



Modélisation de la porosité du réservoir de gaz de Saint-Flavien par méthodes géostatistiques

RAPPORT INRSCO2-2013-V2.14

Par

**Maxime Claprood
Erwan Gloaguen
Bernard Giroux
Mathieu J. Duchesne
et
Michel Malo**

R-1445

**Soumis au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
2013 – Québec**

ISBN : 978-2-89146-770-4

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 des volets de recherche Caractérisation et Capacité de stockage. Ces travaux ont porté sur la modélisation de la porosité du réservoir de gaz de Saint-Flavien par des méthodes géostatistiques; soit l'inversion sismique stochastique et les simulations gaussiennes séquentielles avec approche bayésienne. Les champs de porosité sont modélisés en utilisant les données géophysiques en diagraphie et de sismique-réflexion. Cette région présente un intérêt particulier car de nombreuses données géophysiques sont disponibles et peuvent être utilisées pour mieux comprendre la distribution de porosité du champ de gaz de Saint-Flavien. Bien qu'il n'y ait et n'aura pas d'injection de CO₂ à Saint-Flavien, l'exercice est d'intérêt afin d'adapter les méthodologies existantes au contexte géologique particulier des Basses-Terres du Saint-Flavien, soit une géologie variée et une porosité moyenne faible.

Sommaire

Ce rapport présente les avantages de l'utilisation des simulations géostatistiques dans le cadre d'activités de séquestration géologique du CO₂, utilisant le réservoir de gaz du Groupe de Beekmantown de Saint-Flavien comme exemple virtuel pour l'injection de CO₂. L'intégration des données d'un cube sismique 3D (amplitude sismique et impédance acoustique) et des données de diagraphies d'impédance acoustique (IA) et de porosité, par simulations gaussiennes séquentielles (SGS) avec une approche bayésienne permet de générer 250 réalisations de porosité pour le réservoir de Saint-Flavien.

Le schéma conventionnel des SGS est adapté aux conditions particulières du réservoir de Saint-Flavien ; c'est-à-dire une géologie complexe et variée, et une porosité faible dont la relation pétrophysique avec l'impédance acoustique est moins bien définie que pour la majorité des réservoirs où cette méthode a été appliquée. La transformation normale de la porosité permet de déterminer des familles pétrophysiques selon les distributions conjointes d'IA et de porosité normalisée et ainsi mieux définir les relations entre les deux propriétés pétrophysiques.

L'utilisation de l'inversion sismique stochastique (ISS) est essentielle dans le contexte de Saint-Flavien. L'ISS permet de générer des cubes d'IA à hautes fréquences afin de mieux représenter les variations rapides d'IA observées à petite échelle sur les diagraphies. En utilisant les cubes d'IA générés par l'ISS pour la simulation de la porosité, des modèles numériques plus réalistes de porosité du réservoir de Saint-Flavien sont ainsi obtenus.

250 modèles de porosité sont simulés par SGS avec approche bayésienne, générant ainsi une liste exhaustive de modèles équiprobables, qui respectent tous la distribution de la porosité observée dans le réservoir. Les modèles présentent des variations réalistes de la porosité, et leur structure spatiale respecte les relations déterminées à partir des données sismiques initiales et des diagraphies. Sur tous les modèles, on observe une porosité moyenne très faible, avec la présence de quelques zones de porosité plus élevée. En interprétant conjointement tous les modèles de porosité, on calcule la probabilité de retrouver une porosité dépassant un certain seuil de valeurs sur l'ensemble de la grille 3D. Un seuil de porosité de 1.0% est considéré pour la présente étude. Des zones possédant une probabilité élevée de retrouver une certaine porosité sont identifiées, dont certaines possèdent un volume pouvant être intéressante pour l'injection du CO₂.

Les volumes poreux connectés, donc propices à l'injection du CO₂, sont calculés et présentés pour trois réalisations distinctes de porosité. Une porosité minimale de 1.0%, et l'absence de la Famille de propriétés pétrophysiques 3 sont les facteurs caractérisant les zones poreuses connectées. Des pochettes de volume intéressant (volume minimal de 500 000 m³) sont mises en évidence, caractérisant ainsi la distribution des zones de haute porosité et les chemins potentiels de propagation du CO₂ dans ce réservoir. Le volume poreux d'une pochette est ensuite calculé en multipliant le volume des cellules par leur porosité, et en intégrant les valeurs pour toutes les cellules de chaque pochette. Un volume poreux où le CO₂ pourrait être injecté est finalement estimé sur chaque réalisation en intégrant toutes les pochettes poreuses d'une même réalisation. On obtient un volume poreux total de 1.41x10⁶ m³ pour la réalisation A (plus faible volume poreux des 250 modèles) et de 3.41x10⁶ m³ pour la réalisation C (3^e plus gros volume poreux des 250 modèles).

Les résultats de cette étude démontrent bien les avantages de l'utilisation des simulations géostatistiques pour évaluer les modèles de porosité dans le cadre de la séquestration géologique du CO₂ dans un réservoir non-conventionnel comme celui de Saint-Flavien.

Table des matières

Préambule.....	iii
Sommaire	iv
Liste des figures	vi
1. Introduction	8
2. Données géophysiques	10
2.1. Sismique	10
2.2. Diagraphies de forage.....	10
3. Méthodologie.....	11
3.1. Évaluation de la porosité et de l'IA à partir des diagraphies de forage.....	11
3.2. Évaluation des paramètres géostatistiques	13
3.2.1. Histogrammes de IA et de porosité.....	14
3.2.2. Variogrammes de la porosité.....	14
3.2.3. Fonction de densité de probabilité 2D IA-porosité	16
3.2.4. Identification des familles pétrophysiques	17
3.3. Calcul des cubes d'IA hautes fréquences par inversion sismique stochastique	18
3.4. Modélisation des cubes de porosité par SGS.....	20
4. Résultats	22
4.1. Simulations de porosité par SGS	22
4.2. Étude de connectivité.....	25
4.3. Potentiel de séquestration du CO ₂	27
5. Discussion.....	27
6. Conclusions	29
7. Remerciements	30
Références	31

Liste des figures

- Figure 1. Localisation du site de Saint-Flavien (Québec). Source des données d'émission de CO₂ : Environnement Canada (<http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=En&n=040E378D-1>). Modifiée de Malo et Bédard, 2012. La carte en bas à droite représente l'élévation de la région de Saint-Flavien. Le carré bleu présente les limites du cube sismique 1993, le carré rouge présente les limites du modèle numérique de réservoir. Les lignes cyan présentent les localisations des 2 profils présentés dans ce rapport (amplitude sismique, impédance acoustique et porosité). Les trajectoires des puits utilisés pour les simulations de porosité sont dessinées en vert et violet; les puits en violet sont présentés sur les profils sismiques ; les trajectoires des autres puits sont en gris. Les lignes noires sont les routes. 8
- Figure 2. Colonne stratigraphique simplifiée du Groupe de Beekmantown dans la région de Saint-Flavien. La zone de réservoir principal (B1) est identifiée en rouge et la zone réservoir secondaire (C) est identifiée en orange (modifié de Bertrand et al., 2003)..... 9
- Figure 3. Amplitude sismique de deux profils extraits du cube sismique. Les diagraphies soniques (DT) des puits situés à proximité des profils sismiques sont présentées en rose. L'extension verticale des 2 profils est de 230 ms. Les toits identifiés aux puits des zones A, B, et C du Beekmantown sont représentés par des boules rose, violet et orange..... 11
- Figure 4. Diagraphies d'impédance acoustique évaluées aux 11 puits à Saint-Flavien. Pour chaque puits, les diagraphies acquises à la fréquence d'échantillonnage de 10 à 15 cm converties en temps-double (vert) et mises à l'échelle aux 2 ms (rouge) sont présentées. L'axe de temps est le même pour tous les puits. L'axe d'impédance acoustique varie de 12000 à 17000 m s⁻¹ g cm⁻³ pour tous les puits. Les toits identifiés aux puits des zones A, B, et C du Beekmantown sont représentés par des traits rose, violet et orange. 12
- Figure 5. Diagraphies de porosité effective évaluées aux 11 puits à Saint-Flavien. Pour chaque puits, les diagraphies acquises à la fréquence d'échantillonnage de 10 à 15 cm converties en temps-double (cyan) et mises à l'échelle aux 2 ms (bleu). L'axe de temps est le même pour tous les puits. L'axe de porosité varie de 0 à 5% pour tous les puits. 13
- Figure 6. Histogrammes d'impédance acoustique (colonne de gauche, m s⁻¹ g cm⁻³) et de porosité effective (Phi, colonne de droite, %) évalués aux 11 puits de Saint-Flavien dans le Groupe de Beekmantown. Les histogrammes d'IA et de porosité sont affichés avec les mêmes axes. 14
- Figure 7. Modèles de porosité simulés à partir du même histogramme, mais correspondant à différents modèles de variogrammes, d'après Dubrule (2003). 15
- Figure 8. Variogrammes 3D expérimentaux (carrés bleus) et modélisés (traits bleus) à partir des données de porosité mises à l'échelle aux 2 ms dans le Beekmantown. Le variogramme modélisé est de type exponentiel avec anisotropie géométrique, de portée horizontale maximale a₁ = 900 m à un azimut de 65°, de portée horizontale minimale a₂ = 475 m, et de portée verticale a₃ = 11 m, et un plateau = 7.32x10⁻⁵. 15
- Figure 9. Fonction de densité de probabilité 2D normalisée entre l'impédance acoustique (IA) et la porosité. Rouge indique une forte probabilité et bleu indique une probabilité nulle de mesurer conjointement les 2 valeurs d'IA et de porosité. Les valeurs initiales d'IA et de porosité aux diagraphies sont présentées avec des croix vertes (Famille 1), magenta (Famille 2), et noires (Famille 3). 16
- Figure 10. Fonction de densité de probabilité 2D normalisée entre l'impédance acoustique (IA) et la porosité normalisée. Même code de couleur que la Figure 9. 17
- Figure 11. Fonction de densité de probabilité 2D normalisées entre l'impédance acoustique et la porosité calculées sur chaque famille pétrophysique. Les traits rouges correspondent à l'IA moyenne du cube déterministe plus ou moins trois écarts-types. 17

Figure 12. Histogramme de l'IA a) sur les diagraphies, b) sur le cube sismique déterministe et c) sur une réalisation d'un cube hautes fréquences obtenue par inversion sismique stochastique. Sur les 3 histogrammes, les traits rouges correspondent à l'IA moyenne plus ou moins un écart-type calculées sur les diagraphies. Les axes d'IA des trois histogrammes varient de 10 000 à 22 000 $\text{m s}^{-1} \text{g cm}^{-3}$ 18

Figure 13. Impédance acoustique inversée de façon déterministe sur deux profils extraits du cube sismique. Les diagraphies d'impédance acoustique mises à l'échelle de 2 ms des puits situés à proximité des profils sont présentées avec la même échelle de couleur. L'extension verticale des 2 profils est de 230 ms. 18

Figure 14. Résultats d'une réalisation d'impédance acoustique obtenue par inversion sismique stochastique. Les profils du haut sont les IA inversées, tandis que les profils du bas sont les amplitudes sismiques hautes fréquences obtenues à partir des profils d'IA. Les diagraphies du haut sont les IA mises à l'échelle de 2 ms avec la même échelle de couleur que les profils d'IA. Les diagraphies du bas (rose) sont les diagraphies soniques mises à l'échelle de 2 ms. L'extension verticale des 2 profils est de 230 ms. 19

Figure 15. Différences entre la moyenne de 500 réalisations d'IA (haut) et d'amplitude sismique (bas) obtenues par inversion sismique stochastique et les valeurs d'IA et d'amplitude sismique du cube déterministe. Les inversions sont optimisées pour le Groupe du Beekmantown, compris entre les marqueurs aux puits rose (zone BA) et les marqueurs mauve (toit du Theresa). 20

Figure 16. Schéma de l'algorithme de simulation séquentielle gaussienne avec approche bayésienne utilisé pour modéliser la porosité du réservoir du Groupe de Beekmantown à Saint-Flavien (figure modifiée de Dubrule, 2003 et Dubreuil-Boisclair, 2013). 21

Figure 17. Profils est-ouest (gauche) et nord-sud (droite) de 3 réalisations de porosité A, B, et C. Les diagraphies de porosité effective mise à l'échelle de 2 ms des puits à proximité des profils sont présentées avec la même échelle de couleur. L'extension verticale des profils est de 230 ms. 23

Figure 18. Probabilités de dépassement d'une porosité de coupure de 1.0%, 1.5%, et 2.0% calculées à partir des 250 réalisations de porosité (profils est-ouest à gauche, profils nord-sud à droite). Les diagraphies de porosité sont aussi présentées. L'extension verticale des profils est de 230 ms. Les cercles pointillés sont décrits dans le texte. 24

Figure 19. Probabilités de dépassement d'une porosité de coupure de 1.0% et d'avoir une probabilité d'occurrence de la Famille 3 de moins de 50% (haut) et de moins de 25% (bas) (profils est-ouest à gauche, profils nord-sud à droite). Les diagraphies de porosité sont aussi présentées. L'extension verticale des profils est de 230 ms. 25

Figure 20. Volumes de pores connectés sur les 3 réalisations présentées à la Figure 17. Les volumes connectés sont présentés avec une échelle de couleur variant de vert ($5 \times 10^5 \text{ m}^3$) à rouge (plus de $5 \times 10^7 \text{ m}^3$). Les profils de porosité simulée et les diagraphies de porosité sont présentés en arrière plan. 26

1. Introduction

L'estimation du volume poreux connecté et de la distribution de la porosité est une étape essentielle pour évaluer le potentiel d'un site pour la séquestration géologique du CO₂. Cette caractérisation précise de la porosité est d'autant plus importante dans un contexte géologique comme les réservoirs potentiels identifiés dans les unités ordovicienne et cambrienne des Basses-Terres du Saint-Laurent. En raison de la grande compaction induite par la profondeur, l'âge, et les mouvements tectoniques, ces unités sont très peu poreuses même dans les zones « réservoir » comme au site de Saint-Flavien. Le site de Saint-Flavien est utilisé ici pour compléter une étude de cas virtuelle de caractérisation de la porosité d'un réservoir pour

l'injection de CO₂, utilisant des méthodes de caractérisation géostatistiques telle que l'inversion sismique stochastique (ISS) et les simulations gaussiennes séquentielles (SGS) avec approche bayésienne. Après plusieurs années d'exploitation, le réservoir de gaz naturel de Saint-Flavien est utilisé depuis 1998 comme réservoir souterrain pour le stockage saisonnier de gaz naturel. Il est exploité par la compagnie Intragaz (<http://www.intragaz.com/>) qui, en tant que partenaire scientifique de la chaire de recherche, a rendu disponibles les données sismiques, les diagraphies, et les données de production nécessaires à la réalisation de ce projet. Le site de Saint-Flavien est situé à 50 km au sud-ouest de la ville de Québec (Figure 1).

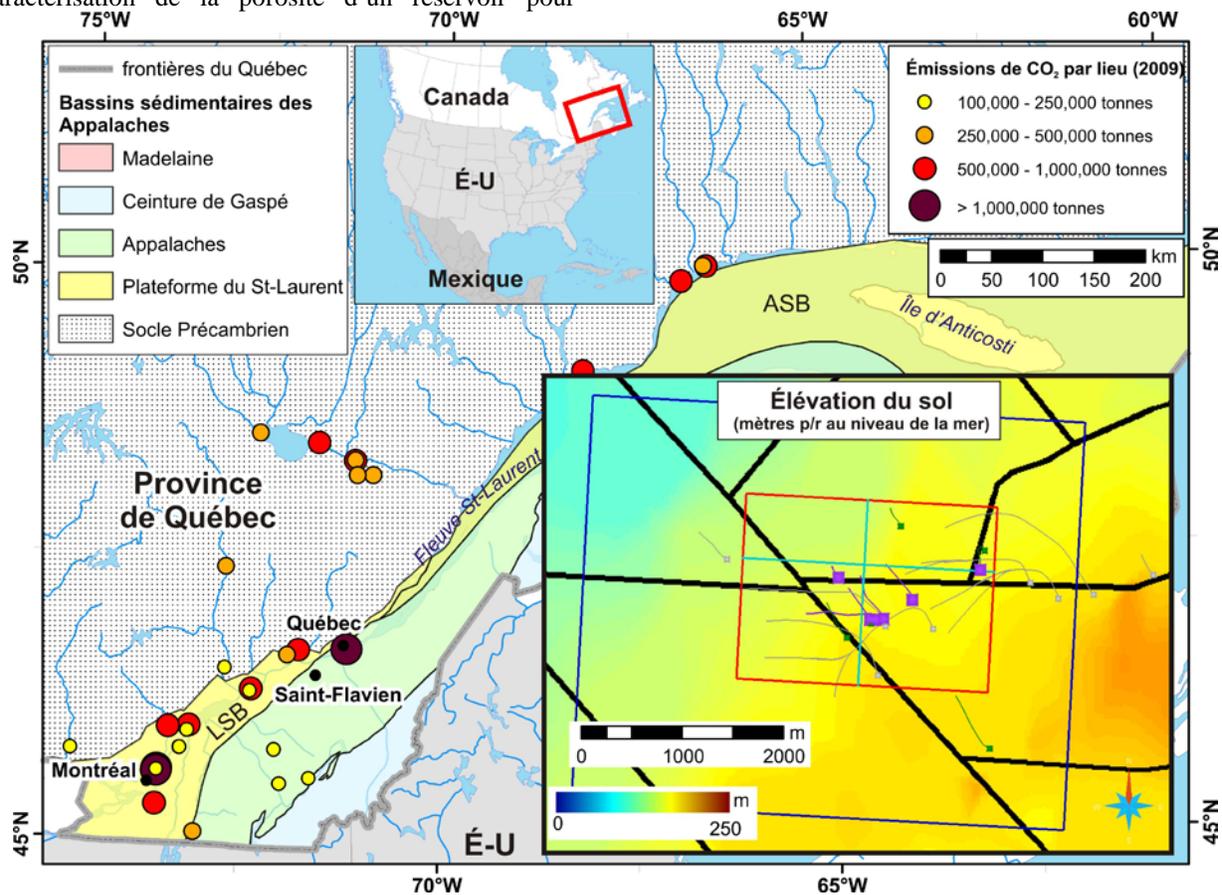


Figure 1. Localisation du site de Saint-Flavien (Québec). Source des données d'émission de CO₂ : Environnement Canada (<http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=En&n=040E378D-1>). Modifiée de Malo et Bédard, 2012. La carte en bas à droite représente l'élévation de la région de Saint-Flavien. Le carré bleu présente les limites du cube sismique 1993, le carré rouge présente les limites du modèle numérique de réservoir. Les lignes cyan présentent les localisations des 2 profils présentés dans ce rapport (amplitude sismique, impédance acoustique et porosité). Les trajectoires des puits utilisés pour les simulations de porosité sont dessinées en vert et violet; les puits en violet sont présentés sur les profils sismiques; les trajectoires des autres puits sont en gris. Les lignes noires sont les routes.

Le réservoir de gaz naturel de Saint-Flavien est situé dans une série d'écaillés faillées de la plateforme sédimentaire du Saint-Laurent qui sont déplacées vers le nord-est. Le réservoir est situé dans l'unité centrale du Groupe de Beekmantown (zone B; Figure 2) d'âge Ordovicien inférieur à une profondeur moyenne de 1500 m (Bertrand et al., 2003). Le Groupe de Beekmantown est reconnu comme étant la dernière unité de marge passive déposée avant le début de la subduction taconienne. Les faciès géologiques du Groupe de Beekmantown dans la structure de Saint-Flavien sont divisés en plusieurs zones (de haut en bas :

A1 à A6, B1 à B5, et C1 à C4) selon une analyse diagraphique. La colonne stratigraphique simplifiée de la région de Saint-Flavien est présentée à la Figure 2. La zone A correspond à un mélange de carbonates, de shale, et de dolomies. Les zones B et C correspondent aux dolomies de la Formation de Beauharnois où se retrouvent des zones de carbonates interclastiques provenant d'un faciès de marge de plateforme marine carbonatée ouverte. Les grès dolomitiques des zones C3 et C4 peuvent être corrélés à la Formation de Theresa.

Unité géologique				Lithologie
Groupe de Chazy				calcaires
Groupe de Beekmantown	Formation de Beauharnois	Zone A	A1	dolomies calcaireuses
			A2	
			A3	
			A4	
			A5	
			A6	
		Zone B	B1	dolomies - réservoir 1
			B2	dolomies
			B3	
			B4	calcaires argileux
			B5	
		Zone C réservoir 2	C1	calcaires
	C2		dolomies gréseuses	
	C3			
C4	calcaires argileux			
Formation de Theresa				grès dolomitiques

Figure 2. Colonne stratigraphique simplifiée du Groupe de Beekmantown dans la région de Saint-Flavien. La zone de réservoir principal (B1) est identifiée en rouge et la zone réservoir secondaire (C) est identifiée en orange (modifié de Bertrand et al., 2003).

La porosité du réservoir de Saint-Flavien provient principalement de la dissolution de calcite contrôlée par des fractures dans des faciès légèrement poreux de dolomites. Cette porosité est surtout exploitée dans les

zones B1 et C, mais est aussi présente dans d'autres zones. La zone B1, principalement dolomitique, est reconnue comme l'unité réservoir principale du champ gazier de Saint-Flavien. L'âge de la roche-réservoir a

un impact non-négligeable sur ses propriétés pétrophysiques. Le niveau de compaction et de consolidation des sédiments d'âge ordovicien du Beekmantown explique en grande partie les valeurs élevées d'impédance acoustique et la faible porosité moyenne.

La distribution de la porosité dans un réservoir est habituellement évaluée par méthodes géostatistiques à partir des diagraphies aux puits, et guidée si possible par un cube d'impédance acoustique (IA) 3D (Mukerji et al., 2001; Hu et Le Ravalec-Dupin, 2004; Mavko et al., 2009). Ces méthodes tiennent pour acquis une relation quasi-linéaire bien définie entre l'IA et la porosité, telle que retrouvée dans un réservoir conventionnel de grès à porosité élevée. Les réservoirs potentiels pour le stockage géologique du CO₂ au Québec (par exemple, le site de Bécancour, Claprood et al., 2012) sont loin d'offrir des conditions idéales pour la caractérisation de la distribution de la porosité par l'utilisation de méthodes géostatistiques. Des modifications à ces méthodes sont apportées pour justifier leur utilisation. Le réservoir de faible porosité de Saint-Flavien est un cas intéressant pour étudier l'application des méthodes géostatistiques où la relation statistique entre l'IA et la porosité se trouve à la limite de résolution de la méthode.

L'objectif du projet est double. D'une part, il s'agit de mieux comprendre la distribution de la porosité dans le réservoir de Saint-Flavien en adaptant les méthodes géostatistiques pour un réservoir non-conventionnel. Il sera ainsi possible d'estimer des volumes plus réalistes de pores disponibles et connectés pour une étude virtuelle d'injection de CO₂. Les méthodes géostatistiques permettent aussi d'évaluer la variabilité et l'incertitude sur les modèles de porosité simulée, permettant de mieux statuer sur les risques associés à l'injection de CO₂ dans cet environnement (Zhang et Sahinidis, 2012). La séquence de travail des méthodes géostatistiques permet de facilement mettre à jour les modèles de porosité suite à l'acquisition de nouvelles données. Ultimement, il sera possible d'utiliser les données temporelles de production pour caler le modèle selon les propriétés dynamiques du réservoir. Ce rapport traite des étapes menant à la caractérisation de la porosité et l'estimation des volumes poreux. Des études subséquentes porteront sur la mise à jour et le calage dynamique des modèles.

2. Données géophysiques

La position des puits et du cube sismique 3D utilisés

pour la modélisation de la porosité et le calcul des volumes de pores connectés à Saint-Flavien est présentée à la Figure 1.

2.1. Sismique

Deux cubes sismiques 3D, dont l'acquisition remonte à 1993 et 2005, sont disponibles pour imager le réservoir de Saint-Flavien. Bien que plus anciennes, les données du cube sismique 3D acquis en 1993 offrent une bonne résolution et furent inversées en 2000 pour obtenir un cube d'impédance acoustique déterministe. Les données du cube de 1993 sont utilisées dans ce projet. Le cube sismique, échantillonné à une fréquence temporelle de 2 ms, couvre une surface de 4.88 par 3.94 km². Le cube d'impédance acoustique est calculé sur un sous-domaine de 3.68 par 2.72 km² (Figure 1). Au niveau du réservoir, la fréquence dominante est estimée à 35-40 Hz et la vitesse sismique est évaluée entre 5000 et 5500 m/s. La longueur d'onde sismique est donc évaluée entre 125 et 150 m, correspondant à une résolution verticale de 31.25 à 37.5 m (un quart de la longueur d'onde; Yilmaz, 2001). Seule la composante verticale est enregistrée, permettant d'évaluer la vitesse des ondes P et le cube d'impédance acoustique.

Bien que les données avant-sommation soient disponibles pour ce levé sismique 3D, il fut jugé préférable d'utiliser seulement les données après-sommation pour la création d'une première génération de modèles de porosité. Les amplitudes sismiques de deux profils extraits du cube sismique 3D, identifiés sur la Figure 1, ainsi que les diagraphies soniques des puits à proximité de ces profils sont présentées à la Figure 3.

2.2. Diagraphies de forage

Dix-neuf (19) puits ont été forés dans le réservoir de Saint-Flavien. Les trajectoires et les tables de conversion temps-profondeur des puits sont utilisées pour travailler dans le domaine du temps et assurer une meilleure corrélation avec les données sismiques. Il est préférable de travailler dans le domaine du temps car il est beaucoup plus simple de convertir les puits en temps que de convertir les données sismiques 3D dans le domaine de la profondeur. La migration en profondeur peut entraîner certaines distorsions dont nous voulons nous affranchir.

Des diagraphies de forage (électrique, sonique, radiations gamma, porosité, densité, effet photo-

électrique) permettant de calculer la porosité effective et l'impédance acoustique dans l'unité du Beekmantown sont utilisées à 11 puits dans la zone d'intérêt pour la modélisation. Deux puits sont exclus car ils se retrouvent à l'extérieur de la zone modélisée. Six puits horizontaux ont aussi été forés dans le but d'atteindre l'unité plus productrice du réservoir (zone B1 du Groupe de Beekmantown). Aucune diagraphie

n'est acquise dans les puits horizontaux, mais leurs trajectoires peuvent être utilisées pour évaluer la connectivité des zones poreuses dans les modèles de porosité. Les données de production disponibles à plusieurs puits seront aussi utiles dans la phase subséquente du projet pour effectuer le calage des données dynamiques (volume de gaz injecté et soutiré, pression).

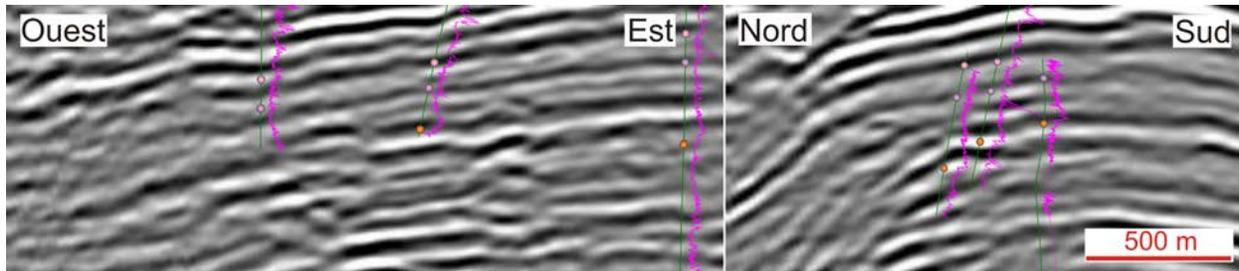


Figure 3. Amplitude sismique de deux profils extraits du cube sismique. Les diagraphies soniques (DT) des puits situés à proximité des profils sismiques sont présentées en rose. L'extension verticale des 2 profils est de 230 ms. Les toits identifiés aux puits des zones A, B, et C du Beekmantown sont représentés par des boules rose, violet et orange.

3. Méthodologie

La méthodologie employée utilise la relation statistique entre l'impédance acoustique et la porosité, par un algorithme bayésien pour simuler le champ de porosité du réservoir de gaz de Saint-Flavien, semblable à l'approche de Dubreuil-Boisclair et al. (2012) pour le champ d'hydrates de gaz de Mallik (Canada).

Les simulations sont effectuées sur une grille couvrant une surface de 2500 par 1800 m² (125 x 90 cellules), isolant les zones A à C du groupe de Beekmantown. Bien que les zones B1 et C soient reconnues comme les zones productrices dans la région de Saint-Flavien, il fut jugé plus approprié de modéliser l'unité complète du Beekmantown afin de mieux exprimer la variabilité observée sur les diagraphies de porosité. La taille des cellules de la grille de modélisation est la même que celle des cellules du cube sismique, soit 20 m latéralement et 2 ms verticalement. Quatre étapes sont identifiées pour évaluer le volume de pores connectés pour l'injection de CO₂ à Saint-Flavien :

1. Évaluation de la porosité et de l'IA à partir des diagraphies de forage ;
2. Évaluation des principaux paramètres géostatistiques (variogrammes, PDF 2D IA-porosité, familles pétrophysiques) ;
3. Calcul de plusieurs réalisations de cubes d'IA hautes fréquences par inversion sismique stochastique et ;

4. Modélisation de plusieurs réalisations de cubes de porosité par SGS avec approche bayésienne.

3.1. Évaluation de la porosité et de l'IA à partir des diagraphies de forage

Les diagraphies d'impédance acoustique et de porosité effective sont les données de base pour compléter les simulations de la porosité en tous points de la grille de modélisation. Bien que la porosité ait aussi été mesurée directement sur certaines carottes, il est jugé préférable d'utiliser seulement les porosités effectives évaluées à partir des diagraphies pour avoir des données comparables calculées sur le même support géométrique. Il y a aussi trop peu de carottes pour avoir un échantillonnage suffisant. Les porosités calculées à partir des diagraphies se comparent bien avec les porosités mesurées sur les carottes disponibles.

La première étape consiste à corriger et filtrer les diagraphies nécessaires aux calculs de la porosité et de l'impédance acoustique. Cette étape est nécessaire pour enlever les dérives, les sauts de haute fréquence et autres bruits qui ne sont pas d'origine géologique ou pétrophysique. Les diagraphies sont filtrées avec des moyennes courantes calculées sur des fenêtres de longueurs variables. Cela permet d'optimiser le filtrage en fonction du type de bruit observé et des variations naturelles observées sur les diagraphies. Il n'est pas toujours possible de déterminer l'origine naturelle ou

expérimentale de certaines fluctuations, et cela peut avoir une répercussion sur les calculs de porosité et d'impédance acoustique. Un filtrage insuffisant a pour effet d'interpréter le bruit d'acquisition comme étant une variation de propriétés pétrophysiques, tandis qu'un filtrage excessif aura pour effet de lisser de vraies variations de propriétés pétrophysiques.

Les corrections et filtrage des diagraphies peuvent être une source importante d'erreur dans l'estimation de la porosité par SGS. Pour les simulations numériques, les données diagraphiques sont utilisées comme des valeurs exactes et non-bruitées. Aucune incertitude n'est associée aux valeurs diagraphiques pendant les

modélisations même si une certaine erreur peut être présente. Les simulations sont effectuées en respectant exactement les valeurs de porosité mesurées aux puits, et en utilisant des statistiques déterminées sur celles-ci.

L'impédance acoustique est calculée en multipliant la vitesse sismique des ondes P par la densité. La vitesse sismique, estimée à partir des diagraphies soniques, varie entre 5000 m/s et 7000 m/s, tandis que les valeurs de densité varient entre 2.50 g/cm³ et 2.95 g/cm³ dans le Groupe du Beekmantown. Les diagraphies d'impédance acoustique calculées aux 11 puits à Saint-Flavien sont présentées à la Figure 4.

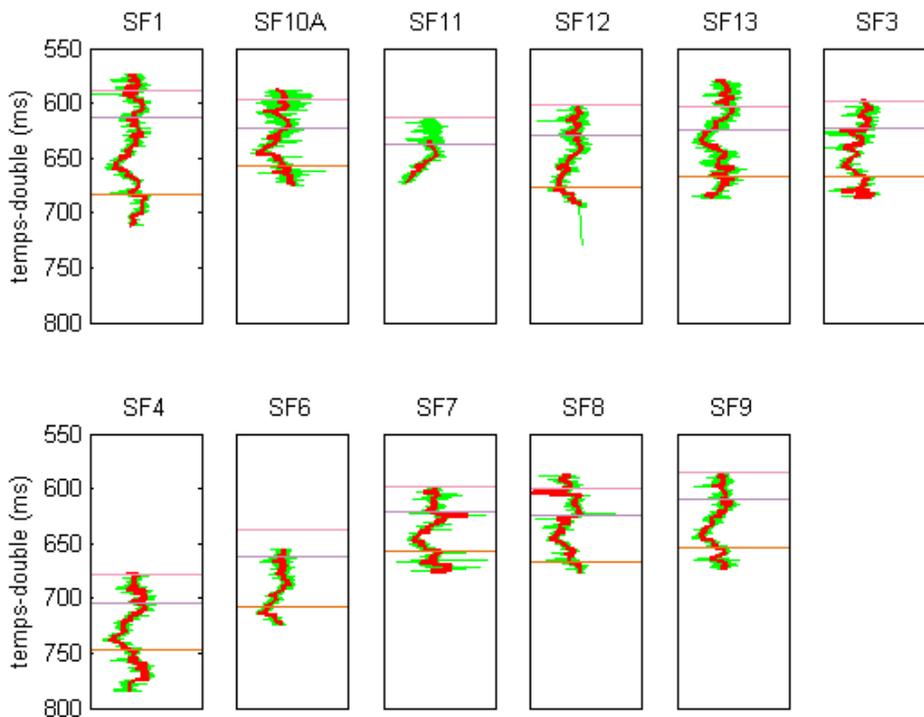


Figure 4. Diagraphies d'impédance acoustique évaluées aux 11 puits à Saint-Flavien. Pour chaque puits, les diagraphies acquises à la fréquence d'échantillonnage de 10 à 15 cm converties en temps-double (vert) et mises à l'échelle aux 2 ms (rouge) sont présentées. L'axe de temps est le même pour tous les puits. L'axe d'impédance acoustique varie de 12000 à 17000 m s⁻¹ g cm⁻³ pour tous les puits. Les toits identifiés aux puits des zones A, B, et C du Beekmantown sont représentés par des traits rose, violet et orange.

Dans le contexte géologique du Beekmantown, une valeur élevée d'IA peut être associée à une présence plus importante de dolomie (roche la plus dense), ou à une porosité plus faible. À l'opposé, une valeur faible d'IA peut s'expliquer par une porosité élevée, ou par une proportion plus importante d'argile ou de grès (les roches les moins denses). Puisque l'algorithme des SGS par approche bayésienne considère qu'un

changement d'IA est associé à une variation de la porosité, il est important de bien classer les données en familles pétrophysiques pour enlever l'influence de la géologie pouvant fausser les valeurs simulées de porosité. La méthodologie utilisée pour la division en familles fait l'objet de la section 3.2.4.

La porosité effective est calculée en fonction des diagraphies disponibles à chaque puits. Les calculs tiennent compte des volumes d'argile, de la proportion de quatre minéraux de base (argile, grès, calcaire, dolomite) selon le facteur photo-électrique et leurs propriétés physiques respectives (densité, vitesse sismique), de la porosité neutron et la porosité de densité, et de leur vitesse sismique. Les volumes d'argile sont estimés par plusieurs méthodes en fonction des diagraphies disponibles : radiation gamma, résistivité, neutron, neutron-densité, neutron-sonique, et densité-sonique. La valeur minimale obtenue par toutes ces méthodes est utilisée comme volume d'argile final. L'utilisation de la valeur

minimale est justifiée car les méthodes de calcul ont tendance à surévaluer les volumes d'argile lorsqu'elles font défaut, et l'utilisation de la valeur minimale est souvent présentée comme l'estimation la plus fiable du volume d'argile (Ellis et Singer, 2008).

Le calcul de la porosité effective utilise un modèle initial de porosité basé sur les valeurs de la diagraphie neutron-sonique. Cette méthodologie semble donner les résultats les plus stables et des valeurs de porosité qui correspondent le mieux aux porosités mesurées sur les carottes récoltées à Saint-Flavien. Les diagraphies de porosité effective évaluées aux 11 puits à Saint-Flavien sont présentées à la Figure 5.

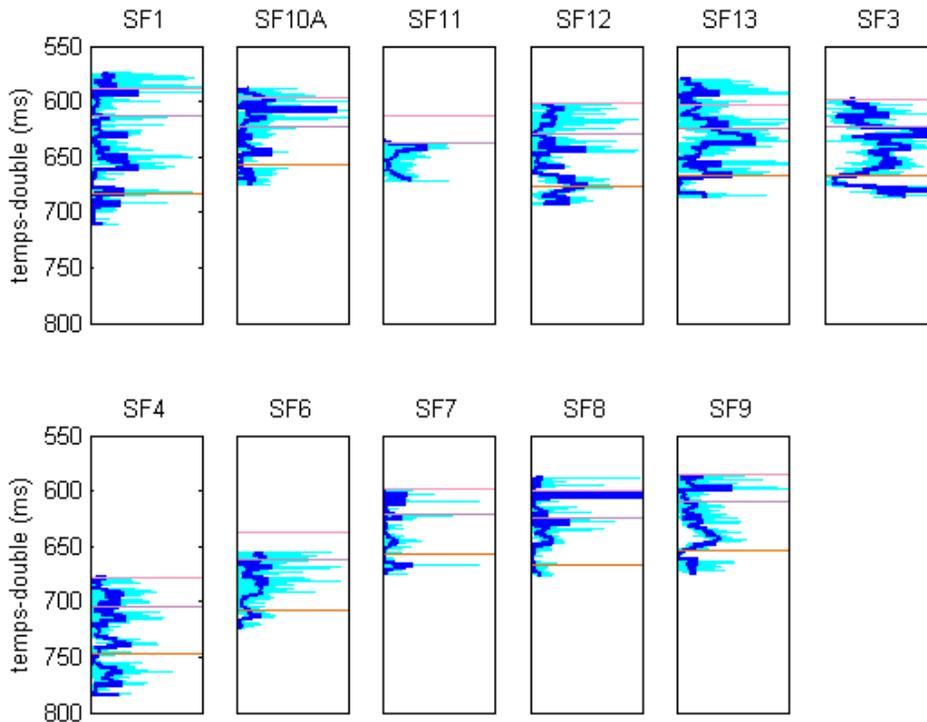


Figure 5. Diagraphies de porosité effective évaluées aux 11 puits à Saint-Flavien. Pour chaque puits, les diagraphies acquises à la fréquence d'échantillonnage de 10 à 15 cm converties en temps-double (cyan) et mises à l'échelle aux 2 ms (bleu). L'axe de temps est le même pour tous les puits. L'axe de porosité varie de 0 à 5% pour tous les puits.

3.2. Évaluation des paramètres géostatistiques

Les paramètres géostatistiques de modélisation sont calculés à partir des diagraphies de porosité et d'impédance acoustique. Ces paramètres servent à tenir compte de toute l'information disponible aux puits afin de modéliser la porosité à tous les autres points de la grille.

Quatre paramètres principaux sont nécessaires pour la modélisation de la porosité par SGS avec approche bayésienne :

- les histogrammes d'impédance acoustique et de porosité ;
- les variogrammes de porosité ;
- le noyau d'impédance acoustique en fonction de la porosité et ;
- la distribution des familles pétrophysiques.

3.2.1. Histogrammes de IA et de porosité

Les histogrammes expriment les distributions d'impédance acoustique et de porosité évaluées par les diagraphies aux puits. Afin de ne pas biaiser les résultats, seules les valeurs incluses dans la zone à modéliser (Groupe de Beekmantown) sont utilisées pour le calcul des distributions. Ces histogrammes servent de données conditionnantes dans les modélisations pour estimer les valeurs de porosité en établissant les moyennes, variances, et distributions *a priori* à respecter.

L'histogramme total de l'IA présenté à la Figure 6 présente une distribution se rapprochant d'une loi normale, avec une valeur moyenne de $16\,921\text{ m s}^{-1}\text{ g cm}^{-3}$ et un écart-type de $1042\text{ m s}^{-1}\text{ g cm}^{-3}$. L'histogramme de porosité sur toutes les données (Figure 6, droite en bas) présente une distribution se rapprochant d'une loi lognormale, avec plusieurs faibles valeurs (entre 0% et 1% de porosité) et quelques valeurs plus élevées. Bien que ce ne soit pas une condition nécessaire, la modélisation par SGS donne de meilleurs résultats lorsque les distributions d'IA et de porosité sont normales. On utilise donc ici une transformation normale des valeurs de porosité pour mieux différencier les faibles valeurs. Cette transformation normale est nécessaire pour l'identification des trois familles pétrophysiques dont les histogrammes sont présentés en Figure 6.

On observe que les paramètres statistiques sont distincts pour chaque famille identifiée, autant au niveau de l'IA que de la porosité. Les moyennes et écarts-types d'impédance acoustique pour chaque famille et toutes les données confondues sont exprimés au Tableau 1.

Tableau 1. Moyenne et écart-type de l'impédance acoustique évaluée aux diagraphies pour chaque famille (IA en $\text{m s}^{-1}\text{ g cm}^{-3}$).

Famille	Moyenne	Écart-type
1	16557	687
2	17411	772
3	14973	485
Total	16921	1042

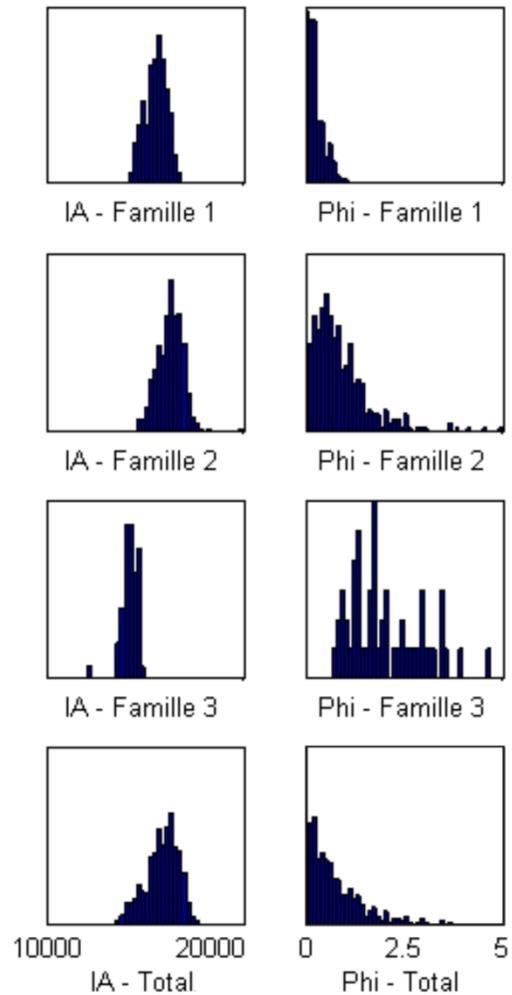


Figure 6. Histogrammes d'impédance acoustique (colonne de gauche, $\text{m s}^{-1}\text{ g cm}^{-3}$) et de porosité effective (Phi, colonne de droite, %) évalués aux 11 puits de Saint-Flavien dans le Groupe de Beekmantown. Les histogrammes d'IA et de porosité sont affichés avec les mêmes axes.

3.2.2. Variogrammes de la porosité

En plus de connaître la distribution des valeurs de porosité, il faut évaluer la structure spatiale pour pouvoir faire les simulations. Comme le montre la Figure 7, différents modèles de porosité peuvent être simulés à partir du même histogramme, selon le choix du modèle de structure spatiale déterminé.

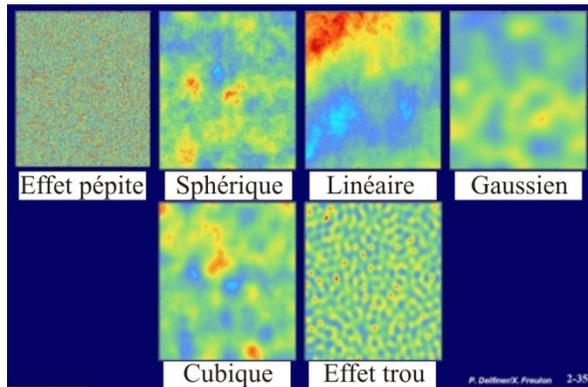


Figure 7. Modèles de porosité simulés à partir du même histogramme, mais correspondant à différents modèles de variogrammes, d'après Dubrule (2003).

Il est important de pouvoir évaluer les variations spatiales de la porosité afin de simuler des modèles réalistes en fonction de l'information disponible. Un cube d'impédance acoustique sert de guide aux variations spatiales de porosité par la relation existant entre les deux propriétés. En utilisant la méthode des SGS par approche bayésienne, on exprime les variations spatiales de porosité par des variogrammes calculés à partir des données de porosité évaluées sur les diagraphies. Un variogramme exprime la covariance d'une propriété et sa variation en fonction de la distance « h » entre deux points. Au-delà d'une certaine limite appelée portée, aucune relation spatiale n'existe entre les deux points ; le plateau du variogramme est atteint. Le plateau correspond à la variance de la variable. Un modèle de variogramme théorique est d'abord calculé pour ajuster le variogramme expérimental obtenu avec les données, et est ensuite utilisé dans les simulations.

Les données diagraphiques de porosité possèdent une excellente résolution verticale, mais une résolution spatiale restreignant le calcul de variogrammes horizontaux. On évalue les portées horizontales à partir des données du cube d'impédance acoustique déterministe. Les modèles de variogramme et les variances sont les mêmes que ceux évalués par les variogrammes verticaux de porosité. Les variogrammes sont calculés (et présentés à la Figure 8) pour toutes les données acquises dans le Beekmantown, et ensuite séparément pour les trois familles pétrophysiques. Seuls les variogrammes globaux sont présentés à la Figure 8.

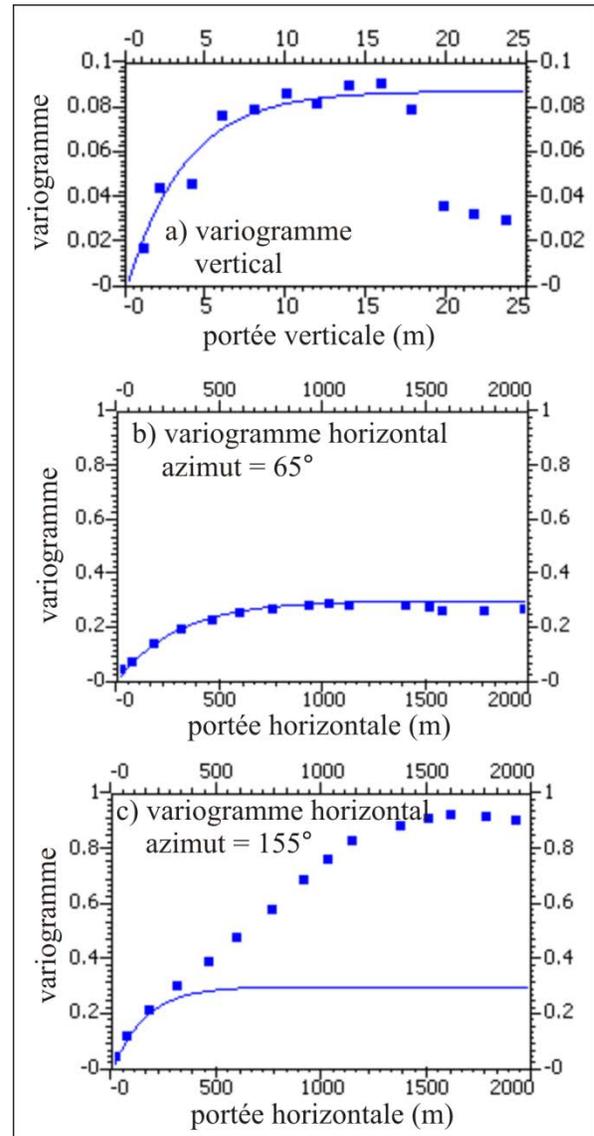


Figure 8. Variogrammes 3D expérimentaux (carrés bleus) et modélisés (traits bleus) à partir des données de porosité mises à l'échelle aux 2 ms dans le Beekmantown. Le variogramme modélisé est de type exponentiel avec anisotropie géométrique, de portée horizontale maximale $a_1 = 900$ m à un azimuth de 65° , de portée horizontale minimale $a_2 = 475$ m, et de portée verticale $a_3 = 11$ m, et un plateau = 7.32×10^{-5} .

On observe que les variogrammes sont de type exponentiel, montrant une faible corrélation pour les petites distances. Les paramètres des variogrammes calculés à partir des données de porosité appartenant à chacune des familles sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Paramètres des variogrammes exponentiels de la porosité modélisés globalement et pour chacune des familles.

Famille	a1 (m)	a2 (m)	a3 (m)	azimut (°)	plateau (x10 ⁻⁵)
1	1137	600	13.9	65	7.32
2	552	291	6.75	65	772
3	663	350	8.1	65	485
Global	900	475	11	65	1042

Les portées verticales sont estimés directement à partir des diagraphies de porosité mise à l'échelle, tandis que les portées horizontales sont mises à niveau par rapport aux portées de variogramme global, selon le même ratio que les portées verticales. On note que la famille 1 possède les plus longues portées tandis que la famille 2 possède la plus petite longueur de corrélation. Les paramètres de la famille 3 se rapprochent de la famille 2. Cela est peut-être expliqué par la plus grande variabilité sur les valeurs de porosité observée sur les histogrammes des familles 2 et 3 à la Figure 6.

3.2.3. Fonction de densité de probabilité 2D IA-porosité

Afin d'intégrer les données d'impédance acoustique acquises sur le cube sismique aux modélisations de porosité, la relation statistique reliant les deux propriétés pétrophysiques doit être connue. Cette relation est exprimée par la fonction de densité de probabilité (PDF) 2D évaluée à partir des diagraphies où les impédances acoustiques et la porosité sont conjointement mesurées. La PDF 2D est estimée en utilisant l'estimateur de densité de noyau (KDE, *Kernel density estimator*) non-paramétrique (Rosenblatt, 1956; Parzen, 1962). Le KDE de la porosité (Φ) et l'IA est exprimé comme suit par Wand et Jones (1995) pour tous les points n :

$$f(\Phi, IA) = \frac{1}{nh_1h_2} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{\Phi - \Phi_i}{h_1}\right) K\left(\frac{IA - IA_i}{h_2}\right),$$

où h_1 et h_2 sont les largeurs de classes du noyau et K est la fonction de noyau. Un noyau de type gaussien est sélectionné pour son utilisation fréquente avec des variables continues.

La relation entre l'IA et la porosité est généralement bien définie pour un champ de porosité élevée : la porosité augmente avec une diminution de l'IA. Dans le contexte de Saint-Flavien, où la porosité moyenne est

très faible et où la porosité élevée se retrouve surtout dans des zones de fractures, la relation est moins franche. La Figure 9 présente la PDF 2D calculée à partir des données d'IA et de porosité évaluées sur les diagraphies mises à l'échelle de 2 ms.

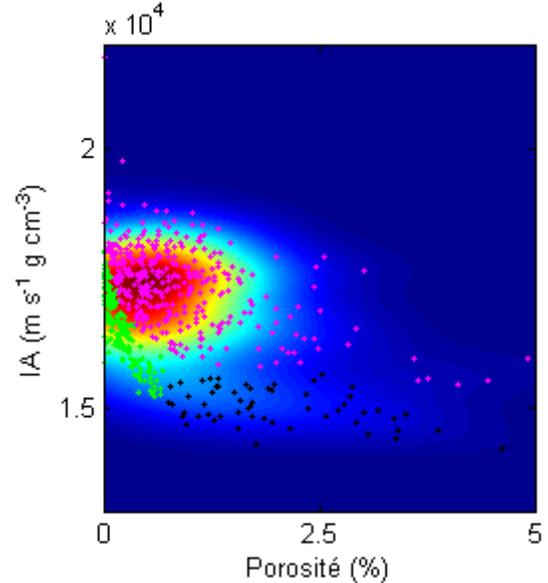


Figure 9. Fonction de densité de probabilité 2D normalisée entre l'impédance acoustique (IA) et la porosité. Rouge indique une forte probabilité et bleu indique une probabilité nulle de mesurer conjointement les 2 valeurs d'IA et de porosité. Les valeurs initiales d'IA et de porosité aux diagraphies sont présentées avec des croix vertes (Famille 1), magenta (Famille 2), et noires (Famille 3).

La PDF 2D sur la Figure 9 présente les probabilités conjointes d'obtenir toutes les valeurs d'IA et de porosité possibles. Selon cette PDF 2D, il est difficile de déterminer si une relation existe entre la porosité et l'impédance acoustique dans le Beekmantown au site de Saint-Flavien. Il est pratiquement impossible de différencier des familles pétrophysiques à partir de cette PDF 2D.

Une bonne résolution de la PDF 2D est importante pour obtenir les meilleures estimations possibles de la porosité à partir des valeurs d'impédance acoustique. Si aucune relation n'existe entre les deux propriétés, l'apport du cube d'IA serait nul. Afin d'améliorer la relation entre les deux propriétés, on effectue une transformation normale des données de porosité. L'utilisation de la PDF 2D sur les données de porosité normalisée permet de distinguer trois familles

pétrophysiques dont les relations respectives avec les valeurs d'impédance acoustique sont mieux définies.

3.2.4. Identification des familles pétrophysiques

En effectuant une transformation normale de la porosité, on modifie les valeurs afin d'en former une variable gaussienne de distribution normale. La PDF 2D de l'IA versus la porosité normalisée est montrée à la Figure 10.

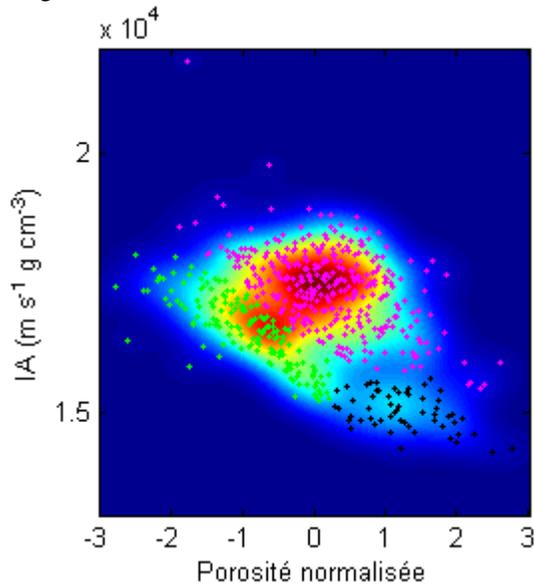


Figure 10. Fonction de densité de probabilité 2D normalisée entre l'impédance acoustique (IA) et la porosité normalisée. Même code de couleur que la Figure 9.

D'après cette PDF 2D sur les porosités normalisées, il est possible de visualiser trois familles distinctes dont les données de diagraphies sont présentées avec des points de couleur (vert pour Famille 1, magenta pour Famille 2, et noir pour Famille 3). La méthode des modèles de mélanges gaussiens (GMM) (Dubreuil-Boisclair et al., 2012; Grana et al., 2012) est utilisée pour estimer la PDF 2D en une somme pondérée de fonctions gaussiennes. Bien que ces trois familles soient identifiées seulement à partir de l'analyse de données pétrophysiques (IA et porosité), elles semblent correspondre à des géologies distinctes sur les retailles de carottes analysés. La Famille 1 (points verts) est définie par des carbonates relativement purs avec une proportion non-négligeable de dolomie. La Famille 2 se distingue par une importante proportion de dolomie. Il est difficile de bien discerner les Familles 1 et 2 car la transition est graduelle entre les deux familles. Bien

que présentant une plus grande porosité, la Famille 3 possède une plus grande proportion d'argile qui pourrait limiter sa perméabilité, et donc l'injection de CO₂ dans les zones où cette famille est présente. Il est donc essentiel de bien modéliser la distribution de la Famille 3 pour évaluer un volume réaliste de pores connectés disponibles pour l'injection de CO₂. Les zones d'intérêt pour l'injection se situent dans les zones plus poreuses des Familles 1 ou 2.

Afin de modéliser la distribution de la porosité en fonction de la famille pétrophysique, on reconstruit des PDF 2D de l'IA versus la porosité réelle séparément pour chacune des familles (Figure 11). Les PDF 2D calculées sur chacune des familles présentent une relation mieux définies entre l'IA et la porosité. En séparant ainsi en familles pétrophysiques, on améliore les estimations de porosité qui seront estimées à partir de la relation déterminée pour chacune des familles.

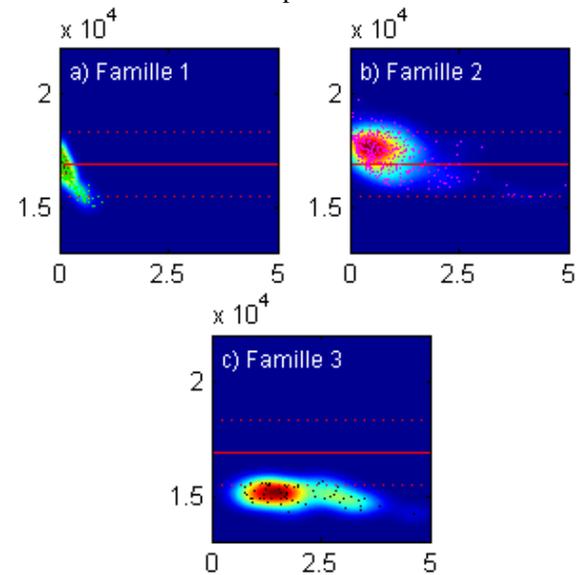


Figure 11. Fonction de densité de probabilité 2D normalisées entre l'impédance acoustique et la porosité calculées sur chaque famille pétrophysique. Les traits rouges correspondent à l'IA moyenne du cube déterministe plus ou moins trois écarts-types.

Pour chaque point de l'espace IA versus porosité, il est ainsi possible de calculer la probabilité d'appartenance à chacune des trois familles. Ces probabilités seront utilisées dans l'algorithme de simulations gaussiennes séquentielles afin de sélectionner la famille correspondant à chaque point de la grille. Une fois que les paramètres géostatistiques sont évalués à l'aide de toutes les données d'IA et de porosité acquises dans le Groupe du Beekmantown dans la région de Saint-

Flavien, la prochaine étape consiste à rehausser le contenu fréquentiel du cube sismique d'impédance sismique 3D pour échantillonner l'étendue complète des valeurs d'IA calculées sur les diagraphies.

3.3. Calcul des cubes d'IA hautes fréquences par inversion sismique stochastique

La relation entre l'impédance acoustique et la porosité est déterminée à partir des diagraphies mesurées aux puits. À partir de cette relation, l'IA calculée avec des données sismiques est utilisée pour guider les estimations de porosité en tous points du modèle. Un principe important des SGS est que l'IA de la sismique représente les mêmes valeurs que l'IA mesurée aux diagraphies. Bien que cela semble une tautologie à première vue, ce n'est pas nécessairement toujours le cas. Dans un premier temps, comme c'est le cas pour le cube d'IA déterministe calculé à Saint-Flavien, le cube d'IA inversé à partir des données sismiques n'est pas toujours contraint par toutes les diagraphies d'IA. La relation déterminée par les diagraphies n'est donc pas toujours valable lorsqu'on tente de l'appliquer aux valeurs d'IA du cube sismique. Bien que l'IA moyenne du cube sismique déterministe corresponde bien à la moyenne évaluée sur les diagraphies au niveau du Beekmantown (histogrammes de la Figure 12), la variance du cube sismique déterministe est moins élevée qu'aux diagraphies. On voit bien sur les histogrammes (a) et (b) de la Figure 12 que les distributions de l'IA aux puits et sur le cube sismique déterministe sont significativement différentes.

Cela aura un impact important sur les simulations de porosité, puisque si le cube d'IA déterministe est utilisé, les valeurs extrêmes de porosité (correspondant

aux valeurs extrêmes d'IA) ne pourront être échantillonnées adéquatement. En particulier, la Famille 3 (Figure 11c), bien qu'identifiée sur les diagraphies, pourra difficilement être échantillonnée car elle correspond à des valeurs d'IA trop faible (non présentes sur le cube déterministe).

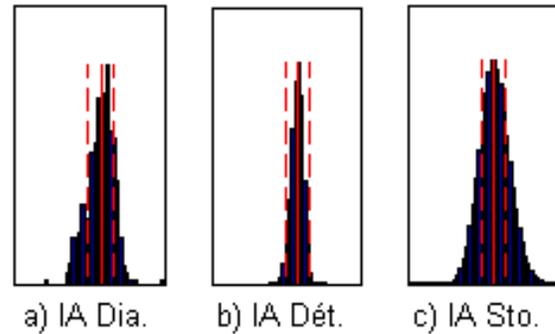


Figure 12. Histogramme de l'IA a) sur les diagraphies, b) sur le cube sismique déterministe et c) sur une réalisation d'un cube hautes fréquences obtenue par inversion sismique stochastique. Sur les 3 histogrammes, les traits rouges correspondent à l'IA moyenne plus ou moins un écart-type calculées sur les diagraphies. Les axes d'IA des trois histogrammes varient de 10 000 à 22 000 $m s^{-1} g cm^{-3}$.

De plus, la résolution verticale de la sismique (30-35 m) est beaucoup plus faible que la résolution des diagraphies (10-15 cm). Cette faible résolution verticale de la sismique a pour effet de moyenniser les valeurs d'impédance acoustique, et ainsi atténuer les variations verticales rapides de porosité qui peuvent survenir. Cet effet peut être vu sur les profils d'impédance acoustique déterministe extraits du cube sismique présentés à la Figure 13.

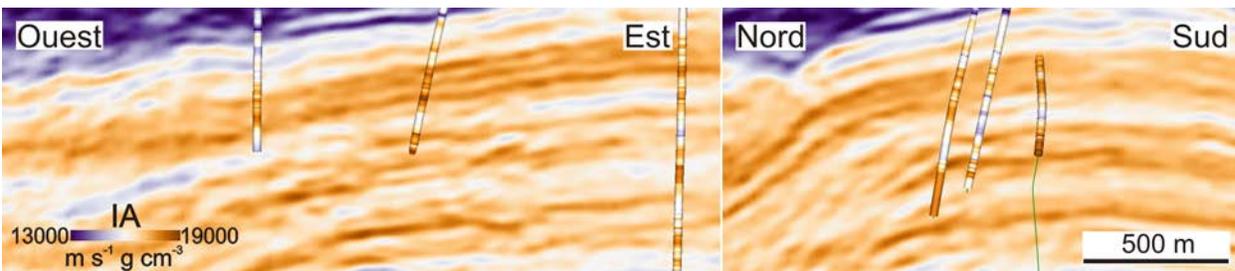


Figure 13. Impédance acoustique inversée de façon déterministe sur deux profils extraits du cube sismique. Les diagraphies d'impédance acoustique mises à l'échelle de 2 ms des puits situés à proximité des profils sont présentées avec la même échelle de couleur. L'extension verticale des 2 profils est de 230 ms.

On remarque, sur la Figure 13, que les impédances acoustiques obtenues par l'inversion déterministe ne correspondent pas toujours aux variations d'impédance acoustique déterminées sur les diagraphies. Bien que les tendances basses fréquences soient généralement respectées, on observe un biais dans les variations hautes fréquences à la plupart des diagraphies. Ces différences, aussi observables sur les histogrammes d'IA de la Figure 12, engendrera un biais sur les modélisations de porosité par SGS, puisque seules les valeurs de porosité correspondant aux valeurs d'IA échantillonnées sur l'histogramme peuvent être simulées. Pour réduire le biais induit sur les simulations de porosité avec le cube d'IA déterministe, on génère

des cubes d'IA hautes fréquences par inversion sismique stochastique (ISS) (Buland et Omre, 2003 ; Escobar et al., 2006 ; Buland et al., 2008). L'ISS utilise le cube d'IA déterministe comme modèle initial basse fréquence, et le modifie par une approche bayésienne pour générer plusieurs cubes d'IA hautes fréquences respectant les contraintes initiales : la tendance exprimée par le cube d'IA déterministe, le cube d'amplitude sismique, et les diagraphies d'IA évaluées aux puits (Doyen, 2007). 500 réalisations globales équiprobables de cubes IA hautes fréquences sont ainsi générées par ISS. Les résultats d'une de ces réalisations sont présentés à la Figure 14.

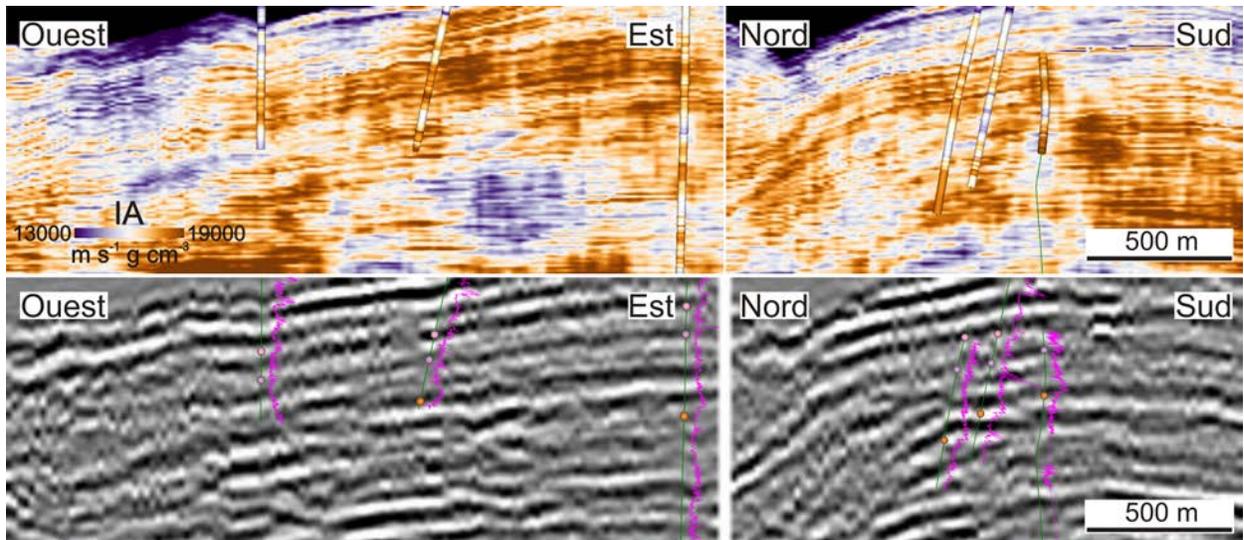


Figure 14. Résultats d'une réalisation d'impédance acoustique obtenue par inversion sismique stochastique. Les profils du haut sont les IA inversées, tandis que les profils du bas sont les amplitudes sismiques hautes fréquences obtenues à partir des profils d'IA. Les diagraphies du haut sont les IA mises à l'échelle de 2 ms avec la même échelle de couleur que les profils d'IA. Les diagraphies du bas (rose) sont les diagraphies soniques mises à l'échelle de 2 ms. L'extension verticale des 2 profils est de 230 ms.

Pour chacune des réalisations globales d'IA, les nœuds (x,y) de la grille sismique sont visités selon un chemin aléatoire. Plusieurs réalisations locales d'une trace d'IA y sont générées par simulations gaussiennes séquentielles. Les inversions sont guidées par un modèle géostatistique *a priori* (variogrammes définis sur les diagraphies d'IA, fonction de covariance définie par les poids de krigeage sur les positions initiales des diagraphies IA et des points déjà simulés), et par le cube IA déterministe de basses fréquences. Les traces d'IA modélisées localement sont ensuite convoluées avec l'ondelette sismique pour obtenir des traces d'amplitude sismique de hautes fréquences. Ces traces sismiques de hautes fréquences sont comparées avec

les traces d'amplitude sismique basses fréquences initiales. La meilleure trace d'amplitude sismique haute fréquence est retenue et devient une valeur conditionnante pour l'inversion des autres nœuds. Le processus est répété jusqu'à ce que tous les nœuds soient visités afin d'obtenir une réalisation globale du cube d'IA haute fréquence.

Des niveaux de tolérance spécifiques sont appliqués aux trois types de données initiales : les diagraphies d'IA, le cube d'IA déterministe, et le cube d'amplitude sismique basse fréquence. Ces niveaux de tolérance spécifiques sont employés afin de refléter le niveau de confiance envers chaque type de données. Le niveau de

confiance sur les diagraphies étant assez élevé, le niveau de tolérance sur ces données est fixé relativement bas, afin de respecter au maximum les données initiales. Des niveaux de tolérance plus permissifs sont fixés pour les données sismiques, afin d'accepter une plus grande déviation par rapport à leur valeur initiale. La Figure 14 montre que les valeurs d'IA obtenues aux diagraphies sont mieux reproduites sur les sections d'IA obtenues par ISS. On note également des variations verticales plus importantes de l'IA que sur le cube d'IA déterministe.

Bien que les réalisations d'IA soient toutes différentes (essence même d'un procédé stochastique), toutes les réalisations simulées sont aussi probables les unes que les autres, et respectent toutes les données initiales. La moyenne des 500 réalisations d'IA et d'amplitude sismique de hautes fréquences tend vers les valeurs initiales du cube déterministe, les différences d'IA étant comprises à l'intérieur de trois écart-type d'IA calculé sur le cube déterministe. La Figure 15 présente les différences entre la moyenne de 500 réalisations d'IA et d'amplitude sismique obtenues par ISS et les cubes déterministes d'IA et d'amplitude sismique.

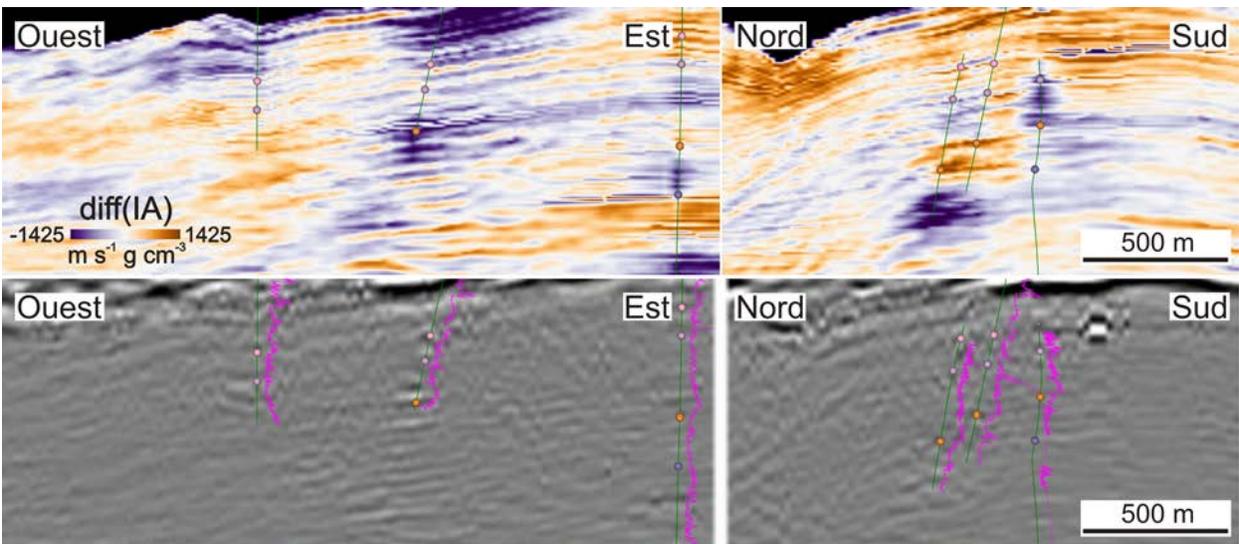


Figure 15. Différences entre la moyenne de 500 réalisations d'IA (haut) et d'amplitude sismique (bas) obtenues par inversion sismique stochastique et les valeurs d'IA et d'amplitude sismique du cube déterministe. Les inversions sont optimisées pour le Groupe du Beekmantown, compris entre les marqueurs aux puits rose (zone BA) et les marqueurs mauve (toit du Theresa).

On voit qu'il existe une certaine différence entre la moyenne des réalisations d'ISS et les données du cube déterministe. Cette différence peut être expliquée par les niveaux de tolérance utilisés pour l'inversion. Il est logique d'observer une telle différence entre les deux types de données, car les cubes d'IA modélisés par ISS sont obtenus afin d'augmenter le contenu fréquentiel du cube initial, et sont donc présentés avec un support différent. Les histogrammes des IA obtenues par ISS représentent un compromis entre l'histogramme d'IA aux puits et l'histogramme du cube d'IA déterministe (Figure 12).

3.4. Modélisation des cubes de porosité par SGS

Utilisant les diagraphies de porosité, les probabilités d'appartenance à chaque famille, les PDF 2D entre la porosité et l'IA pour les 3 familles pétrophysiques, et les cubes d'IA obtenus par ISS, des réalisations de porosité sont modélisés par simulation gaussienne séquentielle avec une approche bayésienne (Gastaldi, 1998 ; Dubrule, 2003 ; Doyen, 2007). Cette approche bayésienne permet d'inclure la probabilité de trouver la propriété recherchée en fonction de toute autre information disponible. Dans le cas présent, on cherche la probabilité *a posteriori* de connaître la porosité Φ en fonction de l'impédance acoustique IA . Selon le

théorème de Bayes, cette probabilité *a posteriori* $P(\Phi|IA)$ peut s'exprimer ainsi :

$$P(\Phi|IA) = \frac{1}{P(IA)} \cdot P(IA|\Phi) \cdot P(\Phi)$$

où $P(\Phi)$ est la probabilité *a priori* déterminée à partir des paramètres de krigeage et de variogramme pour chaque famille, $P(IA|\Phi)$ est la vraisemblance évaluée par la PDF 2D, et $P(IA)$ est un facteur de normalisation.

L'algorithme utilisé pour modéliser la porosité est adapté de Dubreuil-Boisclair et al. (2012) et Dubreuil-Boisclair (2013) pour tenir compte de la présence des trois familles pétrophysiques. L'algorithme est présenté à la Figure 16 pour la simulation de la porosité à un point précis de la grille sismique 3D et comprend six étapes.

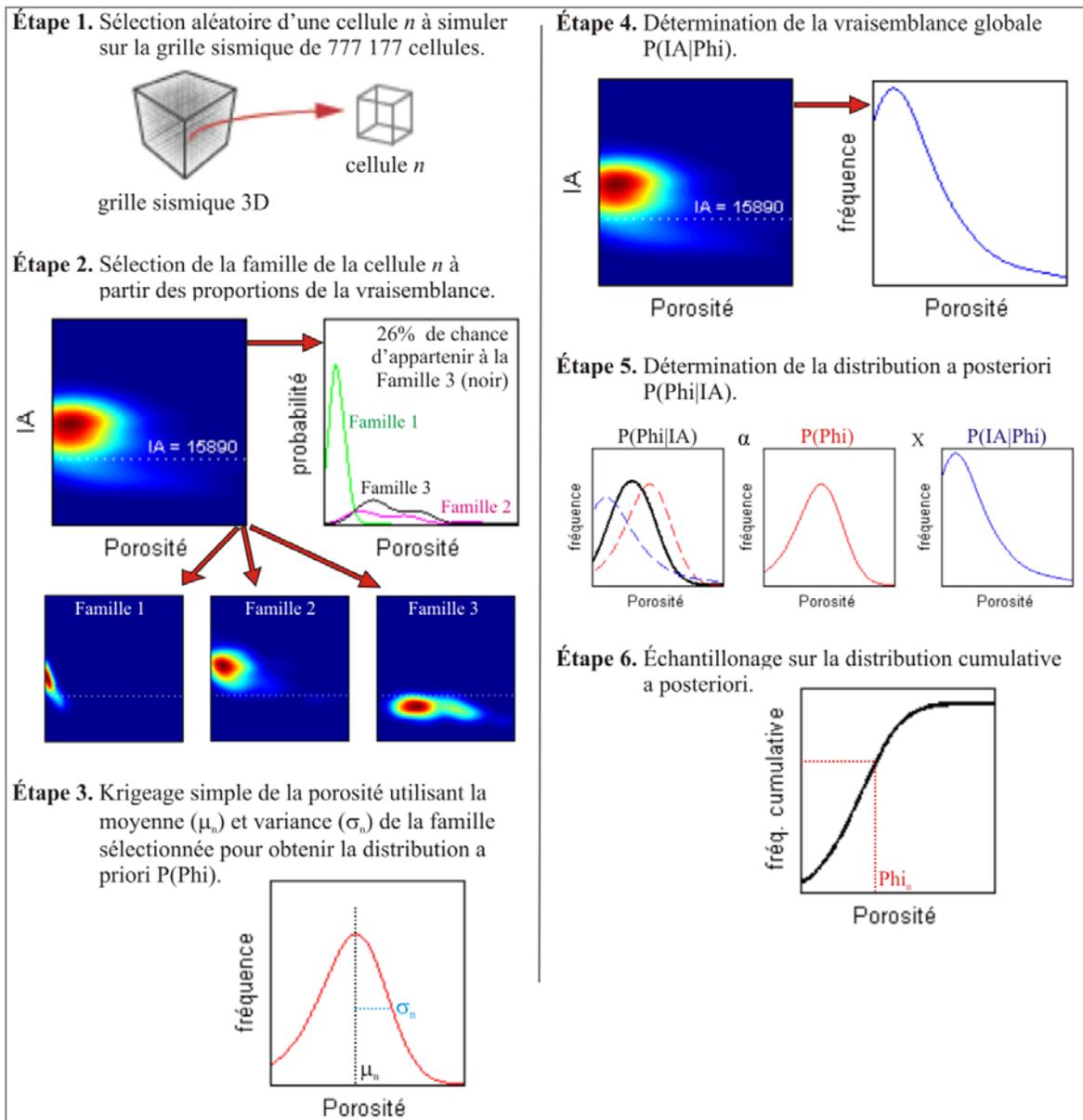


Figure 16. Schéma de l'algorithme de simulation séquentielle gaussienne avec approche bayésienne utilisé pour modéliser la porosité du réservoir du Groupe de Beekmantown à Saint-Flavien (figure modifiée de Dubrule, 2003 et Dubreuil-Boisclair, 2013).

La première étape consiste à définir un chemin aléatoire pour parcourir et estimer la porosité aux 777 177 cellules de la grille de modélisation. Pour chacune des simulations, ce chemin est aléatoirement redéfini afin qu'il soit unique pour chaque modèle. Les prochaines étapes décrivent la procédure à employer pour estimer la porosité à une seule cellule (notée n) de la grille. Ces étapes sont répétées séquentiellement pour toutes les cellules.

La deuxième étape consiste à sélectionner la famille pétrophysique dans laquelle se trouve la cellule n . Les méthodes couramment utilisées sont les simulations géostatistiques afin de générer des modèles de distribution de faciès. Ces méthodes plus complexes ne sont pas utilisées ici car il y a trop de recouvrements sur les PDF 2D d'IA et de porosité entre les familles pétrophysiques à Saint-Flavien. Dans ce projet, on calcule les probabilités de sélectionner chacune des familles à partir de la vraisemblance évaluée sur chaque famille selon la valeur d'IA de la cellule n . Afin d'assurer une certaine continuité à la distribution spatiale des familles, on pondère les probabilités avec les probabilités des points inclus à l'intérieur de l'ellipse d'influence du variogramme. On tire ensuite aléatoirement une valeur permettant de sélectionner la famille en tenant compte des probabilités de tomber dans chacune des familles.

En troisième étape, on calcule la distribution *a priori* $P_n(\Phi)$ en fonction des valeurs connues de porosité sur les diagraphies et sur les cellules préalablement simulées (cellules 1 à $n-1$). La distribution *a priori* est calculée par krigeage simple en utilisant le variogramme, la moyenne et la variance correspondant à la famille sélectionnée.

En quatrième étape, on extrait la vraisemblance globale $P(\text{IA}|\Phi)$ à partir de la PDF 2D pour la valeur IA extraite de la cellule n .

On calcule ensuite la distribution conditionnelle finale, aussi appelé distribution *a posteriori* $P(\Phi|\text{IA})$, par la multiplication de la distribution *a priori* et de la vraisemblance évaluées aux mêmes points. La distribution *a posteriori* est normalisée par la probabilité marginale de la porosité ainsi que par son aire totale sous la courbe.

La sixième et dernière étape consiste à calculer la distribution cumulative *a posteriori* de la porosité et y tirer une valeur aléatoire de porosité qui est assignée à la cellule n à modéliser. Cette valeur de porosité est

ensuite considérée comme une valeur *a priori* pour la simulation des autres cellules de la grille. La procédure est ainsi répétée jusqu'à ce que la porosité soit simulée à toutes les cellules de la grille.

On obtient ainsi une réalisation de porosité par simulation séquentielle gaussienne avec approche bayésienne pouvant être adaptée pour une distribution non-gaussienne et multimodale de la porosité. Puisqu'il s'agit d'une approche bayésienne incorporant l'incertitude et les probabilités dans la procédure, chacune des réalisations simulées est différente et respecte toutes les données et statistiques initiales. Il est proscrit de se fier simplement aux valeurs de porosités simulées sur une seule réalisation, car cette valeur est appelée à changer pour chaque réalisation. En simulant un grand nombre de réalisations, on découvre la force de cet algorithme, permettant d'évaluer les probabilités de dépasser une porosité de coupure. 250 réalisations de porosité sont complétées pour le réservoir du Groupe de Beekmantown à Saint-Flavien.

4. Résultats

Dans la première partie de cette section, quelques réalisations de porosité sont présentées pour démontrer la variabilité des résultats que les SGS avec une approche bayésienne peuvent engendrer. Les résultats globaux obtenus sur l'ensemble des réalisations sont ensuite décrits. Ces résultats expriment les probabilités de dépasser une certaine porosité de coupure et les probabilités de ne pas se situer dans la Famille 3, correspondant à une géologie peu propice à l'injection de CO_2 (présence d'argile). Les résultats d'une étude de connectivité des zones poreuses sur trois réalisations sont ensuite présentés. Les résultats de l'étude de connectivité servent finalement à évaluer le potentiel de séquestration géologique du CO_2 à l'échelle du réservoir de Saint-Flavien.

4.1. Simulations de porosité par SGS

La Figure 17 présente les résultats de trois réalisations de porosité effectuées sur le réservoir du Groupe de Beekmantown à Saint-Flavien.

Les profils de porosité de la Figure 17 montrent bien que la porosité moyenne est très faible dans le réservoir de Saint-Flavien. Les zones plus poreuses ($>2\%$) sont peu nombreuses et très localisées. Les porosités simulées sur les trois réalisations de la Figure 17 tendent vers les porosités observées sur les diagraphies à proximité des puits. Les valeurs ne sont pas

exactement les mêmes car il existe un léger décalage spatial entre les deux points de mesure, mais la corrélation aux puits est excellente. Les profils

présentés ne passent pas exactement par tous les points des diagraphies, générant un artéfact visuel plutôt qu'une erreur dans les modélisations.

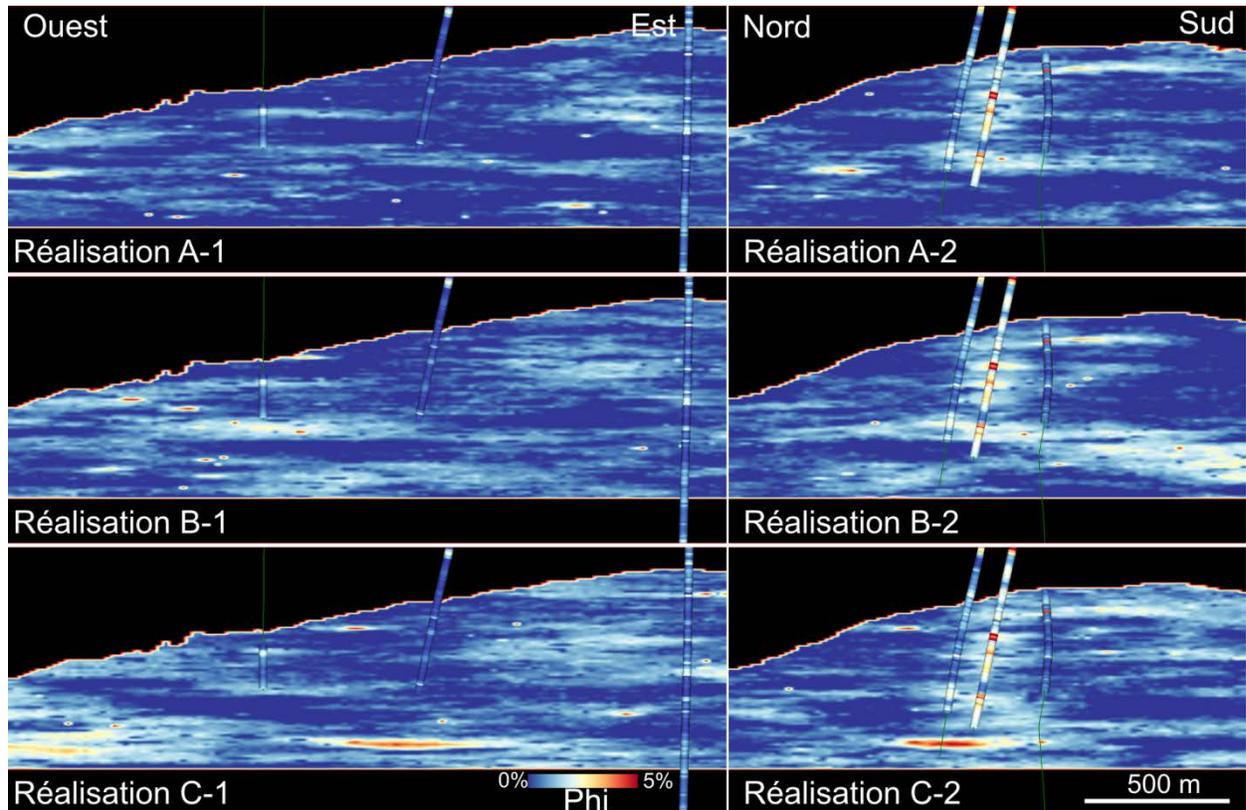


Figure 17. Profils est-ouest (gauche) et nord-sud (droite) de 3 réalisations de porosité A, B, et C. Les diagraphies de porosité effective mise à l'échelle de 2 ms des puits à proximité des profils sont présentées avec la même échelle de couleur. L'extension verticale des profils est de 230 ms.

Une grande variabilité de la porosité simulée est observée sur les profils des trois réalisations de la Figure 17. Bien que tous les modèles utilisent les mêmes données initiales et paramètres géostatistiques, les résultats obtenus semblent différents. La structure des modèles de porosité est similaire pour chaque réalisation, représentant un compromis entre le respect des paramètres des variogrammes, et de la relation existant sur les PDF 2D avec l'IA. Bien que très variables, les résultats obtenus sont beaucoup plus réalistes que ceux qui auraient pu être obtenus par d'autres méthodes telles que le co-krigeage, qui ont tendance à générer des modèles de porosité lissée. L'effet de dôme observé sur les profils sismiques (Figure 3) et d'IA (Figure 13 et Figure 14) disparaît sur les réalisations de porosité. Bien que les PDF 2D respectent les relations existantes entre la porosité et l'IA, les variogrammes sont bâtis sur une grille

cartésienne ne pouvant tenir compte des changements de direction des principales orientations des structures géologiques comme cela semble être le cas dans l'échelle de Saint-Flavien. On observe aussi des points localisés de forte porosité distribués aléatoirement dans le modèle. Ces points sont un effet normal des SGS avec approche bayésienne qui peut sélectionner des points extrêmes dans la distribution *a posteriori* en dépit de leur très faible probabilité. L'utilisation des SGS avec approche bayésienne se démarque des autres méthodes par la possibilité qu'elles offrent de calculer certaines statistiques et probabilités sur toutes les réalisations simulées. Bien que toutes les réalisations de porosité soient équiprobables, on peut calculer la distribution de porosité en chaque cellule de la grille à partir des 250 réalisations. En intégrant les porosités des 250 réalisations, il devient intéressant de calculer certaines probabilités de dépassement d'un seuil de

porosité (Figure 18).

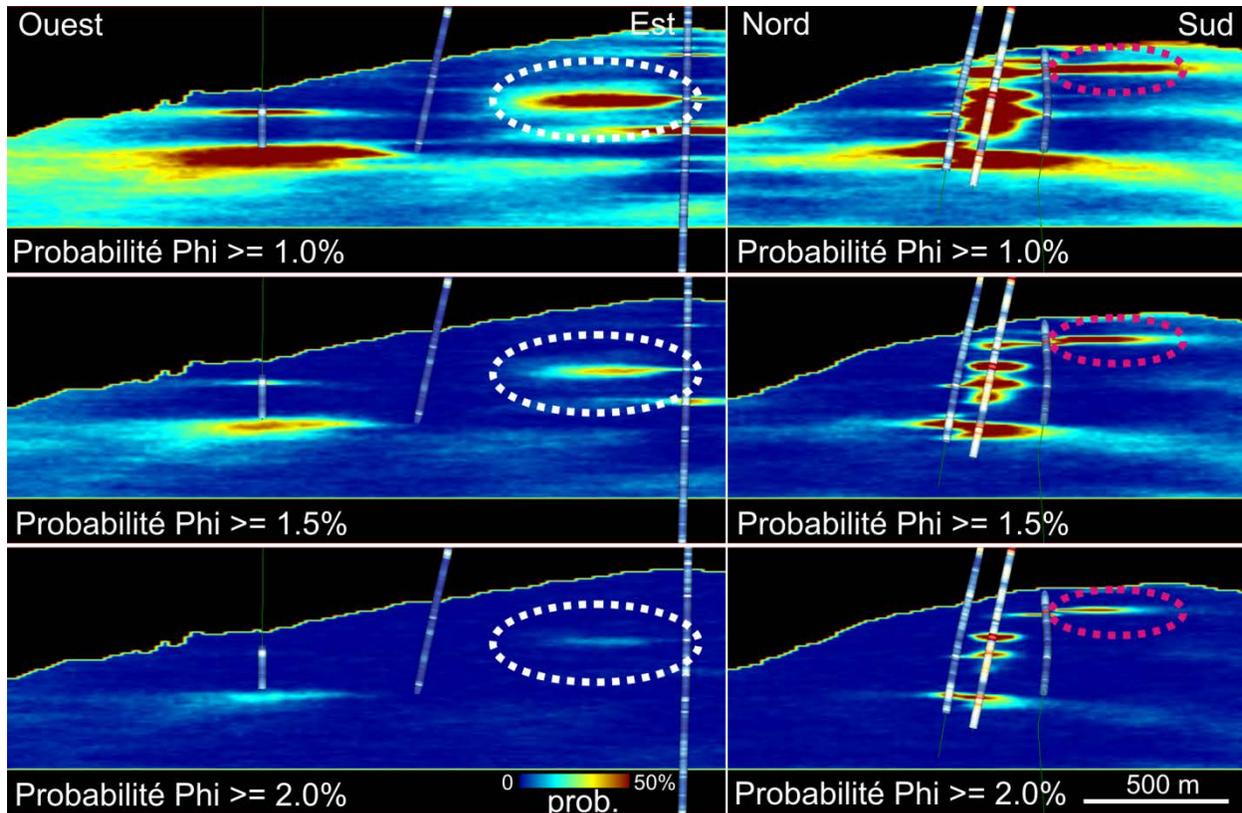


Figure 18. Probabilités de dépassement d'une porosité de coupure de 1.0%, 1.5%, et 2.0% calculées à partir des 250 réalisations de porosité (profils est-ouest à gauche, profils nord-sud à droite). Les diagrammes de porosité sont aussi présentés. L'extension verticale des profils est de 230 ms. Les cercles pointillés sont décrits dans le texte.

Les profils de la Figure 18 présentent la distribution des zones plus poreuses. En calculant les probabilités de dépasser une certaine porosité de coupure sur les 250 réalisations simulées, on peut identifier les zones où il est plus probable d'observer une porosité élevée. Les zones rouges sur la Figure 18 indiquent que plus de 50% des réalisations ont généré une porosité plus élevée que la porosité de coupure établie. On peut ainsi identifier les zones poreuses et le niveau de confiance avec lequel ces zones sont identifiées. Les variations des probabilités avec la valeur de coupure indiquent aussi une plage de valeurs possibles pour la porosité. En utilisant la zone encerclée par un pointillé blanc sur la Figure 18 comme exemple, on détermine que la porosité de cette zone est probablement comprise entre 1.0% et 2.0%. En effet, la probabilité de dépassement de 1.0% est très élevée, tandis que la probabilité de dépassement de 2.0% est très faible. Il s'agit d'une zone à porosité réelle moyennement élevée. La porosité de la zone identifiée par un pointillé magenta est

probablement plus élevée, sa probabilité de dépasser une porosité de 2.0% restant élevée. Bien qu'on ne puisse connaître la valeur exacte de la porosité de ces zones, on peut affirmer avec confiance qu'une bonne porosité existe pour ces deux zones. Ces résultats sont importants du point de vue de la séquestration géologique du CO₂, car ils permettent de déterminer les cibles à viser pour une injection potentielle de CO₂, tout en indiquant le niveau de confiance avec lequel ces cibles sont identifiées. D'autres paramètres peuvent aussi influencer le bon déroulement d'une opération d'injection de CO₂ telle que les variations locales de la géologie. Des familles pétrophysiques ont été identifiées au préalable dans le réservoir du Groupe de Beekmantown à Saint-Flavien. La Famille 3 a été caractérisée comme possédant une proportion importante d'argile, pouvant limiter la propagation d'un fluide comme le CO₂. On peut inclure ce paramètre dans les calculs afin de retrouver les zones poreuses n'appartenant pas à la Famille 3 (Figure 19).

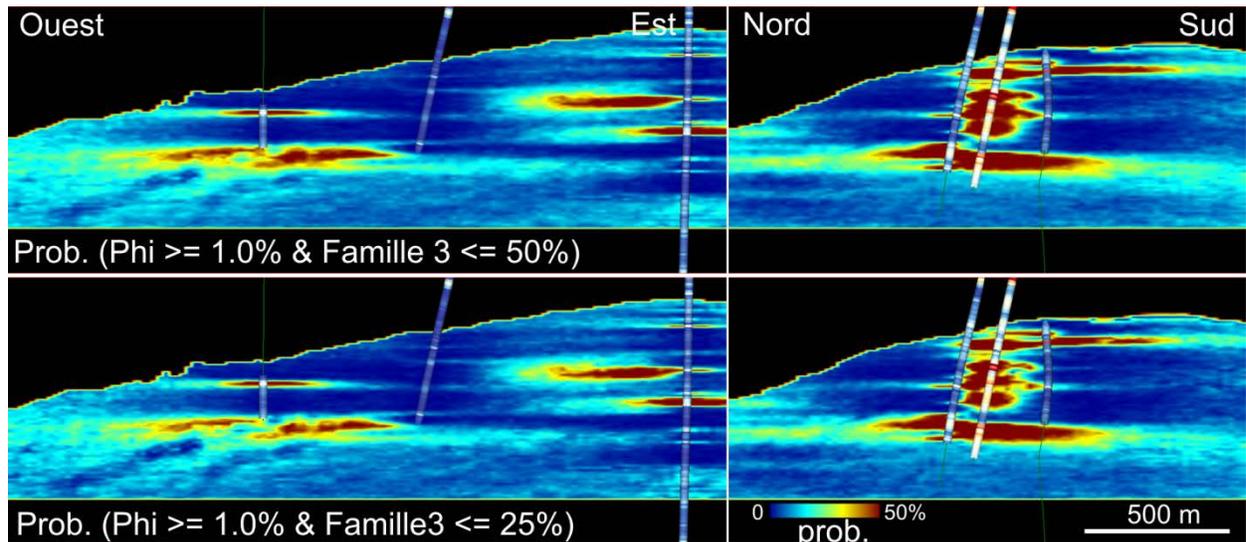


Figure 19. Probabilités de dépassement d'une porosité de coupure de 1.0% et d'avoir une probabilité d'occurrence de la Famille 3 de moins de 50% (haut) et de moins de 25% (bas) (profils est-ouest à gauche, profils nord-sud à droite). Les diagraphies de porosité sont aussi présentées. L'extension verticale des profils est de 230 ms.

L'analyse de la Figure 19 démontre que l'ajout d'une autre condition (exclusion de la Famille 3) restreint les zones d'intérêts pour l'injection de CO₂. Il est aussi possible d'adapter le niveau de contrainte associé à la présence de la Famille 3 en variant les probabilités d'appartenance à cette famille. En utilisant les deux exemples présentés à la Figure 19 (probabilité d'appartenance à la Famille 3 de 50% et 25%), les zones propices à l'injection de CO₂ sont légèrement moins étendues lorsqu'une plus faible probabilité de rencontrer la Famille 3 est utilisée. Ce niveau de contrainte additionnel permet ainsi d'ajuster le niveau de confiance avec lequel la prise de décision pour l'injection de CO₂ peut être effectuée.

En comparant les résultats de la Figure 19 avec les profils du haut de la Figure 18, les zones intéressantes pour l'injection de CO₂ sont moins étendues et présentent des bordures moins lisses lorsque la géologie est prise en compte. L'apport de l'inversion sismique stochastique doit être souligné. En effet, dans le cas de Saint-Flavien, la Famille 3 étant liée à des impédances acoustiques faibles, l'utilisation du cube d'IA déterministe ne permettait pas d'obtenir un échantillonnage adéquat de cette famille. En utilisant les cubes d'IA obtenues par ISS, la Famille 3 peut aussi être échantillonnée avec une fréquence correspondant à la distribution observée sur les diagraphies. Cela permet ainsi de calculer des volumes plus réalistes de pores connectés, ce qui permettra d'estimer de façon

plus précise les volumes possibles d'injection de CO₂ ainsi que sa propagation dans le réservoir.

4.2. Étude de connectivité

Dans le domaine de la séquestration géologique du CO₂, tout comme dans l'analyse d'un réservoir de gaz et de pétrole, il ne suffit pas seulement d'évaluer le volume poreux. Il faut également déterminer le niveau de connectivité entre les pores pour assurer une bonne propagation des fluides dans le milieu géologique ciblé. Les calculs de connectivité permettant d'évaluer les volumes poreux connectés sont donc d'une importance capitale pour estimer les volumes de CO₂ qu'il serait possible d'injecter, et évaluer les limites de sa propagation dans le réservoir.

Les volumes de pores connectés des 3 réalisations précédemment présentées (Figure 17) sont affichés à la Figure 20. Sur chaque réalisation, la connectivité surfacique entre chaque cellule possédant une porosité de plus de 1.0% et dont la probabilité de faire partie des familles 1 ou 2 est la plus importante. Cela permet d'identifier des pochettes poreuses où l'injection de CO₂ pourrait être envisageable. De façon arbitraire, on identifie ici les pochettes poreuses et connectées dont le volume rocheux est plus grand que 500 000 m³.

On note la différence des volumes poreux entre les résultats des analyses de connectivité effectuées sur les 3 réalisations présentées à la Figure 20.

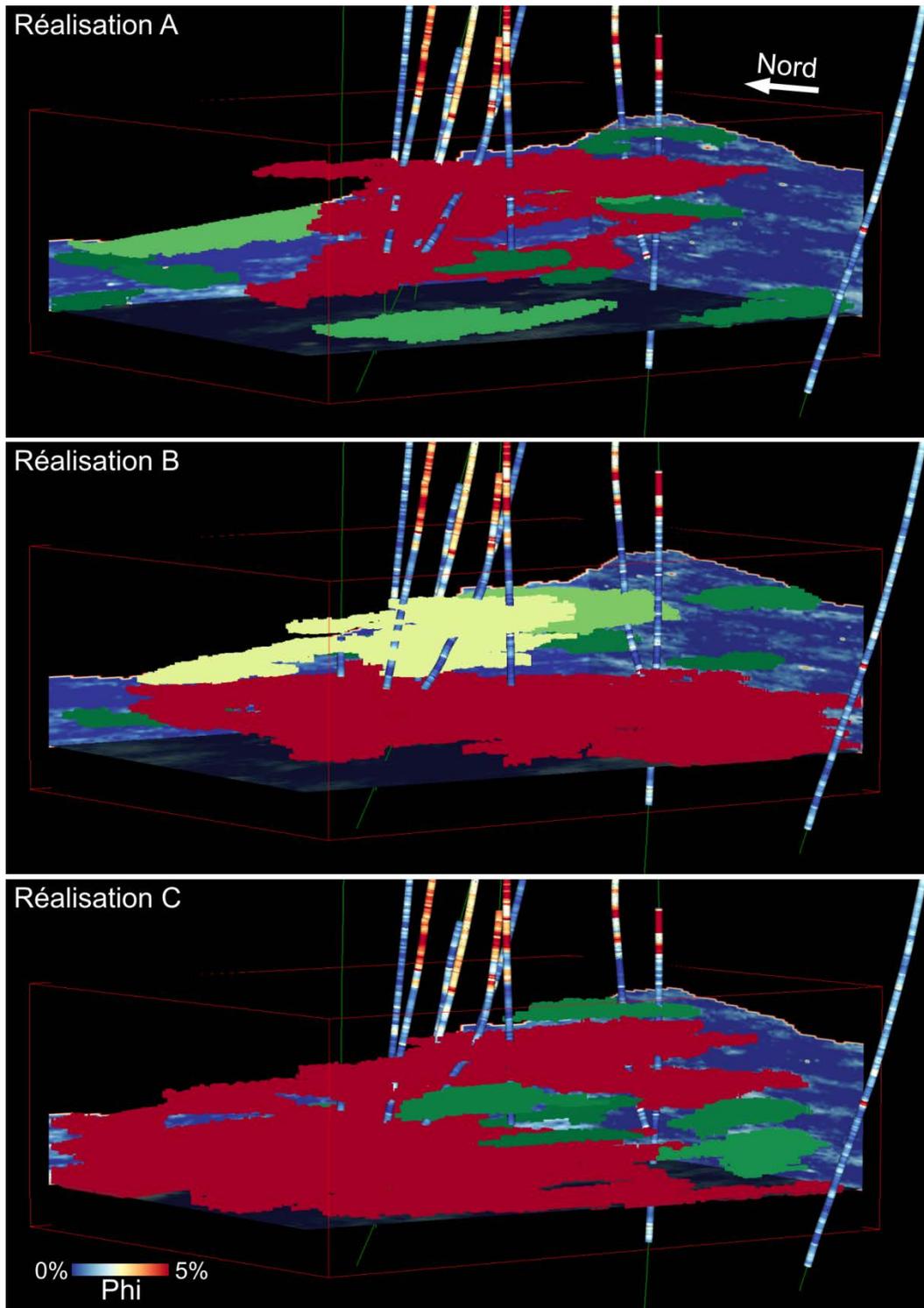


Figure 20. Volumes de pores connectés sur les 3 réalisations présentées à la Figure 17. Les volumes connectés sont présentés avec une échelle de couleur variant de vert ($5 \times 10^5 \text{ m}^3$) à rouge (plus de $5 \times 10^7 \text{ m}^3$). Les profils de porosité simulée et les diagraphies de porosité sont présentés en arrière plan.

Sur la réalisation A, on dénote 15 pochettes poreuses de plus de 500 000 m³, pour un volume total de 9.81x10⁷ m³, soit 6.4% du volume total modélisé. En multipliant le volume de chaque cellule par la porosité modélisée, on obtient un volume poreux total de 1.41x10⁶ m³, pour une porosité moyenne de 1.40% dans ces zones poreuses connectées. Il s'agit de la réalisation donnant le volume poreux le moins élevé des 250 réalisations.

Sur la réalisation B, on dénote seulement 12 pochettes poreuses de plus de 500 000 m³. Ce plus petit nombre qu'en A est dû au regroupement de petites pochettes en des pochettes de taille plus élevée. On obtient ainsi un volume total de 1.56x10⁸ m³, soit 10.0% du volume total modélisé. On calcule un volume poreux total de 2.25x10⁶ m³ avec une porosité moyenne de 1.44%.

Finalement, sur la réalisation C, on observe 14 pochettes poreuses de plus de 500 000m³ pour un volume total de 2.29x10⁸ m³, soit 14.7% du volume total modélisé. On estime un volume poreux total de 3.41x10⁶ m³ avec une porosité moyenne de 1.39%. Cette réalisation représente le troisième plus gros volume poreux.

4.3. Potentiel de séquestration du CO₂

En utilisant les volumes poreux connectés et les paramètres pétrophysiques exprimant l'état initial à Saint-Flavien, il est possible d'estimer la masse totale (G_{CO_2}) de CO₂ pouvant être séquestré dans chacune des réalisations simulées de porosité, selon les standards établis dans l'Atlas Nord-Américain pour la séquestration du carbone (2012) :

moyennes ou en utilisant des méthodologies plus simplistes comme le cokrigage. Ces méthodes ont tendance à sous-estimer les valeurs extrêmes de porosité pouvant exister. Les estimations de la porosité et des volumes de CO₂ pouvant être injecté s'en trouveraient ainsi biaisés.

La condition de normalité des données initiales de porosité peut cependant restreindre l'utilisation des SGS pour un environnement comme le réservoir de Saint-Flavien, où quelques zones poreuses se retrouvent dans une matrice très peu poreuse. Cette condition peut être relaxée en classifiant les données en familles pétrophysiques possédant leur relation pétrophysique propre.

L'utilisation de l'inversion sismique stochastique est nécessaire afin de rehausser le contenu fréquentiel du cube d'IA déterministe inversé à Saint-Flavien. L'ISS permettant d'obtenir plusieurs réalisations de cubes d'IA hautes fréquences, cela permet d'échantillonner la plage complète de modèle d'IA respectant les données d'amplitude sismique initiales et les diagraphies d'impédance acoustique. Les cubes d'IA ainsi générés par ISS permettent de simuler des modèles de porosité du réservoir respectant mieux les variations de hautes fréquences observées sur les diagraphies.

Les réalisations de porosité semblent présenter une certaine structure laminaire, alors que les cubes d'amplitude sismique et d'IA présentent une structure en forme de dôme. Bien que la relation entre l'IA et la porosité soit prise en compte, les variogrammes exprimant la relation entre deux points ne peuvent tenir compte des variations d'orientation de l'ellipsoïde du variogramme en fonction de la position. Des méthodes géostatistiques existent pour effectuer les changements de coordonnées nécessaires pour palier à ce problème, telle que l'utilisation d'une distance non-euclidienne (Curriero, 2006 ; Perrin et Meiring, 1999), la mise à l'échelle multidimensionnelle (*multidimensional scaling*, Sampson et Guttorp, 1992), ou la transformation basée sur les coordonnées d'écoulement (Rivest et al., 2012). Ces méthodes sont pour le moment difficilement applicables sur des modèles de taille considérable et un cas aussi complexe que celui de Saint-Flavien.

La variabilité des réalisations de porosité obtenues par SGS est une conséquence directe de l'utilisation des simulations numériques stochastiques. L'approche bayésienne permet de contrôler cette variabilité en tenant compte des probabilités d'occurrence des

porosités et des familles en fonction de la valeur d'IA à chaque cellule de la grille. La variabilité est particulièrement importante à Saint-Flavien car les relations entre l'IA et la porosité exprimées par les PDF 2D (Figure 11) comportent une grande incertitude. Deux hypothèses pourraient expliquer cette incertitude élevée. Tout d'abord, ces relations sont généralement définies pour des réservoirs plus conventionnels, composés de grès poreux interlités avec des couches d'argile de porosité effective très faible. Dans ces réservoirs conventionnels, les relations pétrophysiques sont mieux définies pour chaque famille. La géologie du réservoir de Saint-Flavien étant plus complexe due à la présence de plusieurs types de roches (dolomie, carbonate, grès, et argile en proportions variables), les relations pétrophysiques sont plus difficiles à définir. La faible porosité existant dans le réservoir de Saint-Flavien peut aussi expliquer l'incertitude élevée. La relation existant entre l'IA et la porosité est généralement bien définie pour des valeurs de porosité beaucoup plus grande que la porosité moyenne observée à Saint-Flavien. Les SGS avec approche bayésienne utilisent cette relation et son incertitude associée afin d'estimer la porosité en tous points d'un modèle. La dispersion observée sur les valeurs de porosité en fonction de l'IA sur les PDF 2D génère ainsi une incertitude plus élevée sur les résultats. On se trouve dans les limites d'application des méthodes SGS. En utilisant les transformations normales de porosité pour identifier les familles pétrophysiques, les réalisations de porosité sont améliorées par rapport aux modélisations complétées sans tenir compte des familles. L'utilisation de familles permet de mieux recréer la distribution non-gaussienne de la porosité par une somme de 3 distributions gaussiennes représentant les 3 familles pétrophysiques.

La génération de plusieurs réalisations équiprobables de porosité par SGS permet d'estimer les probabilités de dépassement de porosité de coupure. Les modèles de porosité simulée ne présentent pas la porosité réelle (car celle-ci ne peut être observée directement), mais en complétant l'analyse sur l'ensemble des modèles simulés (250 modèles), on peut identifier les zones poreuses probables et le niveau de confiance avec lequel celles-ci sont simulées. Il est ainsi possible d'ajuster les paramètres de décision quant au potentiel d'injection de CO₂ dans le réservoir analysé, en tenant compte autant de la porosité et de la connectivité des zones poreuses.

Assumant que le réservoir soit vidé complètement du gaz naturel présent initialement, les modélisations

montrent qu'il serait possible d'y stocker du CO₂ pour un ordre de grandeur de 1.0Mt. Cette valeur correspond au seuil minimal établi dans l'Atlas Nord-Américain pour la séquestration du carbone pour qu'un réservoir de gaz soit favorable à l'injection de CO₂. Les valeurs du coefficient d'efficacité, évalué entre 27% et 36%, sont bien en-deçà du seuil minimal établi à 50% dans l'Atlas. Les coefficients sont toutefois évalués d'une façon différente et les méthodologies employées peuvent expliquer cette différence.

Bien que le cas de Saint-Flavien reste une étude sur un cas fictif d'injection de CO₂, la méthodologie développée dans ce projet permet d'adapter les méthodes SGS avec approche bayésienne pour les cas de réservoir de faible porosité de fracture. Cette approche pourrait être d'une importance capitale pour la séquestration géologique du CO₂ au Québec car les réservoirs visés sont surtout des aquifères salins situés dans les roches âgées et compactées de la plateforme du Saint-Laurent, dont la porosité moyenne est faible. Ces aquifères salins comprennent des zones de fractures poreuses localisées où les méthodes classiques de modélisation de réservoir devront être adaptées pour être valables.

6. Conclusions

Ce rapport a démontré l'intérêt des simulations géostatistiques dans le cadre d'activité de séquestration géologique du CO₂, utilisant le réservoir de gaz du Groupe de Beekmantown de Saint-Flavien comme exemple fictif pour l'injection de CO₂. L'intégration des données d'un cube sismique 3D (amplitude sismique et impédance acoustique) et des données de diagraphies d'impédance acoustique et de porosité par simulations gaussiennes séquentielles avec une approche bayésienne permet de générer des réalisations de porosité dans le réservoir de Saint-Flavien.

Le schéma conventionnel des SGS est adapté aux conditions particulières du réservoir de Saint-Flavien ; c'est-à-dire une géologie complexe et variée, et une porosité faible dont la relation pétrophysique avec l'impédance acoustique est moins bien corrélée. La transformation normale de la porosité permet de déterminer des familles pétrophysiques selon les distributions conjointes d'IA et de porosité normalisée et ainsi mieux définir les relations entre les deux propriétés pétrophysiques.

L'utilisation de l'inversion sismique stochastique est essentielle dans le contexte de Saint-Flavien. L'ISS

permet de générer des cubes d'IA à hautes fréquences afin de mieux représenter les variations rapides d'IA observées à petite échelle sur les diagraphies. Utilisant les cubes d'IA générés par l'ISS dans les modélisations de la porosité, des modèles numériques plus réalistes de porosité du réservoir de Saint-Flavien sont ainsi obtenus.

Au total, 250 modèles de porosité sont simulés par SGS avec approche bayésienne, générant une liste exhaustive de modèles équiprobables, respectant tous la distribution de la porosité dans le réservoir. Les modèles présentent des variations réalistes de la porosité, dont la structure spatiale respecte les relations déterminées à partir des données sismiques initiales et des diagraphies. Sur tous les modèles, on observe une porosité moyenne très faible, avec la présence de quelques zones de porosité plus élevée. En interprétant conjointement tous les modèles de porosité, la probabilité de retrouver une porosité dépassant un certain seuil est calculée sur l'ensemble de la grille 3D. Un seuil de porosité de 1.0% est considéré pour la présente étude. Des zones possédant une probabilité élevée de retrouver une certaine porosité sont identifiées, dont certaines possèdent un volume pouvant être intéressant pour l'injection du CO₂.

Les volumes poreux connectés, propices à l'injection du CO₂, sont calculés et présentés pour trois réalisations de porosité. Une porosité minimale de 1.0%, et l'absence de la Famille 3 sont les facteurs délimitant les zones poreuses connectées. Des pochettes de volume intéressant sont ainsi mises en évidence, caractérisant ainsi la distribution des zones de haute porosité et les chemins potentiels de propagation du CO₂ dans ce réservoir. Il faut noter que plusieurs autres pochettes poreuses sont présentes dans les modèles de porosité, mais de taille jugée insuffisante pour l'injection de CO₂. Un volume arbitrairement fixé de 500 000 m³ sert de valeur minimale pour cette étude. Le volume poreux d'une pochette est ensuite calculé en multipliant le volume des cellules par leur porosité, et en intégrant les valeurs pour toutes les cellules de chaque pochette. Un volume poreux où le CO₂ pourrait y être injecté est finalement estimé sur chaque réalisation en intégrant pour toutes les pochettes poreuses d'une même réalisation. Un volume poreux où le CO₂ pourrait y être injecté est finalement estimé sur chaque réalisation. On obtient un volume poreux total de 1.41x10⁶ m³ pour la réalisation A (plus faible volume poreux des 250 modèles) et de 3.41x10⁶ m³ pour la réalisation C (3^e plus gros volume poreux des 250 modèles). Les coefficients d'efficacité calculés à

partir du ratio du volume poreux connecté sur le volume poreux total se situent entre 27% et 36%. Le potentiel de séquestration en CO₂ du réservoir de Saint-Flavien est estimé entre 0.67Mt et 1.61Mt selon la réalisation sur laquelle il est évalué.

Les résultats de cette étude démontrent bien les avantages des simulations géostatistiques pour évaluer la distribution de la porosité dans le cadre de la séquestration géologique du CO₂ dans un réservoir de faible porosité de fracture comme celui de Saint-Flavien. Plusieurs avenues de recherche restent toutefois à explorer. L'inversion sismique stochastique génère des distributions d'impédance acoustique respectant une loi normale, ce qui n'est pas toujours le cas en réalité. Certaines méthodes de conditionnement tel que la déformation graduelle pourraient être utilisées pour tenter de retrouver les distributions d'origine. La distribution de l'IA dans le réservoir de Saint-Flavien est presque normale (histogramme de la Figure 12), générant un biais négligeable dans le cas précis de Saint-Flavien. Les SGS avec approche bayésienne sont développées pour des réservoirs comprenant une matrice poreuse dont la distribution de porosité tend vers une loi normale. Bien que cette méthodologie peut être appliquée avec certaines modifications pour des réservoirs plus complexes comme la porosité de fracture telle que retrouvée à Saint-Flavien, d'autres méthodologies peuvent mieux convenir à la problématique.

Quelques étapes restent à compléter afin de terminer cette étude fictive sur l'injection de CO₂ au site de Saint-Flavien. La prochaine étape sera de confronter les modèles de porosité générés par SGS à l'aide de données pétrophysiques statiques (porosité et impédance acoustique) aux données dynamiques de production. Une zone poreuse n'est pas nécessairement une zone intéressante du point de vue de l'injection et de la propagation du fluide. La perméabilité de la matrice est également un paramètre critique dont il faudra tenir compte. Les modèles de réservoir devront être mis à jour en tenant compte des données de production (données de pression en temps, volume d'injection et de production de gaz naturel) disponibles à plusieurs puits dans le réservoir qui servent de proxy afin d'estimer la perméabilité. Il sera ainsi possible de mettre à jour les réalisations de porosité avec les paramètres dynamiques du réservoir, permettant ainsi de réduire l'incertitude sur les modèles de porosité du réservoir. Des modélisations d'écoulement devront être effectuées afin de caler les modèles numériques avec les données de production. Une fois les modèles calés

avec les données de production de gaz naturel, il faudra ensuite effectuer des simulations d'écoulement et de propagation suite à l'injection de CO₂ dans ce réservoir. Cette étape permettra de statuer sur les volumes réalistes de CO₂ pouvant être injecté dans le réservoir du Groupe de Beekmantown de Saint-Flavien.

7. Remerciements

La présente étude a été réalisée grâce au support du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec. Nous remercions Intragaz Inc. pour nous avoir donné accès aux données géophysiques du site de Saint-Flavien, et particulièrement F. Badina, D. Leavy, et A. Hachour pour les discussions intéressantes. IHS Global Inc. a mis à notre disposition le programme d'interprétation sismique *Kingdom Suite* utilisé dans cette étude grâce à une licence académique d'utilisation. CGG Veritas est également remercié pour avoir mis à notre disposition le logiciel GeoSI (*Geostatistical Stochastic Inversion*) pour l'inversion sismique stochastique. Nous sommes reconnaissants envers P. Doyen et R. Moyen de CGG Veritas pour leurs conseils sur l'utilisation de GeoSI. Les simulations ont été réalisées sur une grappe de Calcul Canada (allocation wpn-843 de B. Giroux).

Références

- Bertrand, R., Chagnon, A., Malo, M., Duchaine, Y., Lavoie, D. et Savard, M., 2003. Sedimentologic, diagenetic and tectonic evolution of the Saint-Flavien gas reservoir at the structural front of the Quebec Appalachians. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 51(2), 126-154.
- Buland, A., Omre, H., 2003. Bayesian linearized AVO inversion. *Geophysics*, 68(1), 185-198.
- Buland, A., Kolbjornsen, O., Hauge, R., Skjaeveland, O., Duffaut, K., 2008. Bayesian lithology and fluid prediction from seismic prestack data. *Geophysics*, 73(3), 13-21.
- Claprod, M., Gloaguen, E., Giroux, B., Konstantinovskaya, E., Malo, M. et Duchesne, M.J., 2012. Workflow using sparse vintage data for building a first geological and reservoir model for CO₂ geological storage in deep saline aquifer. A case study in the St. Lawrence Platform, Canada. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2, 260-278, doi: 10.1002/ghg.
- Curriero, F.C., 2006. On the use of non-euclidean distance measures in geostatistics. *Mathematical Geology*, 30, 907-926.
- Doyen, P.M., 2007. Seismic reservoir characterization An Earth modelling perspective. EAGE Publications.
- Dubreuil-Boisclair, C., 2013. Modélisation stochastique du réservoir d'hydrates de gaz de Mallik. Thèse de Doctorat présenté à l'INRS, Université du Québec, Québec, Canada. 111 pp.
- Dubreuil-Boisclair, C., Gloaguen, E., Bellefleur, G. et Marcotte, D., 2012. Non-Gaussian gas hydrate grade simulation at the Mallik site, Mackenzie Delta, Canada. *Marine and Petroleum Geology*. 35, 20-27.
- 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.
- Ellis, D.W. et Singer, J.M., 2008. Well Logging for Earth Scientists, 2nd ed., Springer, Dordrecht, The Netherlands, 692pp.
- Escobar, I., Williamson, P., Cherrett, A., Doyen, P.M., Bornard, R., Moyen, R. et Crozat, T., 2006. Fast geostatistical stochastic inversion in a stratigraphic grid. SEG Annual Conference.
- Gastaldi, C., Roy, D., Doyen, P., et Den Boer, L., 1998. Using bayesian simulations to predict reservoir thickness under tuning conditions. *The Leading Edge*, 17(4), 589-593.
- Grana, D., Mukerji, T., Dovera, L. et Della Rossa, E., 2012. Sequential simulations of mixed discrete-continuous properties: Sequential Gaussian mixture simulation. *Quantitative Geology and Geostatistic*, 17, 239-250, doi: 10.1007/978-94-007-4153-9_19.
- Hu, L.Y., et Le Ravalec-Dupin, M., 2004. Elements for an integrated geostatistical modeling of heterogeneous reservoirs. *Oil & Gas Science and Technology, Rev. IFP*, 59(2), 141-155.
- Malo, M. et Bédard, K., 2012. Basin-scale assessment for CO₂ storage prospectivity in the Province of Québec, Canada. *Energy Procedia*, 23, 487-494, doi: 10.1016/j.egypro.2012.06.031.
- Mavko, G., Mukerji, T. et Dvorkin, J., 2009. *The Rock physics Handbook – Tools for Seismic Analysis of Porous Media*, 2nd ed., Cambridge University Press, 255pp.
- Mukerji, T., Avseth, P., Mavko, G., Takahashi, I. et Gonzalez, E.F., 2001. Statistical rock physics: Combining rock physics, information theory, and geostatistics to reduce uncertainty in seismic reservoir characterization. *The Leading Edge*, 20(3), 313-319.
- North American Carbon Storage Atlas, 2012. First edition, 51pp., <http://www.nacsap.org>.
- Parzen, E., 1962. On estimation of a probability density function and mode. *Annals of Mathematical Statistics*, 33, 1065-1076.
- Perrin, O., et Meiring, W., 1999. Identifiability for non-stationary spatial structure. *Journal of Applied Probability*, 26, 1244-1250.
- Rivest, M., Marcotte, D., et Pasquier, P., 2012. Sparse data integration for the interpolation of concentration measurements using kriging in natural coordinates. *Journal of Hydrology*, 416, 72-82.
- Rosenblatt, M., 1956. Remarks on some

nonparametric estimates of a density function. *Annals of Mathematical Statistics*, 27, 832-837.

Sampson, P.D. et Guttorp. P., 1992. Nonparametric estimation of nonstationary spatial covariance structure. *Journal of the American Statistical Association*, 87, 108-119.

Wand, M.P. et Jones, M.C., 1995. *Kernel Smoothing*. CRC Monographs on Statistics & Applied Probability, Chapman & Hall, New York.

Yilmaz, O., 2001. *Seismic data analysis: Processing, inversion and interpretation of seismic data*. Investigations in Geophysics No.10, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA.

Zhang, Y. et Sahinidis, V., 2013. Uncertainty quantification in CO₂ sequestration using surrogate models from polynomial chaos expansion. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(9), 3121-3132, doi: 10.1021/ie300856p.