



**Modélisation géologique 3D du bassin des
Basses-Terres du Saint-Laurent**

RAPPORT FINAL
INRSCO2-2013-V1.5

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-1439

TABLE DES MATIÈRES

PRÉAMBULE	5
SOMMAIRE	6
1. INTRODUCTION	7
2. GÉOLOGIE DU BASSIN DES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT	7
3. MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D DU BASSIN DES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT	10
3.1. Données de base.....	10
3.1.1. <i>Données de puits</i>	10
3.1.2. <i>Carte géologique</i>	11
3.1.3. <i>Carte structurale du toit du socle</i>	15
3.1.4. <i>Analyse structurale des données géoscientifiques</i>	15
3.2. Modélisation géologique 3D.....	18
3.2.1. <i>Failles normales</i>	18
3.2.2. <i>Sommet du socle précambrien</i>	21
3.2.3. <i>Sommets des unités géologiques</i>	23
3.2.4. <i>Modèle volumique</i>	23
4. ANALYSE DU MODÈLE GÉOLOGIQUE 3D	26
4.1. Épaisseur des unités.....	26
4.2. Discordances sédimentaires locales	26
4.3. Géologie de surface	26
5. CONCLUSIONS.....	28
RÉFÉRENCES	29

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 la modélisation géologique 3D du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent cadre dans le volet inventaire.

Sommaire

Au Québec, le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent a été identifié comme étant celui qui présente le meilleur potentiel de stockage géologique du CO₂. Pour mieux évaluer et analyser ce bassin, un modèle géologique 3D faillé a été conçu avec le logiciel GOCAD®. Les données de base utilisées pour la construction de ce modèle géologique 3D faillé sont : (1) la carte géologique de surface ; (2) la carte structurale du toit du socle précambrien ; (3) les données de puits réinterprétées à partir des diagraphies ; ainsi que (4) l'interprétation des linéaments structuraux.

Treize (13) failles normales ont été intégrées dans le modèle géologique 3D. Ces failles ont été modélisées car elles sont associées à des déplacements verticaux importants dans le bassin. Celles-ci ont toutes été créées avec un pendage régulier de 60° perpendiculaire au tracé général de chacune des failles. Les failles de chevauchement associées à la déformation du bassin cambro-ordovicien des Appalaches n'ont pas été modélisées.

Chacune des unités géologiques suivantes a été modélisée en trois dimensions dans le bassin : (1) la Formation de Covey Hill (Groupe de Potsdam); (2) la Formation de Cairnside (Groupe de Potsdam); (3) la Formation de Theresa (Groupe de Beekmantown); (4) la Formation de Beauharnois (Groupe de Beekmantown); (5) les groupes de Chazy/Black River/Trenton; (6) le Shale d'Utica inférieur; (7) le Shale d'Utica supérieur; et (8) les roches-couverture indifférenciées (groupes de Sainte-Rosalie, de Lorraine et de Queenston).

Le modèle géologique 3D permet de réaliser plusieurs analyses comme les variations d'épaisseur des unités géologiques, l'identification de discordances locales dans la succession sédimentaire, la correction de la géologie de surface ainsi que des calculs de volume d'unités géologiques. D'ailleurs, ce modèle géologique 3D faillé été utilisé afin de calculer les capacités de stockage de CO₂ sur l'ensemble du bassin des Basses-Terres du St-Laurent, faisant l'objet d'un rapport distinct.

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. Au Québec, le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent a été identifié comme étant celui qui présente le meilleur potentiel de stockage géologique du CO₂ et qu'il est le bassin à prioriser pour les études plus poussées (Figure 1 et Figure 2) (Bédard *et al.*, 2011; Malo et Bédard, 2012).

L'étape suivante consiste à évaluer la capacité de stockage du CO₂ du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. Cette évaluation nécessite une connaissance plus fine du bassin, particulièrement de la géométrie de ses unités géologiques, car le volume des unités-réservoirs ciblées pour le stockage du CO₂ doit être connu pour calculer la capacité de stockage. En conséquence, l'évaluation doit être basée sur la construction d'un modèle géologique 3D fiable.

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). Il est limité par le socle précambrien de la Province de Grenville au nord-ouest et 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 des Appalaches (Castonguay *et al.*, 2010). Le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent est chevauché au sud-est par le bassin cambro-ordovicien des Appalaches, dont la limite entre ces deux bassins est marquée par la Ligne de Logan. À cet endroit, les roches de du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent se retrouvent imbriquées sous forme d'écailles de chevauchement. La Figure 2 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 du bassin 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 silicoclastiques à grains fins des groupes du Shale d'Utica, de Sainte-Rosalie et de Lorraine sont considérées comme des roches-couverture (Figure 3).

Dans le cadre de la présente étude sur la capacité de stockage du bassin, seules les roches autochtones de la plate-forme sont modélisées et évaluées. Les roches des écailles de chevauchement n'ont donc pas été incluses car la modélisation de leur géométrie aura été trop complexe, car trop peu de données existent à leur sujet à l'échelle du bassin.

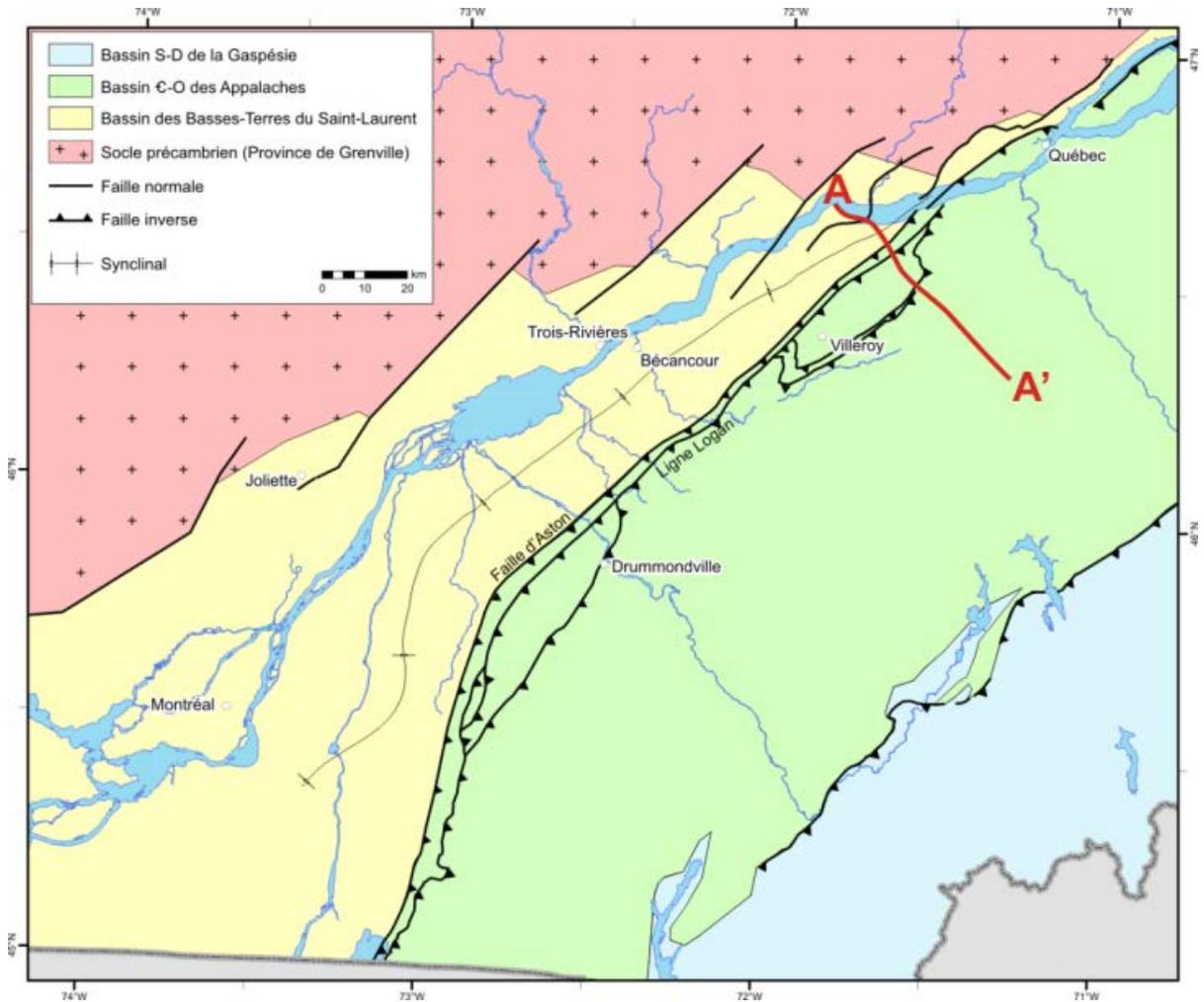


Figure 1 – Carte des bassins sédimentaires du sud du Québec. S-D : siluro-dévonien. C-O : cambro-ordovicien. Ligne A-A' : ligne sismique M-2001 (voir Figure 2).

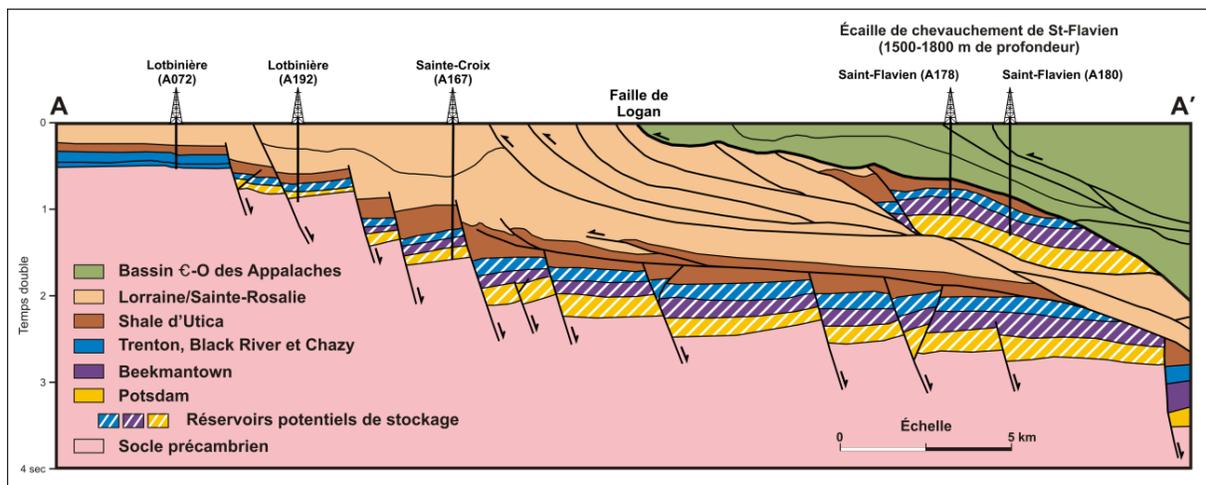


Figure 2 – Architecture du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent le long de la ligne sismique M-2001. Voir Figure 1 pour localisation. Adaptée de Castonguay *et al.* (2010).

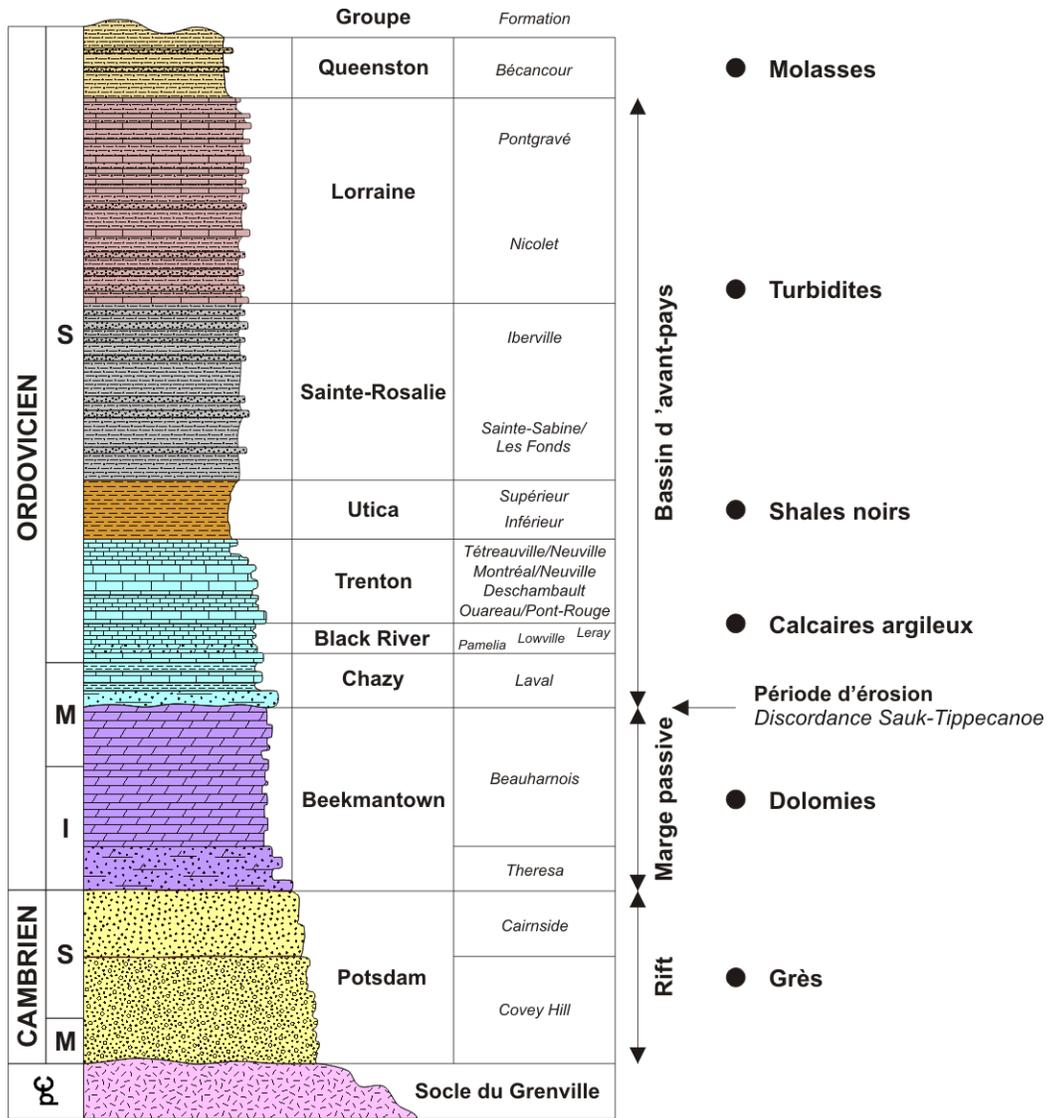


Figure 3 – Colonne stratigraphique des Basses-Terres du Saint-Laurent (modifiée de Comeau *et al.*, 2012).

3. Modélisation géologique 3D du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent

3.1. Données de base

Les données de base utilisées pour la modélisation géologique 3D sont la carte géologique, la carte structurale du toit du socle précambrien, les données de puits ainsi que l'interprétation des linéaments réalisée par Viasat Geotechnologies pour les besoins de la Chaire (VIASAT, 2011).

3.1.1. Données de puits

Les sommets des formations rencontrées dans les puits sont utilisés afin d'estimer la profondeur et l'épaisseur des unités interprétées dans le modèle 3D. Comme les données d'origine disponibles au Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) 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; Comeau *et al.*, 2013). Une fois ces données corrigées dans quatre-vingts (80) puits possédant des diagraphies, elles ont été utilisées pour estimer la profondeur des unités dans les modèles 3D. Les sommets analysés dans les puits sont les suivant :

- Utica supérieur : identifié dans 63 puits
- Utica inférieur : identifié dans 53 puits
- Trenton/Black River/Chazy : identifié dans 77 puits
- Beauharnois : identifié dans 51 puits
- Theresa : identifié dans 29 puits
- Cairnside : identifié dans 45 puits
- Covey Hill : identifié dans 28 puits
- Précambrien : identifié dans 22 puits

Les sommets des formations dans les puits qui n'ont pas été réinterprétés ont été utilisés dans la mesure où leur interprétation était jugée adéquate et qu'ils correspondaient bien aux réinterprétations des autres puits.

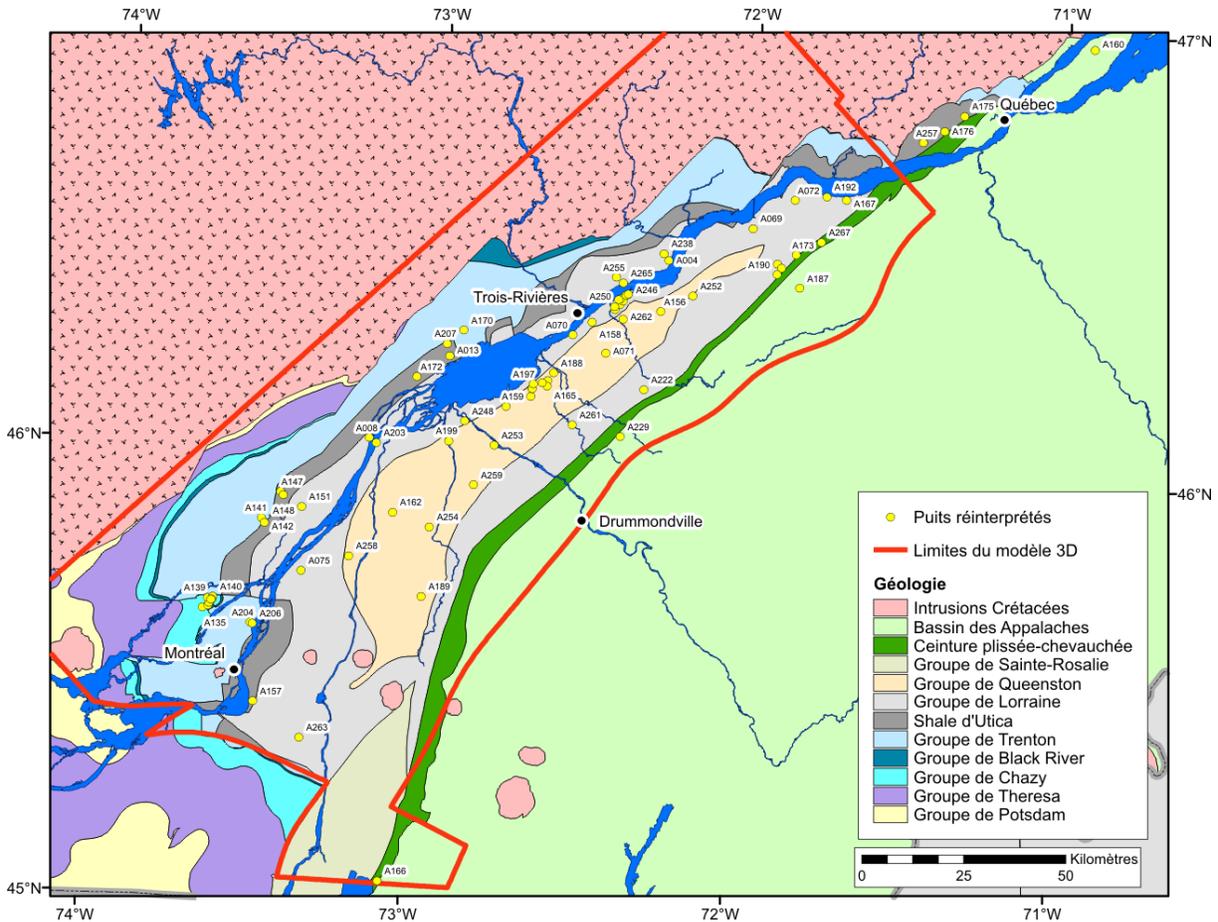


Figure 4 – Carte géologique du sud-ouest du Québec (adaptée du Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG), 2008). Localisation des puits réinterprétés et limites du modèle géologique 3D.

3.1.2. Carte géologique

La carte géologique du sud du Québec permet de connaître les unités présentes en affleurement et celles situées directement sous les dépôts meubles. Ceci a permis de contraindre en surface les interprétations du modèle géologique 3D (Figure 4).

Cependant, suite à l'analyse des puits, la position des unités à la surface a dû être réinterprétée à certains endroits. En effet, il existe des incohérences entre les unités identifiées dans les puits et les unités définies sur la carte géologique. Les incohérences sont surtout présentes aux endroits où la Formation de Nicolet peut être confondue avec le Shale d'Utica et où le Shale d'Utica n'est pas bien différencié du sommet du Groupe de Trenton. Ainsi, les limites entre ces trois unités, sur la carte géologique, ont été respectées dans la mesure du possible lors de la modélisation 3D selon les indications des données de puits qui étaient jugées plus fiables.

Par exemple, dans la région de l'Assomption dans Lanaudière (Figure 5), les puits A142, A147 et A148 rencontrent le Groupe de Lorraine immédiatement sous les dépôts meubles tandis que la carte géologique indique plutôt la présence du Shale d'Utica à la surface. De même, le puits A141 rencontre du Shale d'Utica sous les dépôts meubles tandis que la carte indique plutôt le Groupe de Trenton. Le contact entre ces unités doit donc être déplacé afin de bien respecter les données de puits que l'on juge plus fiable. On semble voir que la limite entre le Shale d'Utica et le Groupe de Trenton sur la carte géologique actuelle correspond plutôt à la limite entre le Groupe de Lorraine et le Shale d'Utica selon les réinterprétations.

Dans la région de Montréal (Figure 6), le puits A204 débute dans le Groupe de Trenton tandis que le puits A206 débute dans le Shale d'Utica. Comme les deux puits sont très près l'un de l'autre, il est possible de préciser la localisation de la limite entre les deux

groupes sur la carte géologique. Sur cette même figure on note aussi que les puits situés à Laval débutent tous dans le Groupe de Chazy, ce qui est cohérent avec la carte géologique.

Dans la région de Maskinongé (Figure 7), le puits A170 débute dans le Shale d'Utica tandis que la carte géologique indique plutôt la présence du Groupe de Trenton à la surface. La faille présente entre le puits A170 et le groupe de puits à l'ouest (A013, A172 et A207) n'a pas été modélisée dans le modèle 3D du bassin car son déplacement n'était pas significatif à cette échelle, ce qui ne veut pas dire qu'elle n'est pas présente en réalité. Cependant, la limite entre le Shale d'Utica et le Groupe de Trenton à l'est de la faille est réinterprétée et est déplacée vers le nord-ouest pour être cohérente avec les données du puits A170.

Finalement, dans la région de Québec (Figure 8), les puits A175, A176 et A 257 débutent tous dans le Groupe de Lorraine tandis que la carte géologique montre du Shale d'Utica à la surface. Le contact entre ces deux groupes doit donc être déplacé vers le nord-ouest pour être cohérent avec les données de puits. Ceci est également appuyé par les interprétations de St-Julien (1995) et Castonguay (2002) qui indiquent la présence du Groupe de Lorraine entre la faille de chevauchement et le Shale d'Utica.

Comme les incohérences notées se situent aux limites entre les groupes de Lorraine, d'Utica et de Trenton, elles proviennent certainement du fait que la définition du Shale d'Utica a évolué avec le temps et que les différents géologues avaient des idées différentes sur ses limites (ex.: Clark, 1947; Clark et Globensky, 1973; Trempe, 1978; Globensky, 1987, 1993; St-Julien, 1995; Thériault, 2012). Ceci a pour conséquence de déplacer les limites entre ces trois groupes vers le nord-ouest par rapport aux limites actuelles de la carte géologique (Globensky, 1987; MRNF, 2008).

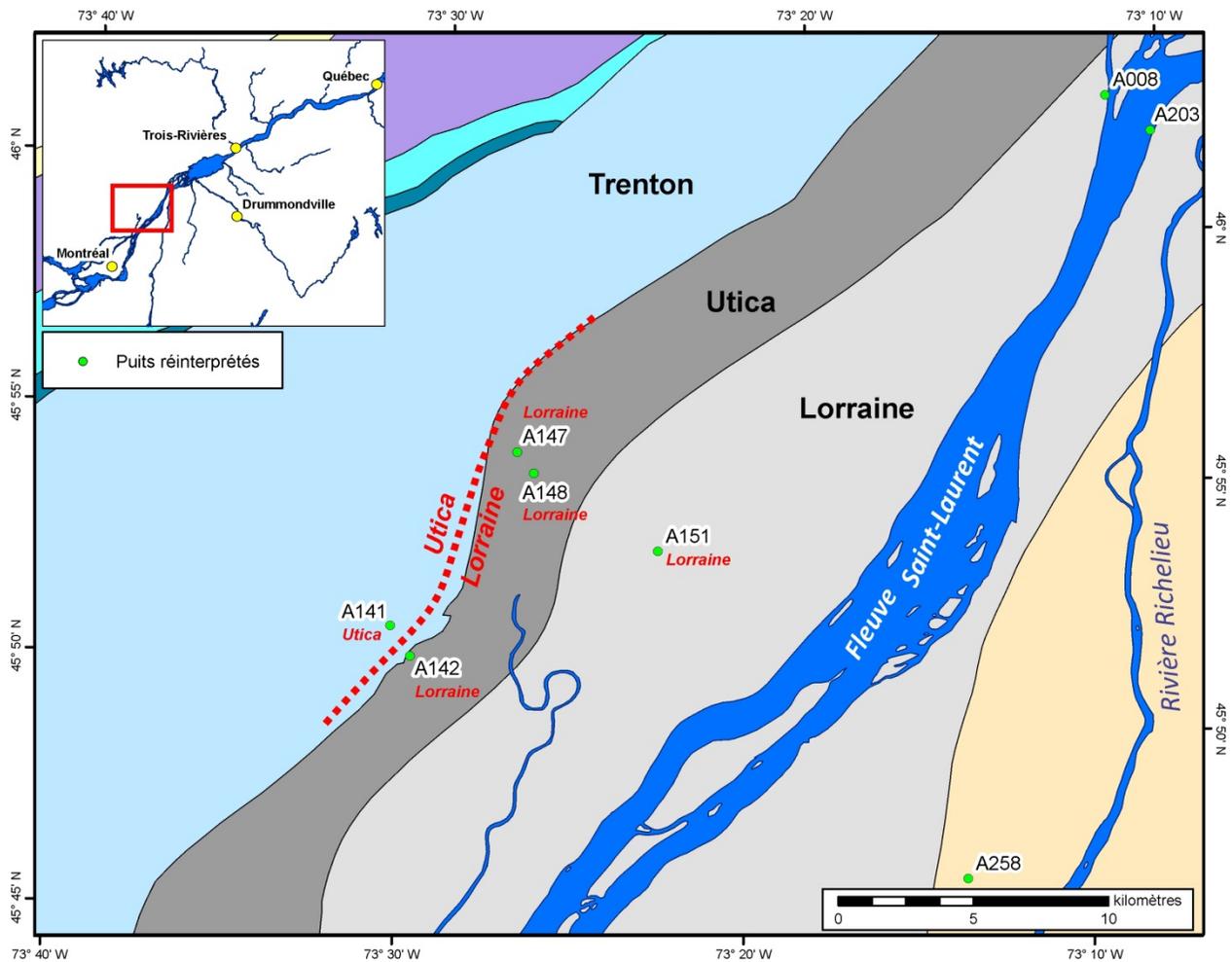


Figure 5 – Région de L'Assomption montrant les incohérences entre les données de puits et la carte géologique actuelle (groupes de Trenton, du Shale d'Utica et de Lorraine en noir). Les nouvelles interprétations approximatives des limites des unités sont en rouge sur la carte. Voir la figure 4 pour associer les patrons de couleur aux unités géologiques.

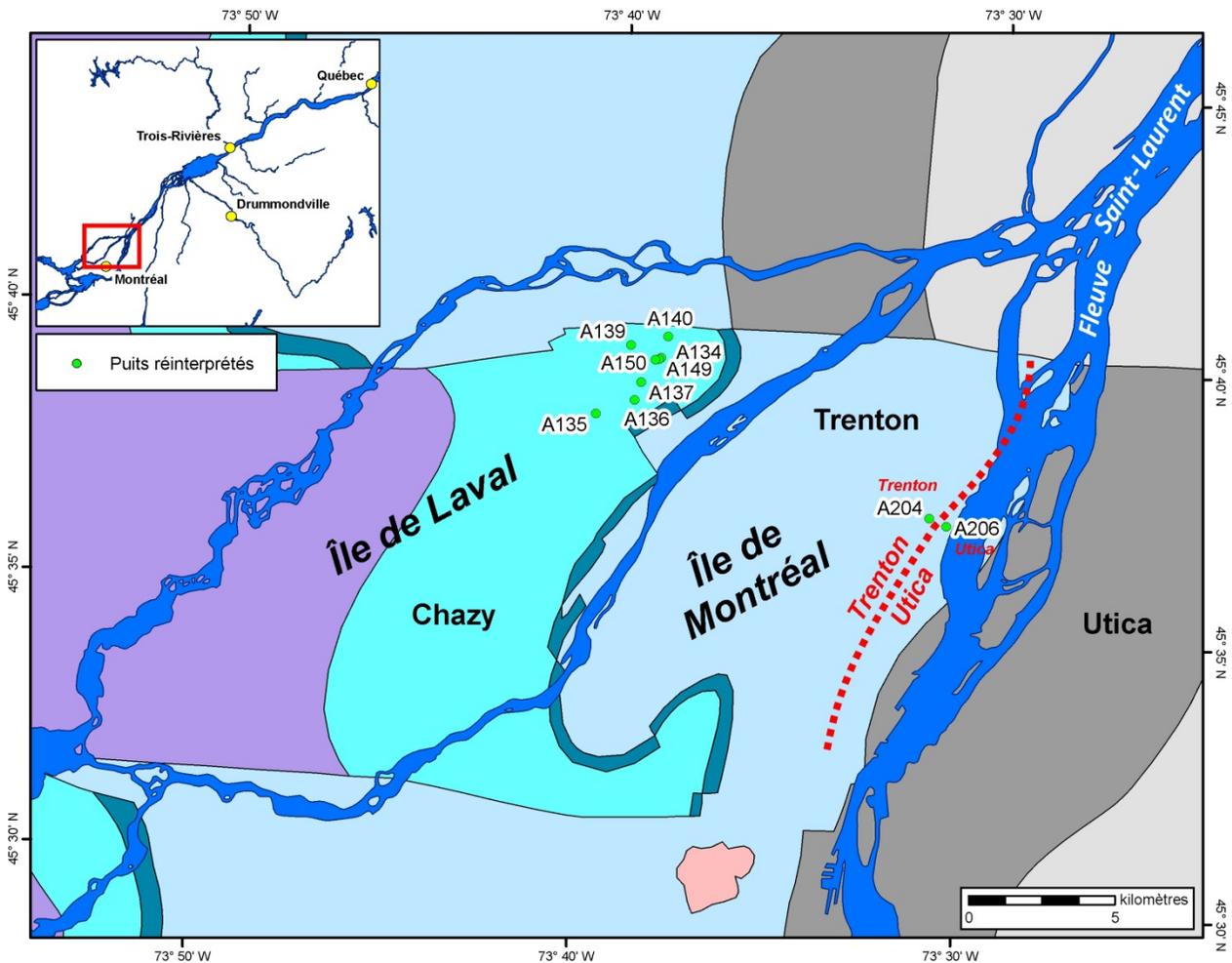


Figure 6 – Région de Montréal montrant les incohérences entre les données de puits et la carte géologique actuelle (groupes de Chazy, de Trenton et du Shale d’Utica en noir). Les nouvelles interprétations approximatives des limites des unités sont en rouge sur la carte. La géologie de surface est cependant confirmée sur l’Île de Laval où les puits et la carte géologique actuelle montrent tous le Groupe de Chazy à la surface. Voir la figure 4 pour associer les patrons de couleur aux unités géologiques.

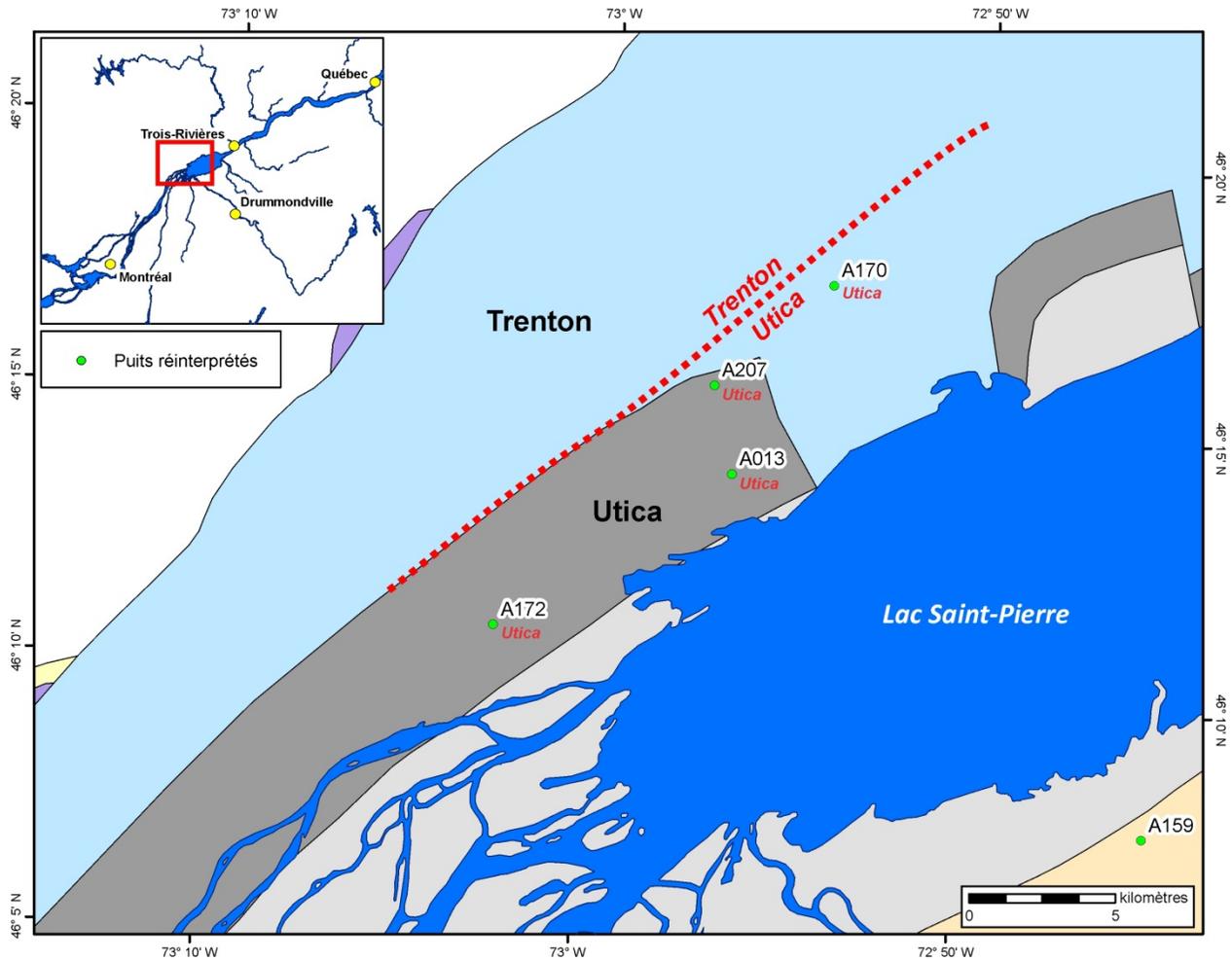


Figure 7 – Région de Maskinongé montrant les incohérences entre les données de puits et la carte géologique actuelle (groupes de Trenton et du Shale d’Utica en noir). Les nouvelles interprétations approximatives des limites des unités sont en rouge sur la carte. Voir la figure 4 pour associer les patrons de couleur aux unités géologiques.

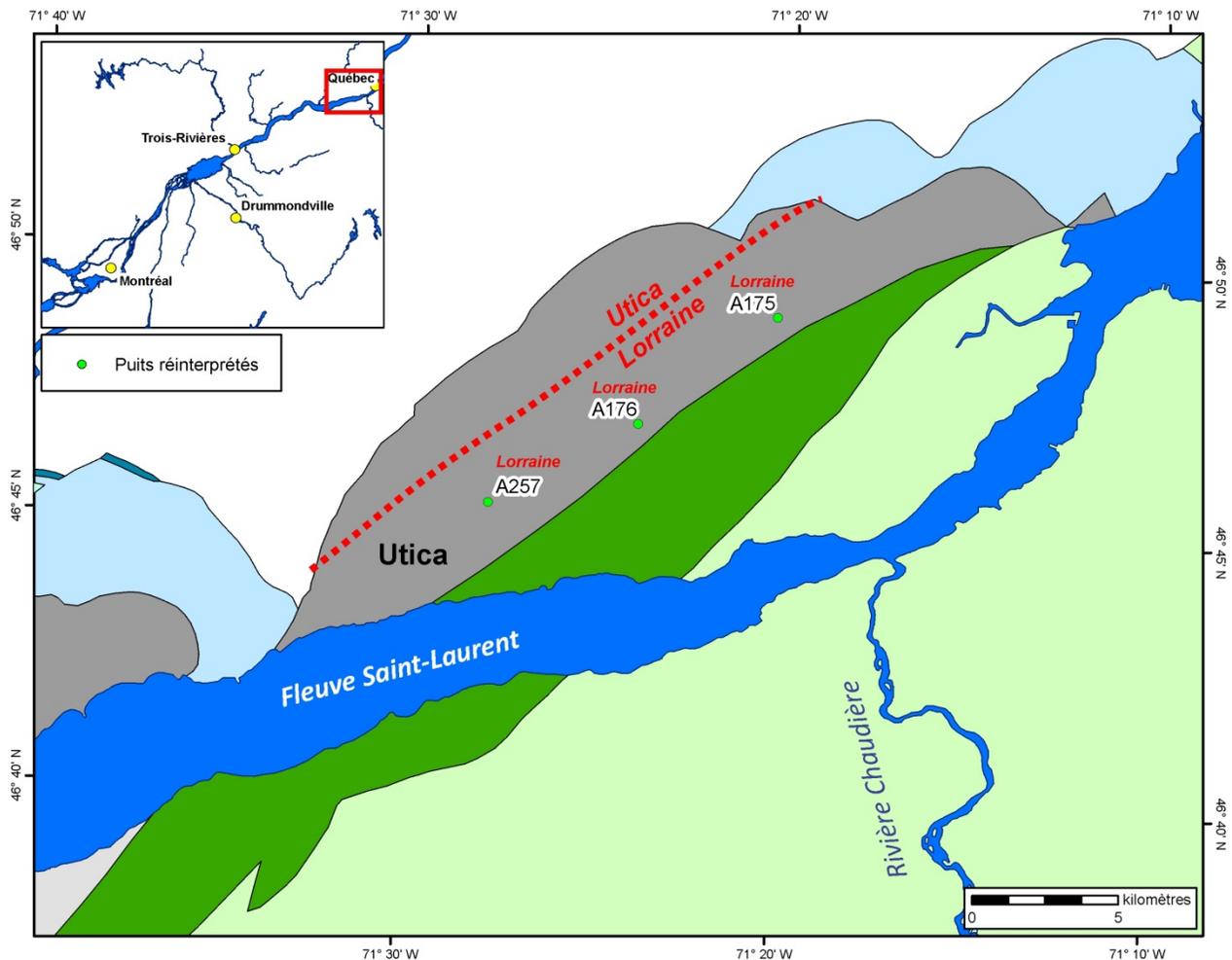


Figure 8 – Région de Québec montrant les incohérences entre les données de puits et la carte géologique actuelle (Shale d’Utica en noir). Les nouvelles interprétations approximatives des limites des unités sont en rouge sur la carte. Voir la figure 4 pour associer les patrons de couleur aux unités géologiques.

3.1.3. Carte structurale du toit du socle

La carte structurale du toit du socle précambrien est une interprétation, réalisée initialement par SOQUIP (1984), des données sismiques illustrant la géométrie du socle précambrien dans le domaine temporel (en temps double), puis digitalisé par la suite par le MRN (SIGPEG, 2009) (Figure 9). 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 géologique 3D en profondeur. Ainsi, la géométrie reconnue sur les profils sismiques est transposée conformément aux profondeurs obtenues à partir des données de puits.

La carte structurale du toit du socle précambrien a également été utilisée afin d’intégrer en profondeur les failles normales au modèle géologique 3D.

3.1.4. Analyse structurale des données géoscientifiques

L’interprétation des linéaments majeurs a été réalisée par la firme VIASAT GeoTechnologies pour les besoins de la Chaire. Les objectifs de l’étude étaient d’effectuer une analyse structurale régionale basée sur des données satellitaires, des données topographiques et des données géophysiques ainsi que d’établir la géométrie et la cinématique probable des systèmes de fractures interprétées (VIASAT, 2011).

Les résultats de cette étude sont utilisés afin de mieux

définir les failles normales présentes dans le bassin. Les failles normales sont également interprétées à l'aide de la carte structurale du socle précambrien (Figure 9). Il existe cependant des régions non couvertes par cette carte structurale où les

interprétations des linéaments majeurs viennent combler les espaces vides. De plus, la comparaison des deux interprétations permet de confirmer la présence de certaines failles et d'affiner leur position et géométrie.

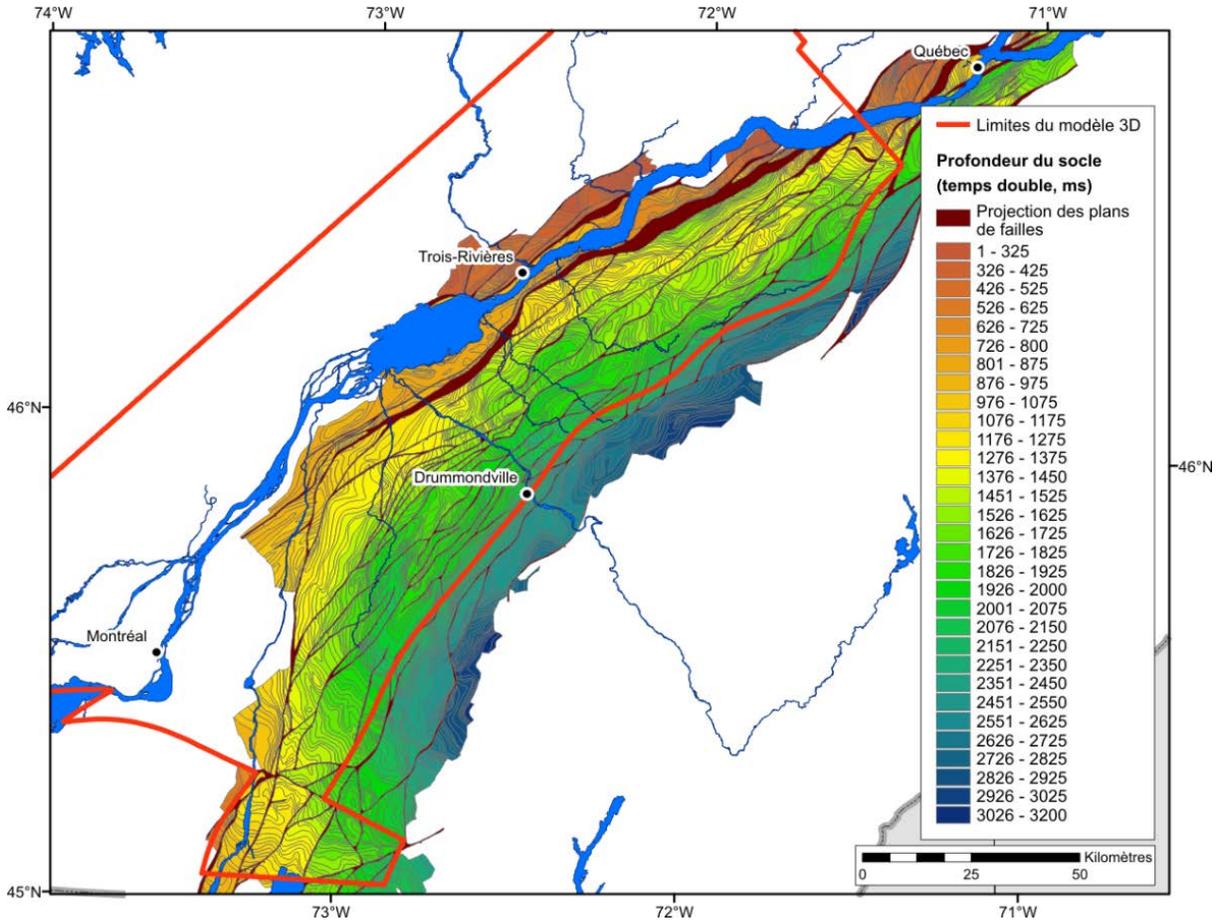


Figure 9 – Carte structurale du toit du socle précambrien en temps (modifiée de Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG), 2009).

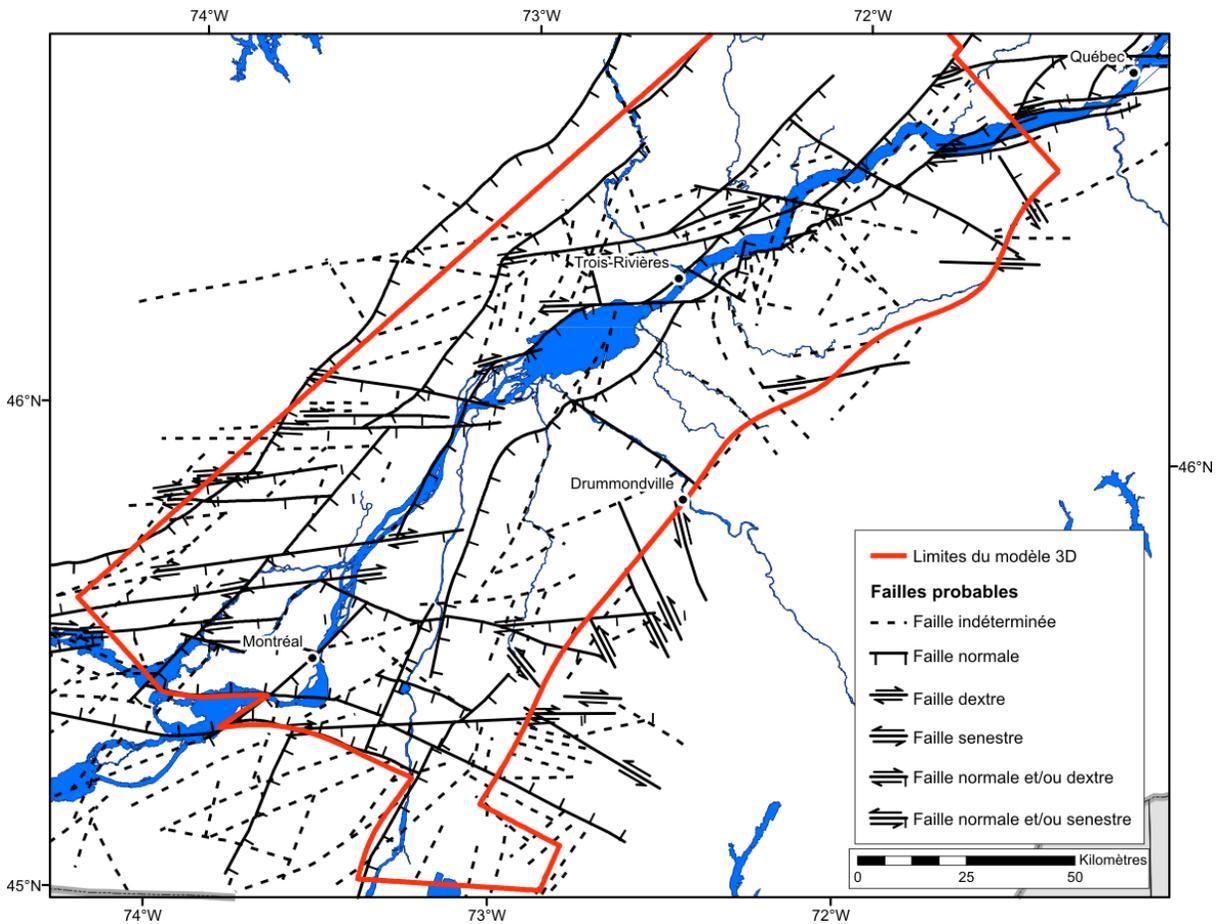


Figure 10 –Faillies interprétées par VIASAT (2011). Les failles de chevauchement ne sont pas représentées afin d’alléger la carte et parce qu’elles n’ont pas été utilisées dans cette étude.



Figure 11 – Méthodologie de construction et d'analyse du modèle géologique 3D.

3.2. 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 méthodologie suivie est présentée dans la Figure 11.

3.2.1. Failles normales

Treize (13) failles normales ont été intégrées dans le modèle géologique 3D (Figure 12 et Figure 13). Ces failles normales ont été modélisées car elles sont associées à des déplacements verticaux importants

dans le bassin. Comme peu d'informations existent sur le pendage des failles normales dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent, elles ont toutes été modélisées avec un pendage constant de 60° perpendiculaire au tracé des failles. Le positionnement des failles normales a été réalisé à l'aide de la carte géologique (Globensky, 1987) et des interprétations de VIASAT (2011) pour les failles qui affleurent en surface. Pour celles qui n'affleurent pas, la carte structurale du toit du socle précambrien a été utilisée pour les positionner avec également l'aide des interprétations de VIASAT (2011) (voir les sections 3.1.3 et 3.1.4). Le Tableau 1 répertorie les failles normales qui ont été modélisées et quelles sources

d'information ont été utilisées pour construire le tracé de ces failles.

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.

Les failles de Deschambault, de Saint-Prosper, de Saint-Cuthbert et de Lachute (Figure 12 et Figure 13) indiquent la limite entre le bassin sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent et le socle précambrien au nord ; elles sont donc identifiées de façon assez fiable sur la carte géologique. Les signes de leur présence sont des escarpements ainsi que des juxtapositions de roches de la partie supérieure de la succession sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent directement avec le socle précambrien (Clark et Globensky, 1973, 1975, 1976a, b; Globensky, 1982a). Leur position est aussi confirmée par les interprétations de VIASAT. Le tracé de la faille de Saint-Cuthbert (Figure 12 et Figure 13) a été modifié en fonction des interprétations de VIASAT.

Les failles de Sainte-Rose, du Rapide-du-Cheval-Blanc, de Sainte-Anne-de-Bellevue, de Delson et de Tracy Brook (Figure 12 et Figure 13) sont identifiées en surface sur la carte géologique. Les tracés de ces failles sur la carte géologique ne sont pas liés à des observations directes des failles sur le terrain mais plutôt à l'observation d'unités géologiques discordantes très près l'une de l'autre, situation improbable sans la présence de failles (Clark, 1972; Globensky, 1982b, 1985). Les interprétations de VIASAT permettent de préciser le tracé des failles du Rapide-du-Cheval-Blanc, de Sainte-Anne-de-Bellevue

et de Delson en surface.

Le prolongement des failles de Deschambault vers le sud-ouest et de Delson vers le sud-est a été tracé à l'aide des interprétations de VIASAT. Il n'est cependant pas possible de déterminer l'ordre chronologique du mouvement des failles de Delson, de Tracy Brook et de Notre-Dame-du-Bon-Conseil. C'est pourquoi ces failles se croisent sans que l'une ne soit déplacée par l'autre.

La position des failles localisées plus en profondeur dans le bassin, qui n'affleurent donc pas à la surface, a été définie à l'aide de la carte structurale du toit du socle précambrien (SOQUIP, 1984; SIGPEG, 2009). Cinq (5) failles ont ainsi 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 de direction SO-NE. Le nombre de failles présentes est plus élevé dans la réalité mais leur importance à l'échelle du bassin était négligeable. 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. Ces failles ont été nommées en fonction de la toponymie de surface ou de leur nom assigné antérieurement : failles de Yamaska, de Grand-Saint-Esprit, de Saint-Wenceslas, de Tracy-Brook et de Notre-Dame-du-Bon-Conseil (en ordre, du fleuve Saint-Laurent vers le sud-est) (Figure 12 et Figure 13).

La faille la plus connue est la faille de Yamaska (en jaune sur la Figure 13) qui longe la rive sud du Fleuve Saint-Laurent. Sa position a été interprétée à l'aide de la carte structurale du toit du socle précambrien (SOQUIP, 1984; SIGPEG, 2009) et de l'interprétation de VIASAT (2011). La faille de Yamaska est aussi rencontrée dans quelques puits (A027, A125, A165, A188), ce qui permet de la positionner de façon fiable à ces endroits.

Tableau 1 – Failles normales intégrées au modèle géologique 3D et sources d'information utilisées pour leur construction.

Failles	Carte géologique	VIASAT	Surface du socle	Interprétations à partir des puits
Deschambault	X	X	X	
Saint-Prosper	X	X		
Saint-Cuthbert	X	X		
Lachute	X	X		
Sainte-Rose	X			
Rapide-du-Cheval-Blanc	X	X		
Sainte-Anne-de-Bellevue	X	X		
Delson	X	X	X	
Tracy Brook	X	X	X	
Yamaska		X	X	X
Grand-Saint-Esprit			X	
Saint-Wenceslas			X	

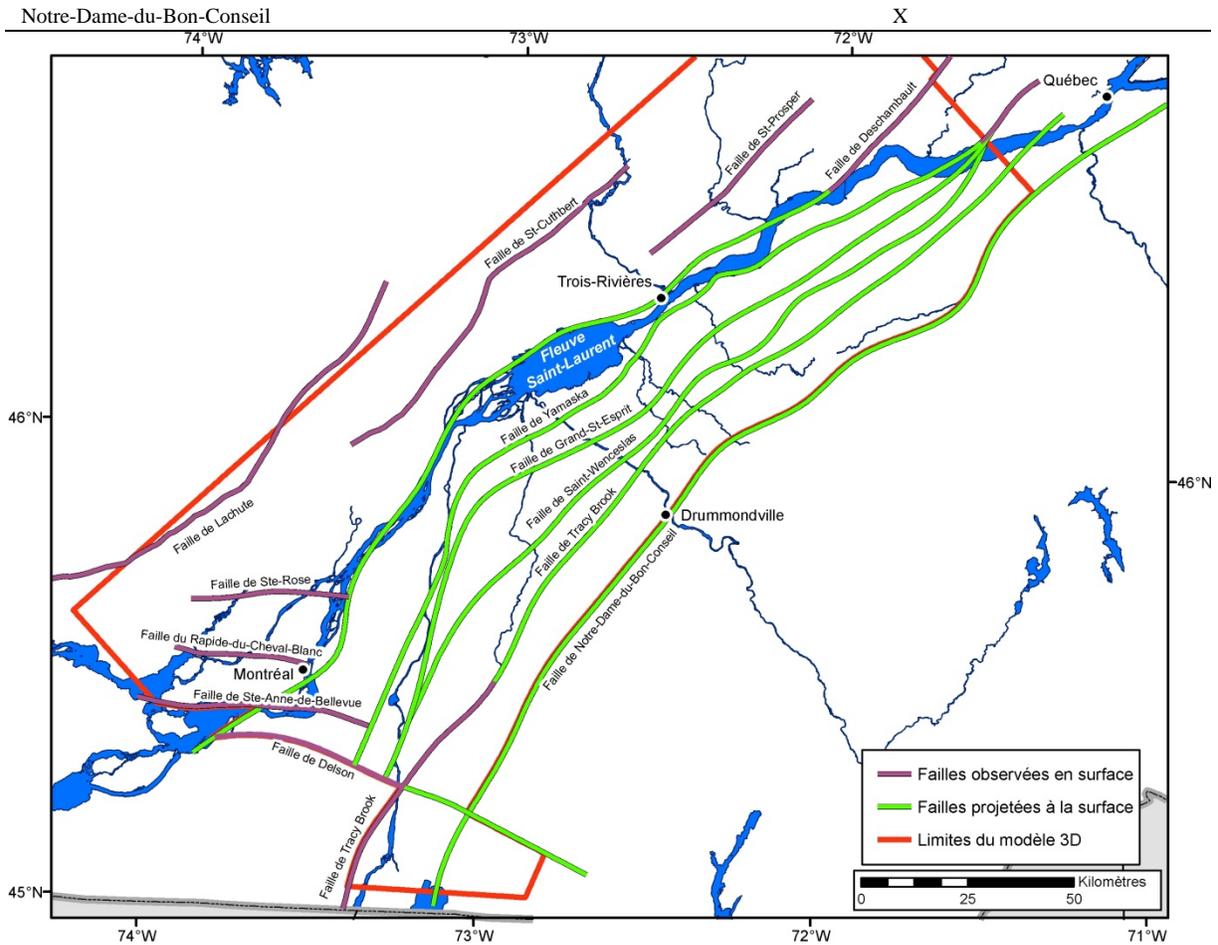


Figure 12 – Projection des failles normales interprétées et modélisées à la surface.

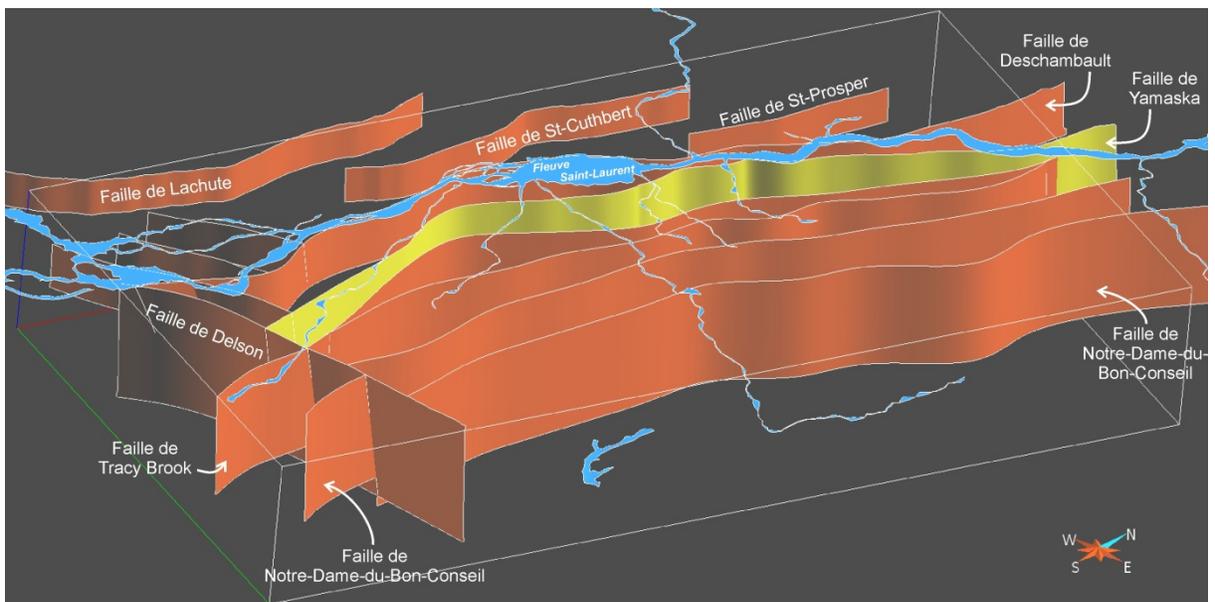


Figure 13 – Ensemble des failles normales modélisées en 3D. La surface jaune représente la faille de Yamaska. Entre les failles de Yamaska et de Notre-Dame-du-Bon-Conseil, on retrouve, du nord au sud, les failles de Grand-Saint-Esprit, de Saint-Wenceslas et de Tracy-Brook. Exagération verticale : 5X.

3.2.2. Sommet du socle précambrien

La seconde étape de la modélisation consistait à construire la surface du sommet du socle précambrien, 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 précambrien.

La problématique principale était de convertir les profondeurs du socle précambrien en temps provenant de la carte structurale en profondeur réelle. Concrètement, les données du socle précambrien ont été séparées selon les blocs de failles majeurs. Les données de chaque bloc de failles ont ensuite été déplacées verticalement pour correspondre de façon

globale aux profondeurs du sommet du socle précambrien dans les puits présents dans ce bloc de faille (Figure 14). De plus, les données de la carte structurale jugées moins fiables ou trop variables ont été éliminées afin de simplifier la modélisation à l'échelle du bassin.

Ce sont donc ces données localisées aux profondeurs adéquates qui ont été utilisées pour modéliser la surface du sommet du socle précambrien (Figure 15) à l'aide d'interprétations et de techniques d'interpolation en 3D. De plus, la surface a été contrainte à l'aide des contacts au niveau du sol provenant de la carte géologique.

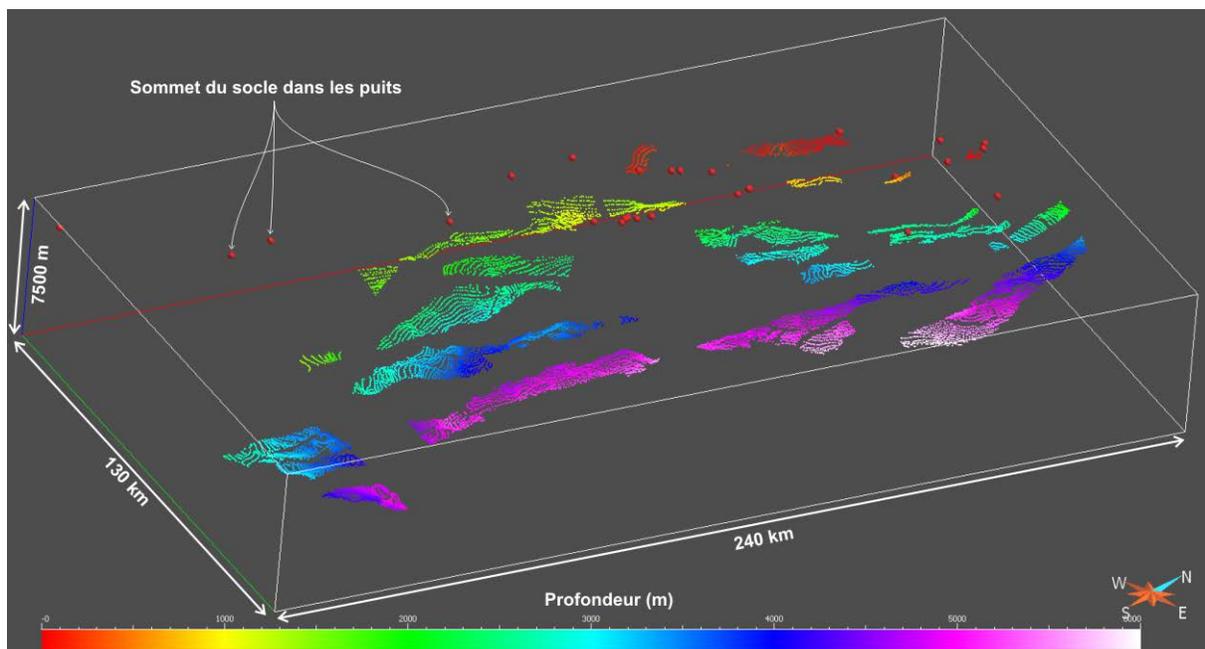


Figure 14 – Données utilisées pour modéliser la surface du socle précambrien. Les points rouges représentent le sommet du socle précambrien identifié dans les puits. Les points multicolores représentent les données de la carte structurale du socle précambrien converties en profondeur. L'échelle de couleur de la profondeur varie de 0 à 6000 mètres. Exagération verticale : 5X.

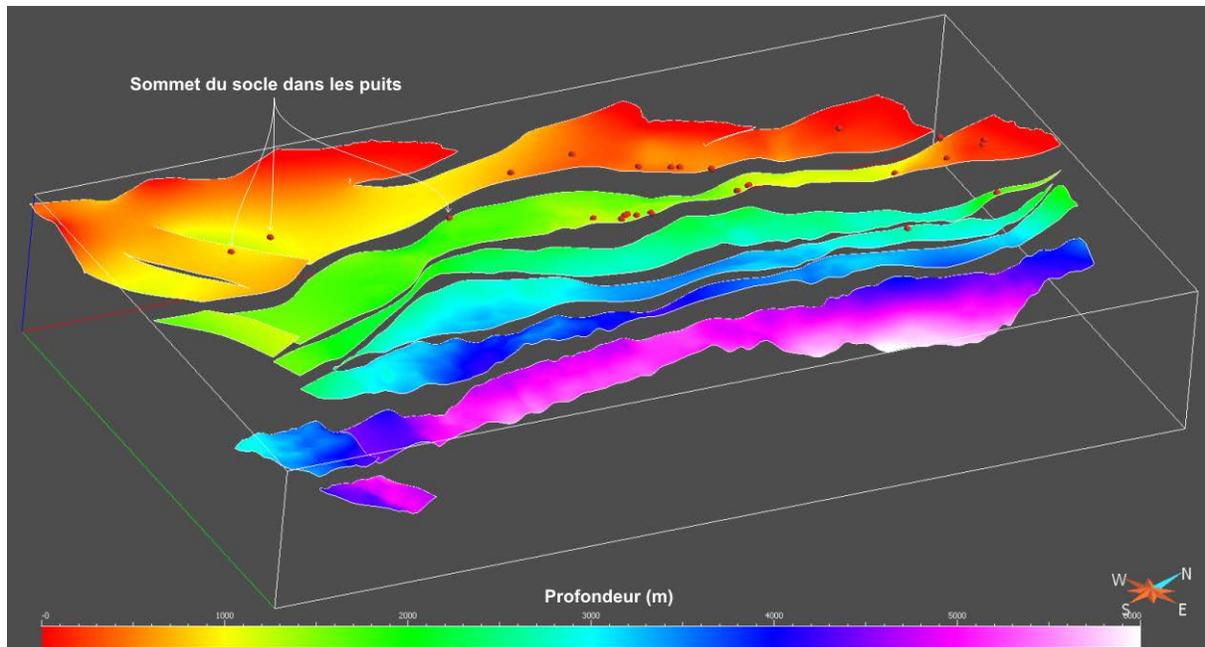


Figure 15 – Socle précambrien en profondeur. L'échelle de couleur de la profondeur varie de 0 à 6000 mètres. Les points rouges représentent le sommet du socle précambrien identifié dans les puits. Exagération verticale : 5X.

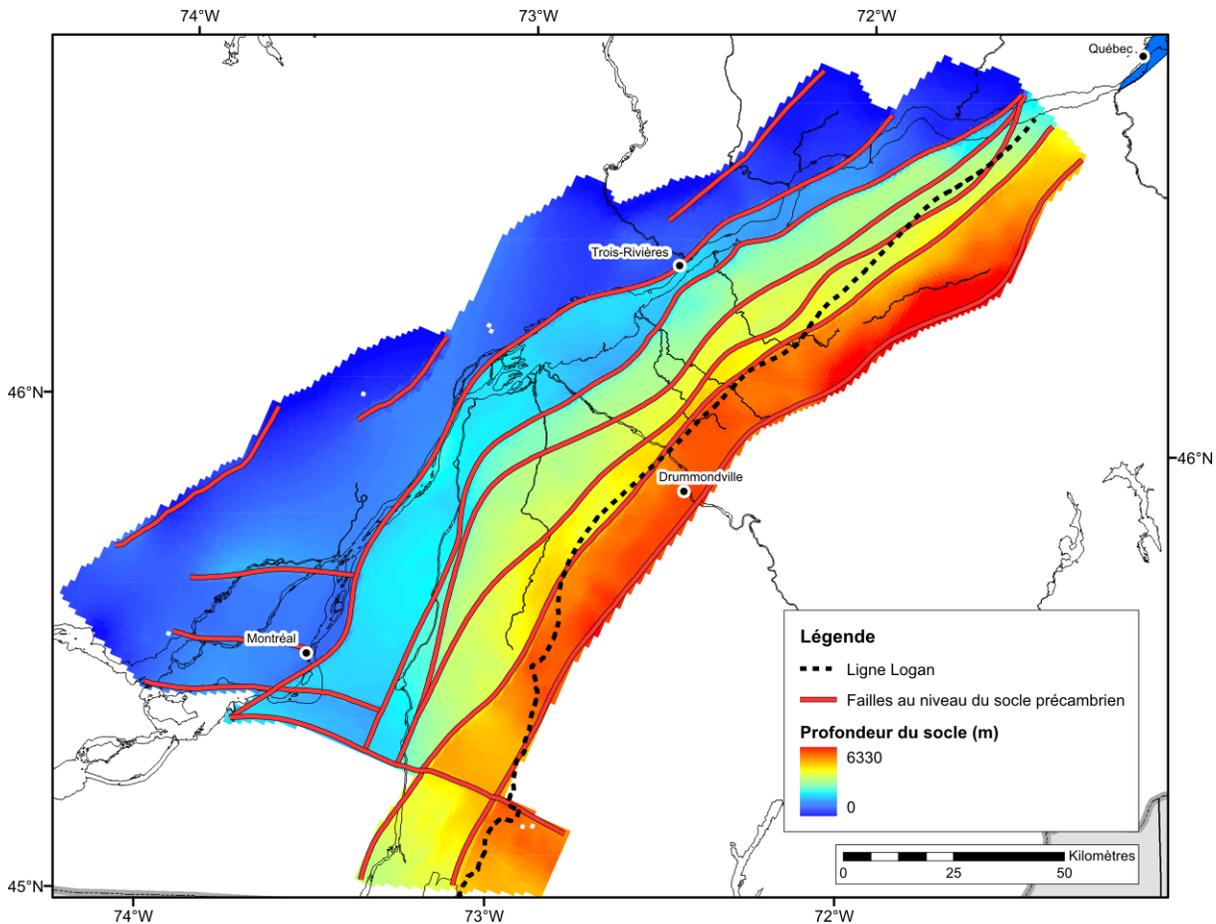


Figure 16 – Carte de la profondeur du socle précambrien modélisé.

3.2.3. Sommets des unités géologiques

Une fois la surface du sommet 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 (Figure 17).

Les surfaces ont été contraintes à l'aide des connaissances géologiques du bassin qui indiquent la présence ou l'absence de certaines unités dans certaines régions spécifiques. Par exemple, les unités des groupes de Beekmantown (Figure 17-4 et -5) et de Potsdam (Figure 17-2 et -3) ne sont pas présentes dans la partie nord-est du bassin au nord de la faille de Yamaska où le Groupe de Trenton est en contact avec le socle précambrien. De même, les unités du Groupe de Beekmantown (Figure 17-4 et -5) ne sont pas présentes dans la partie nord-est du bloc de faille limité par les failles de Deschambault et de Yamaska où le Groupe de Trenton est en contact direct avec le Groupe de Potsdam. (Figure 17)

De plus, chacune des surfaces a été contrainte 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.

Finalement, les surfaces ont été contraintes à l'aide des contacts au niveau du sol provenant de la carte géologique dans la mesure où les contacts étaient jugés fiables.

3.2.4. Modèle volumique

Lorsque toutes les surfaces des sommets des unités géologiques ont été modélisées, un modèle volumique a été construit en remplissant l'espace entre chacune des surfaces pour chacun des blocs de faille 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 18).

Comme la capacité de traitement des ordinateurs utilisés pour la modélisation 3D est limitée, la quantité de cellules (voxels) du modèle devait être également

limitée. Compte tenu de cette contrainte, et afin de respecter la géométrie du bassin où les changements les plus importants se produisent avec 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.

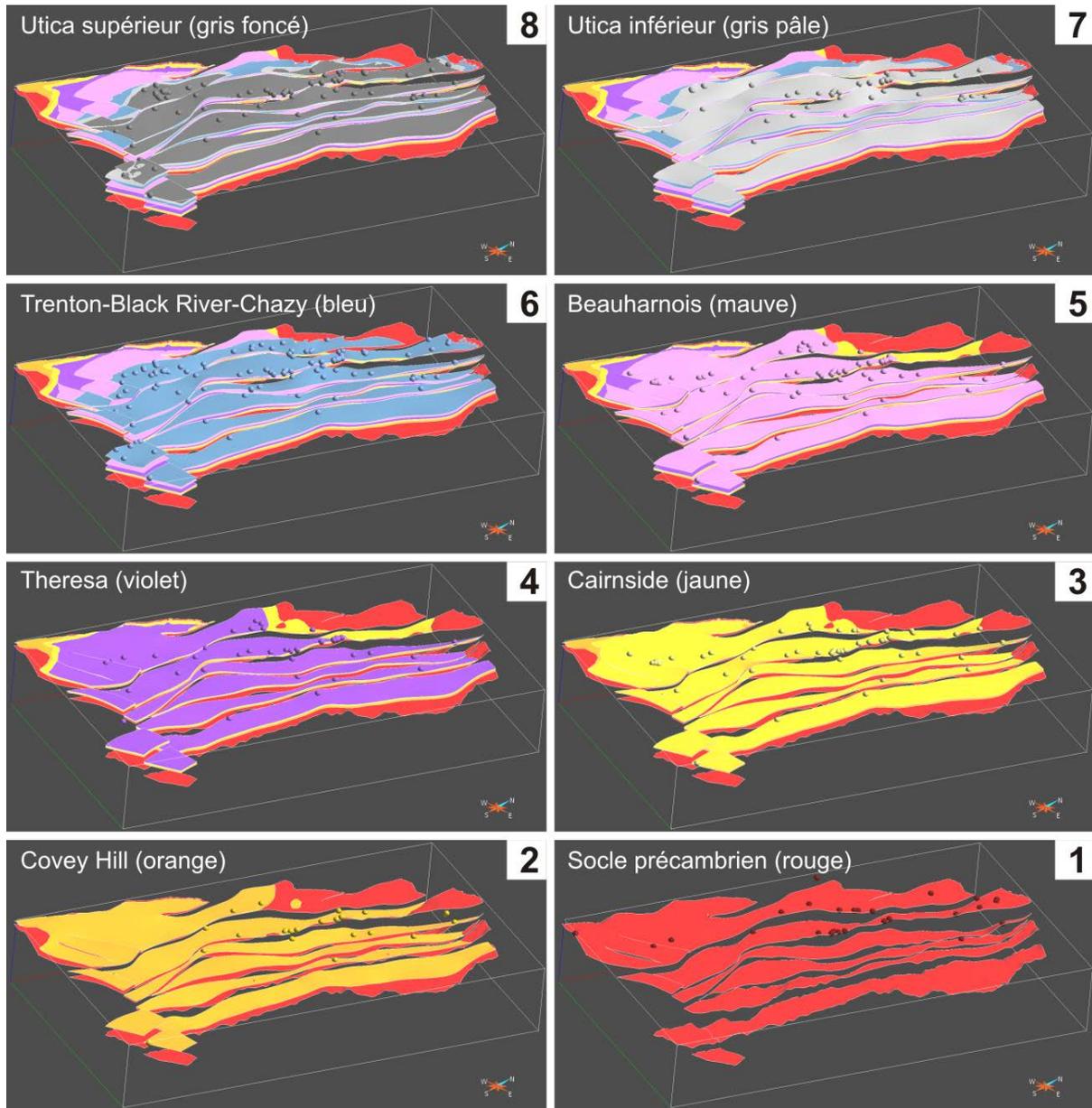


Figure 17 – Modèle géologique 3D en surfaces du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les surfaces représentent le sommet des différentes unités modélisées. Les points de couleurs représentent les positions des sommets des différentes unités dans les puits. Exagération verticale : 5X.

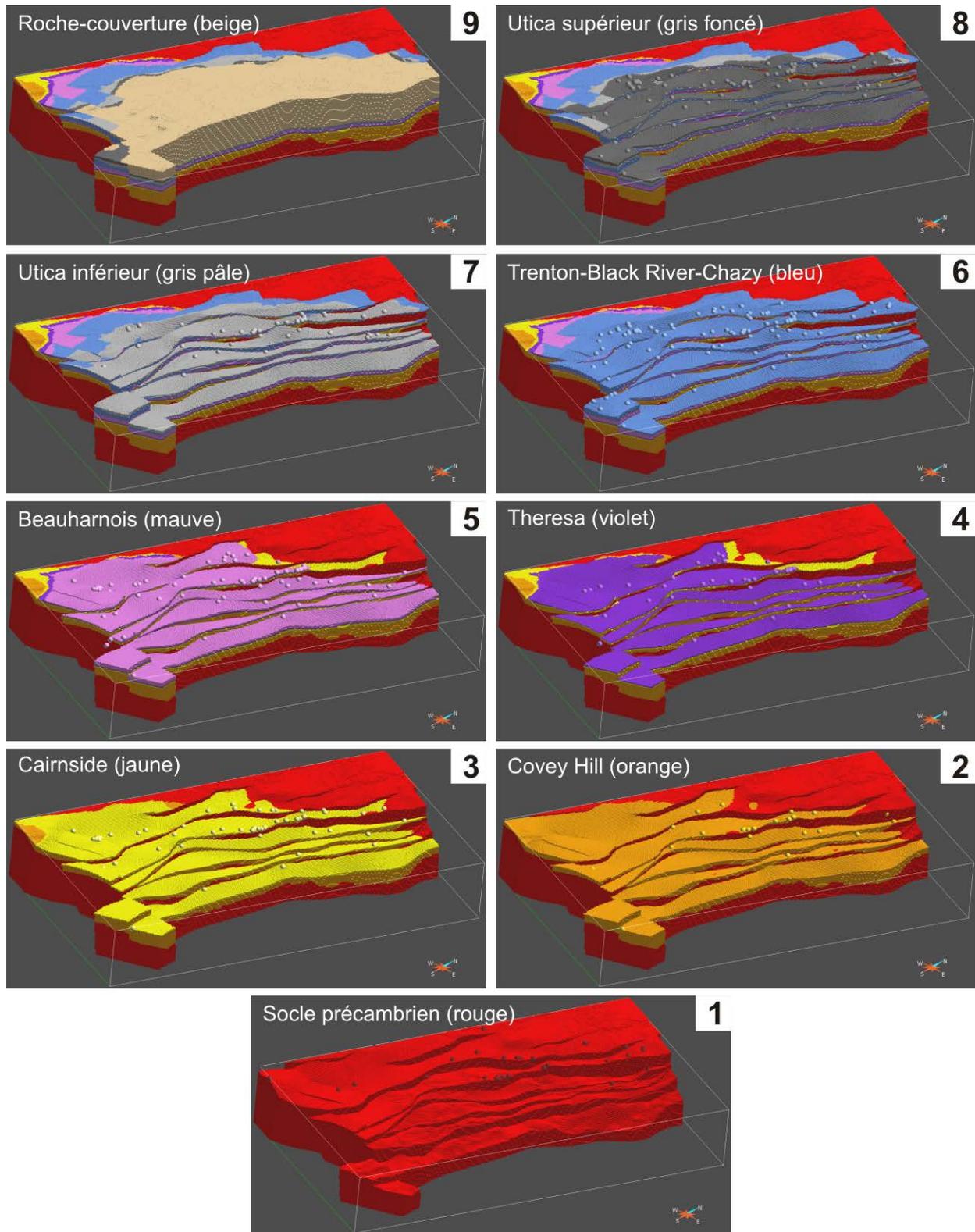


Figure 18 – Modèle géologique 3D volumique du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les points de couleurs représentent les positions des sommets des unités dans les puits. Exagération verticale : 5X.

4. Analyse du modèle géologique 3D

Le modèle géologique 3D permet d'analyser certaines caractéristiques du bassin comme les variations d'épaisseur des unités, d'identifier des discordances locales dans la succession sédimentaire, de préciser certains éléments géologiques en surface (failles, contacts lithologiques).

D'ailleurs, le modèle géologique 3D a déjà été utilisé pour calculer les capacités de stockage de CO₂ à l'échelle du bassin (Bédard *et al.*, 2012).

4.1. Épaisseur des unités

Le modèle géologique 3D montre que l'épaisseur des unités augmente généralement avec la profondeur dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent comme le montrent les Figure 19 et Figure 20 pour le Shale d'Utica et le Groupe de Potsdam qui sont à la base et au sommet de la succession sédimentaire. Ces résultats sont concordants avec les études antérieures qui affirmaient que les épaisseurs des unités augmentaient vers le sud-est du bassin (Konstantinovskaya *et al.*, 2009; Castonguay *et al.*, 2010).

La Figure 19 montre cependant une diminution de l'épaisseur du Shale d'Utica dans le dernier bloc de faille modélisé au sud-est du bassin. Comme très peu de puits sont présents dans ce bloc de faille et que le Shale d'Utica pourrait y être coupé par les failles de chevauchement associées au bassin cambro-ordovicien des Appalaches, ce bloc de faille n'est pas considéré dans l'analyse de la variation d'épaisseur pour le Shale d'Utica.

La région au sud-ouest du bassin, au sud de la faille de Delson (Figure 12 et Figure 13), représente un cas particulier. Les puits présents dans ces blocs de faille montrent des profondeurs et des épaisseurs d'unités très différentes du reste du bassin ce qui suggère un régime sédimentaire différent. En effet, la succession sédimentaire y est beaucoup plus épaisse qu'ailleurs dans le bassin. À ce jour, aucune hypothèse n'est formulée pour expliquer ce phénomène mais plus d'attention devrait y être portée dans le futur.

4.2. Discordances sédimentaires locales

La construction du modèle géologique 3D permet de montrer l'étendue de discordances sédimentaires locales ou absence de dépôt dans le bassin observés dans plusieurs puits. Les Figure 17 et Figure 18 permettent de visualiser ces discordances locales au sein de la succession sédimentaire.

On note l'absence, au nord-est du bassin modélisé, des unités des groupes de Potsdam et de Beekmantown. L'unité de Trenton/Black River/Chazy repose en effet directement sur le socle précambrien. Une hypothèse avancée est que, dans cette région, le socle précambrien émergeait au moment du dépôt des groupes de Potsdam et de Beekmantown et qu'il se serait par la suite enfoncé sous le niveau marin au moment du dépôt de l'ensemble Trenton/Black River/Chazy. Une autre hypothèse serait que les unités des groupes de Potsdam et de Beekmantown aient été complètement érodées à la fin du dépôt de la Formation de Beauharnois et ferait partie de la grande discordance régionale de Sauk-Tippecanoe qui s'étend sur toute l'Amérique du Nord (Lavoie *et al.*, 2003).

Dans la région centrale du modèle, on note l'absence des unités du Groupe de Beekmantown (Figure 21). Dans cette région, l'ensemble Trenton/Black River/Chazy repose en discordance sur le Groupe de Potsdam. L'hypothèse avancée pour expliquer ce phénomène est que, lors de la période d'érosion de Sauk-Tippecanoe, cette région était plus élevée et que les unités supérieures de la succession aient été érodées tandis qu'elles étaient préservées dans les régions plus profondes.

4.3. Géologie de surface

La modélisation géologique 3D permet de préciser la position en surface de certains éléments géologiques comme les failles et les contacts d'unités lithologiques. Notre interprétation est différente de la carte géologique actuelle (Globensky, 1987; MRNF, 2008) pour les raisons citées dans la section 3.1.2 de ce rapport. À des fins de validation, il serait cependant intéressant d'aller vérifier ces nouvelles interprétations directement sur le terrain.

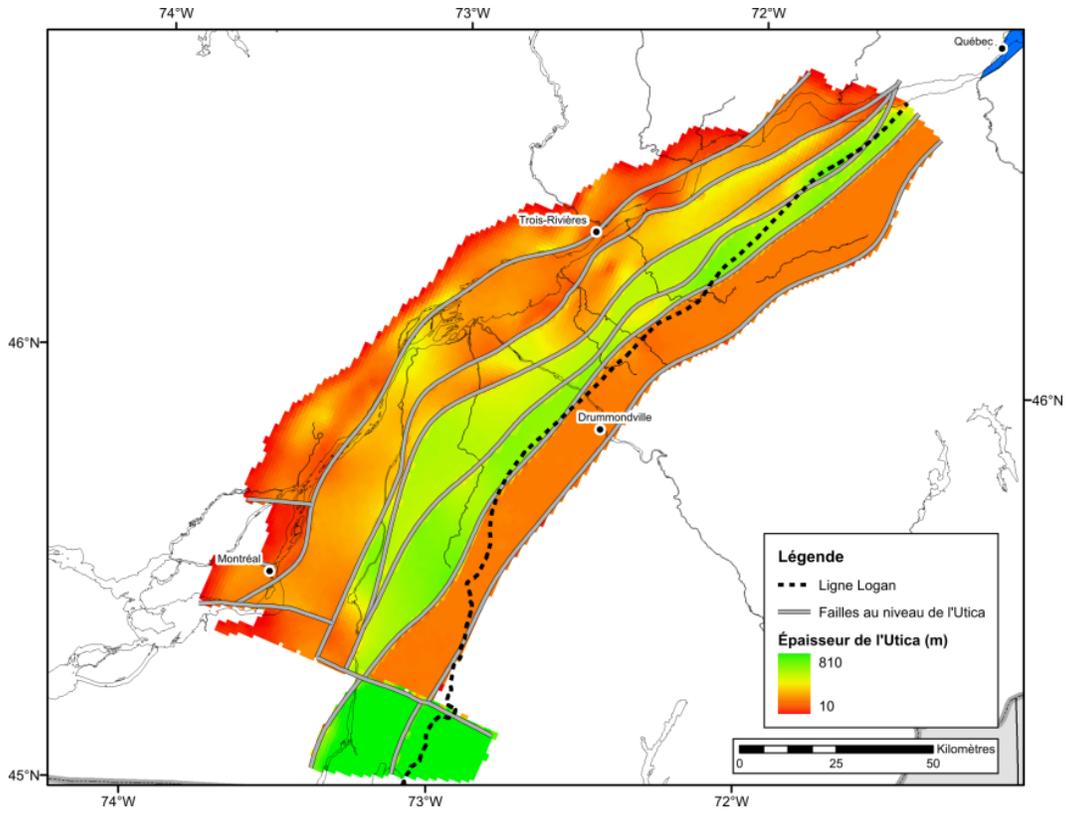


Figure 19 – Carte de l'épaisseur totale du Shale d'Utica.

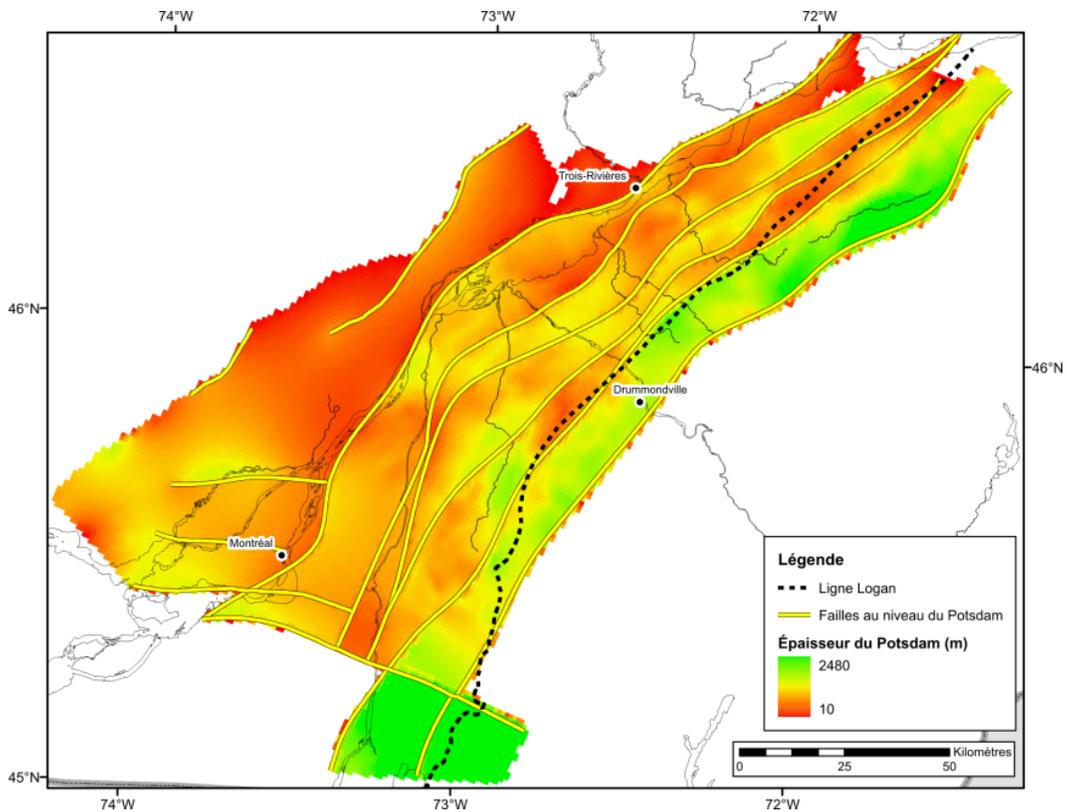


Figure 20 – Carte de l'épaisseur totale du Groupe de Potsdam.

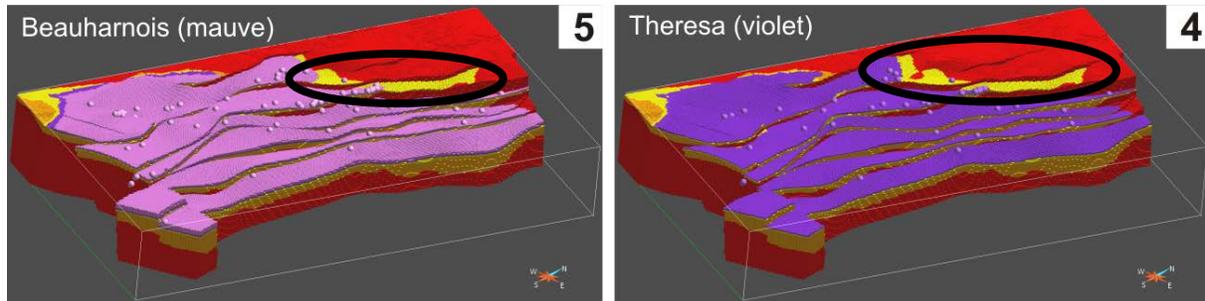


Figure 21 – Absence du Groupe de Beekmantown dans la partie centrale du bassin (région entourée de noir).

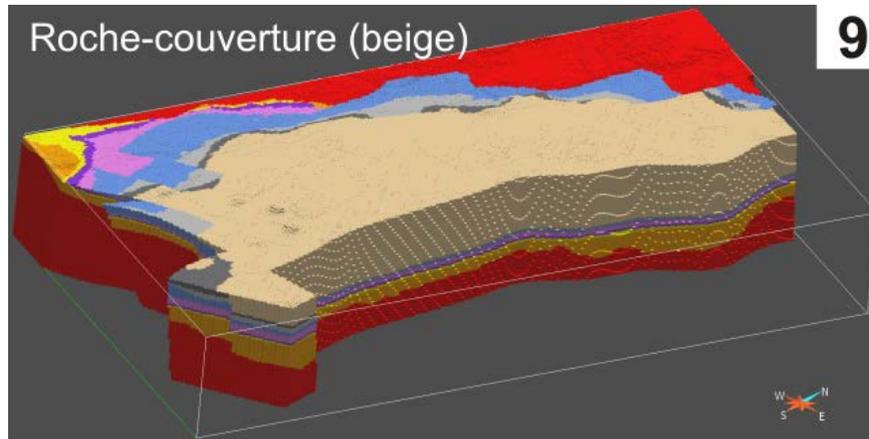


Figure 22 – Géologie de surface interprétée à l'aide du modèle géologique 3D. Rouge : Socle précambrien. Orange : Covey Hill. Jaune : Cairnside. Mauve foncé : Theresa. Mauve pâle : Beauharnois. Bleu : Trenton/Black River/Chazy. Beige : roche-couverture.

5. Conclusions

Un modèle géologique 3D des unités géologiques du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent a été construit dans l'optique de calculer le volume des unités-réservoirs ciblées pour le stockage du CO₂, paramètre essentiel au calcul de capacité effective du bassin.

Le modèle géologique 3D du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent a été construit avec le logiciel GOCAD®. Différentes données de base ont été utilisées dans la construction de ce modèle géologique : (1) la carte géologique de surface; (2) la carte structurale du toit du socle précambrien; (3) les données de puits réinterprétées à partir des diagraphies; ainsi que (4) l'interprétation des linéaments structuraux.

L'originalité de ce modèle géologique demeure l'intégration de treize (13) failles normales découpant en blocs distincts les unités géologiques. Ces failles ont été modélisées car elles sont associées à des déplacements verticaux importants dans le bassin. Celles-ci ont toutes été modélisées avec un pendage

régulier de 60° perpendiculaire au tracé général de chacune des failles. Les unités géologiques modélisées à l'échelle du bassin sont : (1) la Formation de Covey Hill (Groupe de Potsdam); (2) la Formation de Cairnside (Groupe de Potsdam); (3) la Formation de Theresa (Groupe de Beekmantown); (4) la Formation de Beauharnois (Groupe de Beekmantown); (5) les groupes de Chazy/Black River/Trenton; (6) le Shale d'Utica inférieur; (7) le Shale d'Utica supérieur; et (8) les roches-couverture indifférenciées (groupes de Sainte-Rosalie, de Lorraine et de Queenston).

Outre le calcul de la capacité effective de stockage du CO₂, ce modèle géologique 3D permet maintenant de réaliser plusieurs analyses, telles que les variations d'épaisseur des unités géologiques, l'identification de discordances locales dans la succession sédimentaire, la correction de la géologie de surface ainsi que des calculs de volume d'unités géologiques.

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>
- 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., Comeau, F.-A. et Malo, M. (2012) *Comparaison entre les modèles géologiques 3D faillés et non-faillés pour les calculs de capacités effectives de stockage géologique du CO₂ dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent*. Institut national de la recherche scientifique, Québec. R-xxxx. xx pages.
- Bédard, K., Duchaine, Y. et Malo, M. (2010) *Nouvelle analyse des données de puits gaziers et pétroliers dans la région de Sorel-Béancour*. Institut national de la recherche scientifique, Québec. R-1166 (INRSCO2-2010-V1.1). 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. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 58 (3), 219-234, <http://dx.doi.org/10.2113/gscpgbull.58.3.219>
- Castonguay, S., Tremblay, A. et Lavoie, D. (2002) *Carte de compilation géologique, Québec-Chaudière, Les ponts géologiques de l'est du Canada, Transect 2, Québec*. Commission géologique du Canada. Dossier public 4314.
- Clark, T.H. (1947) *Rapport sommaire sur les Basses Terres au sud du Saint-Laurent*. Ministère des mines - Service de la carte géologique, Québec. RP-204. 21 pages.
- Clark, T.H. (1972) *Rapport géologique - Région de Montréal*. Ministère des richesses naturelles - Direction générale des mines, Québec. RG-152. 244 pages.
- Clark, T.H. et Globensky, Y. (1973) *Rapport géologique - Portneuf et parties de St-Raymond et de Lyster*. Ministère des richesses naturelles - Direction générale des mines, Québec. RG-148. 110 pages.
- Clark, T.H. et Globensky, Y. (1975) *Rapport géologique - Région de Grondines*. Ministère des richesses naturelles - Direction générale des mines, Québec. RG-154. 159 pages.
- Clark, T.H. et Globensky, Y. (1976a) *Rapport géologique - Région de Trois-Rivières*. Ministère des richesses naturelles - Direction générale des mines, Québec. RG-164. 87 pages.
- Clark, T.H. et Globensky, Y. (1976b) *Rapport géologique - Région de Verchères*. Ministère des richesses naturelles - Direction générale des mines, Québec. RG-190. 64 pages.
- 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.
- Comeau, F.-A., Bédard, K. et Malo, M. (2013) *Lithostratigraphie standardisée du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent basée sur l'étude des diagraphies*. Institut national de la recherche scientifique, Québec, Québec. R-xxxx. xx pages.
- Globensky, Y. (1982a) *Rapport géologique - Région de Lachute*. Ministère de l'énergie et des ressources - Direction générale de l'exploration géologique et minérale, Québec. RG-200. 67 pages.
- Globensky, Y. (1982b) *Rapport géologique - Régions de Lacolle - Saint-Jean*. Ministère de l'énergie et des ressources - Direction générale de l'exploration géologique et minérale, Québec. RG-197. 197 pages.
- Globensky, Y. (1985) *Géologie des régions de Saint-Jean (partie nord) et de Beloeil*. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec. MM 84-03. 99 pages.
- Globensky, Y. (1987) *Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent*. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec. MM 85-02. 63 pages.
- Globensky, Y. (1993) *Lexique stratigraphique canadien. Volume V-B : région des Appalaches, des Basses-Terres du Saint-Laurent et des Îles de la Madeleine*. Gouvernement du Québec, Ministère de l'énergie et des ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale. DV-91-23. 327 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
- Konstantinovskaya, E.A., Rodriguez, D., Kirkwood, D., Harris, L.B. et Thériault, R. (2009) Effects of Basement Structure, Sedimentation and Erosion on Thrust Wedge Geometry: An Example from the Quebec Appalachians and Analogue Models. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 57 (1), 34-62, <http://dx.doi.org/10.2113/gscpgbull.57.1.34>
- Lavoie, D., Burden, E. et Lebel, D. (2003) Stratigraphic framework for the Cambrian Ordovician rift and passive margin successions from southern Quebec to western Newfoundland. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40 (2), 177-205, <http://dx.doi.org/10.1139/e02-078>
- 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>
- 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.
- Société québécoise d'initiatives pétrolières (SOQUIP) (1984) *Carte structurale du socle (Basses-Terres du Saint-Laurent)*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. DP 84-32.
- St-Julien, P. (1995) *Géologie de la région de Québec*. Ministère des Ressources naturelles, Québec. MB 94-40. 62 pages.
- Système 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.
- Système 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.
- Thériault, R. (2012) *Caractérisation du Shale d'Utica et du Groupe de Lorraine, Basses-Terres du Saint-Laurent - Partie 2 : Interprétation géologique*. Gouvernement du Québec, Géologie Québec, Direction de l'information géologique de Québec. DV2012-04. 79 pages.
- Trempe, R. (1978) *Précisions nécessaires sur la lithologie, la stratigraphie et la sédimentologie de la Formation d'Utica dans les Basses Terres du St-Laurent*. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, Québec. 1978TA000-07. 25 pages.
- VIASAT (2011) *Analyse structurale de données satellites, topographiques et géophysiques, Basses-Terres du Saint-Laurent*. VIASAT GeoTechnologies Inc. Rapport soumis à l'INRS Eau-Terre-Environnement. 30 pages.