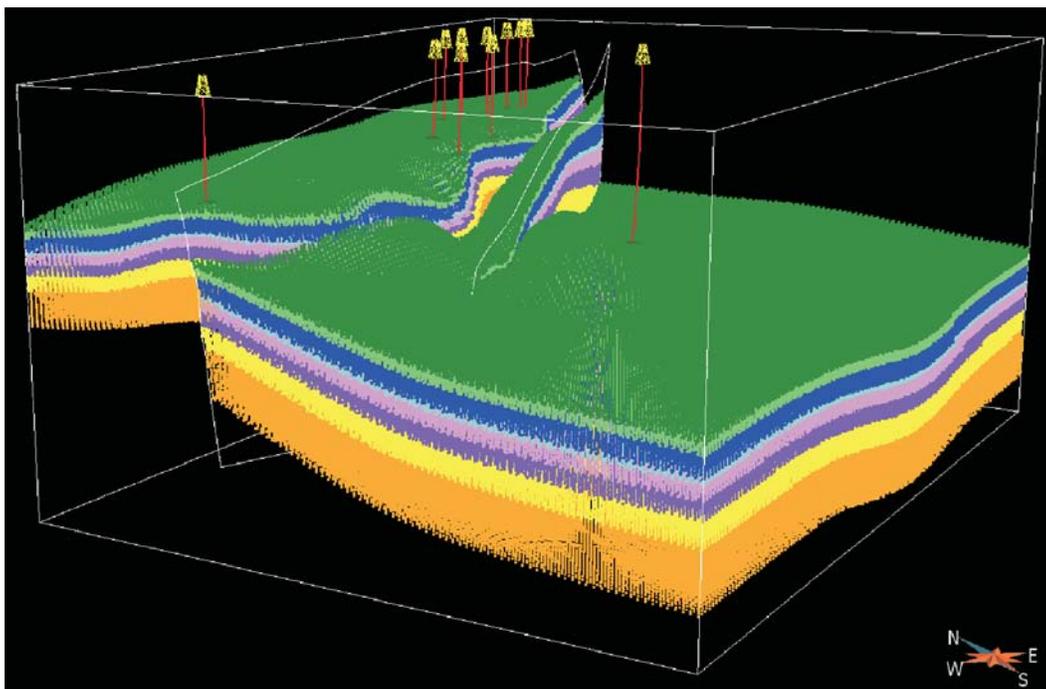


Figure 9. Représentation 3D du modèle géologique de la plate-forme du Saint-Laurent dans la région de Bécancour, avec le même code de couleurs utilisé pour les toits de formation à la Figure 3. Le modèle présente les unités stratigraphiques de la Formation de Covey Hill (orange) au Shale d'Utica (vert foncé) de bas en haut. Le cube défini par les arêtes blanches est de dimensions 13.6 km x 10.5 km x 3.2 km. La position en surface (symboles jaunes) et les trajectoires (lignes rouges) des 11 puits sont présentés.

5. Discussion

Au stade initial d'un projet de séquestration géologique de CO₂ dans un aquifère salin, peu de données sont disponibles pour modéliser avec précision le comportement d'un réservoir pour le stockage du CO₂. Il est cependant possible, à partir des données disponibles, d'estimer le potentiel de séquestration géologique en modélisant la géologie et les propriétés hydrauliques, et ainsi identifier les unités stratigraphiques principales et leur comportement général suite à une injection de CO₂.

La construction d'un modèle 3D représentant les principales unités stratigraphiques est la première étape à compléter pendant une étude de caractérisation de réservoir. Il fut décidé de construire un modèle déterministe des unités stratigraphiques de la plate-forme du Saint-Laurent dans la région de Bécancour en dépit du fait que plusieurs sources d'erreur et d'incertitude sont reconnues dans les données géophysiques disponibles à Bécancour. Même si un modèle final déterministe ne peut capturer tous les détails d'un modèle 3D précis, il s'agit d'une approche conventionnellement employée pendant cette étape de la caractérisation (Eigestad et al., 2009).

Nous reconnaissons que ce modèle final présente un niveau élevé d'incertitude, difficilement quantifiable sur la profondeur exacte des neuf horizons modélisés en tous points de la région à l'étude. Cette incertitude provient en premier lieu de la faible densité et de la qualité variable des données sismiques 2D utilisées pour construire le modèle en temps-double, et en second lieu du nombre limité de puits utilisés pour transposer cette information dans le domaine de la profondeur. Comme le mentionne Chadwick et al. (2004), l'espacement entre les lignes sismiques 2D et les puits est souvent un facteur limitatif dans la construction d'un modèle détaillé de réservoir. Le modèle final présenté dans ce rapport est perçu comme le meilleur modèle géologique 3D de la séquence stratigraphiques de la plate-forme du Saint-Laurent dans la région de Bécancour considérant la quantité limitée de données géophysiques disponibles.

L'incertitude augmente considérablement lorsqu'on s'éloigne des puits et des lignes sismiques. L'acquisition de données géophysiques additionnelles, préférablement acquises en trois dimensions, est nécessaire afin d'améliorer la précision et la résolution du modèle géologique 3D en imposant de nouvelles contraintes sur les variations spatiales de chaque horizon. La variance de krigeage calculée sur les horizons krigés en profondeur peut être utilisée de façon qualitative pour exprimer notre confiance sur les horizons modélisés en fonction de la distance par rapport aux puits. Elle n'a toutefois pas de valeur quantitative lorsque calculée dans un processus de krigeage par dérive externe tel qu'utilisé à Bécancour.

L'incertitude du modèle géologique 3D sera prise en compte lors de la modélisation des distributions des propriétés pétro-physiques qui est entreprise par des méthodes géostatistiques probabilistes. Cette étude est présentement en cours et les résultats seront présentés dans un rapport subséquent. Cette approche a déjà été testée avec succès par Polak et al. (2006) et Chapuis et al. (2011), qui ont construit des modèles structuraux 3D statiques et ont ensuite utilisé des méthodes géostatistiques pour estimer les distributions et probabilités de faciès hydrauliques dans chaque unité et ainsi introduire l'incertitude dans leur modèle respectif.

Les surfaces générées à partir des horizons sismiques et les failles pointées sur les lignes sismiques 2D sont modélisées en considérant une continuité latérale entre les points de mesure. Des failles additionnelles ou d'autres éléments structuraux peuvent être présents dans la région, mais ne sont pas détectés à cause de la qualité variable et de la faible densité des données géophysiques disponibles. Par exemple, des failles secondaires sont identifiées sur certaines lignes sismiques, mais leur prolongement latéral entre les lignes sismiques ne peut être établi avec confiance.

Ce modèle ne satisfait pas en tous points les interprétations précédentes faites sur les lignes sismiques régionales acquises dans la plate-forme du Saint-Laurent. Par exemple, contrairement au modèle exposé dans ce présent rapport, Castonguay et al. (2010) interprète la faille de Sainte-Angèle convergeant avec la faille de Yamaska, affectant la séquence sédimentaire jusqu'à la surface le long de la ligne sismique régionale M2002. Nous pensons que la résolution des lignes sismiques à Bécancour est trop faible aux temps courts pour justifier un tel prolongement de la faille de Yamaska au travers des turbidites du Groupe de Lorraine. Des données additionnelles sont nécessaires afin de mieux imager les couches plus superficielles, d'une façon similaire à celle employée par Yordkayhun et al. (2007, 2009) au site d'injection de CO₂ de Ketzin, en Allemagne.

Le principe de parcimonie est suivi pour la construction du modèle 3D, considérant que le plus simple modèle respectant toutes les contraintes géologiques et géophysiques est le modèle retenu pour la suite du projet de caractérisation des aquifères salins profonds de Bécancour.

6. Conclusions

Les résultats obtenus suite au krigeage des toits de formation (en profondeur) avec les horizons modélisés (en temps-double) comme dérive externe sont très encourageants considérant la quantité limitée de données sismiques et diagraphies disponibles. Les horizons modélisés en profondeur respectent exactement les toits de formation identifiés aux 11 puits situés dans les limites du modèle. Les variations spatiales des horizons sont évaluées à partir des données sismiques acquises en temps-double, et sont transférées dans le domaine de la profondeur en utilisant le krigeage par dérive externe. Cette approche est à privilégier pour les projets de stockage géologique de CO₂ se plaçant dans un cadre autre que pour la récupération assistée de gaz ou pétrole, où le financement peut être un facteur limitatif pour l'obtention de données géophysiques de haute qualité.

L'information obtenue des diagraphies aux puits sera utilisée pour caractériser les distributions des propriétés pétro-physiques des différentes formations. Les horizons krigés seront intégrés afin de modéliser les distributions de la porosité et de la perméabilité pour chaque unité stratigraphique par une approche géostatistique. Ces informations seront ensuite utilisées pour effectuer des simulations d'écoulement dans les aquifères salins profonds de la région de Bécancour.

7. Remerciements

La présente étude a été réalisée grâce au support du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de Parcs du Québec. Nous remercions Junex Inc. pour nous donner accès aux données sismiques et de diagraphies utilisées dans cette étude. Seismic MicroTechnology a mis à notre disposition le programme d'interprétation sismique *Kingdom Suite* utilisé dans cette étude grâce à une licence académique d'utilisation.

Références

- Castonguay, S., Lavoie, D., Dietrich, J., et Laliberté, J.Y., 2010. Structure and petroleum plays in the St. Lawrence Platform and Appalachians in southern Quebec: insights from interpretation of MRNQ seismic reflection data, *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 58, 219-234.
- Chadwick, R., Sweigel, P., Gregersen, U., Kirby, G., Holloway, S., et Johannessen, P., 2004. Geological reservoir characterization of a CO₂ storage site: The Utsira Sand, Sleipner, northern North Sea, *Energy*, 29, 1371-1381.
- Chapuis, F., Bauer, H., Grataloup, S., Leynet, A., Bourguin, B., Castagnac, C., Fillacier, S., Lecompte, A., Le Gallo, Y., et Bonijoly, D., 2011. Geological investigations for CO₂ storage : from seismic and well data to 3D modeling, *Energy Procedia*, 4, 4591-4598.
- Claprood, M., Konstantinovskaya, E., Duchesne, M., Giroux, B., Malo, M., Massé, L., et Lavoie, J., 2010. Joint sonic log – 2D seismic analysis to model the petro-physical properties of aquifers for CO₂ storage in the Bécancour area, Québec, Canada, *in*: Conference GeoCanada 2010, Working with the Earth, Calgary, Canada. http://chaireco2.ete.inrs.ca/?q=en/publications_en.
- Delhomme, J.P., Boucher, M., Meunier, G., et Jensen, F., 1981. Apport de la géostatistique à la description de gaz en aquifère. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 26, 309-327.
- Doveton, J.H., 1986. Log analysis of subsurface geology – Concepts and computer methods: John Wiley & Sons, New York, 273p.
- Dubrule, O., 2003. Geostatistics for seismic data integration in earth models. Distinguished Instructor Series, No.6, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA. Sponsored by the Society of Exploration Geophysicists and the European Association of Geoscientists & Engineers.
- Eigestad, G., Dahle, H., Hellevang, B., Riis, F., Johansen, W., et Oian, E., 2009. Geological modeling and simulation of CO₂ injection in the Johansen Formation. *Computational Geosciences*, 13, 435-450.
- Konstantinovskaya, E., Claprood, M., Duchesne, M., Giroux, B., Malo, M., et Lefebvre, R., 2010a. Le potentiel de stockage du CO₂ expérimental dans les aquifères salins profonds de Bécancour: Partie I: Analyse des diagraphies et des profils sismiques. Rapport : INRSCO2-2010-V2.1. INRS-ETE. http://chaireco2.ete.inrs.ca/?q=fr/publications_fr.
- Konstantinovskaya, E., Claprood, M., Duchesne, M., Malo, M., Bédard, K., Giroux, B., Massé, L., et Marcil, J.-S., 2010b. Preliminary geological and geophysical study of a potential CO₂ storage site in deep saline aquifers of the Bécancour area, St. Lawrence Lowlands, Québec, *in*: Conference GeoCanada 2010, Working with the Earth, Calgary, Canada. http://chaireco2.ete.inrs.ca/?q=en/publications_en.
- Leguijt, J., 2009. Seismically constrained probabilistic reservoir modeling. *The Leading Edge*, 28, 1478-1484.
- Mallet, J.L., 2002. Geomodeling. Oxford University Press, New York, USA.
- Polak, S., Zweigel, J., Lindeberg, E., Pannetier-Lescoffit, S., Schulz, H.M., Faber, E., Teschner, M., Poggenburg, J., May, F., Krooss, B., Alles, S., Kunaver, D., Mawa-Isaac, E., et Zweigel, P., 2006. The Atzbach-Schwanenstadt gas field – A potential site for onshore CO₂ storage and EGR, *The Leading Edge*, 25, 1272-1275.
- Süss, M., et Shaw, J., 2003. P wave seismic velocity structure derived from sonic logs and industry reflection data in the Los Angeles basin, California. *Journal of Geophysical Research*, 108, 2170.
- Yilmaz, O., 2001. Seismic data analysis: Processing, inversion and interpretation of seismic data. Investigations in Geophysics No.10, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA.
- Yordkayhun, S., Juhlin, C., Giese, R., et Cosma, C., 2007. Shallow velocity-depth model using first arrival traveltimes inversion at the CO₂SINK site, Ketzin, Germany, *Journal of Applied Geophysics*, 63, 68-79.
- Yordkayhun, S., Tryggvason, A., Norden, B., Juhlin, C., et Bergman, B., 2009. 3D seismic traveltimes tomography imaging of the shallow subsurface at the CO₂SINK site, Ketzin, Germany, *Geophysics*, 74, G1-G15.