

Université du Québec
INRS Eau, Terre et Environnement

Modélisation 3D du système pétrolier du bassin nord-est de la Gaspésie, Québec, Canada

Par
Adeline Parent

Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophae Doctor (Ph.D.)
en Sciences de la Terre

Jury d'évaluation

Examineur externe	Jean-Paul Callot Université de Pau et des Pays de l'Adour
Examineur externe	Keith Dewing Commission géologique du Canada
Examineur interne	Mathieu Duchesne Commission géologique du Canada
Directeur de recherche	Michel Malo INRS Eau, Terre et Environnement
Codirectrice de recherche	Muriel Thibaut IFP Energies nouvelles

Thèse soutenue le 20 Décembre 2012, à Québec, Québec, Canada



RÉSUMÉ

La Gaspésie (Québec, Canada) présente un potentiel pétrolier reconnue depuis 150 ans et des puits de gaz sont en production dans l'est de la péninsule. Un programme de recherche sur la compréhension et l'analyse du système pétrolier dans cette région a permis d'améliorer l'évaluation du potentiel pétrolier à partir des données de surface, de puits et de modélisation en 1D et 2D. Dans la continuité de ce programme, l'objectif principal de cette thèse est d'évaluer le potentiel pétrolier en 3D de la zone d'étude appelée zone Bourque située au nord-est de la Gaspésie. Pour atteindre cet objectif, il a fallu définir une méthode de travail qui se compose de plusieurs étapes en partant de l'interprétation sismique jusqu'à la simulation en saturation.

L'interprétation des lignes sismiques avec pour la première fois la vérification de l'interprétation dans un environnement en 3D a permis de déterminer la géométrie des roches en profondeur et le prolongement des deux grandes failles majeures, les failles du Bras Nord-Ouest et Troisième Lac. Ces deux failles s'enracinent profondément dans les unités cambro-ordoviciennes sous le bassin siluro-dévonien. La structure des roches en profondeur décrivent un style en ceinture de plis et de chevauchements.

La restauration en coupe valide l'interprétation des lignes sismiques et permet de déterminer la cinématique de la déformation. Ainsi le raccourcissement a été mesuré sur la Formation de Forillon avec un taux de 9 % et se rapproche du raccourcissement tectonique total de la région qui est compris entre 5 et 20 %. Pour la première fois en Gaspésie, une restauration surfacique a été effectuée tout en testant la recevabilité des résultats. Le taux de raccourcissement surfacique est de 3,8 %. Ces deux faibles taux de raccourcissement permettent de valider l'utilisation du logiciel Temis 3D qui utilise la méthode de restauration en *Backstripping*.

La reconstitution de la géométrie en 3D à l'âge actuel a permis d'améliorer le positionnement des horizons, surtout du toit des roches cambro-ordoviciennes qui sont considérées comme des roches mères potentielles, et des failles existantes et de répertorier de nouvelles failles. Le modèle surfacique a servi de modèle structural en profondeur pour le simulateur de bassin.

Pour la première fois en Gaspésie, la modélisation en 3D de l'évolution du bassin a été effectuée. La méthode proposée consiste à comparer les données de réflectance de la vitrinite simulées par le logiciel et mesurées à partir des échantillons. Le scénario qui permet la meilleure comparaison des données de réflectance de la vitrinite est celui dont les hypothèses sont : i) un flux de chaleur moyen de 50 mW.m^{-2} , ii) une érosion locale au nord des roches cambro-ordoviciennes de 4000 m à la fin de l'orogénèse taconienne, iii) une érosion salinique de 100 m de la Formation de Gascons, iv) une érosion jusqu'à 3200 m du Groupe des Grès de Gaspé après l'orogénèse acadienne et v) un enfouissement/érosion de 3000 m de roches carbonifères. Ce scénario a également été comparé avec d'autres données de calibration : les données de porosité et de traces de fission.

La simulation de la génération et de la saturation en hydrocarbures a permis de déterminer que la roche mère principale est la Formation de Rivière Ouelle et les roches mères secondaires sont les formations de Forillon et de Shiphead. Les roches réservoirs potentielles sont les formations de White Head et d'Indian Cove, la Formation de West Point qui est située dans les zones de failles, les formations de Forillon et de Shiphead présentent une accumulation d'hydrocarbures seulement lors du scénario avec des failles imperméables.

Mots clés : bassin pétrolier / nord-est Gaspésie / modélisation 3D / simulation de bassin / restauration en coupe / restauration surfacique / interprétation sismique / potentiel pétrolier / roche mère / roche réservoir

ABSTRACT

Gaspé Peninsula (Quebec, Canada) has hydrocarbon potential recognized for 150 years, and with current gas production in the east of the peninsula. A research program on understanding and analyzing the petroleum system in the Gaspé Peninsula helped in improving the evaluation of hydrocarbon potential from surface data, well data and 1D and 2D basin modeling. Following this program, the main objective of this thesis is to evaluate the hydrocarbon potential in 3D of the study area known as the Bourque zone in north-eastern Gaspé Peninsula. To achieve this objective, it was necessary to define a working method which consists of several steps starting from seismic interpretation to saturation simulation

Seismic interpretation was used to determine the geometry of the basement and the extension of two major faults: the Bras Nord-Ouest fault and the Third Lake fault, and has been implemented for the first time with the verification of these interpretations in a 3D environment. These two deep-seated faults are located in the Cambro-Ordovician units under the Siluro-Devonian basin. The structure of the basement describes a fold and thrust belt style.

A structurally restored cross-section is used to validate the seismic interpretation and to determine the kinematics of the deformation. Therefore, shortening measured on the Forillon Formation approximated 9 %, which is close to the total tectonic shortening of the area which lies between 5 and 20 %. For the first time in Gaspé peninsula, surface restoration was made while checking the results viability. Surface restoration gave a shortening of 3,8 %, which validated the use of the basin simulation software that based on backstripping.

The geometric model has helped in improving the localisation of horizons and existing/new faults. The geometry specifically aided in defining the base of the Silurian-Devonian basin where there is a potential source rock. The reconstruction of the 3D present-day geometry has served as a structural model for the basin simulation software.

For the first time, the evolution of basin modelling was performed. The suggested method consists in comparing the simulated and sampled vitrinite reflectance data. Only one scenario was conclusive with the vitrinite reflectance data. The hypothesis of this scenario is: i) a mean heat flow of 50 mW.m^{-2} , ii) a local erosion of 4000 m in the north of the Cambro-Ordovician rocks at the end of the Taconic orogeny, iii) a Salinic erosion of 100 m of the Gascons Formation, iv) an erosion up to 3200 m of the Gaspé Sandstone Group after the Acadian Orogeny and finally v) an burial/erosion of 3000 m of Carboniferous rocks. This scenario was also compared with porosity and fission track calibration data.

With the hydrocarbon generation and saturation simulations, we determined that the main source rock is located with-in the Rivière Ouelle Formation, whereas secondary source rocks occur in the Forillon and Shiphead formations. Reservoir rocks observed in the simulations are the White Head Formation, the Indian Cove Formation, the West Point carbonate formation located on footwall highs, the Forillon and Shiphead formations. However the 2 latter formations only generate potential leads in a scenario with the tight faults.

Keywords: petroleum basin / northeastern Gaspé Peninsula / 3D modeling / HC Fluid Flow / restored cross-section / surface restoration / seismic interpretation / petroleum potential / source rock / reservoir rock

REMERCIEMENTS

Cette thèse n'aurait été possible sans mon directeur Michel MALO et ma co-directrice Muriel THIBAUT. Michel dont la tranquillité et la disponibilité malgré un planning chargé sont légendaires, a su me laisser libre pour accomplir mes travaux, tout en gardant un œil critique et avisé. Muriel dont l'amour de la langue française se traduit par l'acharnement sur des détails de style, m'a permis d'atteindre un niveau d'écriture, de soucis du détail, de rigueur scientifique qui me serviront pour le reste de ma carrière.

Hier encore, je me trouvais à Québec où travaillent Nicolas PINET et Denis LAVOIE de la CGC, Rudolf BERTRAND de l'INRS ainsi que Stéphanie ROY, Martin BECHE et Daniel BRISEBOIS de la compagnie Pétrolia. Ils ont toujours montré de l'intérêt pour mes travaux et répondu à toutes mes sollicitations lorsque le besoin s'en faisait sentir. J'espère que cette thèse sera un remerciement suffisant au soutien dont ils ont fait preuve en mon égard.

A l'instar de Jean-Paul CALLOT, Keith DEWING et Mathieu DUCHESNE que je remercie de m'avoir fait l'honneur d'être les examinateurs de cette thèse. J'éprouve un profond respect pour leurs travaux et leur parcours, ainsi que pour leurs qualités humaines. Le regard critique, juste et avisé qu'ils ont porté sur mes recherches ne peut que m'encourager à être encore plus perspicace et engagée dans ma future carrière. Et je n'oublie pas Bernard CARPENTIER, Martine ANCEL et Anne JARDIN de l'IFPEN pour leurs aides inestimables.

Normalement, «faire une thèse» est une échappée solitaire mais elle s'effectue toujours au milieu de compagnons de fortune (ou d'infortune). On ne se rend pas toujours compte à quel point ils peuvent être importants dans le travail et dans la vie, jusqu'au jour où nos chemins se séparent. Je tiens donc à saluer ma collègue Gaëlle, l'équipe INRS avec Jean-Daniel « le pilier de l'INRS », Karine « notre mère à tous », Jean-Philibert « starbuck », Linda « toujours disponible », Maxime « toujours en gougounes », Suzanne « indispensable », Tien Dung,... L'équipe IFPEN avec en premier Anne Lise « le génie », Maximus, Edwin, Mathieu Ducros. Et je tiens à remercier spécialement ma chère députée, ma belle Asmine, Pikachu, David, Tatsinouette, MarieÈve,...

Toutefois, ce niveau n'aurait jamais été atteint sans la STU. Quel chemin parcouru depuis ce temps-là. Merci à Daguet, Chouchou, Ninja, Rachou, sans vous, je n'en serai pas là. Merci à l'UPMC, avec Isabelle « indispensable », Clémence « la douce », RJDC « mon mentor », une spéciale dédicace à Clark qui m'a ouvert les portes de mon avenir « en route pour l'Allemagne »!

A ma famille et Frédéric pour leur irremplaçable et inconditionnel soutien, je leur dédie cette thèse.

Garantir de n'avoir oublié personne n'est pas possible, je me permets donc de remercier ceux qui n'apparaissent pas dans ce texte mais qui ont fait ou font encore parti de ma vie. Je ne vous oublie pas, je préfère vous remercier en personne.

Enfin, aux personnes qui sont parties trop tôt :

Jacqueline Quévêdo (RIP 26/04/2008)
Jean-Marie Parent (RIP 26/12/2011)
Philippe-Olivier Parent (RIP 18/07/2012)

TABLE DES MATIERES

Résumé	i
Abstract	iii
Remerciements.....	v
1. Chapitre 1 : Mise en contexte de l'étude	1
1.1. Historique du potentiel pétrolier en Gaspésie	1
1.2. Notions de système pétrolier et problématique liée au nord-est de la Gaspésie	4
1.3. Objectifs de cette thèse.....	5
1.4. Choix du cas réel : le projet Bourque.....	7
1.5. Méthodologie de travail et organisation de la thèse.....	8
1.5.1. Méthodologie de travail	8
1.5.2. Organisation de la thèse	8
1.6. Géologie des Appalaches canadiennes.....	10
1.6.1. Les roches cambro-ordoviciennes et néoprotérozoïques et leur division temporelle et spatiale.....	10
1.6.2. Les roches du Paléozoïque moyen.....	12
1.6.3. Les roches du Paléozoïque supérieur.....	12
1.6.4. L'évolution géodynamique des Appalaches	13
1.7. Géologie de la Gaspésie.....	17
1.7.1. Les roches du Paléozoïque inférieur.....	17
1.7.2. Les roches du Paléozoïque moyen de la ceinture de Gaspé et leur division temporelle et spatiale.....	20
1.7.3. Les roches du Paléozoïque supérieur.....	26
1.7.4. Le contexte structural de la péninsule gaspésienne	26
1.7.5. Les cycles de régression-transgression en Gaspésie.....	31
2. Chapitre 2 : Analyse des données sismiques en 2D	33
2.1. Principes généraux de l'exploration sismique	33
2.2. Historique de l'exploration sismique en Gaspésie.....	34

2.3.	Méthode de travail	36
2.4.	Description des données nécessaire à l'interprétation sismique	39
2.4.1.	La division spatiale de la zone Bourque	39
2.4.2.	Les données sismiques et interprétation proposée	40
2.4.3.	Le traitement sismique en profondeur	46
2.4.4.	Les données de puits et agrandissement de la zone d'étude	48
2.4.5.	Les données lithostratigraphiques	50
2.4.6.	Les données de géologie structurale de la zone Bourque	55
2.4.7.	Les autres données géophysiques disponibles	62
2.5.	Interprétation des lignes sismiques migrées en profondeurs	66
2.5.1.	Regroupement de certaines lignes sismiques	66
2.5.2.	Description et interprétation de la Ligne 82-152	69
2.5.3.	Description et interprétation de la Ligne 82-156	77
2.6.	Discussion des résultats.....	79
3.	Chapitre 3 : Restauration structurale et construction d'un modèle structural surfacique 3D à l'âge actuel	81
3.1.	Bibliographie de la modélisation surfacique 3D en Gaspésie.....	81
3.2.	Introduction à la modélisation surfacique 3D avec le logiciel gOcad	81
3.2.1.	Présentation du géomodeleur gOcad	82
3.2.2.	Interpolation d'une propriété dans un modèle discret.....	83
3.2.3.	Notion de rugosité.....	83
3.3.	Introduction à la restauration	84
3.3.1.	Objectifs de la restauration	84
3.3.2.	Méthodes de restauration en coupe en contexte compressif.....	84
3.3.3.	Méthodes de restauration surfacique	86
3.3.4.	Méthode de restauration surfacique dans gOcad	88
3.4.	Méthode de travail pour la construction d'un modèle structural surfacique 3D.....	89
3.5.	Données disponibles pour la modélisation surfacique en 3D et la restauration	90
3.5.1.	La carte géologique de la zone Bourque.....	90
3.5.2.	Les fichiers SEGY des lignes sismiques.....	93

3.5.3.	L'ensemble des puits disponibles et les épaisseurs des formations.....	93
3.5.4.	Les autres données géoréférencées.....	94
3.5.5.	Les études antérieures sur la restauration.....	97
3.6.	Analyse des résultats de la restauration en coupe de la ligne sismique 82-152.....	98
3.6.1.	Choix d'un niveau compétent de référence.....	99
3.6.2.	Restauration en coupe de la ligne 82-152.....	100
3.6.3.	Calcul du taux de raccourcissement.....	102
3.6.4.	Construction de la paléogéométrie.....	103
3.7.	Analyse des résultats du modèle surfacique à l'âge actuel de la zone Bourque.....	109
3.7.1.	Problèmes rencontrés lors de la construction du modèle avec le logiciel gOcad.....	109
3.7.2.	Construction du modèle surfacique en trois dimensions.....	110
3.8.	Analyse des résultats de la restauration surfacique de la Formation de Forillon.....	113
3.8.1.	Choix de la méthode de restauration.....	113
3.8.2.	Test de la rétro-déformabilité d'une feuille de papier dans gOcad.....	114
3.8.3.	Restauration de la surface correspondant à la base de la Formation de Forillon.....	116
3.9.	Discussion des résultats.....	119
4.	Chapitre 4 : Application de la modélisation de bassin à la zone Bourque dans le nord-est de la Gaspésie.....	121
4.1.	Introduction au système pétrolier.....	121
4.2.	Introduction à la modélisation de bassin avec l'outil Temis 3D.....	122
4.2.1.	Présentation de l'outil de modélisation Temis 3D.....	123
4.2.2.	Méthodologie appliquée avec l'outil Temis 3D.....	130
4.3.	Description des données du bassin de la zone Bourque.....	133
4.3.1.	Le modèle structural en profondeur à l'âge actuel et les pièges structuraux potentiels.....	133
4.3.2.	La colonne stratigraphique et les données lithologiques.....	134
4.3.3.	Les paléobathymétries.....	136
4.3.4.	Les taux de sédimentation et les épaisseurs des érosions.....	136

4.3.5.	Les conditions thermiques	137
4.4.	Description des données du système pétrolier	140
4.4.1.	Les données sur les roches mères	140
4.4.2.	Les données des roches réservoirs	142
4.4.3.	Les pièges stratigraphiques potentiels de la ceinture de Gaspé	144
4.5.	Description des données de calibration	144
4.5.1.	Les cartes de vitrinite	146
4.5.2.	Les traces de fission	150
4.6.	Simulations et analyse des résultats.....	152
4.6.1.	Construction du modèle géologique avec le logiciel Temis 3D	152
4.6.2.	Simulation thermique le long des puits Sunny Bank et Gaspé Sud et comparaison avec les données publiées	153
4.6.3.	Sensibilité du TR et de la vitrinite à la variation des épaisseurs d'érosion.....	167
4.6.4.	Sensibilité du TR et de la vitrinite à la variation du flux de chaleur	186
4.6.5.	Comparaison du scénario calibré avec la carte de vitrinite avec les autres données de calibration	195
4.6.6.	Simulation en saturation	200
4.7.	Charte des évènements et discussion	220
4.7.1.	Comparaison de la charte des évènements avec d'autres études	221
4.7.2.	Discussion sur les limites de cette these	227
5.	Chapitre 5 : Conclusions et perspectives.....	229
6.	References	239

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1: Localisation de la Gaspésie	1
Figure 1.2 : Zones d'isovaleurs de la réflectance estimée de la vitrinite et stades de génération des hydrocarbures pour la partie sud du Cambro-Ordovicien, au nord de la discordance taconienne, et pour le Siluro-Dévonien de la région nord-est de la Gaspésie, au sud de la discordance.	3
Figure 1.3 : Carte de localisation des permis de recherche de pétrole, de gaz naturel et de réservoir souterrain en Gaspésie.	3
Figure 1.4 : Carte de la géologie régionale simplifiée de la péninsule de Gaspésie localisant le projet Bourque ainsi que les principales lignes sismiques du domaine et les principaux puits qui l'entourent. La carte montre également les domaines géologiques cambro-ordoviciens.....	6
Figure 1.5 : Modèle conceptuel de développement d'une barrière récifale se développant sur les points hauts de blocs faillés et basculés durant la phase d'extension du début de l'orogénie acadienne à la fin du Silurien.	7
Figure 1.6 : Organisation de la thèse et présentation du contenu de chacun des cinq chapitres.	9
Figure 1.7 : Localisation des Appalaches en Amérique du Nord.....	11
Figure 1.8 : Carte géologique simplifiée de l'est du Canada représentant l'ensemble des zones du Paléozoïque inférieur	11
Figure 1.9 : Phases tectoniques enregistrés (représentées avec des numéros) le long de l'ancienne marge continentale laurentienne dans le nord-est du continent américain.....	11
Figure 1.10 : Modèle géodynamique de la formation de la plateforme laurentienne et de la chaîne Appalachienne (de (a) à (e)) et la carte géologique simplifiée (f) des Appalaches canadiennes avec la distribution des zones tectonostratigraphiques, sous-zones et les éléments tectoniques majeurs	15
Figure 1.11: Carte géologique de la Gaspésie montrant les roches datant de l'Ordovicien précoce au Dévonien tardif.....	19
Figure 1.12 : Trois principales structures acadiennes localisées dans le segment Gaspé-Témiscouata au niveau des Appalaches québécoises	19
Figure 1.13 : Tableau de corrélation des sections stratigraphiques de 6 à 6 et de 12 à 22 du segment Gaspé-Témiscouata dans les Appalaches québécoises.....	25
Figure 1.14: Coupes schématiques de l'évolution des zones de Humber et de Dunnage en Gaspésie.....	28
Figure 1.15 : Interprétation schématique du développement séquentiel d'une ceinture de plis et de chevauchements acadienne	30

Figure 1.16 : Évolution sédimentaire et tectonique de la séquence siluro-dévonienne entre la fin de l'Ordovicien moyen et la fin du Dévonien dans le segment de Gaspésie-Matapédia-Témiscouata	31
Figure 2.1 : Carte de localisation des lignes sismiques (lignes rouges) disponibles en Gaspésie, les puits pour l'exploration pétrolière (losanges noires) et les deux zones de sismiques 3D faites par Pétrolia	35
Figure 2.2 : Schéma représentatif de la méthode de travail pour l'étude des lignes sismiques du projet Bourque	37
Figure 2.3 : Localisation de l'ensemble de lignes sismiques avec en gras celles discutées dans le texte. Localisation du projet Bourque, des lignes sismiques disponibles pour le projet (en noir) et des périmètres des deux projets sismiques 3D faite par Pétrolia en 2008 (en pointillés noirs)	38
Figure 2.4 : Carte géologique du nord-est de la Gaspésie.....	39
Figure 2.5 : Interprétation de deux lignes sismiques situées dans la zone Bourque.	40
Figure 2.6 : Visualisation et interprétation partielle des lignes sismiques 22 et 221 provenant de la sismique 3D faite par Pétrolia en 2008	41
Figure 2.7 : Carte de localisation des profils sismiques de l'étude de St-Julien et Bourque (1990) (P-11, P13, P-15, P-16, P-17, P-19, P-20, P-31 et P-32) et de la coupe structurale AA' de la compagnie Pétrolia ainsi que certains puits à proximités (Gaspé Nord n°1, Gaspé Sud n°1, Haldimand n°1 et 2, Douglas n°1, Tar Point n°1 et 2 et Malbaie n°1).	42
Figure 2.8 : Schématisation des relations structuro-stratigraphiques le long des profils sismiques SOQUIP P-19, P-20 et P-31	42
Figure 2.9 : Coupe structurale et schéma des relations structuro-stratigraphiques faite à partir des profils sismiques à proximité et des puits Haldimand n°1 et 2, Douglas n°1 et Gaspé Nord n°1	43
Figure 2.10 : Interprétation structurale des lignes sismiques VB 06, VB 04A, VB 04B et VB 04C montrant un style structural de type de tectonique de couverture.....	44
Figure 2.11 : Schéma structural à partir de l'interprétation de la ligne 2001-MRN-10B	45
Figure 2.12 : Interprétation sismique de la ligne 2001-MRN-12 montrant une géométrie de chevauchement de nappes.....	46
Figure 2.13 : Localisation du projet Bourque, de la zone Bourque et des différents puits et lignes sismiques à proximité.....	49
Figure 2.14 : Lithostratigraphie des formations de la zone de Humber et de la ceinture de Gaspé comprises entre Murdockville et le Mont Serpentine au nord-est de la Gaspésie, en fonction de l'histoire géologique et l'eustatisme de la zone.....	52
Figure 2.15 : Lithostratigraphie d'un segment de la bande Nord	54
Figure 2.16 : Carte montrant les unités stratigraphiques et tectoniques en Gaspésie et la localisation des coupes structurales présentées dans le texte.....	57

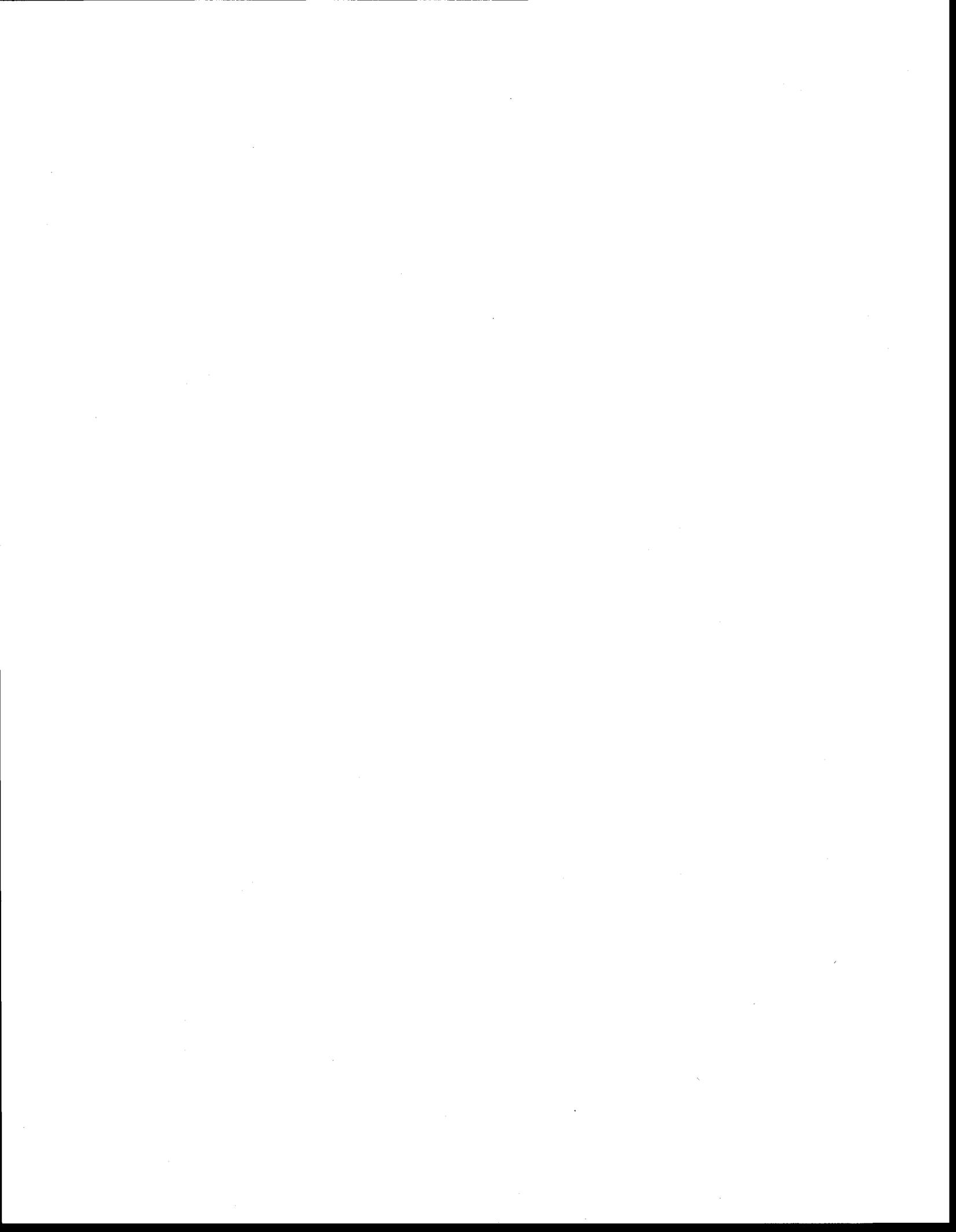
Figure 2.17 : Coupe structurale de la zone de Humber, dans le nord de la zone Bourque et la carte de localisation de la coupe structurale	58
Figure 2.18 : Coupe structurale BB' de la zone Bourque localisée sur la Figure 2.16	59
Figure 2.19 : Carte géologique du synclinal de Champoux montrant les relations entre la géologie structurale d'une déformation salinique (plis de direction NO : Fs) et d'une déformation acadienne (plis de direction NE : Fa) situé à l'est de la zone Bourque	59
Figure 2.20 : Bloc diagramme illustrant la géométrie théorique d'un pli d'extension longitudinale	60
Figure 2.21 : Deux coupes schématiques (DD' et EE') à travers l'anticlinal de la Rivière Saint-Jean au sud de la zone Bourque, illustrant les relations structurales et chronologiques entre les plis et les failles de cette partie de la Gaspésie.....	60
Figure 2.22 : Coupe schématique FF' montrant les relations tectono-stratigraphiques entre la partie nord et la partie centre du nord-est de la Gaspésie	61
Figure 2.23 : Coupe géologique (localisée sur la Figure 2.16) montrant la relation entre les roches du Supergroupe de Québec et les roches plus jeunes	62
Figure 2.24 : Ensemble de cartes faites à partir de données géophysiques.....	63
Figure 2.25 : Coupe HH' faite à partir de la géologie de terrain et d'un modèle de champ potentiel.....	66
Figure 2.26 : Image sismique profondeur de la ligne 82-152 et interprétation schématique de cette ligne.....	67
Figure 2.27 : Interprétation du bloc Nord de la ligne sismique 82-152 montrant la structure en fleurs de la FBNO, la réflexion Forillon / Indian Point, la terminaison de la réflexion Forillon / Indian Point en <i>onlap</i> (flèche rouge), la Formation de West Point et la zone d'érosion qui met en contact la Formation de West Point avec le Cambro-Ordovicien sous-jacent.....	70
Figure 2.28 : Bloc diagramme et vue en carte idéalisée de la géométrie d'une terminaison compressive en « queue de cheval » avec les plis et les failles chevauchantes.....	72
Figure 2.29 : Interprétation du pourtour du puits Mississippi n°1 (C017) le long de la ligne sismique 82-152 montrant le réflexion Forillon / Indian Point corroboré par les données du puits, la possible présence de la formation de West Point le long de la FTL et la présence de la Formation de Gascons dans le bloc Centre	73
Figure 2.30 : Interprétation de l'anticlinal Holland/Mont Bald avec la projection du puits Impérial, Gaspé n°1 (C023) le long de la ligne sismique 82-152 montrant a) le réflexion Indian Point / Roncelles dus au passage d'une lithologie avec des mudstones, siltstones et grès fins à une séquence monotone de mudstone très calcaireux, b) le réflexion Laforce/Burnt Jam Brook dû à l'apparition de bancs massifs de grès calcaires appartenant à la Formation de Laforce, c) le réflexion possible dû à la transition entre les shales calcaireux de la Formation de Burnt Jam Brook aux calcilutites et calcaires argileux de la Formation de White Head.....	74

Figure 2.31 : Imagerie sismique profondeur de la ligne 82-156 et interprétation schématique de cette ligne.....	75
Figure 2.32 : Interprétation de la partie est de l'axe du pli Holland/Mont Bald avec le puits Impérial, Gaspé n°1 (C023) montrant a) la réflexion Indian Point / Roncelles, b) la réflexion Laforce/Burnt Jam Brook, c) la réflexion possible Burnt Jam Brook / White Head.....	78
Figure 2.33 : Interprétation de la zone d'érosion située le long de la ligne sismique 82-156 montrant les terminaisons en <i>onlap</i> (fleches rouges) et les formations sus-jacentes concernées	79
Figure 3.1 : Méthode de la surface transférée pour la détermination de la profondeur du niveau de décollement	85
Figure 3.2 : Combinaison des méthodes de conservation de niveaux repères et de la longueur	86
Figure 3.3 : Restauration surfacique par la méthode de déformation continue.....	87
Figure 3.4 : Restauration d'une surface par la méthode de déformation discontinue.....	88
Figure 3.5 : Schéma général pour la construction de modèles géologiques équilibrés soit par méthode directe (modélisation directe), soit par méthode inverse (restauration).....	89
Figure 3.6 : Méthode de travail générale appliquée pour la construction d'un modèle surfacique à l'âge actuel contraint par la restauration en coupe pour la partie interprétation des lignes sismiques et la restauration surfacique après la construction des surfaces dans un environnement en 3D.	90
Figure 3.7 : Carte géologique de la zone Bourque avec la localisation de la trace de la coupe faite à partir de la ligne sismique 82-152.....	92
Figure 3.8 : Visualisation dans gOcad des lignes sismiques, des données de puits, du modèle numérique de terrain interpolé sous forme de carte.....	93
Figure 3.9 : Carte montrant la localisation du <i>Gaspé Folded Belt</i> , de la zone Bourque et des coupes structurales présentées dans la thèse de Kirkwood (1993)	97
Figure 3.10 : Méthode de travail appliquée à la restauration en coupe de la ligne sismique profondeur 82-152	99
Figure 3.11 : Coupes initiale et restaurée de la ligne sismique 82-152 montrant la géométrie des différentes formations avant et après la déformation acadienne	101
Figure 3.12 : Série de coupes paléogéométriques faites à partir de la restauration de la ligne sismique 82-152.....	107
Figure 3.13 : Coupe est-ouest dans gOcad montrant l'accentuation de la courbure survenue lors de l'interpolation de la Formation de Forillon.....	109
Figure 3.14 : La direction des contraintes (a) est telle que la surface triangulée (présentée en coupe) ne peut être correctement interpolée (b) de chaque côté de la faille (F).....	110
Figure 3.15 : Différentes visualisations en trois dimensions dans le logiciel gOcad.....	111
Figure 3.16 : Méthode de travail pour la restauration surfacique du toit de la Formation de Forillon.....	113

Figure 3.17 : Les deux types de méthode de restauration (surface correspondant à la base de la Formation de Forillon restaurée grâce aux deux méthodes proposées dans gOcad)	113
Figure 3.18: Essai de restauration grâce au logiciel gOcad avec la méthode de <i>flexural slip</i> pour un pli rétro-déformable	115
Figure 3.19 : Étude des deux fonctions (avec ou sans raccord des failles) de la méthode <i>flexural slip</i> sur la surface Forillon découpée par trois failles	117
Figure 3.20 : Mise en valeur de la déformation sur la surface Forillon restaurée par la méthode <i>flexural slip and unfault</i>	118
Figure 3.21 : Restauration de la surface correspondant à la base de la Formation de Forillon. Le taux de raccourcissement a été évalué à 3,8 %	118
Figure 4.1: Représentation simplifiée d'un système pétrolier	122
Figure 4.2 : Simulation de la restauration géométrique d'une colonne sédimentaire 1D	124
Figure 4.3: Évolution comparée des T_{max} et des taux de transformation calculés en fonction de la réflectance de la vitrinite pour les trois grands types de matière organique étudiés	128
Figure 4.4 : Schéma représentatif d'une étude avec le logiciel Temis 3D avec la liste des données d'entrée (cases blanches) et des données simulées (cases noires) en fonction des modules utilisés (ronds)	131
Figure 4.5 : Carte de localisation des données de calibration disponibles sur la zone Bourque au nord-est de la Gaspésie	132
Figure 4.6 : Cartes paléogéographiques allant de l'Ordovicien précoce au Dévonien précoce. La croix rouge localise la Gaspésie	139
Figure 4.7: Zones d'isovaleurs de la réflectance estimée de la vitrinite et des stades de génération des HC basés sur l'analyse des échantillons de surface du secteur Est du synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé	147
Figure 4.8 : Coupe structurale FG de la Figure 4.7 montrant les zones d'isovaleurs de la réflectance estimée de la vitrinite et des stades de génération des HC en profondeur.	148
Figure 4.9: Profils des puits Sunny Bank n°1 et Québec Oil n°2. Prof. : Profondeur et R_H : Réflectance estimée de la vitrinite	149
Figure 4.10 : Profils des puits Gaspé Nord et Gaspé Sud	150
Figure 4.11 : Visualisation du modèle 3D à l'âge actuel dans le logiciel Temis 3D et localisation des points A, B, C et D discutés dans le texte et des blocs Nord, Centre, Sud et Ouest	153
Figure 4.12: Schéma représentant la méthode de travail pour la simulation thermique le long des puits Sunny Bank et Gaspé Sud avec la calibration des épaisseurs d'érosion, du gradient géothermique et du flux de chaleur avec la réflectance de la vitrinite (R_0)	154
Figure 4.13 : Comparaison des données de réflectance estimée de la vitrinite calculée à partir d'échantillons du puits Sunny Bank n°1 (Tableau 4.10) et celles provenant des données simulées des différentes modélisations répertoriées dans le Tableau 4.11	157

Figure 4.14 : Comparaison et moyenne mobile des données de réflectance estimée de la vitrinite calculée à partir d'échantillons du puits Sunny Bank n°1 (Tableau 4.10) et celles provenant des données simulées des différentes modélisations répertoriées dans le Tableau 4.11.....	159
Figure 4.15 : Comparaison des données de réflectance estimée de la vitrinite calculée à partir d'échantillons du puits Gaspé Sud n°1 (Tableau 4.13) et celles provenant des données simulées des différentes modélisations. Le détail des tests se trouve dans le Tableau 4.14...	163
Figure 4.16 : Comparaison et moyenne mobile respective des données de réflectance estimée de la vitrinite calculée à partir d'échantillons du puits Gaspé Sud n°1 (Tableau 4.13) et celles provenant des données simulées des différentes modélisations dont le détail se trouve dans le Tableau 4.14.	165
Figure 4.17 : Comparaison des cartes de réflectance estimée de la vitrinite résultant de la modélisation avec le logiciel Temis 3D.....	168
Figure 4.18 : Schéma représentant la méthode de travail pour la sensibilité du TR et de la R_0 à la variation des épaisseurs d'érosion avec un flux de chaleur fixé à 50 mW.m^{-2}	167
Figure 4.19 : Schématisation du processus de construction des épaisseurs érodées dans le logiciel Temis 3D.....	169
Figure 4.20 : Coupes schématiques représentant l'enfouissement des formations le long de la ligne sismique 82-152 (Chapitres 2 et 3) en fonction des hypothèses d'épaisseurs d'érosion choisies (scénarios 1, 2, 3 et 4) et des quatre évènements appelés discordances 1, 2, 3 et 4 (Tableau 4.15).	170
Figure 4.21 : Courbes d'enfouissement des trois roches mères Rivière Ouelle, Forillon et Shiphead le long des quatre puits extraits dans le modèle 3D en fonction du temps et des hypothèses d'épaisseurs d'érosion choisis dans les scénarios 1, 2, 3 et 4.	171
Figure 4.22 : Résultats des taux de transformation (TR) en fonction du temps, de la roche mère choisie et des quatre premiers scénarios faisant varier les épaisseurs d'érosion.....	177
Figure 4.23 : Cartes de réflectance de la vitrinite provenant de la simulation avec le logiciel Temis 3D des scénarios 1, 2, 3 et 4 pour étudier l'influence de la variation des taux de sédimentation/érosion dans la zone Bourque.....	185
Figure 4.24 : Schéma représentant la méthode de travail pour la sensibilité du TR et de la R_0 à la variation du flux de chaleur avec une hypothèse d'épaisseur d'érosion correspondant aux hypothèses du scénario 4.....	186
Figure 4.25 : Carte de flux de chaleur dans le logiciel Temis 3D pour le scénario 4 entre 391,8 Ma et 250 Ma.	187
Figure 4.26 : Résultats des taux de transformation (TR) en fonction du temps, de la roche mère choisie et des quatre scénarios faisant varier le taux de flux de chaleur.....	191
Figure 4.27 : Cartes de réflectance de la vitrinite provenant de la simulation avec le logiciel Temis 3D des scénarios 4, 5, 6 et 7 pour étudier l'influence de la variation du flux de chaleur dans la zone Bourque.	194

Figure 4.28 : Comparaison des données de réflectance de la vitrinite faites à partir des échantillons (Bertrand et Malo, 2001) ET à partir des données de sortie de la simulation du scénario 4 (ronds verts et courbe en pointillé rouge), le long des puits Sunny Bank n°1 et Gaspé Sud	196
Figure 4.29: Comparaison à gauche des données de réflectance de la vitrinite faites à partir des échantillons le long du puits Gaspé Nord (Bertrand et Malo, 2001) et à droite à partir des données de sortie de la simulation du scénario 4 (ronds verts), le long des puits de l'extraction 1D correspondant aux coordonnées de l'échantillons de la trace de fission G33 (coordonnées i/j dans le modèle 3D: 156/65, Figure 4.5).....	197
Figure 4.30: Carte de la porosité à l'actuel résultant de la simulation par le logiciel Temis 3D du scénario 4.	198
Figure 4.31: Schéma représentant la méthode de travail pour la simulation en saturation avec le module d'expulsion et de migration des HC avec les hypothèses d'épaisseur d'érosion et de flux de chaleur correspondant aux hypothèses du scénario 4	200
Figure 4.32: Génération des HC de la roche mère RIVIÈRE OUELLE au cours de l'histoire du bassin.....	201
Figure 4.33: Génération des HC de la roche mère FORILLON au cours de l'histoire du bassin...	203
Figure 4.34: Génération des HC de la roche mère SHIPHEAD au cours de l'histoire du bassin...	205
Figure 4.35: Visualisation du modèle 3D en coupes (i, j, k) montrant les résultats en saturation du scénario A avec des failles perméables avec les hypothèses du scénario 4 au cours du temps.....	209
Figure 4.36: Visualisation à l'âge actuel du toit des formations ayant un potentiel réservoir d'après le scénario A (failles perméables) lors de la simulation en saturation du S ₄	211
Figure 4.37: Visualisation du modèle 3D en coupes (i, j, k) montrant les résultats en saturation du scénario B avec des failles imperméables avec les hypothèses du scénario 4 au cours du temps.....	215
Figure 4.38: Visualisation à l'âge actuel du toit des formations ayant un potentiel réservoir d'après le scénario B (failles imperméables) lors de la simulation en saturation du S ₄	217
Figure 4.39: Charte des évènements de la zone Bourque réalisée à partir des scénarios A et B (respectivement failles perméables et imperméables) de la simulation en saturation du scénario 4 avec le logiciel Temis 3D.	221
Figure 4.40 : Synthèse de la tectonique, des roches mères potentielles et de la génération et de la migration des hydrocarbures à gauche : pour les modélisations 1D du puits Gaspé Sud (Roy, 2008) et du puits Sunny Bank (Bertrand et Malo, 2001; Roy, 2008) à droite : pour la modélisation 3D de la zone Bourque à partir du scénario 4.	223
Figure 4.41: Chartes des évènements créées à partir de l'ensemble des informations disponibles en Gaspésie et des cibles d'exploration possibles appelées CEP	225



1. CHAPITRE 1 : MISE EN CONTEXTE DE L'ÉTUDE

1.1. HISTORIQUE DU POTENTIEL PÉTROLIER EN GASPESIE

Le potentiel pétrolier en Gaspésie (Figure 1.1) est reconnu depuis plus de 150 ans (Lavoie et Bourque, 2001). La stratigraphie générale et les grands ensembles tectoniques de l'est de la péninsule ont d'abord été reconnus par Logan (1844, 1863). C'est à cette période que le premier suintement d'huile fut découvert en 1860, suivi par des forages peu profonds de 200m, effectués par la Gaspé Mining Compagny résultant en une production artisanale. Près de cent ans plus tard, Jones (1936) effectue des levés géologiques dans le but d'établir le potentiel pétrolier de la région (Amyot, 1984; Rheault, 1986). De 1860 à 1950, près de 70 sondages peu profonds furent réalisés, avec des récupérations d'huile plutôt modestes. Néanmoins, une petite raffinerie fut construite en 1900, pour être démantelée en 1904 (Lavoie et Bourque, 2001).



Figure 1.1: Localisation de la Gaspésie (www.geobase.ca dessiné par Kerry Lagueux ESRI, NGDC)

En 1967, la compagnie Gulf Oil Ltd. foras le puits Sunny Bank n°1 d'une profondeur de 3536 mètres (Figure 1.2) qui s'avéra une source d'informations importantes sur la succession dévonienne de l'est de la Gaspésie.

La création par le gouvernement du Québec de la Société Québécoise d'Initiative Pétrolière (SOQUIP) en 1969 renouvela l'intérêt pour l'exploration pétrolière dans la péninsule. Au même moment, le centre de recherche Pétrole de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-Pétrole) fut créé pour appuyer les activités d'exploration de SOQUIP. Des activités de sismique-réflexion, de sondages et de travaux de laboratoire de toutes sortes, portant surtout sur le nord-est de la Gaspésie, ont contribué à augmenter les connaissances de base dans cette région.

En 1995, la découverte d'huile et de gaz à Terre-Neuve a relancé l'exploration dans l'ensemble des Appalaches et incita Shell-Canada à s'approprier les droits d'exploration sur une grande superficie en Gaspésie dans le nord-est de la péninsule. Cette découverte initia un important projet de recherche pour évaluer le potentiel en réservoirs des carbonates et des séries silicoclastiques grossières des roches siluro-dévonienues, ainsi que le potentiel en roches-mères (Lavoie et Bourque, 2001).

En 1999, la Commission géologique du Canada (CGC), en partenariat avec le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRNFQ) et plusieurs universités canadiennes, initie un vaste projet de recherche, étalé sur 5 ans, portant sur l'architecture et l'évolution des bassins sédimentaires d'âge Paléozoïque précoce et moyen de l'est du Canada, incluant plusieurs études thématiques sur les systèmes pétroliers. Une abondante documentation à propos du bassin gaspésien est venue depuis enrichir la banque de données géoscientifiques.

Au début des années 2000, la compagnie Junex met en valeur et en production le puits Galt n°1 (Figure 1.2) par des travaux de sismique et de forages. Par la suite, Bertrand et Malo (2001) de l'INRS-ETE (INRS - Eau Terre Environnement) publie une étude de synthèse sur la maturation thermique de la région nord-est de la Gaspésie (Figure 1.2).

Depuis sa création en 2005, la société pétrolière Pétrolia a acquis des permis qui recouvrent aujourd'hui 15 000km², principalement en Gaspésie (Figure 1.3, en violet). Cette compagnie a foré (entre autre) le puits Haldimand n°1 près de la ville de Gaspé (Figure 1.2). Ce puits, dont la production a atteint 30 à 40 barils de pétrole et 30 à 40 Mpc de gaz naturel par jour, avait pour objectif de vérifier la présence de zones réservoirs dans les grès dévoniens. En 5 ans, Pétrolia a foré une série de puits dans le nord-est de la Gaspésie dont les puits Haldimand n°2 et Tar Point n°1 (Figure 1.2) qui ont démontré des indices de pétrole et de gaz (rapport annuel 2010. www.petroliagaz.com).

Deux thèses de doctorat récentes s'inscrivent dans la ligne de recherche du projet sur la compréhension et l'analyse du système pétrolier en Gaspésie :

- La thèse de Martin Bêche (2008), portant sur l'analyse des lignes sismiques du MRNFQ dans la région centrale de la Gaspésie,

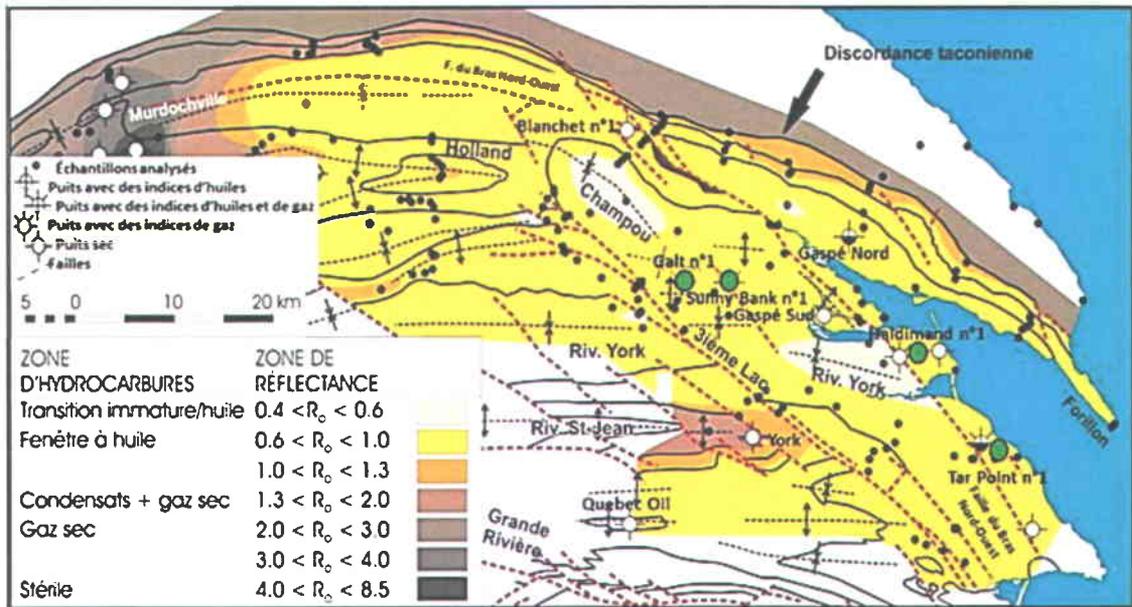


Figure 1.2 : Zones d'isovaleurs de la réflectance estimée de la vitrinite et stades de génération des hydrocarbures pour la partie sud du Cambro-Ordovicien, au nord de la discordance taconienne, et pour le Siluro-Dévonien de la région nord-est de la Gaspésie, au sud de la discordance (modifié de Bertrand et Malo, 2001). Les ronds verts correspondent aux puits détaillés dans le texte.

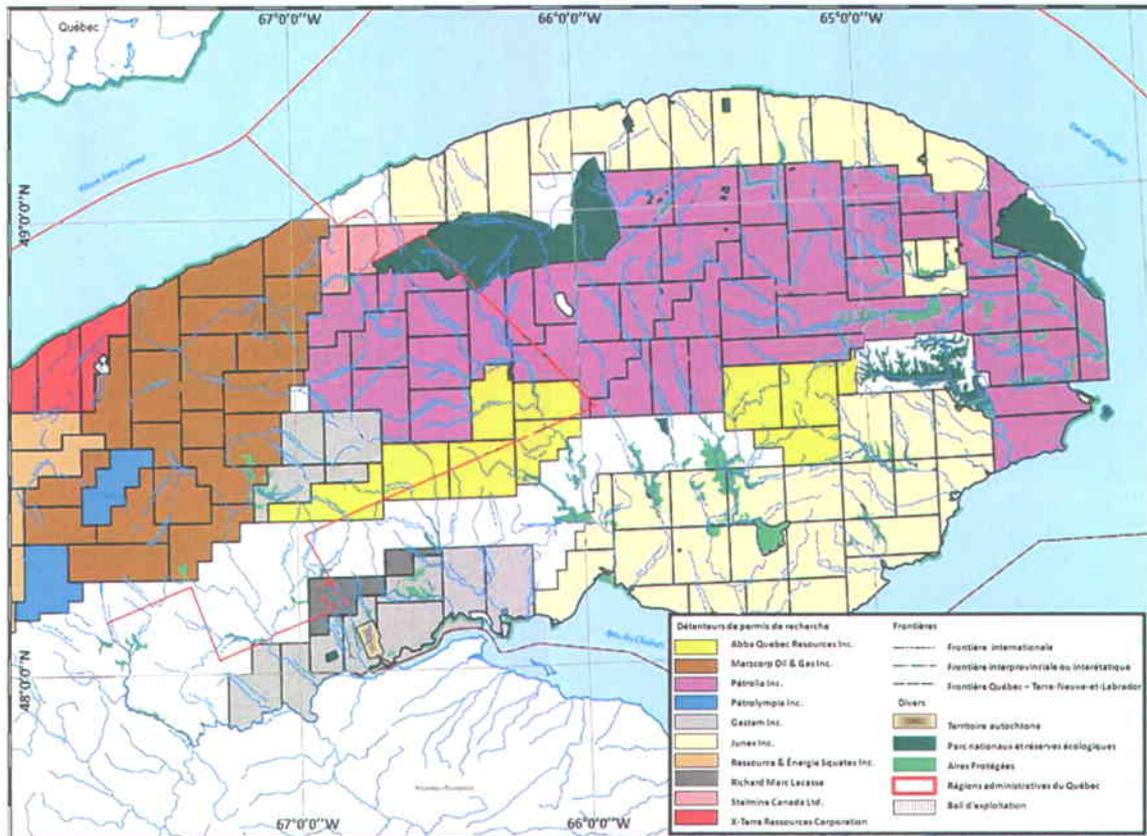


Figure 1.3 : Carte de localisation des permis de recherche de pétrole, de gaz naturel et de réservoir souterrain en Gaspésie (www.mrn.gouv.qc.ca/publications/energie/exploration/Permis_gaspesie.pdf).

- Et la thèse de Stéphanie Roy (2008), sur la maturation thermique et le potentiel pétrolière des roches siluro-dévonniennes sur l'ensemble de la Gaspésie.

La présence de pétrole n'est pas à prouver, mais il reste à comprendre le système pétrolier dans son ensemble pour pouvoir investir dans l'exploitation des hydrocarbures (HC) en Gaspésie.

1.2. NOTIONS DE SYSTÈME PETROLIER ET PROBLEMATIQUE LIEE AU NORD-EST DE LA GASPESIE

Pour former un champ de pétrole conventionnel, plusieurs éléments géologiques doivent être présents dans un bassin sédimentaire et certains événements géologiques doivent avoir eu lieu:

1. Il faut d'abord une roche riche en matière organique (roche mère) dans le bassin qui doit avoir subi une maturation thermique adéquate pour permettre à la matière organique de se transformer en HC avec une augmentation progressive de la température (génération). Des études géochimiques ont permis de reconnaître les principales roches mères et les conditions de maturation thermique de celles-ci (Bertrand, 1987; Bertrand et Malo, 2001; Roy, 2008 ; Grundman *et al.*, 2012). De plus des modélisations 1D sur la génération d'HC ont été tentées en ne tenant compte que des données stratigraphiques (âge et épaisseur des unités) et de maturation thermique (réflectance de la vitrinite) (Bertrand et Malo, 2001; Roy 2008 ; Grundman *et al.*, 2012).

2. Il faut ensuite que les HC soient expulsés de la roche mère avant qu'ils ne deviennent trop cuits (migration primaire). On sait que des HC ont été générés en Gaspésie et qu'ils ont migré puisqu'on en trouve dans des roches réservoirs par sondage en forage et au niveau des suintements de surface.

3. Des conduits perméables (roches poreuses et/ou fracturées, failles, discordances) doivent être présents pour permettre le transport des HC vers une roche réservoir (migration secondaire), or la chronologie exacte des mouvements le long des failles et les chemins de migration vers les réservoirs restent inconnus.

4. La roche réservoir doit se trouver dans un piège recouvert d'une roche imperméable (roche couverture) empêchant la fuite des HC. Or le bassin de la péninsule gaspésienne a subi plusieurs orogénèses, ce qui a pu affecter l'intégrité de la roche couverture.

Pour préserver les HC dans le réservoir jusqu'à aujourd'hui, les conditions géologiques doivent avoir été favorables. Or en Gaspésie, il existe des puits en production, des puits ayant expulsé des HC lors du forage ou encore des suintements en surface. Pour mieux comprendre le champ pétrolier au nord-est de la Gaspésie, plusieurs questions restent posées comme :

- Quelle est la géométrie des roches en profondeur?
- Quelle est la cinématique des failles et de leurs relations avec les plis environnants?
- Quand l'enfouissement maximal a-t-il eu lieu?
- Comment l'enfouissement et les érosions ont pu influencer la génération des hydrocarbures et leur expulsion des roches mères?
- Comment et quand s'est fait la migration des hydrocarbures en fonction de la structure?
- Comment des roches mères ordoviciennes ont-elles pu évoluer avec l'enfouissement tectonique et sédimentaire en ayant encore des valeurs aussi basses de réflectance de la vitrinite?

1.3. OBJECTIFS DE CETTE THESE

La thèse va chercher à répondre aux questions listées dans la partie « 1.2. Notion de système pétrolier et problématique liée au nord-est de la Gaspésie ».

La zone étudiée dans cette thèse (Figure 1.4) se situe au nord de la chaîne de montagnes des Appalaches, au nord-est de la péninsule gaspésienne, entre Murdochville et le Mont Serpentine. Cette zone ne possède que neuf lignes sismiques en deux dimensions et quelques puits peu profonds et sans donnée de diagraphie. De plus, la région est très ancienne et également très érodée. Or les taux de sédimentation/érosion sont très approximatifs et la région ne dispose que de données de réflectance de la vitrinite qui peuvent aider à calculer les profondeurs d'enfouissement des roches. Dans cette thèse, la modélisation de bassin en trois dimensions va permettre de reconstruire l'histoire géologique du bassin sédimentaire du nord-est de la Gaspésie. Pour cela, plusieurs objectifs ont été définis :

- Interpréter les lignes sismiques (2D) qui ont été préalablement retraités et convertis en profondeur.
- Reconstituer la géométrie actuelle en 3D de la portion nord-est du bassin à partir de l'intégration des données géologiques de surface, des puits, des données géophysiques et des profils sismiques pour étudier le mouvement des failles.
- Restaurer les coupes et les surfaces à leur état initial avant la déformation afin de comprendre et d'établir la cinématique des déformations taconienne, salinique et acadienne.

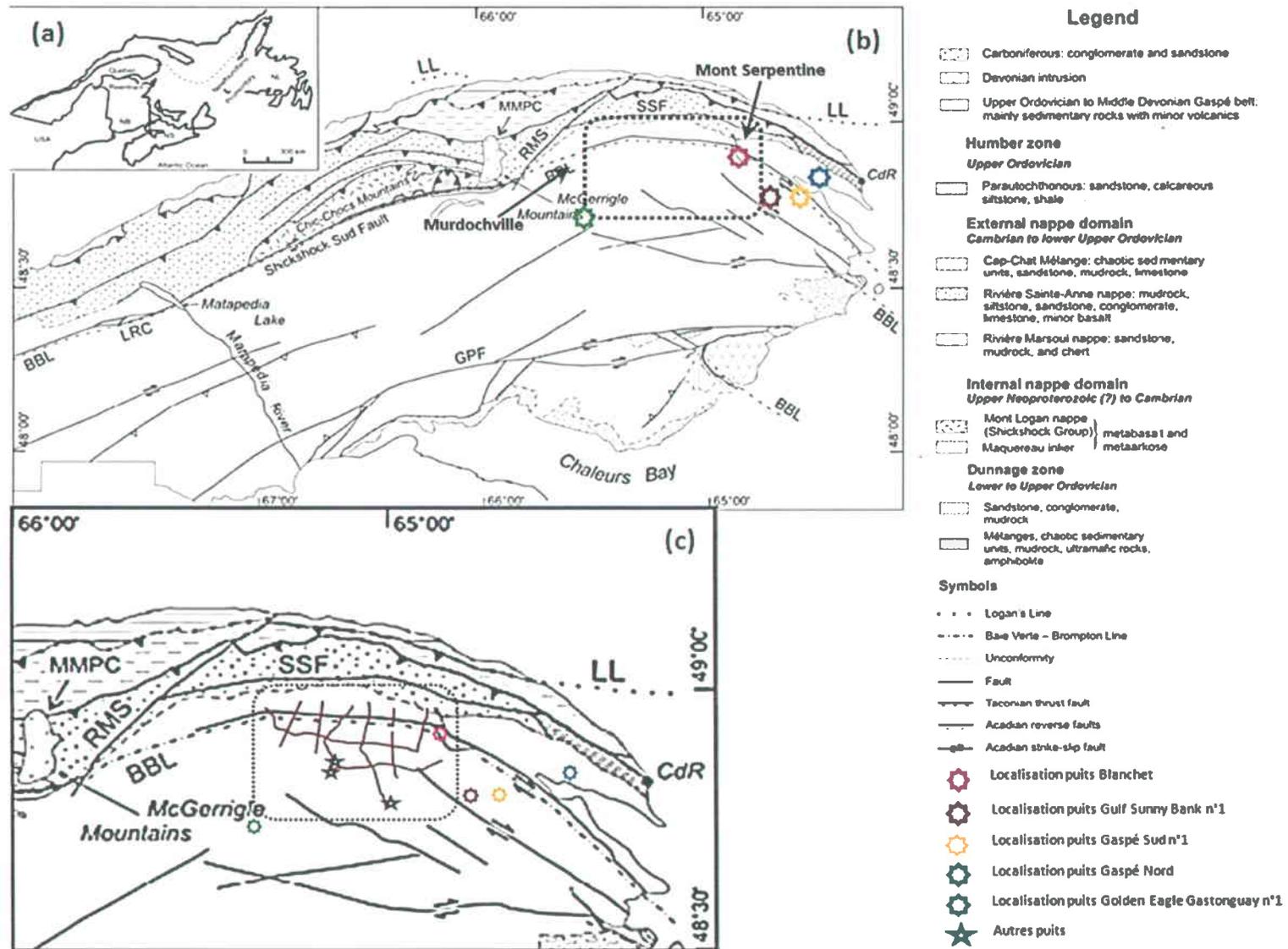


Figure 1.4 : Carte de la géologie régionale simplifiée de la péninsule de Gaspésie localisant le projet Bourque ainsi que les principales lignes sismiques du domaine et les principaux puits qui l'entourent. La carte montre également les domaines géologiques cambro-ordoviens. BBL, Baie Verte – Brompton Line; CdR, Cap des Rosiers; GPF, Grand Pabos fault; LL, Logan's Line; LRC, La Rédemption Complex; MMPC, McGerrigle Mountains Plutonic Complex; NB, New Brunswick; NL, Newfoundland; NS, Nova Scotia; RMS, Rivière Madeleine Sud fault; SSF, Shickshock Sud fault (modifié de Sacks *et al.*, 2004).

- Établir la cinématique thermique.
- Comprendre et définir les taux d'érosion au cours du temps.
- Modéliser l'évolution du bassin et du système pétrolier en 4D.
- Simuler l'évolution des fluides, dont les HC, pour évaluer le potentiel du système pétrolier.

1.4. CHOIX DU CAS REEL : LE PROJET BOURQUE

La zone d'étude se situe dans les Appalaches canadiennes dans l'est de la province de Québec, en bordure nord-est de la péninsule gaspésienne. Cette zone de 66 km² appelée la propriété Bourque (ou Projet Bourque, www.petroliagaz.com) est située à environ 50 kilomètres au nord-ouest de Gaspé (Figure 1.4). Les droits d'exploration appartiennent à la compagnie pétrolière Pétrolia (Figure 1.3). Neuf lignes sismiques sont disponibles sur le terrain du projet Bourque (Figure 1.4).

Le projet Bourque qui a débuté en 2007 a été nommé ainsi en l'honneur de Pierre-André Bourque, professeur au département de géologie et génie géologique de l'Université Laval, qui a consacré une grande partie de sa carrière à susciter l'intérêt des pétroliers pour les récifs dévoniens de la Gaspésie (www.petroliagaz.com). L'hypothèse de Bourque en 2001, fondée sur un modèle développé pour le bassin de la Gaspésie autour des calcaires récifaux de la Formation de West Point, stipule que ces derniers (Figure 1.5), très semblables à ceux qui forment les réservoirs pétrolifères du Dévonien d'Alberta (i.e., le grand gisement de Leduc), se seraient implantés et développés sur les points hauts de blocs faillés et basculés durant la phase d'extension du début de l'orogénie acadienne à la fin du Silurien (la pulsation salinique). Cette structuration en blocs basculés et la présence des complexes récifaux sont fortement suggérées par les profils sismiques de SOQUIP qui sont situés au nord-est de la Gaspésie (voir Chapitre 2). De plus, un levé sismique 3D réalisé par Pétrolia en 2008 a démontré la présence de ce complexe récifal dans la Formation de West Point (Rapport annuel 2010 www.petroliagaz.com) (Chapitre 2).

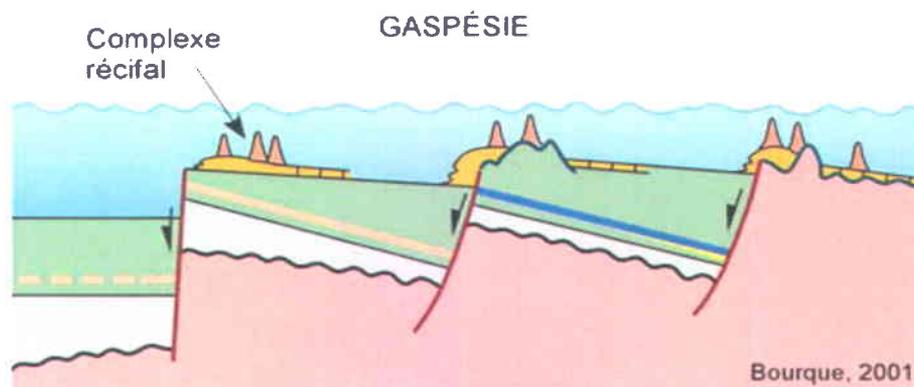


Figure 1.5 : Modèle conceptuel de développement d'une barrière récifale se développant sur les points hauts de blocs faillés et basculés durant la phase d'extension du début de l'orogénie acadienne à la fin du Silurien (Bourque, 2001).

1.5. METHODOLOGIE DE TRAVAIL ET ORGANISATION DE LA THESE

1.5.1. METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Chaque chapitre est structuré en quatre parties: **i)** une recherche bibliographique qui se compose de l'historique des travaux antérieurs et/ou de la bibliographie de l'outil utilisé, **ii)** l'élaboration d'une méthode de travail adaptée à chacun des cas (chapitres), **iii)** la présentation et la description des données nécessaires à chaque méthode préconisée, et **iv)** la comparaison et l'analyse des résultats.

Cette succession d'étapes à suivre sert à répondre à la problématique et permet de proposer un protocole qui guidera pas à pas le lecteur mais aussi tout géologue souhaitant faire la modélisation d'un réservoir pétrolier.

1.5.2. ORGANISATION DE LA THESE

Cette thèse se compose de cinq chapitres (Figure 1.6).

Dans le **premier chapitre**, la problématique liée au bassin gaspésien est expliquée. Cela permet de mettre en place des objectifs et une méthodologie de travail. Les concepts géologiques régionaux et locaux sont également abordés.

La principale source d'information en phase d'exploration précoce est la sismique-réflexion. Le **deuxième chapitre** expose l'interprétation des lignes sismiques en deux dimensions qui ont été migrées en profondeur pour faciliter le recoupement avec des données complémentaires comme les cartes géologiques, les données de terrain, les puits, les cartes gravimétriques et magnétiques. L'analyse des principales lignes sismiques permet d'obtenir l'interprétation de la structure des roches en profondeur et d'étudier la cinématique des failles.

Toutes les données présentées dans le chapitre deux sont intégrées dans un logiciel de modélisation. Le **troisième chapitre** explique les principes à la base de la modélisation géologique 3D ainsi que les deux méthodes de restauration utilisées dans cette étude qui ont pour but de vérifier la cohérence du modèle par une restauration surfacique ou des coupes équilibrées. Ce chapitre permet de valider la cinématique des failles étudiée dans le chapitre précédent et de comprendre en détail l'histoire géologique de la zone d'étude à partir de coupes paléogéométriques.

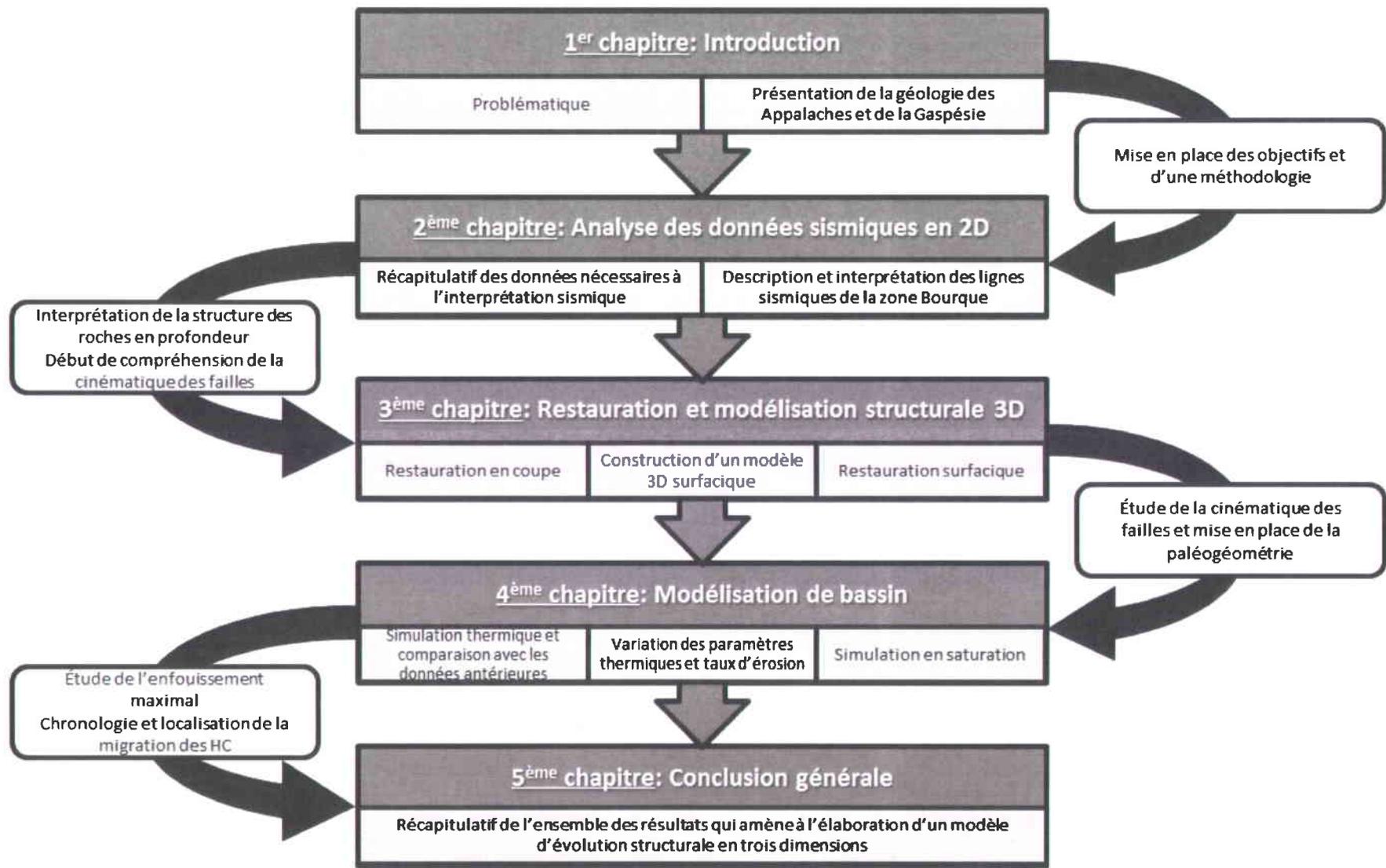


Figure 1.6 : Organisation de la thèse et présentation du contenu de chacun des cinq chapitres. Les principaux résultats de chacune des parties sont indiqués de part et d'autre du processus segmenté situé au centre. Ces résultats permettent de passer à la prochaine étape.

Le **quatrième chapitre** a pour but de présenter la modélisation 3D du bassin en maturité et en saturation. Toutes les données complémentaires qu'il a fallu intégrer, en plus de celles présentées dans le chapitre deux, sont détaillées. L'estimation des érosions et du flux de chaleur à travers le temps permet d'évaluer le meilleur scénario dans le cadre de l'étude de la maturité pétrolière dans le bassin. Ce chapitre comporte un comparatif de deux scénarios en saturation fait à partir du meilleur scénario trouvé précédemment avec ceux décrits dans la littérature.

Pour terminer, le **cinquième chapitre** synthétise l'ensemble des résultats de ce travail de recherche et permet de répondre aux questions posées dans la problématique.

1.6. GEOLOGIE DES APPALACHES CANADIENNES

Les Appalaches sont une chaîne de montagnes située à l'est de l'Amérique du Nord (Figure 1.7). La région des Appalaches canadiennes comprend les provinces de Terre-Neuve, de la Nouvelle-Ecosse, du Nouveau-Brunswick, de l'île du Prince-Édouard et la partie méridionale du Québec située au sud du fleuve Saint-Laurent. Elle présente une superficie de 500 000 km² et sa largeur est maximale (600 km) à la frontière canado-américaine, au Nouveau-Brunswick et en Nouvelle-Écosse (Williams, 1995).

1.6.1. LES ROCHES CAMBRO-ORDOVICIENNES ET NEOPROTEROZOÏQUES ET LEUR DIVISION TEMPORELLE ET SPATIALE

Les Appalaches canadiennes sont divisées en cinq zones tectono-stratigraphiques pour les roches du Paléozoïque inférieur : Humber, Dunnage, Gander, Avalon et Meguma. Ces limites coïncident avec des failles, des contrastes structuraux, lithologiques et stratigraphiques (Williams, 1979 et 1995) (Figure 1.8). A noter que la zonation du Paléozoïque inférieur s'applique à l'ensemble de l'orogène appalachien même dans les régions des Appalaches canadiennes qui ont été recouvertes entièrement par le Paléozoïque moyen ou par des roches plus jeunes. Ces zones correspondaient à des blocs continentaux et aux domaines océaniques qui les séparaient. Depuis elles se sont télescopées jusqu'à devenir des ceintures montagneuses (Figure 1.8).



Figure 1.7 : Localisation des Appalaches en Amérique du Nord (en jaune pâle). Cette chaîne de montagnes s'étire du nord au sud sur près de 2000 km de longueur depuis Terre-Neuve au Canada (non visible sur la carte) jusqu'au centre de l'Alabama aux Etats-Unis.

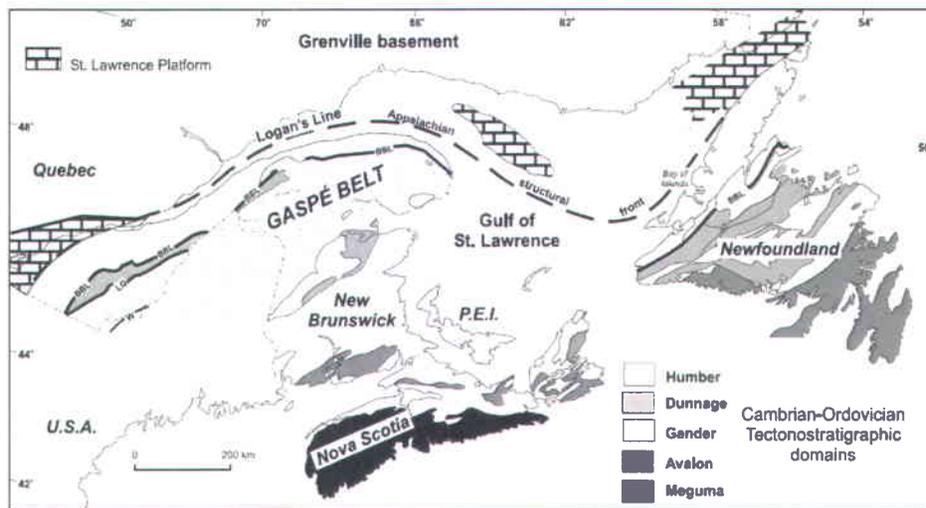


Figure 1.8 : Carte géologique simplifiée de l'est du Canada représentant l'ensemble des zones du Paléozoïque inférieur. BBL : Ligne Baie Verte - Brompton; LG : Faille de La Guadeloupe; W : Faille de Woburn. Les roches carbonifères ne sont pas illustrées. Carte modifiée de Williams 1995 (Lavoie et Asselin, 2004).

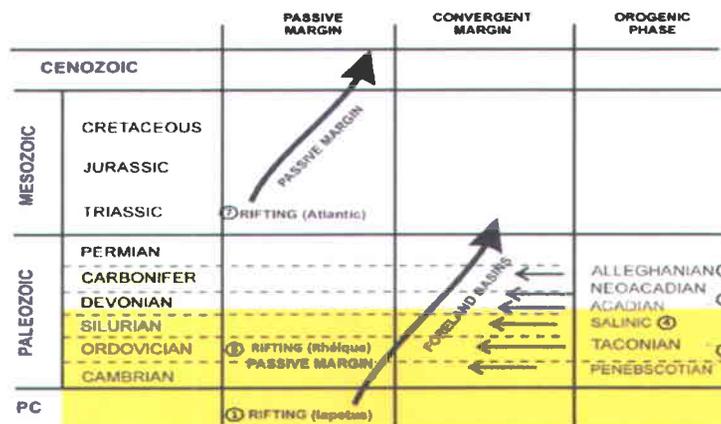


Figure 1.9 : Phases tectoniques enregistrés (représentées avec des numéros) le long de l'ancienne marge continentale laurentienne dans le nord-est du continent américain. Les orogènes majeures sont localisées sur l'échelle des temps géologiques par des flèches (modifiée de Sanford, 1993 par Lavoie, 2008).

La zone de Humber est constituée de roches sédimentaires et volcaniques déposées sur une marge passive en bordure du bouclier canadien pendant le Cambro-Ordovicien (Slivitzky *et al.*, 1991). Les roches de la zone de Dunnage se sont principalement formées à l'Ordovicien en contexte océanique. Cette zone est composée de roches sédimentaires d'eau profonde, de roches volcaniques, de mélanges, ainsi que de roches ultramafiques correspondant à des complexes ophiolitiques à la limite Humber-Dunnage (i.e. la nappe du Mont Albert en Gaspésie; Slivitzky *et al.*, 1991; Malo *et al.*, 2008). La zone de Gander est constituée d'une importante séquence de roches arénacées, siltstones et/ou shales reposant sur un socle cristallin continental (van Staal, 2007). Ces roches se sont formées à l'Ordovicien précoce. La zone d'Avalon représente un ancien arc volcanique constitué de roches sédimentaires et volcaniques néoprotérozoïques, recouvertes par la suite de mudstones et de grès du Paléozoïque inférieur. Enfin, la zone de Meguma représente la marge passive du paléo-Gondwana et est constituée de successions de grauwackes et de shales cambro-ordoviciennes (van Staal, 2007).

1.6.2. LES ROCHES DU PALEOZOÏQUE MOYEN

Les principales séquences du Paléozoïque moyen sont localisées dans des bassins successeurs épicontinentaux datant du Siluro-Dévonien. Ces bassins se sont formés soit :

- en discordance sur les roches du Paléozoïque inférieur déformées lors de l'orogénèse taconienne (ie. la ceinture de Gaspé sur les zones de Humber, Dunnage, et Gander),
- en concordance sur les zones non déformées (i.e. la ceinture d'Annapolis et la zone de Meguma; Williams, 1995).

Ces ceintures sont composées de sédiments détritiques à calcaireux déposés durant une période de calme tectonique relatif. De nombreux complexes volcaniques à caractère bimodal (basalte à rhyolite) se sont mis en place du Silurien précoce au Dévonien moyen (Williams, 1995).

1.6.3. LES ROCHES DU PALEOZOÏQUE SUPERIEUR

Les roches du Paléozoïque supérieur sont contenues dans des bassins datant du Carbonifère et/ou du Permien recouvrant en discordance les formations préexistantes. Le Bassin des Maritimes qui contient la plus grande partie des roches du Paléozoïque supérieur est recoupé obliquement par un rift d'orientation nord-est contenant les plus anciens et plus épais dépôts (jusqu'à 12 km de roches datant du Carbonifère). Les différents bassins sont constitués essentiellement de grès et de conglomérats continentaux avec la présence sporadique d'unités volcaniques à la base des séquences (Williams, 1995). Ces bassins ont subi un épisode érosif post-orogénèse acadienne et ont été affectés, surtout à l'est des Appalaches, par une tectonique intra-continentale lors de l'orogénèse alléghanienne du Carbonifère tardif au Permien (voir 1.6.4. L'évolution géodynamique des Appalaches).

1.6.4. L'ÉVOLUTION GEODYNAMIQUE DES APPALACHES

Les roches du Paléozoïque à l'est du continent se sont assemblées lors d'un cycle orogénique majeur (Wilson, 1966). La plateforme laurentienne, la chaîne des Appalaches et l'océan Atlantique ont été affectés par plusieurs phases tectoniques en convergence (Figure 1.9) dont six orogénèses (van Staal, 2005, 2007): l'orogénèse taconienne (à l'ouest) / penobscotienne (à l'est) durant l'Ordovicien précoce-moyen, l'orogénèse salinique au Silurien, l'orogénèse acadienne au Siluro-Dévonien, l'orogénèse néoacadienne pendant le Dévonien moyen jusqu'au Carbonifère précoce et l'orogénèse alléghanienne pendant le Carbonifère-Permien. Cette section résume l'évolution géodynamique des Appalaches détaillée dans les articles de van Staal (2005 et 2007).

La **première phase** tectonique au Néoprotérozoïque (entre ~625 Ma et ~555 Ma d'après Bond *et al.*, 1984 et ~570 Ma d'après van Staal, 2005) correspond à une période d'extension et de dislocation du supercontinent Rodinia, avec pour conséquence la création du continent Laurentia (plateforme laurentienne du Saint-Laurent) coïncidant au bouclier canadien et à l'ouverture de l'océan Iapétus. Cet océan a atteint une largeur d'environ 5000 kilomètres à la fin du Cambrien (500-490 Ma) (van Staal, 2005).

La **deuxième phase** tectonique (Figure 1.9) se situe entre le Cambrien tardif et l'Ordovicien tardif, et correspond à la subduction intraocéanique liée à la fermeture de la principale partie de l'Océan Iapetus. Cette phase se compose de 2 orogénèses : **i)** La première orogénèse s'est créée en trois épisodes (Figure 1.10, b, c, d1). Au Trémadocien (Figure 1.10, b), s'effectue un rapide retrait du *slab* et l'obduction du microcontinent Dashwood par la croûte océanique. S'en suit l'accrétion des terranes péri-laurentiens d'arc continental et d'arc naissant du continent Laurentia (Figure 1.10, c) (Pinet et Tremblay, 1995; van Staal, 2007). C'est ainsi que la zone de Humber (Figure 1.8) est accrétée à la plateforme laurentienne qui représente les sédiments de marge passive les plus proximaux de l'océan Iapetus. L'accrétion se produit via une importante faille de chevauchement, la faille de Logan et la plateforme du Saint-Laurent n'est que très peu déformée. L'accrétion de la zone de Dunnage (Figure 1.8) a entraîné l'obduction de lambeaux d'ophiolites sur le continent ainsi que le métamorphisme de haut grade des roches ultra-basiques et basaltiques sous-jacentes (i.e. Amphibolite du Diable en Gaspésie; Slivitzky *et al.*, 1991). L'accrétion de ces terranes (Figure 1.10, d1) a causé **l'orogénèse taconienne** (première phase de formation des Appalaches), qui s'est terminée par l'arrivée de l'arc péri-gondwanien de Popelogan-Victoria, à l'Ordovicien tardif. **ii)** Dans un même temps, au cours de l'Ordovicien précoce, à la périphérie du Gondwana, l'arc de Penobscot et la Gandérie (Figure 1.8, zone de Gander) sont entrés en collision en raison de la fermeture du bassin d'arrière-arc intermédiaire, ce qui a entraîné **l'orogénèse penobscotienne** (Figure 1.10, d2). Les terranes péri-gondwaniens se sont soudés le long de la ligne de Red Indian (Figure 1.10, d3) pendant les derniers stades de l'orogénèse taconienne à l'Ordovicien tardif.

Durant la **troisième phase** tectonique (Figure 1.9) l'Océan Rhéique s'ouvre de l'autre côté à l'Ordovicien précoce (van Staal, 2005) en raison de la séparation progressive de l'Avalonie (Figure 1.8, zone d'Avalon) du Gondwana.

La **quatrième phase** (Figure 1.9) correspond à la poursuite de la convergence après la fermeture de la principale partie de l'Océan Iapetus, entraînant la fermeture du bassin d'arrière-arc de Tetagouche-Exploits (Figure 1.10, d2), derrière l'arc de Popelogan-Victoria. La fermeture du bassin d'arrière-arc de Tetagouche-Exploits provoque, au Silurien, l'accrétion de la Gandérie à la Laurentie créant **l'orogénèse salinique** (van Staal, 2007).

Dans la **cinquième phase** tectonique (Figure 1.9), l'océan Rhéique qui s'est ouvert à l'Ordovicien précoce, contient plusieurs petits blocs tectoniques continentaux, y compris Avalonia, Baltica et Meguma (Figure 1.8, zone de Meguma) (van Staal, 2005). Ces microcontinents vont buter sur la marge de Laurentia nouvellement transformée par l'orogénèse taconienne. **L'orogénèse acadienne** du Dévonien précoce résulte de la fermeture du passage océanique entre le continent composite laurentien et l'Avalonie (van Staal, 2007). L'accrétion du microcontinent Meguma à celui de Laurentia correspond à **l'orogénèse néoacadienne** qui s'est déroulée du Dévonien moyen au Carbonifère précoce (van Staal, 2005; 2007). L'accrétion du microcontinent par un écaillage tectonique a été suivie, peu après, au Dévonien moyen, par un important plutonisme granitique, qui résulte d'une subduction continue de la plaque.

La **sixième phase** tectonique (Figure 1.9), pendant le Carbonifère-Permien (entre ~300 Ma et ~250 Ma), correspond à une autre période de compression et d'accrétion continentale (Zen E., 1983), période où le Gondwana s'est accru à Laurentia pour former le supercontinent de la Pangée, **l'orogénèse alléghanienne**.

Enfin la **septième phase** tectonique (Figure 1.9), du Trias au Crétacé (entre ~220 et ~120 Ma), correspond à une troisième période d'extension et de dislocation continentale, avec la création de l'océan Atlantique (van Staal, 2005).

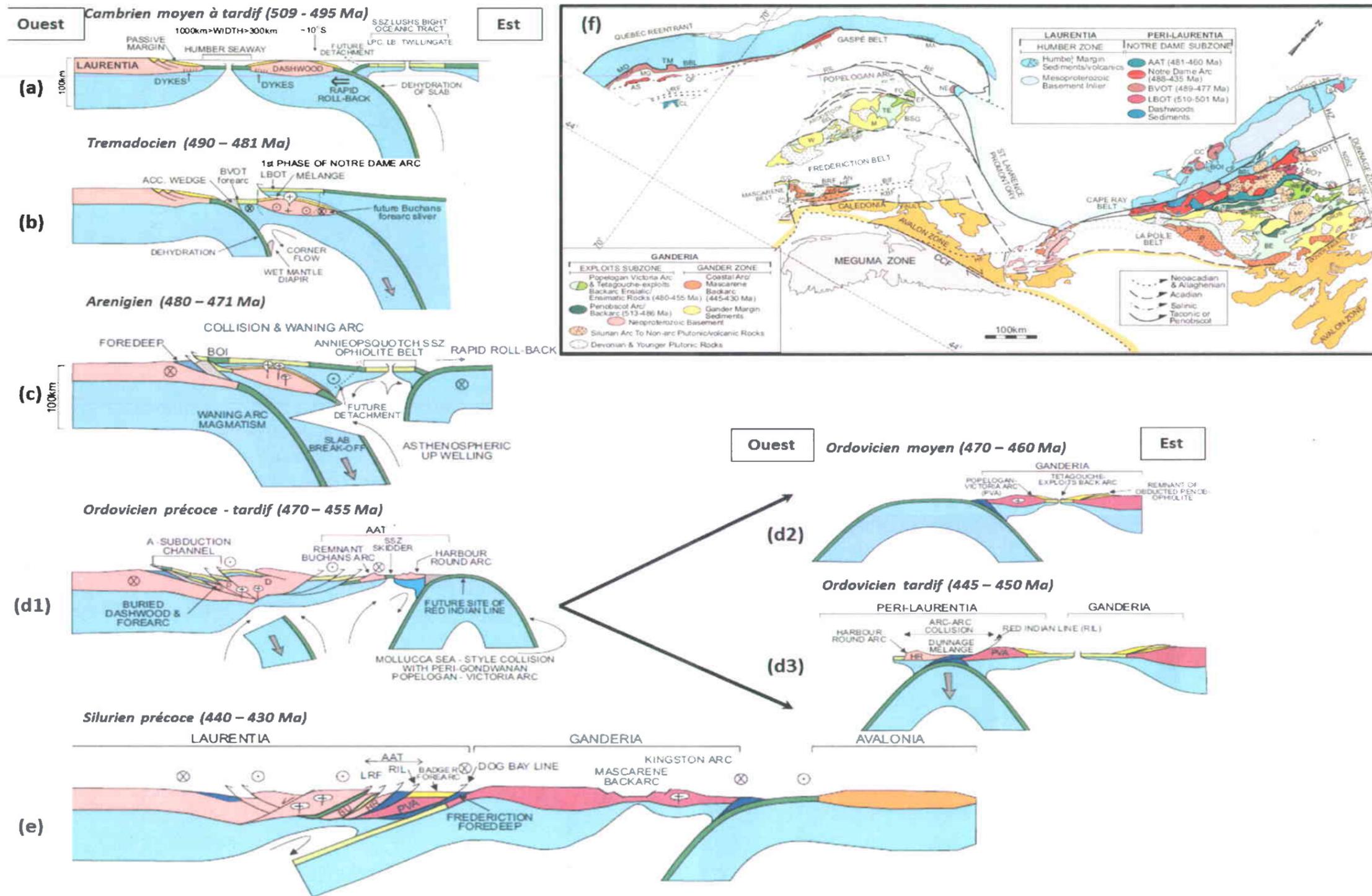


Figure 1.10 : Modèle géodynamique de la formation de la plateforme laurentienne et de la chaîne Appalachianne (de (a) à (e)) et la carte géologique simplifiée (f) des Appalaches canadiennes avec la distribution des zones tectonostratigraphiques, sous-zones et les éléments tectoniques majeurs. Met. Sole: metamorphic sole; BOI: Bay of Island Complex; CC: Coastal Complex; BBL: Baie Verte Brompton Line; SA: St. Anthony Complex; HZ: Humber Zone; NDSZ: Notre Dame subzone; BVOT: Baie Verte oceanic tract; LBOT: Lushs Bight oceanic tract; RIL: Red Indian Line; TW: Twillingate trondhjemite; ESZ: Exploits subzone; WB: Wild Bight Group; EX: Exploits Group; HH: Hodges Hill Pluton; BB: Badger Belt; VA: Victoria arc; TP: Tally Pond Group; C: Cripple Back-Valentine Lake plutons; MP: Mount Peyton pluton; NC: Noggin Cove Formation; PF: Pine Falls Formation; DBL: Dog Bay Line; B: Burgeo batholith; BE: Baie d'Espoir Group; PP: Pipestone Pond Complex; CP: Coy Pond Complex; GRUB: Gander River ultrabasic belt; AC: Ackley granite (modifié d'après van Staal, 2007).

1.7. GEOLOGIE DE LA GASPESIE

La péninsule gaspésienne est composée de trois domaines tectonostratigraphiques (Figure 1.11 ; Malo et Bourque 1993) : **i)** dans la partie nord de la Gaspésie, les roches du Cambro-Ordovicien, constituées des zones de Humber et de Dunnage, ont été déformées durant l'Ordovicien moyen à tardif par l'orogénèse taconienne et au Dévonien moyen par l'orogénèse acadienne (Slivitzky *et al.*, 1991), **ii)** les roches d'âge Ordovicien supérieur à Dévonien moyen de la ceinture de Gaspé sont séparées des roches cambro-ordoviciennes par des failles ou une discordance angulaire suivant la région, et ont été déformées durant le Dévonien moyen par l'orogénèse acadienne, et **iii)** les roches du Dévonien tardif au Carbonifère sont en discordance sur les roches des deux autres domaines et affectées par l'orogénèse alléghanienne lors de la période Pennsylvanien tardif - Permien.

1.7.1. LES ROCHES DU PALEOZOÏQUE INFÉRIEUR

Les roches du Paléozoïque inférieur situées en Gaspésie sont constituées des roches de la zone de Humber et de la zone de Dunnage datées du Cambrien à l'Ordovicien tardif (Figure 1.8). La zone de Humber représente la marge passive de Laurentia et la zone de Dunnage constitue le domaine océanique de l'océan Iapétus. Les roches du Paléozoïque inférieur ont été déformées par deux orogénèses: les orogénèses taconienne et acadienne.

La zone de Humber est divisée en trois domaines, chacun caractérisé par un style structural et un degré de métamorphisme différent. Du nord vers le sud (Figure 1.11), il y a : **i)** le domaine parautochtone, **ii)** le domaine des nappes externes et **iii)** le domaine des nappes internes.

Le domaine des nappes internes (Figure 1.11) montre une déformation intense et un métamorphisme régional ayant une intensité allant de moyenne à forte (faciès des schistes verts à amphibolite; Camiré, 1995). Les successions stratigraphiques et structurales sont difficiles à établir. Ce domaine est constitué de basaltes et de grès feldspathiques du Groupe de Shickshock ainsi que de schistes de la Formation de l'Original (Figure 1.11). Cette zone comprend aussi les roches du Groupe de Maquereau de la boutonnière de Maquereau-Mictaw située au sud-est de la Gaspésie (De Broucker, 1987). Les roches du Groupe de Shickshock qui représentent le stade de rifting pendant la formation de l'Océan Iapetus, font partie de la **nappe du mont Logan** et elles ont un âge allant du Néoprotérozoïque tardif (?) au Cambrien (Slivitzky *et al.*, 1991). Les roches du domaine des nappes internes ont été transportées par des chevauchements de vergence nord-ouest sur les roches du domaine des nappes externes.

En Gaspésie, la limite entre les domaines des nappes internes et externes est liée à d'importantes failles de chevauchement situées le long de son contact nord (Williams, 1995).

Le domaine des nappes externes (Figure 1.11) présente une déformation modérée et un métamorphisme régional de faible intensité (Islam *et al.*, 1982). Les successions stratigraphiques sont généralement conservées et facilement reconstituées. Ce domaine comprend (Slivitzky *et al.*, 1991) :

- des successions de turbidites sableuses, boueuses et calcaires cambro-ordoviciennes (nappe de la Rivière Sainte-Anne avec les formations de Tourelle, Rivière Ouelle, Romieu, le Groupe de Trois-Pistoles et la Formation de l'Orignal) représentant l'évolution d'un milieu de talus continental et de bassin au Paléozoïque précoce durant le stade de la dérive continentale en marge de Laurentia;
- des cherts, des shales et des flyschs boueux de l'Ordovicien tardif (nappe de la Rivière Marsoui) correspondant à une succession de sédiments de bassins profonds (Formation de Des Landes);
- un mélange de plusieurs unités lithostratigraphiques datant de l'Ordovicien précoce résultant plus de la tectonique que de la stratigraphie (Mélange de Cap-Chat; Biron, 1974).

Au-dessus du domaine des nappes externes, il y a le **domaine parautochtone** (Figure 1.11). Ce domaine est constitué de flyschs d'un bassin d'avant-pays (Formation de Cloridorme). L'âge des flyschs va du Caradocien à l'Ashgillien (Ordovicien supérieur; Slivitzky *et al.*, 1991). Le style structural de la Zone de Humber externe est une zone de plissements et de chevauchements d'avant-pays (Williams, 1995).

En Gaspésie, les roches de la **zone de Dunnage** sont constituées de roches ophiolitiques, de mélanges, de roches volcaniques d'arc et de turbidites silicoclastiques d'avant-arc (Figure 1.11; Tremblay *et al.*, 1995). Les roches de la zone de Dunnage n'affleurent que très peu et se retrouvent dans plusieurs boutonnières qui percent au travers des roches siluro-dévonienne (par exemple : les boutonnières du Mélange du Ruisseau Isabelle, du Mont de la Serpentine dans la zone d'étude de cette thèse, ou de Maquereau-Mictaw dans le sud de la Gaspésie). Les roches sont d'âge Ordovicien et de bas degré métamorphique. Les nappes (dont la plus importante est la nappe du Mont-Albert, Fig) et les écailles visibles dans cette zone ont été obductées sur la marge nord-américaine de l'océan Iapetus lors de l'orogénèse taconienne (Malo *et al.*, 2008).

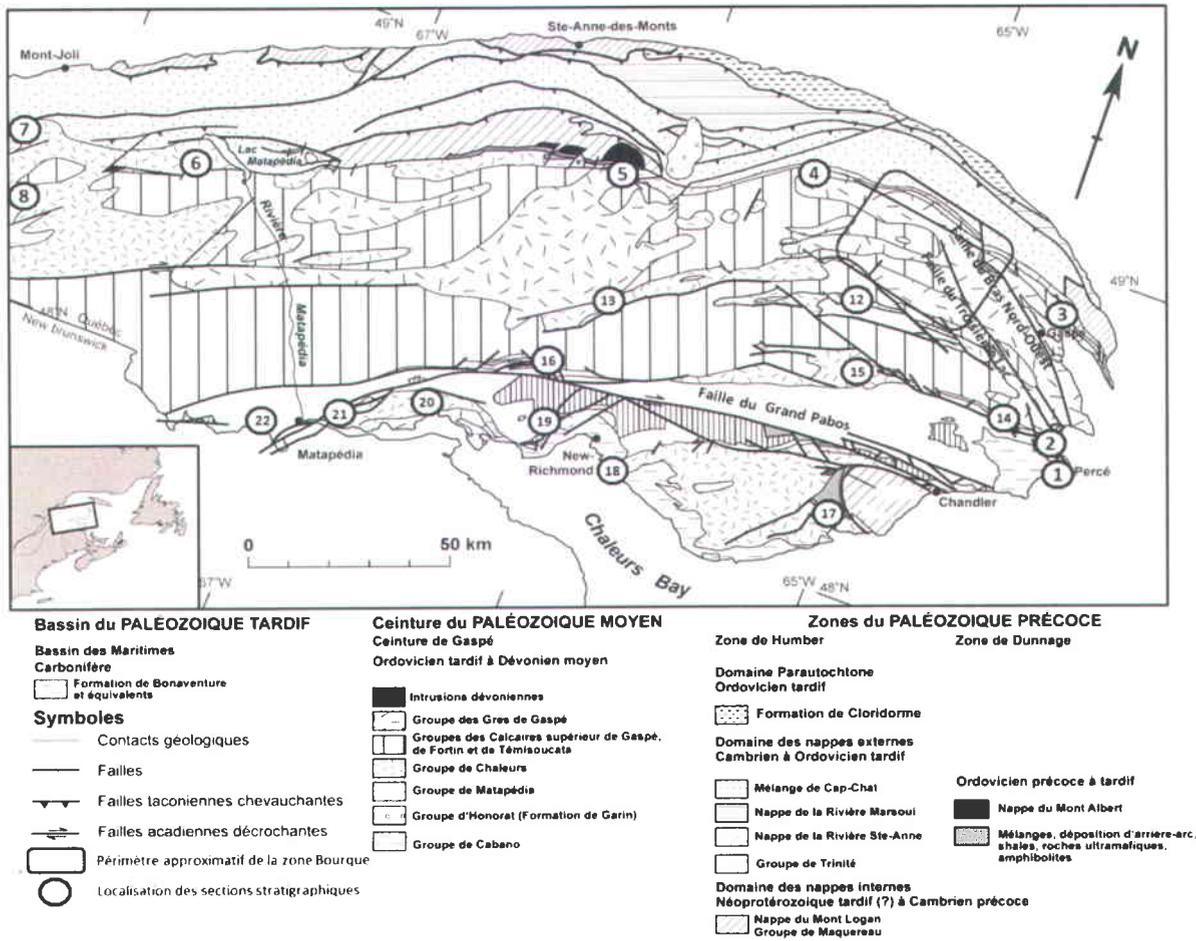


Figure 1.11: Carte géologique de la Gaspésie (modifiée de Brisebois *et al.*, 1991) montrant les roches datant de l'Ordovicien précoce au Dévonien tardif. Les chiffres contenus dans les cercles blancs correspondent à la localisation des sections stratigraphiques de l'article de Bourque *et al.*, (2001) dans la Figure 1.13

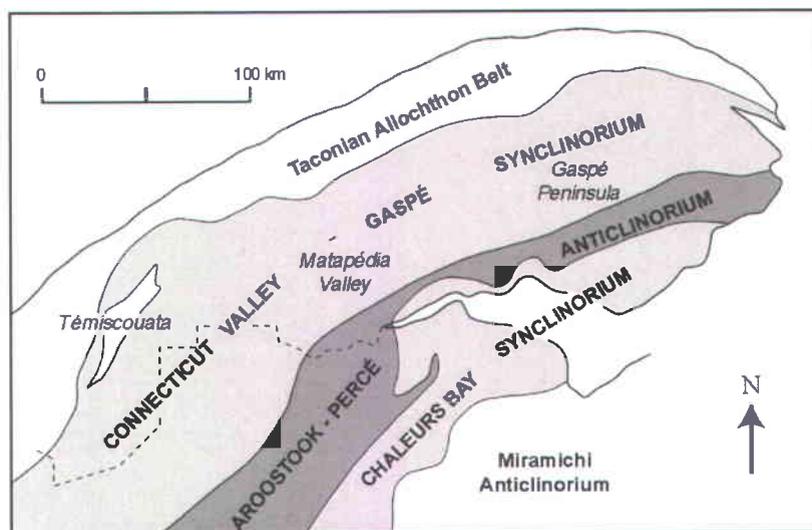


Figure 1.12 : Trois principales structures acadiennes localisées dans le segment Gaspé-Témiscouata au niveau des Appalaches québécoises (Bourque, Malo et Kirkwood, 2000).

1.7.2. LES ROCHES DU PALÉOZOÏQUE MOYEN DE LA CEINTURE DE GASPE ET LEUR DIVISION TEMPORELLE ET SPATIALE

Les roches des ceintures du Paléozoïque moyen sont moins distinctives (Figure 1.11) que celles des zones du Paléozoïque précoce; en outre, aucun complexe ophiolitique, peu de mélanges et autres roches du Paléozoïque moyen ne peuvent être corrélés avec des limites de plaques ou des interactions entre plaques (Williams, 1995). La plupart des roches sont présentes dans des bassins successeurs. Les ceintures sont définies en fonction de contrastes lithologiques et stratigraphiques. Certaines ceintures dans la partie est du continent présentent des différences dans les caractéristiques fauniques, plutoniques ou métallogéniques qui leur sont propres. Les plus vastes ceintures se trouvent au Québec, au Nouveau-Brunswick et en Nouvelle-Écosse. La ceinture de Gaspé (Figure 1.8, Gaspé Belt ; Figure 1.11), située la plus à l'ouest, est composée d'un ensemble de roches du Paléozoïque moyen (Siluro-Dévonien) déposées en discordance sur les roches du Paléozoïque inférieur (Cambro-Ordovicien) des zones de Humber, Dunnage et Gander (Williams, 1995). Ce bassin successeur s'est développé dans l'échancrure formée à la jonction entre le réentrant du Québec et le promontoire du Saint-Laurent de la zone de Humber (Figure 1.10, f).

Les roches siluro-dévonniennes de la ceinture de Gaspé appartiennent à trois divisions structurales majeures, soit, du nord au sud, le synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé (SCVG), l'anticlinorium d'Aroostook-Percé (AAP) et le synclinorium de la baie des Chaleurs (SBC) (Figure 1.12). Un ensemble de failles verticales à la surface séparent les domaines de l'AAP et du SCVG. Les domaines structuraux de l'AAP et du SBC sont par contre en contact stratigraphique. L'ensemble de la ceinture de Gaspé est dominée par les plis régionaux acadiens droits à légèrement déversés et un clivage variant d'intensité suivant les différents domaines (Bourque *et al.*, 1993).

1.6.2.1. Les groupes d'Honorat et de Matapédia

Les groupes d'Honorat et de Matapédia (Figure 1.11) datent de l'Ordovicien tardif (Caradocien) au Silurien précoce (Llandovérien).

Le Groupe d'Honorat est une unité terrigène qui comprend du claystone, du mudstone, du siltstone, des wackes quartzeux et lithiques, des conglomérats et des calcaires silteux. Il se compose de la Formation de Garin (Malo, 1988). Ce groupe affleure uniquement au cœur de l'anticlinorium d'Aroostook-Percé (Figure 1.13, colonnes : 2, 14,15, 18 à 20 et 22).

Le Groupe de Matapédia est dominé par les calcaires qui se sont déposés de l'Ashgillien au Llandovérien. L'unité inférieure, la Formation de Pabos, comprend des roches détritiques calcareuses très variées, tandis que l'unité supérieure, la Formation de

White Head, est en majeure partie constituée de calcaire à grains fins (Malo, 1986). Le Groupe de Matapédia se retrouve dans le SCVG et l'AAP (Figure 1.13, colonnes : 1, 2, 12, 13, 15, 16).

Les grès du Groupe d'Honorat, les silicoclastites de la partie supérieure du Groupe de Matapédia et les siltites calcaires et calcarénitiques de la partie supérieure du Groupe de Matapédia (Formation de White Head) possèdent communément des structures sédimentaires internes typiques aux turbidites ayant été déposées dans un bassin relativement profond (Bourque *et al.*, 2001). La région source pour le Groupe d'Honorat est située au sud-est (Ducharme, 1979; Malo, 1988, 2001). La plate-forme carbonatée d'Anticosti a été identifiée comme région source pour les calcaires de Matapédia (Ducharme, 1979; Malo, 1988; 2001). Le changement progressif des roches terrigènes profondes (Groupe d'Honorat) aux calcaires peu profonds (Groupe de Matapédia) reflète le remplissage d'un bassin profond : le bassin successeur post-taconien.

1.6.2.2. Le Groupe de Chaleurs

Le Groupe de Chaleurs (Figure 1.11) date du Silurien (Llandovérien) au Dévonien précoce (Lochkovien). Ce groupe rassemble plusieurs unités lithostratigraphiques : conglomérats, grès, roches silicoclastiques fines, calcaires variés et volcanites. Ce sont des faciès de plateau continental d'eau peu profonde à profonde et se retrouvent dans les synclinoriums de Connecticut Valley-Gaspé et de la Baie des Chaleurs (Figure 1.11; Bourque *et al.*, 2001). Ce groupe repose soit en concordance sur le Groupe de Matapédia, soit en discordance angulaire sur les roches du Paléozoïque inférieur des groupes de Mictaw ou de Maquereau. Au sommet le Groupe de Chaleurs passe graduellement aux Calcaires Supérieurs de Gaspé et au Groupe de Fortin ou est localement recouvert en discordance angulaire par des roches carbonifères.

Le Groupe de Chaleurs comprend trois assemblages: i) un assemblage inférieur terrigène, ii) un assemblage moyen de calcaires, et iii) un assemblage supérieur avec des récifs locaux et des corps volcaniques (Bourque *et al.*, 2001).

L'assemblage inférieur est un ensemble terrigène, variant de fin à grossier d'âge Llandoverien (Figure 1.11) d'épaisseur variable latéralement. Dans le nord et le nord-ouest de la péninsule, les argilites/calculitites des formations d'Awantjish et de Sources sont surmontées des grès de la Formation de Val-Brillant. Une séquence de mudstones ou de claystones et de grès avec parfois des conglomérats affleure au sud de la Ceinture de Gaspé (formations de Clemville, de Weir et d'Anse Cascon). Les argilites et mudstones/siltstones de la Formation Burnt Jam Brook se retrouvent dans le centre et le sud de la Gaspésie (synclinoriaux de la Baie des Chaleurs et de Ristigouche) où affleurent des mudstones, des grès et des conglomérats (Bourque, 1977; Bourque *et al.*, 2001).

L'assemblage moyen consiste en des calcaires d'eau profonde et de plate-forme. Les calcaires d'eau profonde sont composés de calcarénites sableuses et de calcirudites caractérisés par la Formation de Laforce (Lavoie *et al.*, 1992). Les calcaires de plate-forme, quant à eux, sont constitués de faciès péritidaux, récifaux et subtidaux qui se définissent pour la partie nord par la Formation de Sayabec et pour la partie sud par la Formation de La Vieille.

L'assemblage supérieur est également un ensemble terrigène. Il comprend : **i)** des roches à grains fins représentées par les formations de Saint-Léon, de Gascons et d'Indian Point; et **ii)** trois lithotypes (des conglomérats, des roches volcaniques et des calcaires récifaux). Les conglomérats sont le résultat d'une érosion associée à la discordance salinique (liée entre autres à une diminution eustatique du niveau marin au Silurien tardif et à l'érosion des blocs basculés; Bourque *et al.*, 2001). Les conglomérats sont aussi associés à des faciès littoraux à terrestres, comme des calcaires péritidaux et des lits rouges silicoclastiques. Il y a trois principaux conglomérats, ceux des formations de Griffon Cove River, de New Mills et d'Owl Capes. Les roches volcaniques se composent des roches basaltiques et volcanoclastiques (membres de Ristigouche et du Lac McKay) et des roches felsiques (membres de Baldwin, de Black Cape et de Dalhousie; Bourque *et al.*, 2001). Pour finir, l'assemblage supérieur du Groupe de Chaleurs comprend des calcaires récifaux. Les mieux formés sont les calcaires récifaux de la Formation de West Point.

1.6.2.3. Les groupes des Calcaires Supérieurs de Gaspé et de Fortin

Les Calcaires Supérieurs de Gaspé et le Groupe de Fortin (Figure 1.11) se sont déposés au Dévonien inférieur (Pragien-Emsien) (Lespérance, 1980) et affleurent seulement au sein du Synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé. Ces deux assemblages sédimentaires reposent la plupart du temps en concordance sur le Groupe de Chaleurs (Figure 1.13, colonne 1 à 16) et à de rares endroits, se retrouvent en contact de faille avec les unités du Groupe des Chaleurs. Les groupes des Calcaires Supérieurs de Gaspé et de Fortin se composent de carbonates et de faciès silicoclastiques de plateau continental et de bassin (Bourque *et al.*, 2001).

Le **Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé** se trouve dans la partie nord du synclinorium (Figure 1.13, colonnes de 1 à 6), alors que le Groupe de Fortin se trouve dans les parties centrale et sud du synclinorium (Figure 1.13, colonnes 13, 15 et 16). La partie inférieure du Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé est constituée d'une succession de calcilutites dolomitiques et siliceuses ou de mudstones calcareux (Formation de Forillon). La partie moyenne de ce groupe est plus hétérogène avec un contenu silicoclastique plus élevé (Formation de Shiphead), comprenant des calcaires dolomitiques et siliceux, des mudstones avec des calcarénites, des grès et des lits de

bentonite. La partie supérieure de ce groupe est une unité homogène de lits chertueux à siliceux ou de calcilitites silteuses (Formation d'Indian Cove).

Le **Groupe de Fortin** est l'une des unités stratigraphiques les plus étendues de la Gaspésie, mais aussi celle dont la stratigraphie interne est la plus mal connue (Brisebois et Morin, 2004). Le Groupe de Fortin est épais, monotone, et largement non-fossilifères. Les séquences sont bien litées alternant des siltstones noirs et des shales avec des intercalations d'intervalles de grès et un peu de roches volcaniques (Kirkwood et St-Julien, 1987; Hesse et Dalton, 1995; Bourque *et al.*, 2001). Hesse et Dalton (1995) reconnaissent sept lithofaciès dans le Groupe de Fortin et les interprètent comme des marges sous-marines et des dépôts de chenaux de glissement en bordure de bassins ou de bassins profonds.

1.6.2.4. Le Groupe des Grès de Gaspé

Le Groupe des Grès de Gaspé (Figure 1.11) a un âge du Dévonien précoce à moyen (Emsien à Frasnien) et il est constitué de faciès littoraux à terrestres. Ce groupe se trouve dans les synclinoriums de Connecticut Valley-Gaspé et de la Baie des Chaleurs. Dans le synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé, le Groupe des Grès de Gaspé comprend quatre assemblages (Bourque *et al.*, 2001).

Le premier assemblage est une unité de transition fossilifère contenant essentiellement des brachiopodes et des trilobites (Formation de York Lake) et comprend des calcilitites siliceuses avec des arénites et des wackes quartzeux. La proportion de silicoclastites fines disséminées dans la partie calcaire est plus faible que dans la Formation d'Indian Cove.

Le deuxième assemblage (Formation de York River) comprend une partie basale constituée d'une alternance de niveaux de wacke lithique à feldspathique, à grain moyen à grossier, et de niveaux de grès fin et de mudstone (Brisebois, 1981) et une partie sommitale de grès moyen et grossier. Dans la partie inférieure de la formation, on trouve localement des calcarénites et des conglomérats polygéniques. Les fossiles, relativement abondants, indiquent que la formation est d'âge Emsien (Lespérance, 1980). (A noter : aux environs du Dôme de Lemieux, Figure 1.13, colonne 5), la partie supérieure de la Formation de York River est formée surtout de roches volcaniques comprenant deux ou trois séquences de basalte d'étendue régionale et deux séquences de laves et de tufs rhyolitiques formant des complexes volcaniques d'une superficie de quelques kilomètres carrés et quelques centaines de mètres d'épaisseur, mais les volcanites ne s'étendent pas jusqu'à la Formation de Battery Point (Doyon et Berger, 1997).

Le troisième assemblage comprend des grès conglomératiques, des grès à grains moyens à grossiers, des siltstones et des mudstones (Formation de Battery Point). La présence de fossiles marins dans les deux tiers inférieurs de la formation démontre que cette partie de

l'unité a été déposée essentiellement en milieu marin variant de normal à saumâtre. Par contre, les lits rouges de la partie supérieure de la formation ne contiennent pas de fossiles et pourraient être continentaux. Dans sa partie orientale, la séquence comprend des termes continentaux à plusieurs niveaux stratigraphiques (Cant et Walker, 1976) alors que, dans sa partie occidentale, les éléments marins dominent la partie inférieure de l'unité et les termes continentaux sont prépondérants dans la partie supérieure.

Le dernier assemblage est une séquence de conglomérats, de calcaires et de fragments silicoclastiques et volcaniques (Formation de Malbaie) et indique des dépôts larges et uniformes des tresses de plaines (Rust, 1981).

Dans le synclinal des Monts Berry (Figure 1.13, colonnes 5 et 6), il y a une unité de shales avec des siltstones, des grès et des fissures de retrait (Formation de Lake Branch) entre les formations de York River et de Battery Point et la Formation de Malbaie est absente (Bourque *et al.*, 2001).

Dans le synclinorium de la Baie des Chaleurs, plus précisément dans le synclinal de Ristigouche, des roches continentales à grains grossiers dont l'âge varie entre l'Emsien et le Frasnien (Dévonien moyen à tardif) sont présentes (Bourque *et al.*, 1995). Ces roches sont divisées en quatre unités (Figure 1.13, colonne 20): les formations de Lagarde, de Pirate Cove, de Fleurant et d'Escuminac (Bourque *et al.*, 1995) :

- le conglomérat de la Formation de Lagarde est constitué de fragments de roches volcaniques, de dykes basiques, de chert noir et d'autres roches sédimentaires. La matrice est un mélange de grès et de mudstones. Quelques minces lits charbonneux apparaissent dans les mudstones et les grès (Béland, 1958);
- le conglomérat de la Formation de Pirate Cove est constitué majoritairement de siltstones sableux rouge et vert et mudstone avec des lentilles de chenaux gréseux, et par complément de conglomérats de calcaires avec des clastes provenant essentiellement du groupe de Matapédia exposé au nord;
- le conglomérat de la Formation de Fleurant est composé de cailloux arrondis volcaniques et sédimentaires, en contact discordant avec la Formation de Pirate Cove. La matrice de ce conglomérat est constituée de grès grossier gris (St-Julien *et al.*, 1972);
- les grès de la Formation d'Escuminac sont composés de lits fins de grès gris vert calcareux, de siltstones et des mudstones, avec une abondance de figures basales, des lamines parallèles, des rides de courant et des fossiles de poissons et de plantes (Alcock, 1935).

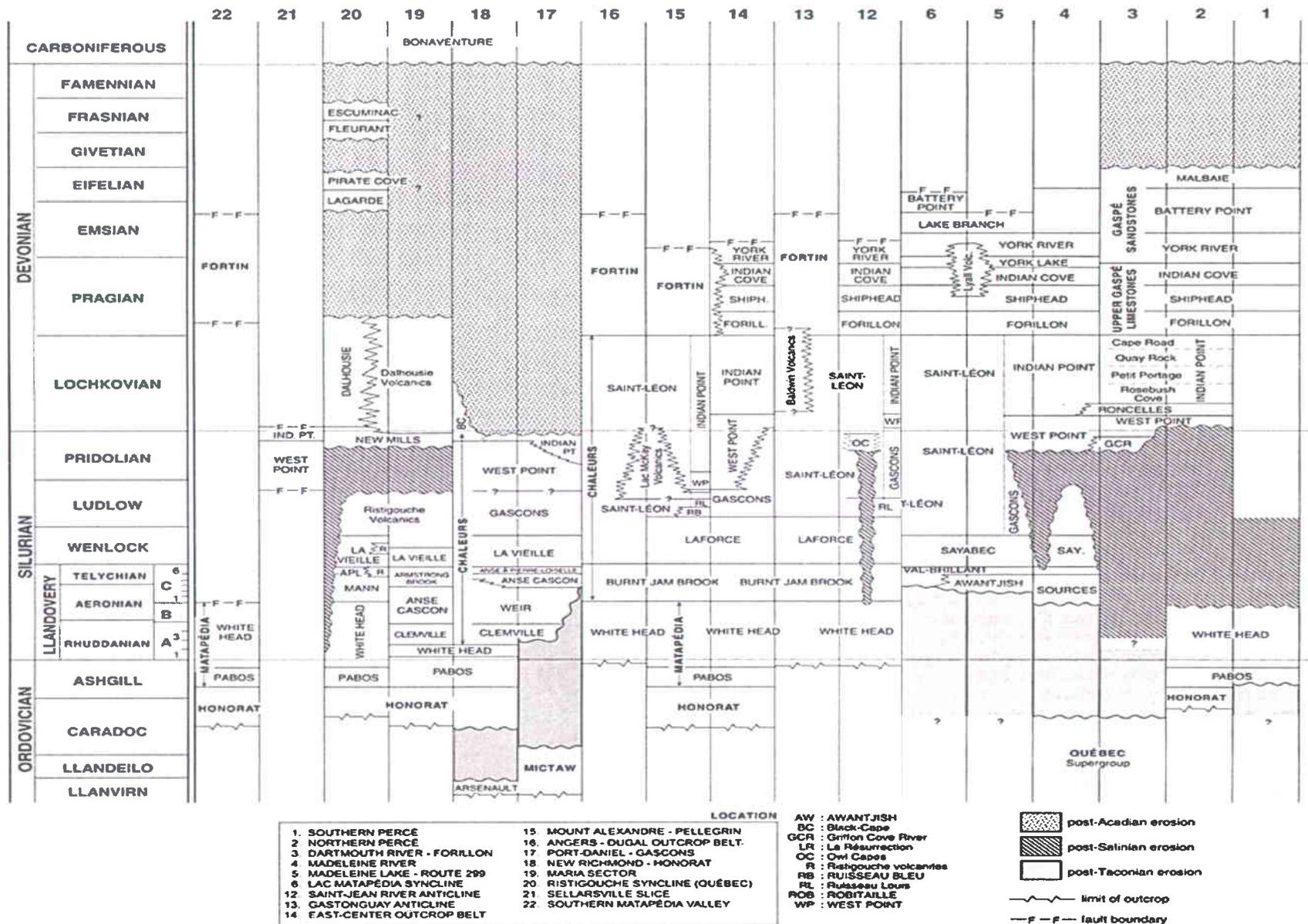


Figure 1.13 : Tableau de corrélation des sections stratigraphiques de 6 à 6 et de 12 à 22 du segment Gaspé-Témiscouata dans les Appalaches québécoises. La localisation de ces sections se trouve dans la Figure 1.11 (Bourque *et al.*, 2001).

1.7.3. LES ROCHES DU PALEOZOÏQUE SUPERIEUR

Le Paléozoïque supérieur est constitué des formations de Bonaventure et de Cannes-de-Roches (van de Poll, 1995) datant du Carbonifère moyen (Figure 1.11) et correspond au bassin des maritimes qui déborde sur les côtes est et sud de la Gaspésie.

La **Formation de Bonaventure** s'étend dans la Baie des Chaleurs jusqu'à l'île Bonaventure (Figure 1.13, colonnes 17 à 20). Elle est composée de conglomérats, de grès et de mudstones qui sont caractérisés par une couleur rouge sombre (van de Poll, 1995).

La **Formation de Cannes-de-Roches** se retrouve dans les régions de Percé et de Gaspé (Figure 1.13, colonnes 1 à 3; van de Poll, 1995) et se compose de conglomérats rouges, de grès et de mudstones. Le sommet de la formation est constitué de strates de couleur grise (van de Poll, 1995). Les roches de couleur rouge sont des dépôts de cônes alluviaux dont les matériaux proviennent d'une région voisine, alors que les roches de couleur grise ont été déposées par un cours d'eau axial pérenne qui s'écoulait à l'intérieur d'une vallée. Les roches de couleur grise proviennent de l'érosion des montagnes créées lors de l'orogénie acadienne (van de Poll, 1995).

1.7.4. LE CONTEXTE STRUCTURAL DE LA PENINSULE GASPESIENNE

Trois discordances bien distinctes sont présentes dans la séquence du Paléozoïque moyen du Québec (Bourque *et al.*, 1995). La discordance la plus ancienne correspond à l'orogénèse taconienne. La deuxième remonte au Ludlovien tardif-Pridolien précoce et correspond à la pulsation salinique (identifié comme le résultat de l'orogénèse salinique plus à l'ouest : van Staal, 2007). Il s'agit soit d'une discordance angulaire, soit d'une discordance d'érosion. La dernière discontinuité est une discordance angulaire qui sépare les roches du Dévonien moyen et supérieur des roches du Carbonifère. Elle correspond à l'orogénèse acadienne (Williams, 1995).

1.6.4.1. Taconien

Dans la péninsule gaspésienne, l'orogénèse taconienne est caractérisée par des nappes de chevauchements et des plis à vergence nord-ouest résultant d'un raccourcissement dû à l'obduction de la nappe ophiolitique du Mont Albert et la mise en place des nappes internes sur la marge passive de Laurentia (Malo *et al.*, 2008).

Deux principales phases de déformation pénétrative taconiennes sont enregistrées (Malo *et al.*, 2008) :

- la première, notée D1 (Figure 1.14, A), commence entre 465 et 459Ma avec l'obduction et le transport structural des ophiolites dans la zone océanique de Humber. Cette période est considérée comme le début du Taconien ;

- la fin de la déformation D1 (Figure 1.14, C) correspond à la mise en place des ophiolites sur la marge continentale (Malo *et al.*, 2008). Cette période coïncide au milieu du Taconien ;
- la deuxième déformation, notée D2 (Figure 1.14, D), vers 448,5Ma, est marquée par le transport structural des nappes internes à travers la marge et la collision plus à l'est de l'arc péri-gondwanien de Popelogan-Victoria (Figure 1.10 , d3 ; van Staal, 2005).

A noter : L'influence de la géométrie de la marge (Figure 1.10, f: promontoires et rentrants) est interprétée comme un facteur clé de l'orogénèse taconienne, afin d'expliquer la déformation majeure en transpression. La position de la péninsule gaspésienne (Figure 1.10, f; Figure 1.14, i) située à la frontière d'une ancienne faille transformante, a créé un environnement géodynamique favorable pour la génération d'ophiolites telles que celles du complexe du Mont-Albert (Figure 1.14, MAC) et développé ultérieurement une tectonique décrochante et transpressionnelle au niveau de la marge de la zone interne de Humber (Malo *et al.*, 2008), le long de la faille de Shickshock (Sack *et al.*, 2004).

D'autres domaines dans les Appalaches canadiennes (Figure 1.10, f), comme le sud du Québec positionné dans le rentrant et Terre-Neuve situé le long du promontoire, ont connu des évolutions tectoniques différentes sans déformation régionale majeure en transpression.

Pendant l'orogénèse taconienne (au Caradocien), les différentes unités qui ont été imbriquées s'érodent et deviennent la source sédimentaire pour le bassin d'avant-pays taconien au nord-ouest de l'orogène (Figure 1.14 ; Malo *et al.*, 2008). Ce bassin d'avant-pays s'est développé à la marge en réponse au poids des nappes taconiennes en migration vers le nord-ouest (Figure 1.14, C et D).

1.6.4.2. Salinique

L'orogénèse salinique est appelée pulsation salinique en Gaspésie. Elle est caractérisée par la mise en place de blocs basculés (Malo et Kirkwood, 1995). L'analyse cinématique des failles orientées NO (failles du Bassin Nord-Ouest, du Troisième Lac et de Gastonguay) dans l'est du synclinorium Connecticut Valley-Gaspé indique que ces failles ont un jeu normal syn-sédimentaire lors du Silurien tardif (Malo 2001), comparativement à un jeu décrochant dextre lors de l'orogénèse acadienne (Malo et Kirkwood 1995; Malo 2001). L'orogénèse salinique se caractérise également par la formation de plis ouverts de direction NO-SE (Malo, 2001). Ces plis seraient des plis d'extension longitudinale liés aux failles normales syn-sédimentaires du Silurien tardif au Dévonien précoce. Une discordance associée à l'orogénèse est constatée par endroits au niveau de la ceinture de Gaspé par de légères déformations et un volcanisme bimodal au Silurien tardif et au Dévonien précoce (Malo, 2001).

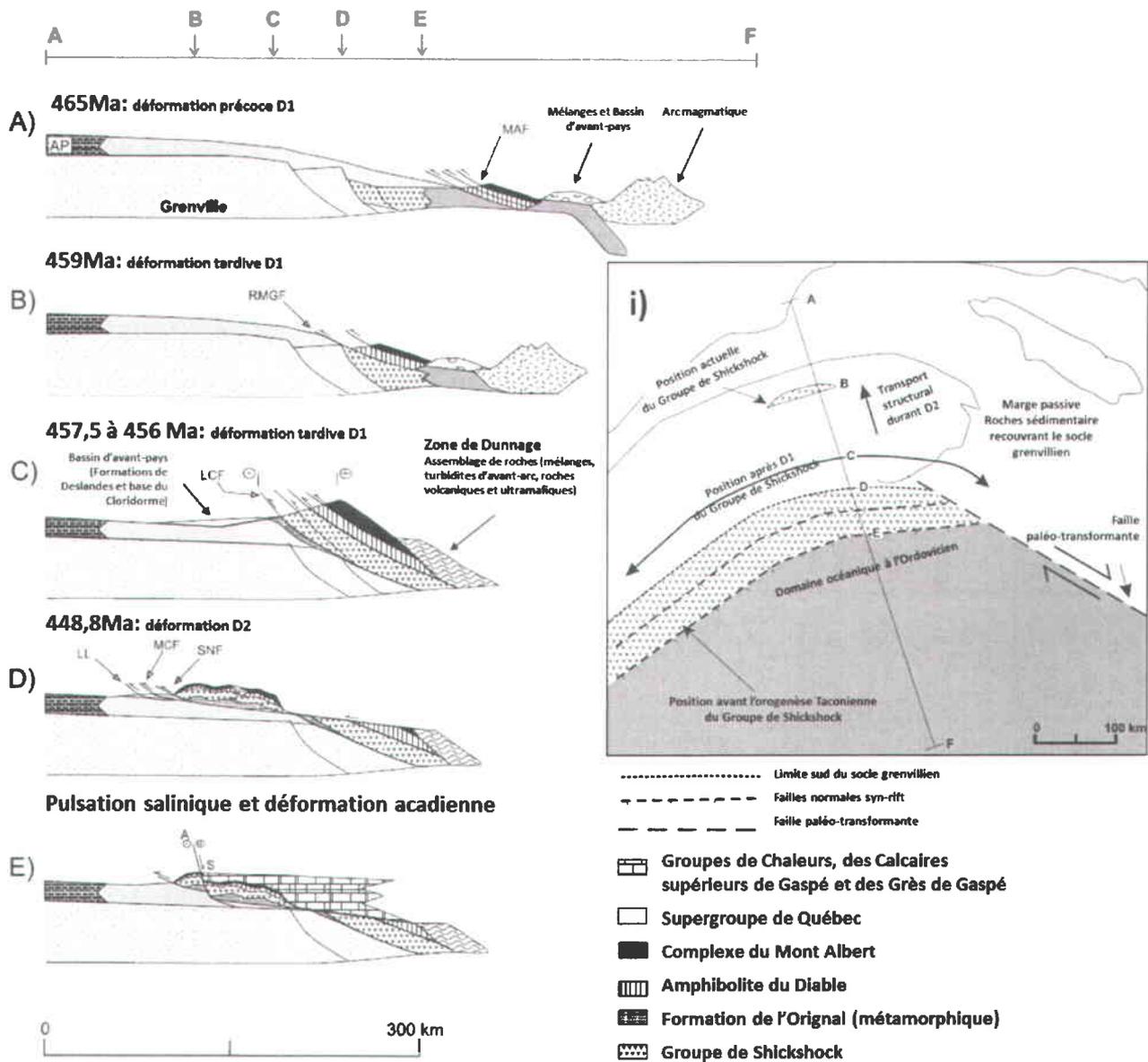


Figure 1.14: Coupes schématiques de l'évolution des zones de Humber et de Dunnage en Gaspésie (modifiées de Malo *et al.*, 2008). i) Carte de localisation de la coupe; A) Le chevauchement intraocéanique du Complexe du Mont-Albert durant la phase précoce de la déformation D1; B) Localisation de MAC et AD le long de la marge externe laurentienne; C) propagation tardive au nord-ouest de la déformation D1; D) Transport des nappes de chevauchement à travers la marge; E) Mise en place des failles normales synsédimentaires suivie par le mouvement transpressif acadien le long de la faille de Schickshock Sud. AD : Amphibolite du Diable; AP : Plateforme d'Anticosti; MAC : Complexe du Mont-Albert; MAF : Faille du Mont-Albert; MCF : Faille Méchins-Carcy; LCF : Faille du Lac de Cascapédia; LL : Ligne de Logan ; RMGF : Faille du Ruisseau des Marches du Géant; SNF : Faille de Shickshock Nord; SS : Groupe de Shickshock.

Il faut retenir que la **discordance salinique** est une **paraconformité**; aucune angularité n'est décelée entre les calcaires de la Formation de West Point qui reposent sur les formations siluriennes plus vieilles. La discordance a creusé plus ou moins profondément dans ces dernières; localement elle a même atteint le Supergroupe de Québec, ce qui fait que les deux discordances taconienne et salinique se confondent (Bourque *et al.*, 2000).

1.6.4.3. Acadien

La déformation acadienne est représentée par des structures compressives (plis et failles inverses) où les plis sont resserrés et les failles reprises en décrochement dextre au cours de la déformation (Kirkwood *et al.*, 1995; Kirkwood, 1999). Les décrochements sont formés le long de zones de cisaillement fragile-ductile orientées E à E-NE.

La principale phase de déformation cassante reconnue dans la ceinture de Gaspé est attribuée à l'orogénèse acadienne avec une contrainte orientée ESE-ONO (Faure *et al.*, 2004). En Gaspésie, la plupart des failles régionales (ie. faille de Grand-Pabos, faille du Troisième Lac, faille du Bras Nord-Ouest) présentent un jeu en décrochement dextre, mais certaines (faille de Shickshock-Sud, faille de Sainte-Florence) présentent en plus un jeu inverse précoce indiquant qu'une tectonique transpressive dextre est à l'origine de l'attitude structurale de la ceinture de Gaspé (Kirkwood et Malo, 1993; Malo et Bourque, 1993).

Différents modèles tectoniques ont été proposés pour l'orogénèse acadienne au niveau de la ceinture de Gaspé. Malo et Béland (1989) établissent un premier scénario à partir de l'étude de l'anticlinorium d'Aroostook-Percé; un modèle de tectonique coulissante responsable du développement des plis, du clivage régional et d'un réseau de failles de décrochement, les principales étant les failles du Grand Pabos et de la Grande Rivière.

Kirkwood (Kirkwood *et al.*, 1995, Kirkwood, 1999) propose que les premières étapes de la déformation transpressive se caractérisent par une déformation coaxiale de type plissement-aplatissement suivie d'un cisaillement simple accompagné de failles coulissantes dextres et d'une extension horizontale parallèle à l'orogène. Les failles inverses et coulissantes sont probablement reliées à un même décollement crustal à la limite entre la séquence supracrustale (zone de Dunnage et ceinture de Gaspé) et le socle grenvillien de Laurentia.

L'étude de nouvelles données sismiques amène Kirkwood *et al.* (2004) à proposer un nouveau modèle structural pour l'orogénèse acadienne (Figure 1.15). Ce modèle montre le développement d'une ceinture de plis et de chevauchements pendant la première phase de l'orogénèse acadienne qui précède la déformation de décrochement acadienne au Dévonien moyen. La relation structurale avec l'est de Gaspésie montre que les failles de décrochement postdatent le développement des plis et des chevauchements. Géométriquement, les failles décrochantes compartimentent, à grande échelle, les structures de plis et de failles (Figure 1.11).

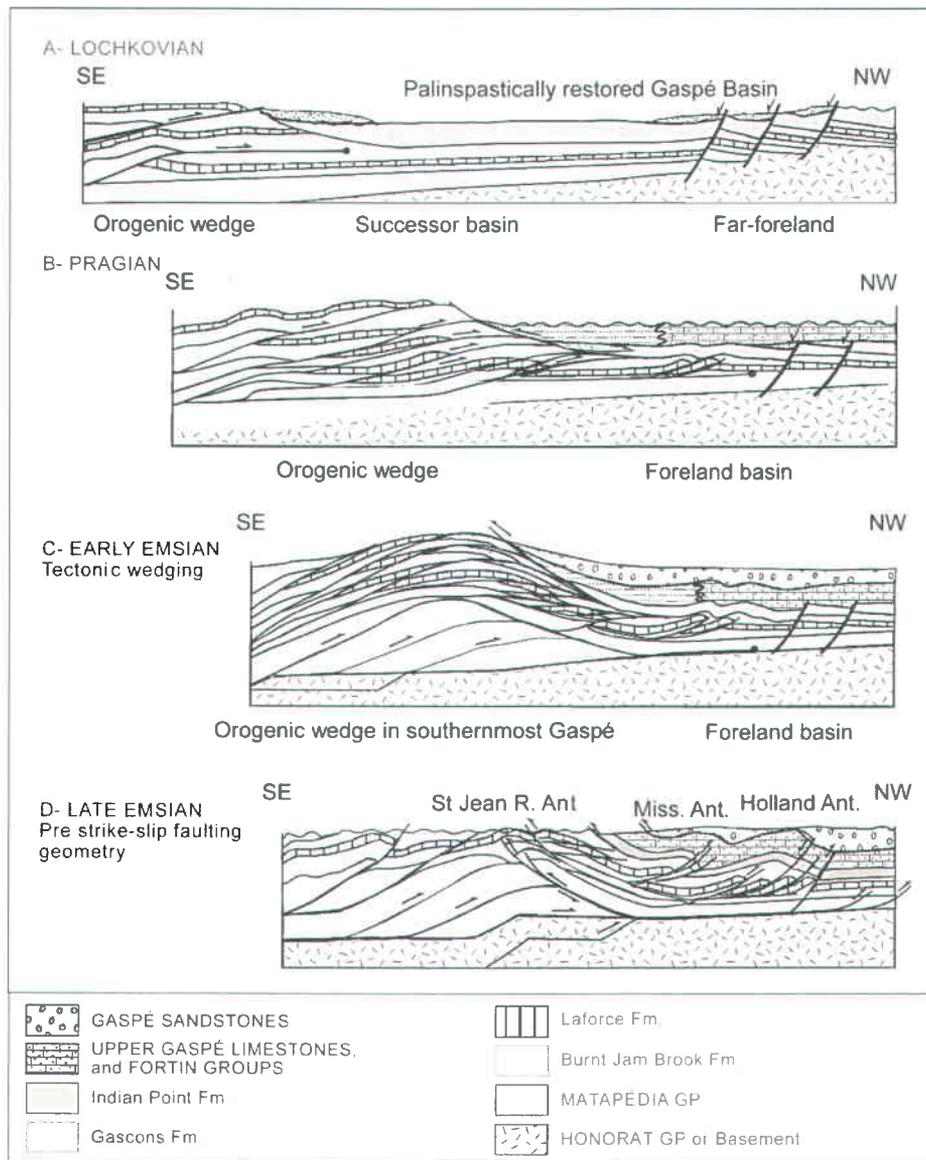


Figure 1.15 : Interprétation schématique du développement séquentiel d'une ceinture de plis et de chevauchements acadienne (Kirkwood et al., 2004), identique à la figure I.8. A : Pendant le Lochkovien, dépôt de sédiments fins et de turbidites de la partie supérieure du Groupe des Chaleurs dans le bassin successeur avec dans le Sud des inter-lits de graviers. Formation de failles normales dans l'avant-pays accélérant la subsidence du bassin dans le Nord. B : Au Praguien, le développement du biseau tectonique migre vers le continent et approche de la limite sud du bassin de Gaspésie. Dépôt des flyschs du Fortin dans le Sud en même temps que le dépôt des Calcaires Supérieurs de Gaspé dans le Nord et imbrication des séquences supérieures de la ceinture de Gaspé. C : À l'Emsien précoce, une tectonique d'imbrication et d'empilement commence dans les séries du l'Ordovicien supérieur au Silurien dans le Sud de la Gaspésie ; un développement d'anticlinaux, d'empilements et de rétrochevauchements est possible et se seraient développés dans la partie Nord-Ouest des empilements en réponse au développement du biseau tectonique. D : Plissement à l'Emsien tardif des séquences de bassin d'avant-pays sud les chevauchements aveugles dans le Nord de la ceinture de Gaspé, les surfaces de détachement se propagent et s'étendent sous la zone de Humber vers le nord.

1.7.5. LES CYCLES DE REGRESSION-TRANSGRESSION EN GASPESIE

En Gaspésie, les événements tectoniques successifs et l'eustatisme qui ont affecté le bassin a permis la sédimentation de plusieurs types de roches liée aux événements transgressif et régressif marins. Deux cycles de régression-transgression sont observés dans la péninsule gaspésienne (Figure 1.16): les phases régressives **R1**, **R2** et **R3** séparées, respectivement, par les événements transgressifs **T1** et **T2** (Bourque, 2001; Bourque *et al.*, 1993, 1995, 2000, 2001).

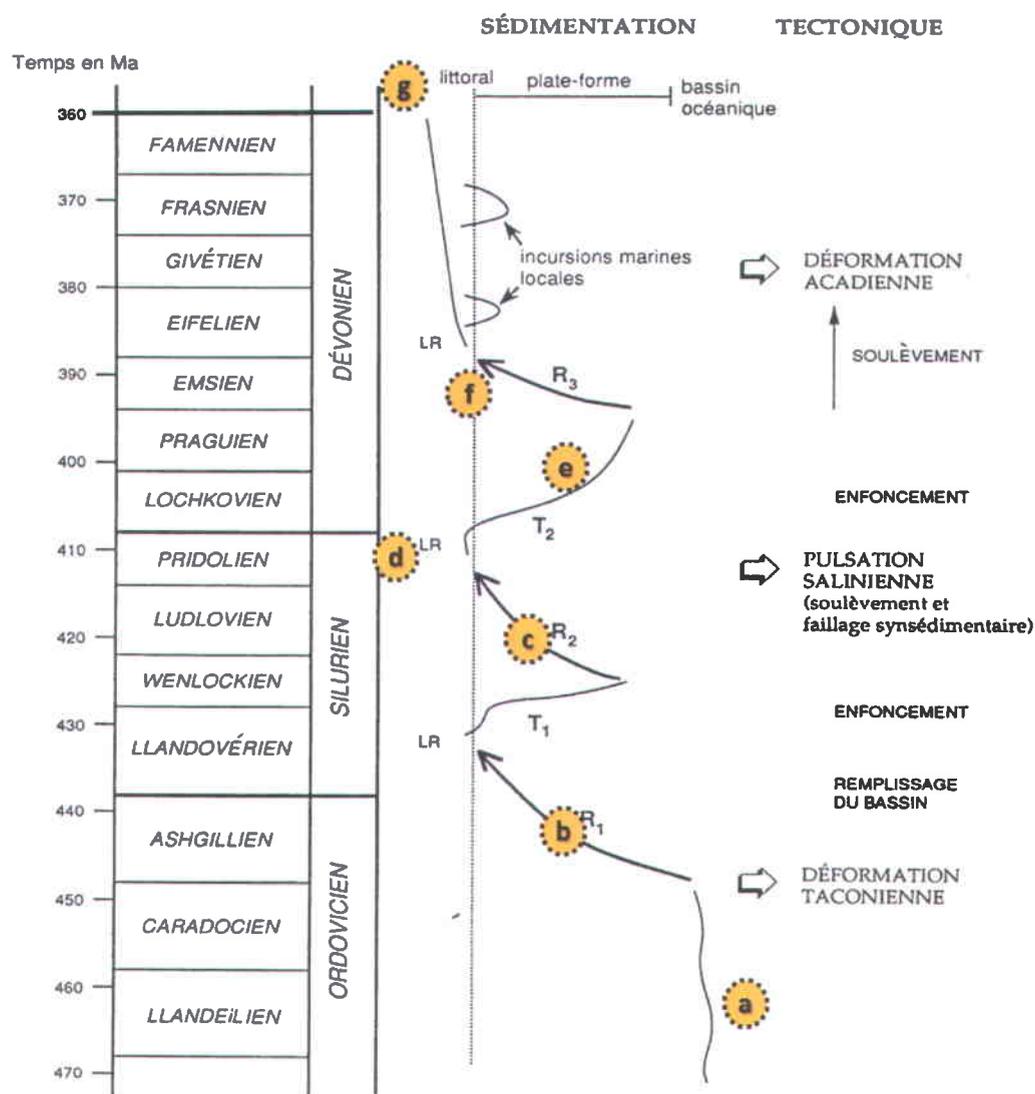


Figure 1.16 : Évolution sédimentaire et tectonique de la séquence siluro-dévonienne entre la fin de l'Ordovicien moyen et la fin du Dévonien dans le segment de Gaspésie-Matapédia-Témiscouata. T=transgression, R=régression, LR=Lits Rouges. Les lettres de a à g sont discutées dans le chapitre 4 (Bourque *et al.*, 1993).

La première phase régressive (Figure 1.16, **R1**) date de 458 Ma à 427 Ma. Cette phase correspond au remplissage du bassin post-tacôniennne. Le premier groupe de dépôt du bassin

sont les unités d'eaux profondes des **groupes d'Honorat et de Matapédia** (Figure 1.11) composés de silicoclastites, à la base (Groupe d'Honorat), qui passent à des calcaires au sommet (Groupe de Matapédia) (Malo, 1986; Bourque *et al.*, 1993 et 2001). Ce sont des turbidites (Malo, 1988) d'environnements marins profonds, déposées à l'Ordovicien supérieur jusqu'au Silurien inférieur. Le deuxième groupe de dépôt est le **Groupe de Chaleurs** (Figure 1.11) qui représente une séquence de plateforme profonde à peu profonde (Bourque *et al.*, 1993, 2001). Il est composé de silicoclastites, de volcanites et de calcaires, localement récifaux. Ce groupe est subdivisé en trois grands ensembles lithologiques (Bourque *et al.*, 1993; 2001) mais seul l'ensemble terrigène variant de fin (argilite, calcilitites) à grossier (grès, conglomérats) à la base du Groupe de Chaleurs a été déposé lors de l'évènement R1.

La première phase transgressive (Figure 1.16, **T1**) correspond au dépôt des unités supérieures du **Groupe de Chaleurs** qui sont représentées par une séquence de carbonate de milieux marins ouvert à des calcaires de plateforme. Selon Lavoie *et al.* (1992), Bourque (2001) et Bourque *et al.* (2001), cette phase d'approfondissement serait due à l'augmentation du niveau marin relatif du Wenlockien tardif-Ludlovien précoce, combinée à la subsidence liée à la tectonique extensive durant le Silurien tardif.

La deuxième phase régressive (Figure 1.16, **R2**) se manifeste par le dépôt de conglomérats de couches rouges terrestres (Figure 1.16, LR) et de calcaires récifaux du **Groupe de Chaleurs**. Elle est corrélée à une chute du niveau marin relatif entre le Ludlovien et le Pridolien, associée au basculement des blocs lors de l'orogénèse salinique (Bourque *et al.*, 1995, 2001). La phase R2 a engendré la discordance salinique.

La deuxième phase transgressive (Figure 1.16, **T2**) correspond au dépôt des sédiments d'eaux profondes à grain fin et des turbidites de la partie sommitale du **Groupe de Chaleurs**, suivis du dépôt du **Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé** (Figure 1.11). Les Calcaires Supérieurs de Gaspé et le Groupe de Fortin, d'âge Dévonien inférieur, succèdent en concordance au Groupe de Chaleurs. Ces sédiments se déposent dans un bassin subsidant dans un régime tectonique transpressionnel en réponse à l'orogénèse acadienne (Bourque *et al.*, 2001).

La troisième phase régressive (Figure 1.16, **R3**) est enregistrée dans les faciès marins peu profonds à terrestres du **Groupe des Grès de Gaspé** (Figure 1.11) en réponse au soulèvement lié à l'orogénèse acadienne. Le Groupe des Grès de Gaspé, d'âge Dévonien inférieur et moyen, est composé d'une séquence à granulométrie croissante qui passe d'un environnement marin à deltaïque, à la base, à des milieux supradeltaïques et fluviatiles, au sommet (Bourque *et al.*, 1993, 2001). Les unités sommitales de cet assemblage contiennent des conglomérats dont la provenance locale indique l'âge des premiers soulèvements orogéniques acadiens en Gaspésie.

2. CHAPITRE 2 : ANALYSE DES DONNEES SISMIQUES EN 2D

2.1. PRINCIPES GENERAUX DE L'EXPLORATION SISMIQUE

La méthode géophysique la plus utilisée pour déterminer les structures du sous-sol est la sismique réflexion. Cette méthode d'exploration consiste en une suite chronologique de trois étapes :

1. L'**acquisition sismique** consiste à provoquer un ébranlement mécanique à proximité de la surface (sur terre : camions vibrateurs et dynamite ; en mer : canon à air) propageant un front d'ondes élastiques dans le sous-sol. Ces ondes se réfléchissent, se diffractent ou se réfractent sur les discontinuités d'impédance* qu'elles rencontrent dans le sous-sol. La sismique réflexion utilise la réflexion de ces ondes sur les limites entre deux milieux d'impédances acoustiques différentes (par exemple, les interfaces sédimentaires qui correspondent à un changement assez brutal des propriétés physiques (densité, vitesses de propagation des ondes) du sous-sol et qui, de ce fait, réfléchissent les ondes sismiques). L'enregistrement sismique représente les variations d'impédance acoustique dans le sous-sol.
2. Le **traitement sismique** consiste à obtenir des signaux propres en éliminant le bruit ainsi que tout phénomène perturbateur. Le traitement contient une chaîne d'étapes successives résumées ci-après dont les détails sont donnés dans Davidson et Braile (1999). Les méthodes pour améliorer la résolution de l'image sont par exemple **i**) la correction des amplitudes (le signal reçu est comparé au signal émis de façon à en extraire le signal significatif de la réponse de la structure), **ii**) la sommation (les signaux reçus par une même station, corrélés avec les signaux émis par un même tir sont sommés de façon à obtenir un signal global moyenné pour chaque tir), **iii**) le filtrage du bruit (les signaux moyennés de chaque station sont filtrés de façon à éliminer le bruit résiduel restant après corrélation et sommation, **iv**) la déconvolution, **v**) l'élimination des multiples, **vi**) la correction statique, etc. Le signal sismique est calculé en temps car il correspond au temps de parcours de l'onde émise et reçue. Le traitement-**profondeur** consiste à transformer ces données temporelles en données profondeur, ce qui nécessite la détermination de la loi physique liant le domaine temps au domaine profondeur, c'est-à-dire le modèle de vitesse du sous-sol concerné.
3. L'**interprétation sismique** qualitative consiste à réaliser un pointé des réflexions selon des principes de la stratigraphie sismique (Mitchum *et al.*, 1977). La

stratigraphie sismique est une méthode d'analyse des données sismiques fondée sur la reconnaissance de la géométrie des réflexions. L'élément de base est la séquence de dépôt qui correspond à une unité stratigraphique composée d'une succession relativement conforme de strates génétiquement liées. Le sommet et la base de la séquence correspondent à des discontinuités (discordances, surface d'érosion, surface de non-dépôt) ou à leur prolongement en concordance. La reconnaissance d'une séquence est basée sur la reconnaissance des discontinuités qui l'entourent. Une séquence de dépôt a une signification chronostratigraphique. Elle s'est déposée dans un intervalle de temps géologique déterminé par les âges des limites supérieures et inférieures de cette séquence.

*A noter : L'impédance acoustique d'une roche est par définition le produit de sa densité ρ par la vitesse de propagation V_p ou V_s des ondes sismiques. Il existe une impédance acoustique ρV_p pour les ondes de compression et une impédance acoustique ρV_s pour les ondes de cisaillement. L'impédance acoustique est égale au rapport de la contrainte à la vitesse des particules, pour des ondes planes en milieu homogène.

Les interfaces ont une influence sur la propagation des ondes. La réflexion d'une onde est une discontinuité d'impédance entre le milieu A et le milieu B (Laverge, 1986).

2.2. HISTORIQUE DE L'EXPLORATION SISMIQUE EN GASPESIE

Les premiers levés sismiques ont été réalisés entre 1971 et 1976 par le gouvernement du Québec. Pendant 15 ans, la Société québécoise d'initiatives pétrolières (SOQUIP) a mené des travaux de géologie, de sismique-réflexion et de forage en Gaspésie (Lavoie et Bourque, 2001).

Entre 1985 et 1988, le ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec patronne un projet de grande envergure, conduit par l'Université Laval, sur une synthèse du bassin siluro-dévonien. Ce projet a contribué à enrichir la banque de données géoscientifiques sous forme de publications et rapports scientifiques et techniques (e.g., Bourque *et al.*, 1993, 1995, 2000; Lavoie *et al.*, 1992; Lavoie et Bourque, 1993; Malo et Bourque, 1993; Kirkwood, 1999), de thèses (Lavoie, 1988; Dansereau, 1989; Kirkwood, 1993).

Entre 1999 et 2003, la compagnie Junex met en valeur et en production le puits de Galt n°1 par des travaux de sismique et de forages. Simultanément, le MRNFQ procède à 613 km de levés sismiques, principalement sous forme de mégatransects (Morin et Laliberté, 2002 ; Figure 2.1).

La révision des lignes sismiques en Gaspésie, de 2003 à 2005, due au projet qu'a lancé la CGC, ainsi que les services géologiques du Québec, du Nouveau-Brunswick et de Terre-

Neuve-et-Labrador a permis de parfaire les connaissances de l'architecture en sous-surface de l'est du Québec, grâce à des programmes majeurs d'acquisition de données géophysiques telles qu'aéromagnétiques et gravimétriques, ainsi que le retraitement des données de sismique-réflexion et l'intégration d'imagerie satellitaire. L'ensemble de ces travaux a été intégré dans une banque de données permettant de faciliter la modélisation de l'architecture de sous-surface de l'est de la Gaspésie (<http://cgc.mcan.gc.ca>). Dans un même temps, l'avancement des imageries de sous-surface, a aidé à une meilleure compréhension et à la validation de théories faites au cours des dernières décennies.

En 2005, la compagnie Pétrolia a acquis plusieurs levés sismiques en plus des profils sismiques rendus publics par le MRNFQ. En 2008, cette compagnie lance deux campagnes de levés sismiques en trois dimensions (les premiers en Gaspésie) : l'une de 13km² dans la zone d'Haldimand et l'autre de 65km² dans la zone Bourque (Figure 2.1).

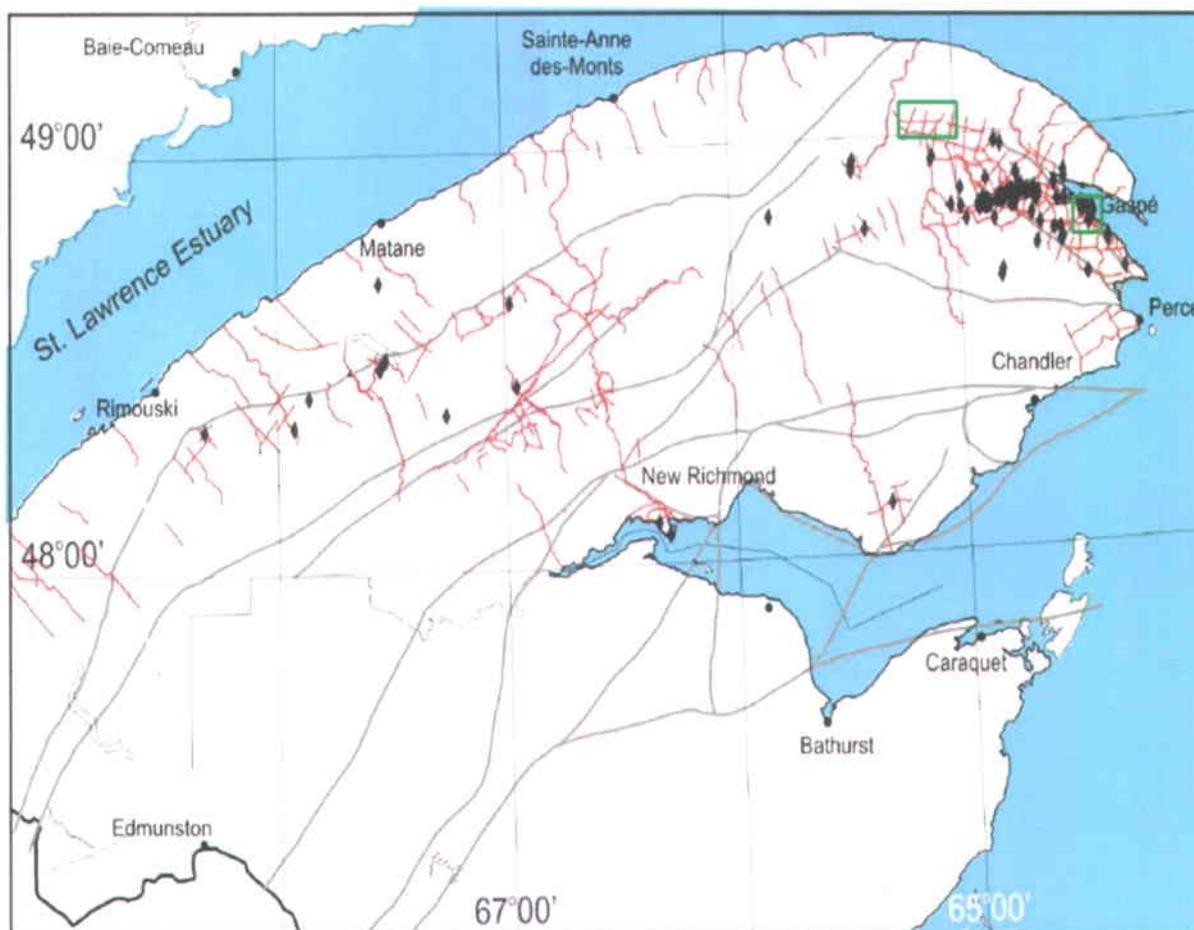


Figure 2.1 : Carte de localisation des lignes sismiques (lignes rouges) disponibles en Gaspésie, les puits pour l'exploration pétrolière (losanges noires) et les deux zones de sismiques 3D faites par Pétrolia (modifiée de Lavoie *et al.*, 2009).

2.3.METHODE DE TRAVAIL

L'étude du système pétrolier du nord-est de la Gaspésie commence par la compréhension de la structure des roches en profondeur. Plusieurs lignes sismiques sont disponibles dans la zone. La méthode appliquée à l'étude de ces lignes sismiques consiste en **premier** à faire un traitement sismique afin de migrer en profondeur les lignes en temps (Figure 2.2 cases blanches) avec le modèle élaboré par Bêche (2008). Ce traitement a été fait durant un stage à l'IFP Energies nouvelles (IFPEN).

Une série de données concernant le bassin de la péninsule gaspésienne est disponible : la géologie structurale (cartes géologiques, données structurales type orientation des failles, des plis...), données stratigraphiques (sections stratigraphiques faites à partir des données de terrain), données de puits (sections stratigraphiques en profondeur), autres données de géophysiques (étude du champ magnétique, étude des anomalies de Bouger...). Le **deuxième** point de cette méthodologie est d'étudier l'ensemble de ces données afin de contraindre l'interprétation des lignes sismiques migrées en profondeur (Figure 2.2 cases noires). Le **troisième** point consiste à interpréter les lignes sismiques (Figure 2.2 cases grises). Les deuxième et troisième points de cette méthode de travail sont les sujets qui ont été travaillés dans cette thèse et développés dans ce chapitre.

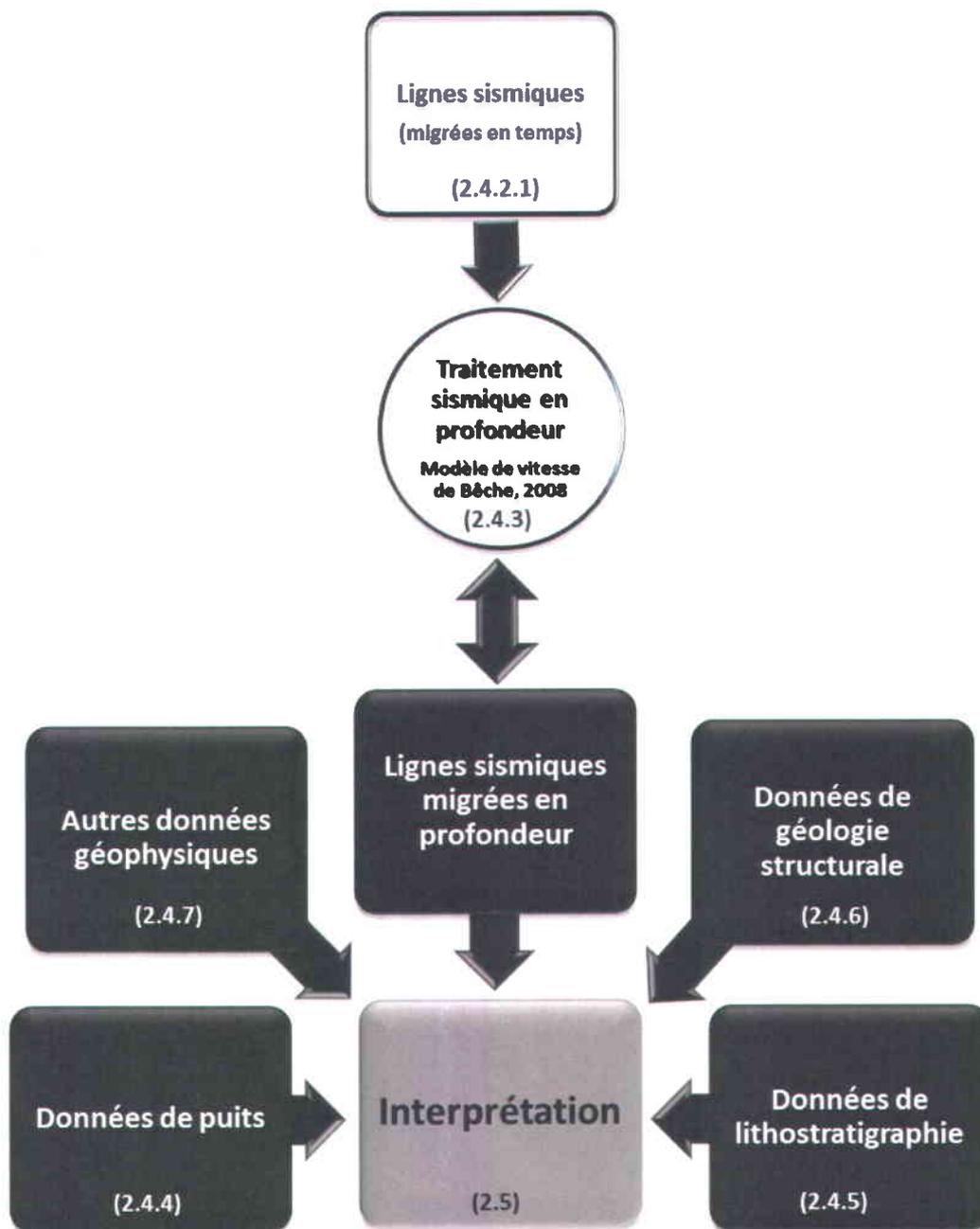


Figure 2.2 : Schéma représentatif de la méthode de travail pour l'étude des lignes sismiques du projet Bourque. Le rectangle blanc correspond au traitement en temps des lignes sismiques faites par le gouvernement du Québec. Le rond blanc correspond au traitement en profondeur des lignes sismiques faites par l'IFPEN avec le modèle de vitesse de M. Béche (2008). Les cases noires correspondent aux données qui serviront à l'interprétation (case grise). Les chiffres entre parenthèses correspondent au numéro de chapitre où l'on peut retrouver ces notions.

2.4. DESCRIPTION DES DONNEES NECESSAIRE A L'INTERPRETATION SISMIQUE

2.4.1. LA DIVISION SPATIALE DE LA ZONE BOURQUE

Pour simplifier l'étude de la zone Bourque, il est nécessaire de la diviser spatialement. La zone d'étude présente trois blocs tectoniques, les blocs Nord, Centre et Sud (Figure 2.4), limités par les failles du Bras Nord-Ouest (FBNO) et du Troisième Lac (FTL) (Béland, 1980; Roksandic et Granger, 1981). Ces deux failles ont joué en failles listriques normales, en failles inverses et en failles dextres et ont eu un rôle majeur dans le contrôle de la sédimentation. Pour une meilleure interprétation, la notion de bloc Ouest est également introduite (Figure 2.4, C). Cette zonation est utilisée tout au long de ce document.

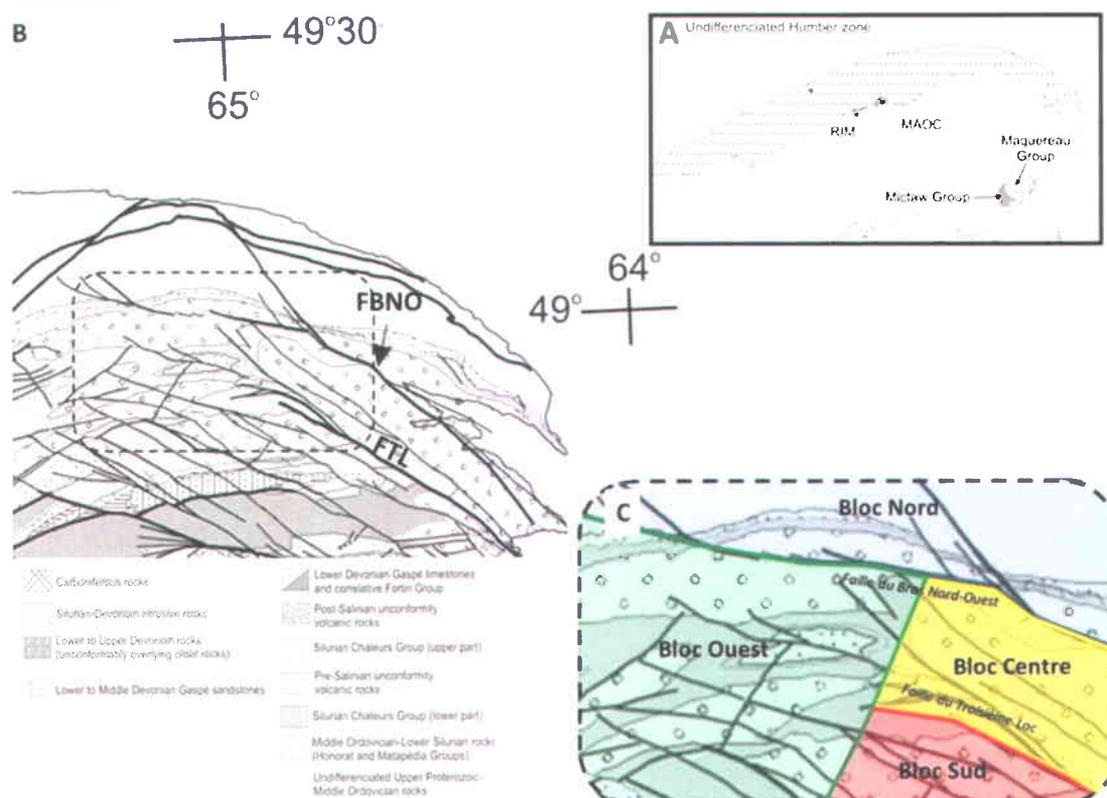


Figure 2.4: Carte géologique du nord-est de la Gaspésie (modifiée de Pinet *et al.*, 2008). A : carte globale de la Gaspésie avec la localisation des complexes ophiolitiques du Mont-Albert (MAOC), de la zone de Humber indifférenciée, du groupe de Mictaw, du groupe de Maquereau et du Mélange du Ruisseau Isabelle (RIM); B : carte géologique agrandie de la pointe nord-est de la Gaspésie avec la localisation de la faille du Bras Nord-Ouest (FBNO) et de la faille du Troisième Lac (FTL); C : carte géologique agrandie sur la zone d'étude avec la distinction des 4 blocs (Nord, Centre, Sud et Ouest) séparés par les deux failles majeures (la FTL et la FBNO).

2.4.2. LES DONNEES SISMIQUES ET INTERPRETATION PROPOSEE

L'étude de l'interprétation des lignes sismiques disponibles en Gaspésie est la première étape de la première partie de la méthode de travail (Figure 2.2).

2.4.2.1. Les lignes sismiques provenant de la zone Bourque

Le projet Bourque se compose de neuf lignes sismiques (Figure 2.3): deux lignes sismiques est-ouest (82-155 et 82-156) et sept lignes sismiques nord-sud (82-149, 82-150, 80-44, 82-152, 82-153A, 82-153B et P-29). Toutes ces lignes proviennent du MRNFQ : la ligne P-29 date de 1976, la ligne 80-44 date de 1980 et les sept autres datent de 1982. Elles ont toutes été migrées en profondeur avec le modèle de vitesse (pour plus de détail voir 2.4.3 Le traitement sismique) provenant de la thèse de Bêche (2008) afin d'avoir une meilleure corrélation avec les données de puits et de pouvoir être intégrées au logiciel gOcad pour une interprétation en trois dimensions (voir chapitre 3).

Deux des lignes de la zone Bourque (les lignes 82-150 et 80-44) ont déjà été partiellement interprétées : i) Thériault et Laliberté (2006) ont interprété la ligne sismique 82-150 en temps (Figure 2.5) ; ii) Un an plus tard, la compagnie Pétrolia (2007) a interprété la ligne sismique la 80-44 migrée en temps à l'est (Figure 2.5).

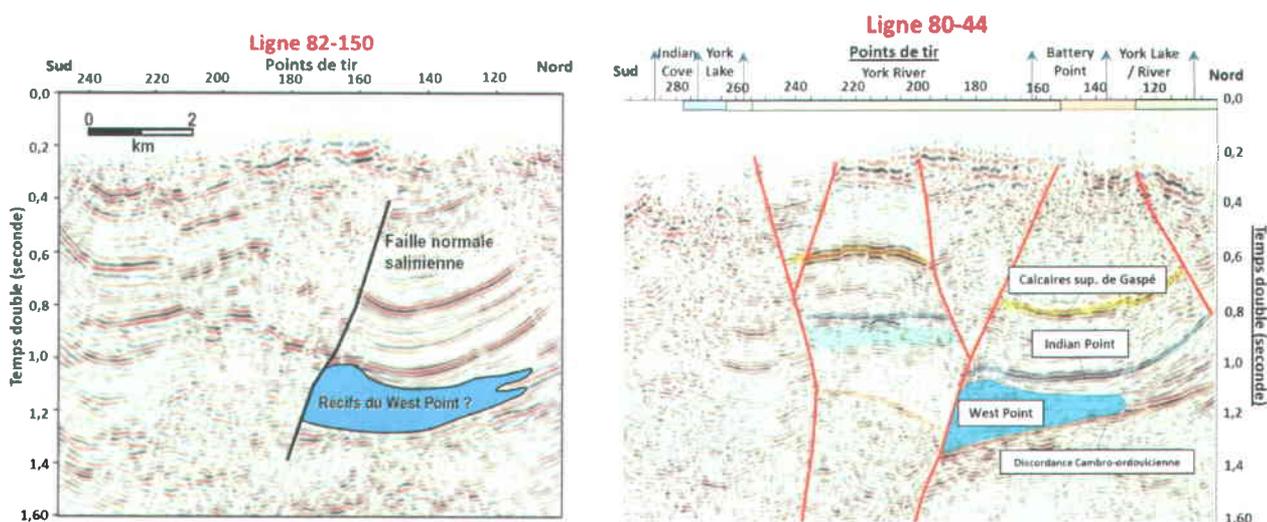


Figure 2.5 : Interprétation de deux lignes sismiques situées dans la zone Bourque. Ces lignes sont localisées sur la Figure 2.3. A gauche la ligne 82-150, partiellement interprétée et présentée par Thériault et Laliberté en 2006 lors de la conférence QuébecExploration. A droite, la ligne sismique 80-44, partiellement interprétée par Pétrolia en 2007, disponible sur www.petroliagaz.com.

L'interprétation de ces lignes sismiques suggère la présence des récifs du West Point au nord de la FBNO, donnant un argument de plus à la théorie de Bourque (voir chapitre 1 partie 1.4.1). L'hypothèse de Bourque (2001) stipule que des calcaires récifaux de la Formation de West Point se seraient implantés et développés sur les points hauts de blocs faillés et basculés durant la phase d'extension (la pulsation salinique) à la fin du Silurien.

Ces lignes sismiques montrent également que les discordances salinique et taconienne se confondent, puisque la Formation de West Point repose sur les formations du Cambro-Ordovicien.

En 2008, la compagnie Pétrolia procède à une grande campagne d'acquisition de données de sismique réflexion en trois dimensions dans la zone Bourque d'une superficie de 66,16 km². Ces données ne sont pas disponibles. Par contre, la compagnie publie régulièrement des nouvelles de leurs recherches et deux lignes sismiques interprétées (Figure 2.6) provenant de la sismique 3D de Pétrolia ont été divulguées : la Ligne 22 et la Ligne 221 (localisation Figure 2.3). Ces deux lignes indiquent la présence possible des récifs de la Formation de West Point.

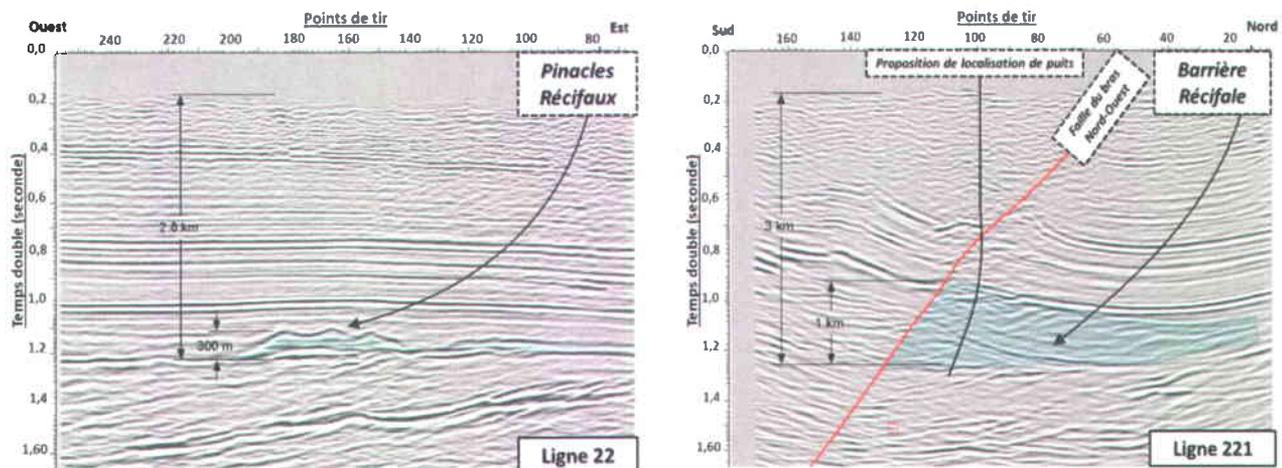


Figure 2.6 : Visualisation et interprétation partielle des lignes sismiques 22 et 221 provenant de la sismique 3D faite par Pétrolia en 2008. La présence des récifs de la Formation de West Point est pointée par la flèche sur les deux images et mise en valeur en bleu ciel (localisation de ces deux lignes Figure 2.3) www.petroliagaz.com.

2.4.2.2. Les lignes sismiques situées au sud-est de la zone Bourque

À l'est, proche de la zone Bourque, il existe plusieurs lignes sismiques et forages (Figure 2.1 et Figure 2.7). En 1990, St-Julien et Bourque ont étudié quelques-unes des lignes de la SOQUIP (Figure 2.7, P-11, P-13, P-15, P-16, P-17, P-19, P-20, P-31 et P-32). Les auteurs ont créé un nouveau modèle d'évolution tectono-sédimentaire du Siluro-Dévonien à partir de leurs observations de la structure des failles sur les tracés sismiques. Ils ont également schématisé les relations structuro-stratigraphiques le long des profils sismiques P-19, P-20 et P-31 (Figure 2.8) et tracé une réflexion à l'intérieur du Groupe de Chaleurs qu'ils attribuent à « la plate-forme West Point ».

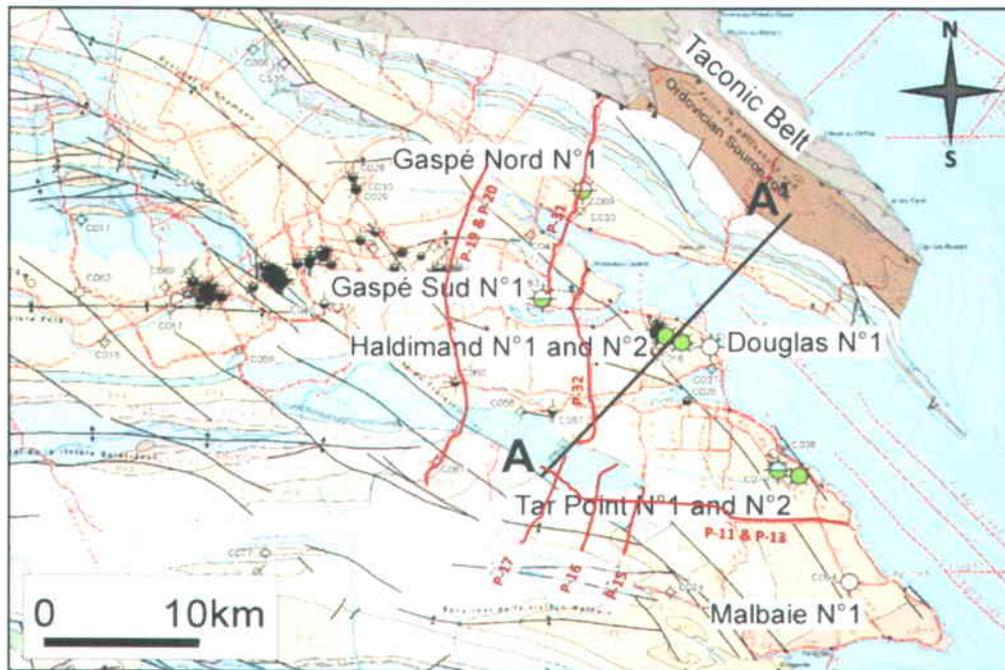


Figure 2.7 : Carte de localisation des profils sismiques de l'étude de St-Julien et Bourque (1990) (P-11, P13, P-15, P-16, P-17, P-19, P-20, P-31 et P-32) et de la coupe structurale AA' de la compagnie Pétrolia ainsi que certains puits à proximité (Gaspé Nord n°1, Gaspé Sud n°1, Haldimand n°1 et 2, Douglas n°1, Tar Point n°1 et 2 et Malbaie n°1).

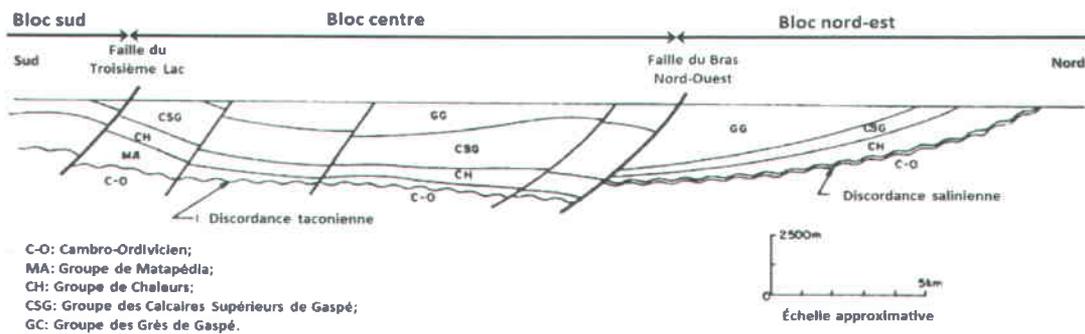


Figure 2.8 : Schématisation des relations structuro-stratigraphiques le long des profils sismiques SOQUIP P-19, P-20 et P-31 (localisation des profils sur la Figure 2.7). A remarquer les variations d'épaisseurs des unités lithostratigraphiques, bien visibles sur le profil (modifiée de St-Julien et Bourque, 1990).

A partir de l'étude de leurs données sismiques et de plusieurs forages, la compagnie Pétrolia a schématisé les relations structuro-stratigraphiques de la zone à l'extrême est de la Gaspésie (Figure 2.9). Cette coupe schématique représente la structure du Cambro-Ordovicien dans le bloc Nord.

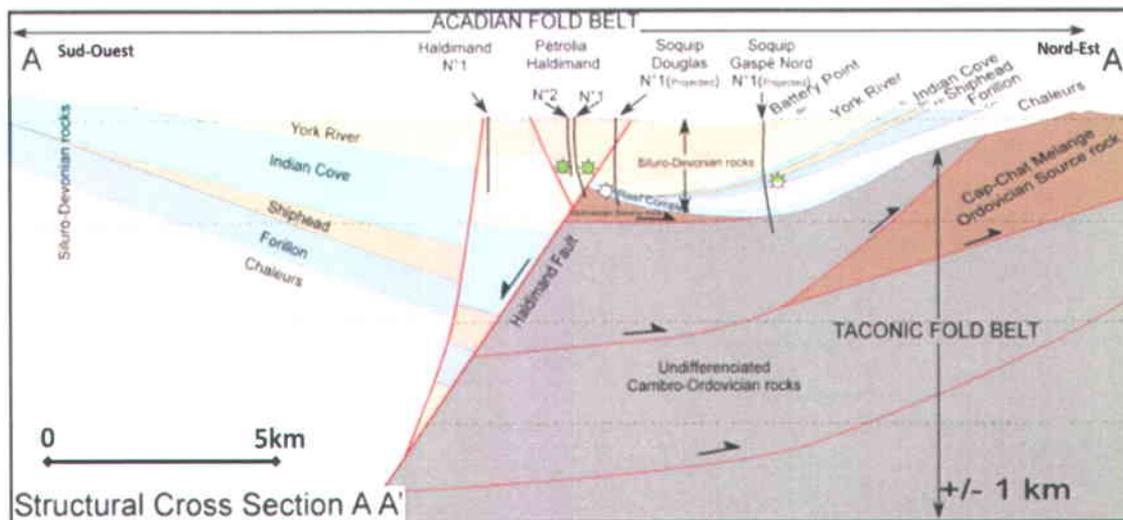


Figure 2.9 : Coupe structurale et schéma des relations structuro-stratigraphiques faite à partir des profils sismiques à proximité et des puits Haldimand n°1 et 2, Douglas n°1 et Gaspé Nord n°1. La localisation de la coupe se trouve sur la Figure 2.7 (www.petroliagaz.com).

Ces deux interprétations (Figure 2.8 et Figure 2.9) révèlent que géométriquement, les grandes failles compartimentent la zone. Les failles du Bras Nord-Ouest et de Haldimand limitent le bloc Nord du bloc Centre et la FTL limite le bloc Centre du bloc Sud. Ils montrent également que les discordances salinique et taconienne se confondent au niveau du bloc Nord (tout comme sur les deux profils sismiques de la Figure 2.5). Mais les profils sismiques ne donnent pas une interprétation précise de la structure en profondeur des formations du Cambro-Ordovicien.

2.4.2.3. Les lignes sismiques situées à l'ouest de la zone Bourque

Les données sismiques disponibles dans la zone Bourque n'ont pas complètement été interprétées. Il n'y a pas d'interprétation sur la géométrie en profondeur de la zone de Humber (et la possible zone de Dunnage) située dans la zone d'étude. Pour cela, il faut s'intéresser aux lignes sismiques plus à l'ouest acquises entre 2000-2001.

Les images sismiques des lignes VB 06, VB 04A, VB 04B et VB 04C ont permis d'imager des réflexions plates en profondeur sous les grands plis régionaux (Morin et Laliberté, 2002) (Figure 2.10) Ces lignes sismiques localisées à plus de 200km à l'ouest de la zone Bourque (Figure 2.3) suggèrent la présence de failles de chevauchement vers le nord en profondeur aussi bien que des failles aveugles dans des anticlinaux dans la partie nord de la ceinture de Gaspé. Cette interprétation montre que le contact, entre les ceintures taconienne et acadienne, est imagé par une réflexion continue plongeant vers le sud et correspondant à une surface de décollement (Morin et Laliberté, 2002). La faille de Shickshock Sud représente la limite à la surface entre la ceinture de Gaspé et la zone de Humber et correspond à cette réflexion. Morin et Laliberté (2002) proposent une

tectonique de couverture pour la ceinture de Gaspé, responsable d'un raccourcissement horizontal significatif.

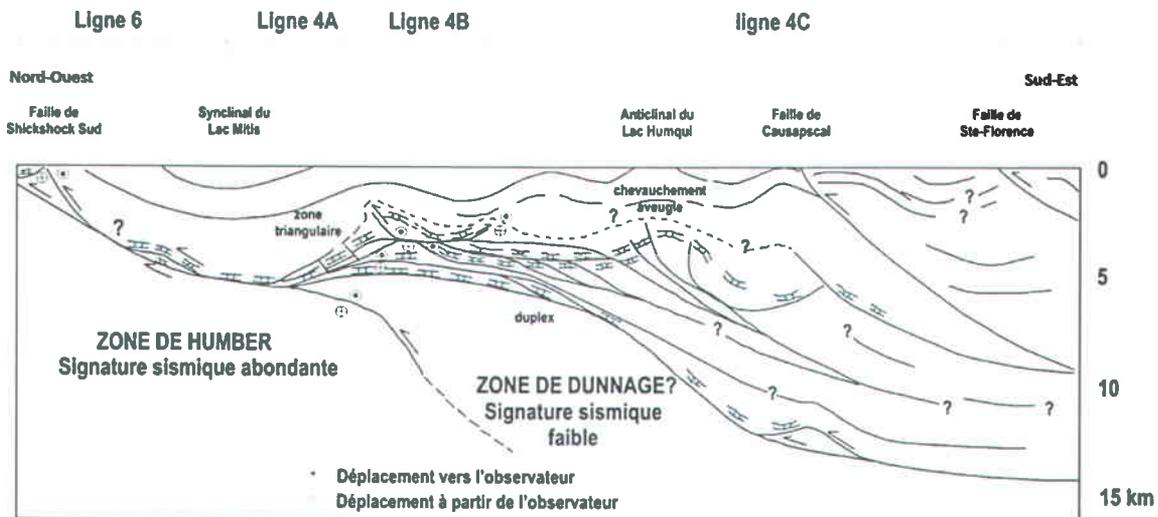


Figure 2.10 : Interprétation structurale des lignes sismiques VB 06, VB 04A, VB 04B et VB 04C montrant un style structural de type de tectonique de couverture (Morin et Laliberté, 2002). Localisation des lignes sismiques Figure 2.3.

L'interprétation de la ligne 2001-MRN-12 (Figure 2.12) proposée par Saucier *et al.* (2006) (Figure 2.3, à moins de 100km à l'ouest de la zone Bourque) indique que la ceinture taconienne est structurée en nappes et chevauchements au-dessus d'un décollement majeur situé à 1500 m au-dessus de la plate-forme du Saint-Laurent et du socle Grenvillien. Ces travaux permettent de décrire le style structural en sous-surface de la zone de Humber. Les roches de la zone de Humber se poursuivent donc sous celles de la ceinture de Gaspé.

La ligne 2001-MRN-10B est considérée comme la continuité de la ligne 2001-MRN-12. Elle se trouve à 150km à l'ouest de la zone Bourque (Figure 2.3). Cette ligne a été interprétée par Bêche (2008) (Figure 2.11). Elle permet d'identifier le contact entre la Ceinture de Gaspé et les roches du Cambro-Ordovicien au niveau de la faille de Shickshock Sud et de mettre en évidence la discordance taconienne sous le mélange du Ruisseau Isabelle (MRI) à partir de la faille de Shickshock Sud jusqu'à la faille sous le synclinal du lac des Huit-Milles. Des structures imbriquées ont été mises en valeur dans les formations cambro-ordoviciennes mais pas la zone de décollement contrairement à la ligne 2001-MRN-12.

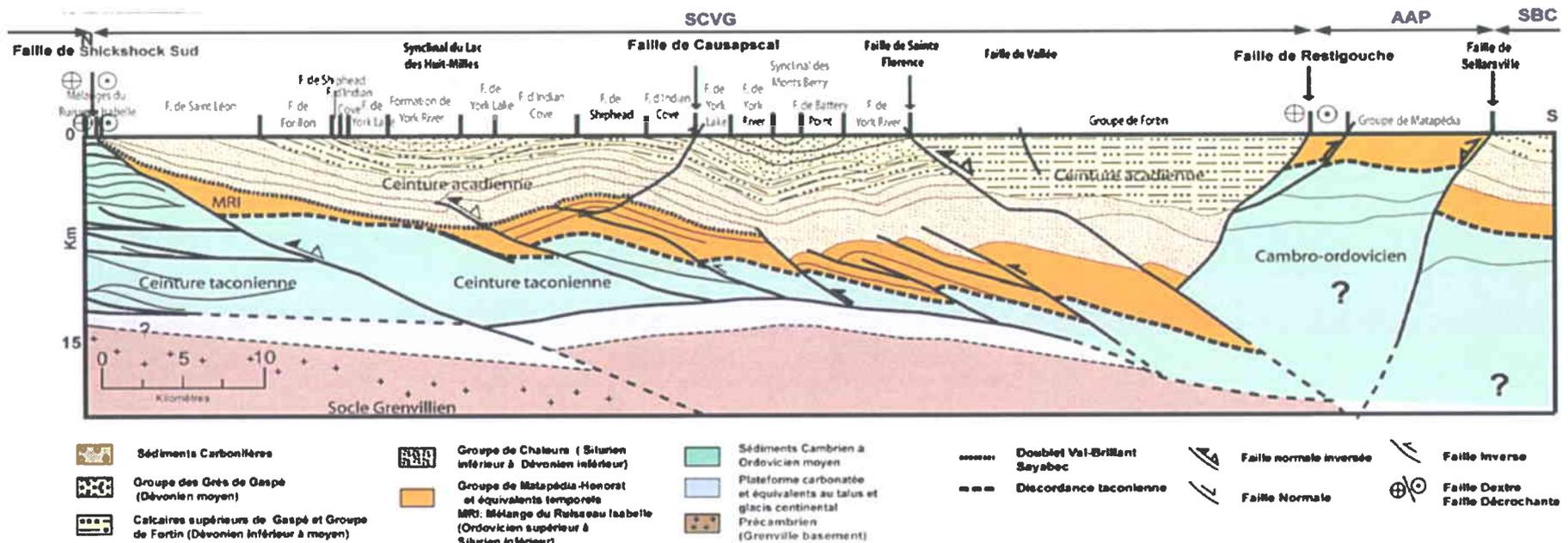


Figure 2.11 : Schéma structural à partir de l'interprétation de la ligne 2001-MRN-10B (Bêche, 2008). SCVG : Synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé ; AAP : Anticlinorium d'Aroostook-Percé ; SBC : Synclinorium de la Baie des Chaleurs ; F. : Formation ; MRI : Mélange du Ruisseau Isabelle équivalent temporel du Groupe de Matapédia-Honorat ; S : Sud. Localisation de la ligne sismique 2001-MRN-10B Figure 2.3.

L'auteur considère que la ceinture taconienne a une structure en nappes avec de grandes failles profondes qui ont joué lors de l'orogénèse acadienne structurant la ceinture de Gaspé. Il note la présence de nombreuses failles chevauchantes prenant racine dans la ceinture taconienne et envisage la faille de Shickshock Sud comme une grande faille de chevauchement s'enracinant profondément dans les roches cambro-ordoviciennes jusqu'à une zone semblant jouer le rôle de décollement basal.

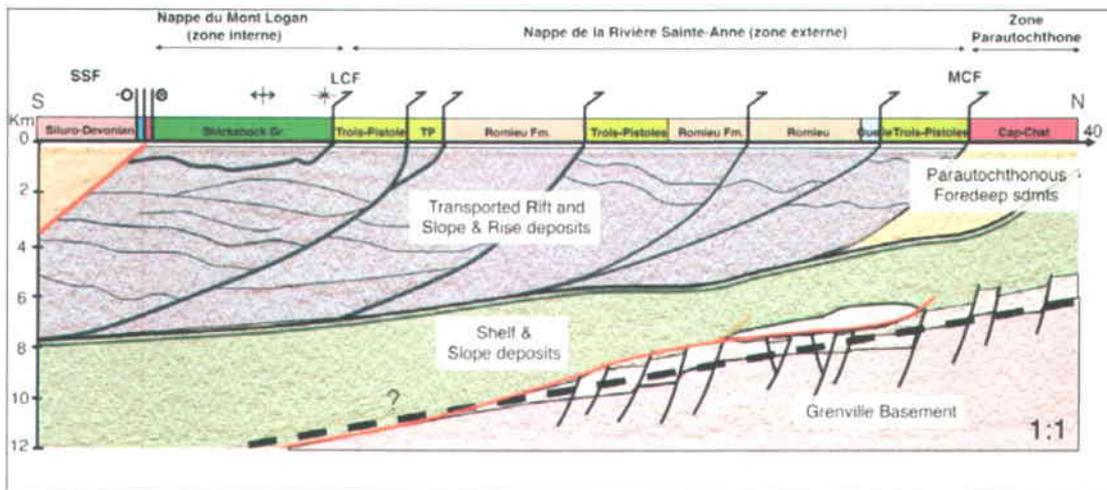


Figure 2.12 : Interprétation sismique de la ligne 2001-MRN-12 montrant une géométrie de chevauchement de nappes (Saucier *et al.*, 2006). TP : Trois-pistoles ; SSF : faille de Shickshock Sud ; LCF : faille du Lac-Cascapédia ; MCF : faille de Méchins-Carcy ; N : Nord ; S : Sud. La ligne en pointillée correspond à la position possible de la base du Grenville. Localisation de la ligne 2001-MRN-12 Figure 2.3.

L'ensemble des observations de Bêche (2008) soutient les interprétations décrivant le style structural de l'orogénèse acadienne comme un style en ceinture de plis et de chevauchements et apportent de nouveaux arguments en faveur du modèle élaboré par Kirkwood *et al.* (2004 ; Figure 1.17). Les images des imbrications structurales sous le synclinal sont comparables à celles des précédentes interprétations de Morin et Laliberté (2002) à l'échelle régionale sur les lignes VB 06 et VB04 A-B-C localisées à environ 70 km à l'ouest de la ligne 2001-MRN-10B.

2.4.3. LE TRAITEMENT SISMIQUE EN PROFONDEUR

Le traitement sismique en profondeur des lignes sismiques disponibles dans la zone Bourque constitue la deuxième étape de la première partie de la méthode de travail (Figure 2.2).

Le travail de thèse de Bêche (2008), en plus de son travail d'interprétation des profils sismiques dans le centre de la Gaspésie, consistait à créer un modèle de vitesse afin de migrer en profondeur les lignes sismiques à partir des données en temps, des données géologiques et des techniques d'inversion tomographique. Les étapes suivies pour la mise

en place du modèle de vitesse pour la migration profondeur sont les suivantes (Bêche, 2008):

Utilisation des données sismiques avant et après sommation afin d'établir de façon fiable un modèle de vitesse pour la migration profondeur. La validation de la conversion en profondeur des sections sismiques en temps s'est fait par l'analyse de «l'horizontalisation» des réflexions sur les collections de traces avant sommation, ce qui a permis de déterminer les vitesses puis de valider leur estimation : l'information de la vitesse ne peut être appréhendée que sur les traces non sommées quel que soit leur type de regroupement.

Détermination des contraintes géologiques. Le travail consistait à partir des informations géologiques et des données de diagraphie disponibles à élaborer des modèles de vitesse simples en affectant une valeur constante à chaque formation géologique, puis à évaluer l'importance des variations latérales de vitesse en effectuant des migrations sismiques profondeur avec des vitesses constantes (*scan* de vitesses). Les données provenaient à la fois d'observations de terrain, de mesures en laboratoire, de modélisations géologiques, des connaissances géologiques régionales / locales, des données gravimétriques et magnétiques et des rares données diagraphiques.

Paramétrisation du modèle de vitesse par la comparaison de deux modèles testés avec le logiciel *John* développé par l'IFPEN i) le **modèle par bloc** (ou *blocky*) qui est constitué avec différentes surfaces délimitées et définies par une vitesse; il a l'avantage de restituer après migration la géométrie exacte du sous-sol. Pour la représentation *blocky*, le sous-sol est divisé en blocs par des interfaces et chaque bloc est caractérisé par sa propre distribution de vitesse. Pour un cas réel, il n'est pas toujours possible de construire ce modèle car il est difficile de connaître la géométrie exacte avant d'avoir une bonne image sismique; ii) le **modèle lisse** (*smooth*) qui revient à créer un modèle de vitesses représentées par des fonctions lisses ce qui a l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance exacte des limites des différentes unités délimitées par les contrastes de vitesse. Pour la représentation lisse, la distribution de vitesse peut être définie sur tout le domaine par une seule fonction, au moins continûment dérivable. Les interfaces simulant les réflecteurs sont également représentées par des fonctions lisses et peuvent être indépendantes des variations de vitesse.

Détermination du modèle de vitesse par tomographie de réflexion (développée à l'IFPEN) dont l'avantage réside dans le fait que les temps observés sont comparés individuellement à leurs temps calculés respectifs. Cette méthode est ainsi adaptée pour déterminer un modèle de vitesse composé de structures complexes puisqu'elle permet de s'affranchir des hypothèses 1D interdisant toute variation latérale de vitesse et toute interface non horizontale.

Les résultats des deux modèles (*smooth* et *blocky*) ont donné sensiblement la même chose dans la thèse de Bêche (2008). Avec le modèle de vitesse lisse, les temps résiduels (valeurs de répartition des temps résiduels moyens et de répartition en fonction de l'offset) étaient inférieurs à ceux obtenus avec le modèle *blocky*. Pour la migration profondeur des lignes sismiques de la zone Bourque, le modèle utilisé est le modèle de vitesse de Bêche (2008) avec un gradient de vitesse lisse basé sur les vitesses de propagation des différentes formations géologiques qui a été fait à partir de la ligne 2001-MRN-10B (localisation Figure 2.3). Le modèle de vitesse lisse (Eq. 2.1) possède un gradient vertical de $0,3 \text{ s}^{-1}$ et une vitesse initiale de 4500 m/s (vitesse estimée des basaltes de la Formation de Shiphead), néglige les inversions de vitesse (i.e. décroissance des vitesses sur une certaine épaisseur malgré l'augmentation de la profondeur) et simule l'accroissement proportionnel de la pression lithostatique avec la profondeur.

$$\text{Modèle de vitesse} = 4500 + 0,1 Z \text{ (avec une vitesse finale à 6000 m/s)} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$Z = \text{profondeur (m)}$$

L'utilisation de ce modèle de vitesse lisse (Eq. 2.1) a été considérée comme satisfaisante compte tenu de la similitude tectonique de la zone du Lac des Huit-Miles et de la zone Bourque et leur type de sédimentologie/stratigraphie. De plus, même si la création de ce modèle a été faite dans la thèse de Bêche (2008) à l'ouest de la zone Bourque, le modèle a été testé avec succès sur la ligne 2001-MRN-16 qui se trouve juste au sud du projet Bourque (Figure 2.3).

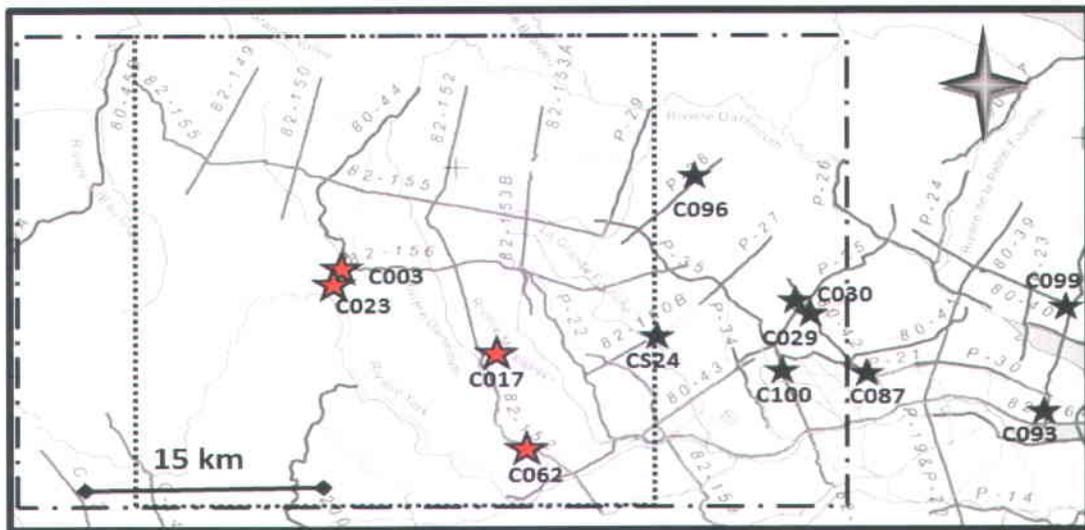
Les données sismiques est-ouest (82-155 et 82-156) et nord-sud (82-149, 82-150, 80-44, 82-152, 82-153A, 82-153B et P-29) ont donc été retraitées et migrées en profondeur à l'IFPEN, à partir des images temps disponibles avant sommation-profondeur (appelée PSDM ou *Pre Stack Depth Migration*) et avec le modèle de vitesse de Bêche (2008) (Eq. 2.1).

2.4.4. LES DONNEES DE PUIITS ET AGRANDISSEMENT DE LA ZONE D'ETUDE

L'étude des données de puits constitue une des étapes de la deuxième partie de la méthode de travail (Figure 2.2, cases noires). L'utilisation des puits dans l'interprétation des lignes sismiques migrées en profondeur permet de caler les réflexions lorsque le puits se situe directement sur la ligne sismique et, si ce n'est pas le cas, le calage se fait par projection du puits sur la ligne sismique la plus proche.

Le projet Bourque a un périmètre originel de 35 km nord-sud et 30 km est-ouest (cadre en pointillé noir sur la Figure 2.13) et ne possède que quelques puits :

- le puits Bald Mountain n°2 (C003) d'une profondeur de 2029 m et datant de 1951 le long de la ligne 80-44,
- le puits Mississipi n°1 (C017) d'une profondeur de 1827 m et datant de 1939 le long de la ligne 82-152,
- le puits Impérial, Gaspé n°1 (C023) d'une profondeur de 1938 m et datant de 1947 le long des lignes 80-44 et 82-156,
- le puits P.O.T. n°28 (C062) d'une profondeur de 1074 m et datant de 1897 le long de la ligne 82-152,
- le puits Blanchet n°1 (C096) d'une profondeur de 1132 m, datant de 1979 et non loin à l'est de la ligne P-29.



Légende:

-  Position des lignes sismiques
-  Localisation des puits utilisés pour l'interprétation des lignes sismiques
-  Localisation des puits discutés dans cette thèse
-  Périmètre du projet Bourque
-  Périmètre de la zone Bourque

Figure 2.13 : Localisation du projet Bourque, de la zone Bourque et des différents puits et lignes sismiques à proximité. Le cadre en pointillés noir : périmètre originel du projet Bourque. Le cadre en tireté noir : périmètre agrandi pour les besoins de la thèse (carte modifiée de la Figure 2.3; Ministère des Ressources naturelles et Faune, 2008 ; <http://sigpeg.mmf.gouv.qc.ca>).

Il a fallu agrandir le périmètre afin de bénéficier des informations données par les puits localisés à l'est de la zone Bourque en vue de la modélisation de bassin (chapitre 4). Le périmètre étudié est maintenant de 35km nord-sud et de 55km est-ouest (cadre en tireté noir sur la Figure 2.13) et inclus plusieurs autres puits dont :

- les puits Venture n°2 et n°3 (C029 et C030) d'une profondeur respective de 2132 et 2399 m, datant de 1947 et de 1948,

- le puits Sunny Bank n°1 (C087) d'une profondeur de 3536 m, datant de 1969,
- le puits Galt n°1 (C100) d'une profondeur de 2500 m, datant de 1983.

2.4.5. LES DONNEES LITHOSTRATIGRAPHIQUES

L'étude des données lithostratigraphiques est essentielle dans l'interprétation des profils sismiques. Cette étape constitue la deuxième partie de la méthode de travail présentée dans la Figure 2.2.

Les détails stratigraphiques développés dans cette partie concernent les roches supposées contenues dans la zone d'étude de cette thèse d'après les articles de Slivitzky *et al.* (1991), de Bourque *et al.* (2001), d'Asselin *et al.* (2004), de Malo *et al.* (2008), et du Lexique Stratigraphique Canadien de Globensky *et al.* (1993). Le Tableau 2.1 liste les formations définies dans la zone d'étude, leur âge respectif et leur lithologie. La colonne stratigraphique (Figure 2.14) montre les relations stratigraphiques des formations de la zone de Humber et de la ceinture de Gaspé comprises dans la zone Bourque, en fonction de l'histoire géologique et de l'eustatisme.

Pour les âges absolus des formations siluro-dévonienues, le Tableau 2.1 renvoie aux coupes (e) et (h) de la Figure 2.14. Les âges indiqués dans ce tableau correspondent aux âges des sommets des formations et sont définis à partir des coupes 4 et 12 (Bourque *et al.*, 2001) couplées avec les âges absolus des étages géologiques rapportés par l'*International Commission on Stratigraphy* (2004 et 2009).

Pour les âges absolus des formations cambro-ordoviciennes, en Gaspésie, le Supergroupe de Québec regroupe toutes les unités entre le fleuve Saint-Laurent et les roches siluro-dévonienues au sud-est (Globensky *et al.*, 1993). Le Supergroupe de Québec situé au nord et probablement sous la zone Bourque (Figure 2.14) comprend i) la Formation de Cloridorme pour les roches du parautochtone taconien (Figure 2.14 a); ii) la formation de Des Landes pour la nappe de la Rivière Marsoui (Figure 2.14 b); iii) les formations de Tourelle, de Rivière Ouelle, de Romieu, le groupe de Trois-Pistoles et la Formation de l'Original pour la nappe de la Rivière Sainte-Anne (Figure 2.14 c) (Slivitzky *et al.*, 1991; Globensky *et al.*, 1993). L'âge des formations cambro-ordoviciennes du Tableau 2.1 et de la Figure 2.14 renvoie aux datations des graptolites de chacune de ces formations (articles de Riva et Malo, 1988; Slivitzky *et al.*, 1991; Webby *et al.*, 2004; Malo *et al.*, 2008).

2.4.5.1. Les roches du Cambrien supérieur et de l'Ordovicien inférieur et moyen

Les roches du Cambrien supérieur et de l'Ordovicien inférieur et moyen présentées dans cette partie, sont les roches identifiables soit en surface, soit dans l'un des puits de la zone

Bourque (Figure 2.14). Les roches de cette période comprennent plusieurs unités lithostratigraphiques qui se succèdent graduellement. Dans la partie orientale de la zone Bourque, les unités stratigraphiques présentes sont les formations de **Romieu***, de **Rivière-Ouelle** et de **Touelle** (Slivitzky *et al.*, 1991). Ces formations font partie de la nappe de la Rivière Sainte-Anne (du domaine des nappes externes) et forment une partie du **Supergroupe de Québec**. Pour les formations de Romieu et de Rivière-Ouelle, il s'agit d'une séquence de mudstones, de mudstones calcareux et de calcaires argileux interstratifiés avec des grès, des conglomérats calcaires. Ces sédiments ont été déposés par courants de turbidité et par mouvements de masse sur le talus et le glacis de la marge du Laurentia (Landing *et al.*, 1992), leur source étant encore le socle grenvillien et la plate-forme du Saint-Laurent. Les formations ordoviciennes se divisent en deux groupes : les formations synorogéniques et postorogéniques. Par exemple, la Formation de Touelle est composée de roches (surtout de flyschs) synorogéniques de l'Ordovicien moyen et supérieur (Slivitzky *et al.*, 1991) dont la source résulte de la destruction de la cordillère taconienne.

*A noter : Actuellement, les chercheurs s'accordent à dire que la Formation de Romieu est un mélange entre la base de la Formation de Rivière Ouelle et le sommet du groupe de Trois-Pistole. Malgré cela, l'unité stratigraphique « Romieu » reste utilisée dans cette thèse puisque : i) cela permet de segmenter l'épaisseur et le temps de déposition de la Formation de Rivière Ouelle qui sont très importants et ii) les cartes qui ont servi à contraindre la surface des lignes sismiques et du modèle 3D n'ont pas été réactualisées.

2.4.5.2. Les formations ordo-siluriennes postorogéniques

Les roches de l'Ordovicien supérieur et du Silurien inférieur postorogéniques présentées dans cette partie, sont identifiables dans l'anticlinal de la Rivière Saint-Jean (au sud de la zone d'étude). Elles ne sont pas connues en affleurement au nord de cet anticlinal et aucun puits de la zone Bourque n'atteint ces formations. Le Groupe de Matapédia constitué des formations de **Pabos** et **White Head** forme la base du bassin successeur post-taconique. La Formation de Pabos présente une sédimentation terrigène calcareuse qui évolue en une sédimentation carbonatée représentée par la Formation de White Head.

2.4.5.3. Les formations siluro-dévonniennes

Les formations siluro-dévonniennes sont représentées par le Groupe de Chaleurs, le Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé et le Groupe des Grès de Gaspé. Deux ensembles marquent la stratigraphie du Groupe de Chaleurs dans le secteur nord-est de la Gaspésie:

Stratigraphie de la zone Bourque

Histoire tectonique

Eustatisme

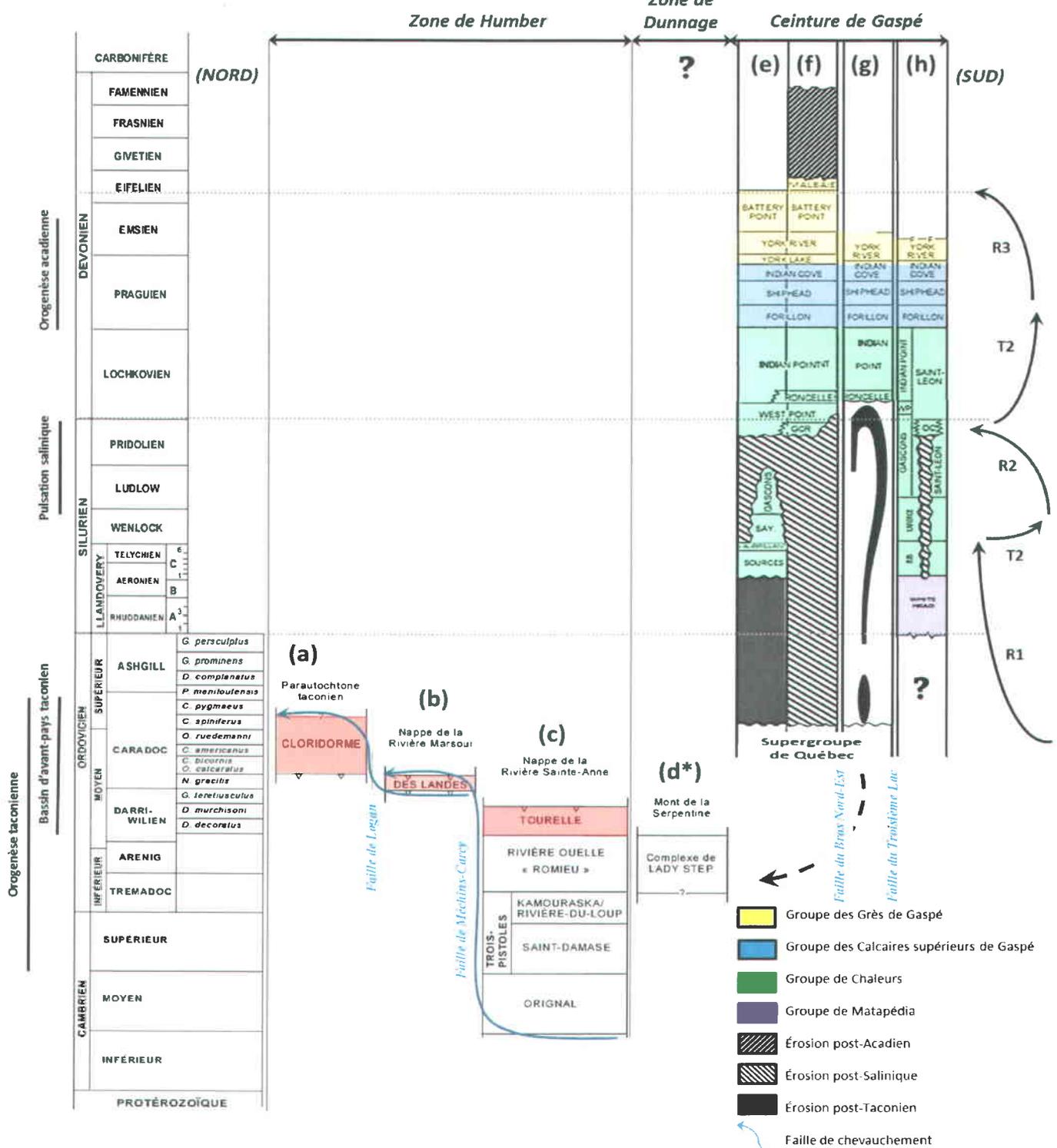


Figure 2.14 : Lithostratigraphie des formations de la zone de Humber et de la ceinture de Gaspé comprises entre Murdockville et le Mont Serpentine au nord-est de la Gaspésie, en fonction de l'histoire géologique et l'eustatisme de la zone. GCR = Griffon Cove River; OC = Owl Capes; BJB = Burnt Jam Brook; WP = West Point; (a), (b), (c) = zone de Humber (d'après Malo *et al.*, 2008); (d*) = formation appartenant supposément à la zone de Dunnage située dans le bloc Centre de la zone Bourque; (e) = Rivière Madeleine (Figure 1.13, colonne 4 de Bourque *et al.*, 2001); (f) = Pointe Forillon (Figure 1.13, colonne 3 de Bourque *et al.*, 2001); (g) = puits de Gaspé Sud (d'après les données du puits); (h) = l'anticlinal de la Rivière St-Jean (Figure 1.13, colonne 12 de Bourque *et al.*, 2001).

- une séquence complète dans le bloc Sud et l'anticlinal de la Rivière Saint-Jean (Figure 2.14, coupe « h »),
- une séquence amputée d'une grande partie de ses faciès siluriens dans le bloc Nord (Figure 2.14, coupe « e »).

Dans le bloc Sud et l'anticlinal de la Rivière Saint-Jean, la séquence est complète. L'assemblage terrigène inférieur se résume à un claystone graptolitique d'eau profonde avec une faible quantité de grès fin (Formation de **Burnt Jam Brook**). L'assemblage médian à carbonates est représenté par des calcarénites et calcirudites lithoclastiques (Formation de **Laforce**) contenant une fraction de grains grossiers de quartz et présentant des caractères turbiditiques par endroits. L'assemblage supérieur est constitué des silicoclastites fines provenant des formations de **Gascons**, d'**Indian Point** et de **Saint-Léon** dans lesquelles s'intercalent des calcaires récifaux (Formation de **West Point**) sur des épaisseurs relativement importantes dans la zone centre-est (les épaisseurs peuvent atteindre 325m dans la zone d'étude : Lespérance et Bourque, 1970; Bourque, 1972, 1977; Bourque *et al.*, 1986; Lachambre, 1987) et une épaisseur plus modeste (une dizaine de m) à l'extrémité orientale de l'anticlinal de la Rivière Saint-Jean. Ces constructions carbonatées sont des pinacles récifaux composées de diverses lithologies calcaires intercalés de faciès silicoclastiques fins et des conglomérats reliés à la **discordance salinique**.

Dans le bloc Nord, l'assemblage terrigène inférieur du Groupe de Chaleurs repose en discordance sur le Supergroupe de Québec. Il est constitué de roches déposées lors d'une diminution de la tranche d'eau, débutant avec les silicoclastites fines calcareuses de la Formation de **Sources** (Lespérance et Bourque, 1970) (Figure 2.15) et se terminant avec les grès littoraux de la Formation de **Val-Brillant**. L'assemblage médian à carbonates est bien représenté par les faciès péritidaux et récifaux de la Formation de **Sayabec**. Au-dessus de la formation de Sayabec, les silicoclastites fines de l'assemblage supérieur (les formations de **Gascons-Indian Point**) contiennent des calcaires récifaux assignées à la Formation de **West Point** (jusqu'à 300 m d'épaisseur et 2 à 3 km de largeur : Lespérance et Bourque, 1970; Bourque, 1972, 1977; Bourque *et al.*, 1986; Lachambre, 1987). À la limite ouest du secteur, les masses récifales sont absentes et les silicoclastites fines sont assignées à la Formation de **Saint Léon**. Plus à l'est, en direction de la presqu'île de Forillon, seule la partie supérieure de la séquence a été reconnue et elle repose en discordance sur des roches cambro-ordoviciennes (Figure 2.15). La répartition de ces formations est donc différente d'est en ouest dans le bloc Nord (Figure 2.15).

Le nord-est de la Gaspésie constitue la région-type du Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé (Lespérance, 1980) et pour celui du groupe des Grès de Gaspé. Les Calcaires Supérieurs de Gaspé sont constitués, à la base, d'une séquence homogène de calcilutite argileuse dolomitique et siliceuse ou d'un mudstone calcareux (Formation de **Forillon**)

(Lavoie, 1992a). La partie médiane est plus hétérogène et possède un contenu silicoclastique plus important (Formation de **Shiphead**); il s'agit de calcaire et mudstone siliceux et dolomitique, avec quantité mineure de lits de calcarénite, grès et bentonite. La portion supérieure du groupe est une unité homogène de calcilutite cherteuse ou silteuse (Formation de **Indian Cove**). Les roches du Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé montrent une forte variation d'épaisseur (Figure 2.8) allant de 500 à 1800m qui est attribuée au dépôt syn-sédimentaire de ces formations et au jeu de la FBNO et la FTL (Lavoie, 1992b).

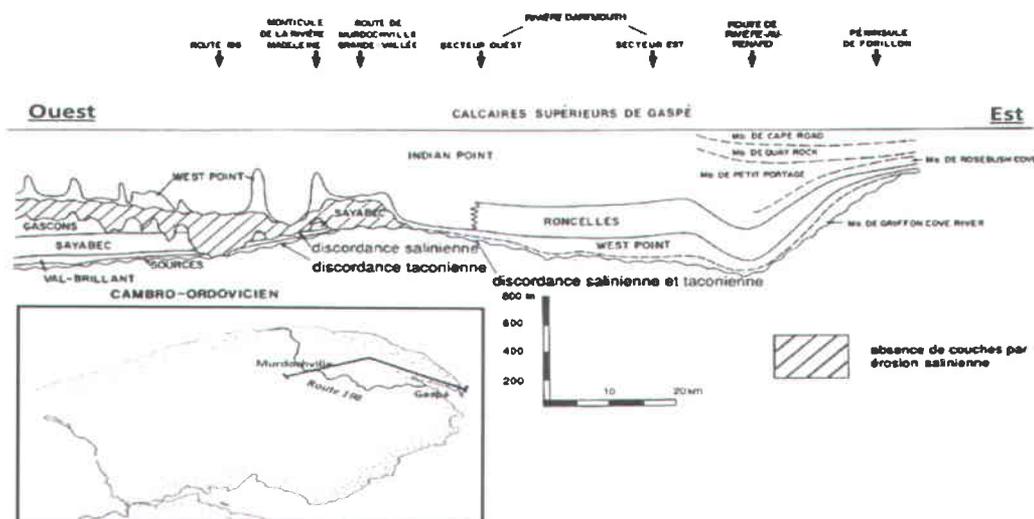


Figure 2.15 : Lithostratigraphie d'un segment de la bande Nord (modifiée de Bourque *et al.*, 1993)

Le Groupe des Grès de Gaspé constitue une épaisse succession pouvant localement atteindre 4 km, déposée dans un intervalle de temps relativement court (Emsien-Eifélien) suggérant un contrôle tectonique majeur sur la source et la subsidence du bassin. Il présente une succession qui va de faciès marins littoraux à des faciès typiquement terrestres. Il comprend quatre assemblages. À la base, une unité de transition (Formation de **York Lake**) composée de calcilutite siliceuse rappelant celle du Membre d'Indian Cove sous-jacent, passant vers le haut à des grès verts feldspathiques semblables à ceux de l'unité sus-jacente (Formation de **York River**). Le York River sus-jacent est composé d'une succession à granulométrie croissante, débutant avec un assemblage de mudstone-siltstone-grès et se terminant avec des grès à stratification entrecroisée à grande échelle. Au-dessus de cette succession, se retrouve un assemblage de grès conglomératiques (Formation de **Battery Point**), grès moyens à grossiers et quantité accessoire de mudstone et siltstone, surmonté par une unité de lits rouges à grès, siltstone et conglomérat (Cant et Walker, 1976; Walker et Cant, 1979; Rust, 1981). L'unité supérieure du groupe (Formation de **Malbaie**) est un conglomérat en bancs épais dont les particules sont composées de calcaires, silicoclastites et volcanites dérivées des

formations plus anciennes des groupes de Matapédia et de Chaleurs, interstratifiées avec des grès grossiers rouges (Rust, 1976, 1981).

2.4.6. LES DONNEES DE GEOLOGIE STRUCTURALE DE LA ZONE BOURQUE

L'étude des données de géologie structurale pour l'interprétation sismique permet de mieux comprendre et d'appréhender les différentes structures géologiques qui sont visibles sur les profils sismiques. Cette étude est la troisième étape de la deuxième partie de la méthode de travail (Figure 2.2).

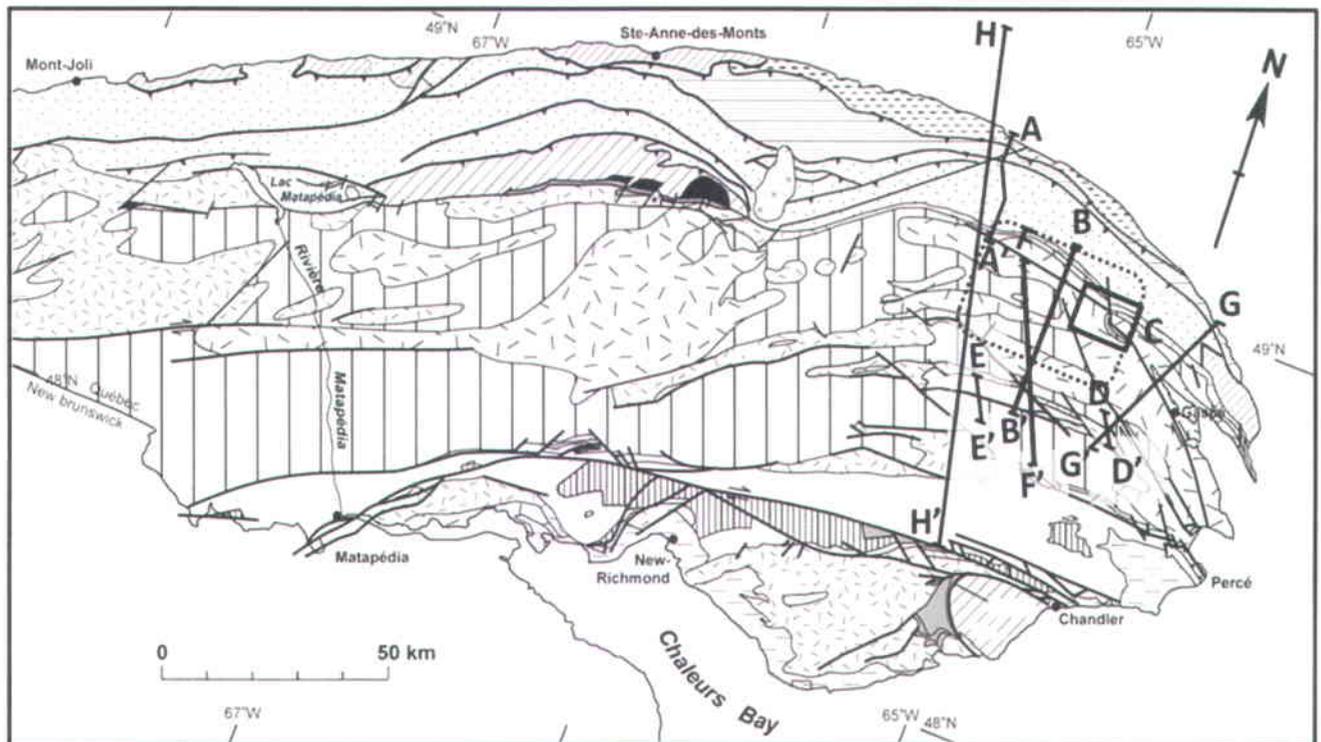
2.4.6.1. La zone de Humber-Dunnage au nord de la zone Bourque

La géométrie de la zone de Humber dans le nord de la péninsule gaspésienne se caractérise par un empilement de nappes de chevauchement (Figure 2.14 à Figure 2.17) ; i) Au nord de la zone Bourque, le domaine parautochtone est représenté essentiellement de la **Formation de Cloridorme** de l'Ordovicien moyen à supérieur. Ce domaine est limité au sud par les failles de Mont Saint-Louis et de Logan (Figure 2.14, a) ; ii) Le domaine des nappes externes contient la nappe de la Rivière Marsoui du Cambrien à l'Ordovicien supérieur, composée de la **Formation de Des Landes** (Figure 2.14, b et Figure 2.16) qui chevauche la zone parautochtone et est elle-même chevauchée par la nappe de la Rivière Sainte-Anne le long de la faille de Méchins-Carcy. Le mélange de Cap-Chat qui fait également partie des nappes externes n'est pas à proximité de la zone Bourque ; iii) Le domaine des nappes internes datant du Néoprotérozoïque au Cambrien, est représenté dans le nord-est de la Gaspésie par une petite bande de roches du Groupe de Shickshock chevauchant les roches de la Formation de Romieu, à l'intérieur même de la **nappe de la Rivière Sainte-Anne**, juste au nord du Mont Serpentine (Figure 2.16).

Le style structural des roches du Cambro-Ordovicien dans le nord-est de la Gaspésie est dominé par les grandes structures régionales en chevauchement dont l'orientation en allant vers l'est varie d'E-O à NO-SE. Ces failles de chevauchement sont accompagnées de plis orientés E-O à NO-SE, déversés à couchés vers le N-NNO. Le transport structural le long des failles est vers le N et le NNE. Ces grandes structures régionales sont reprises par de grands plis ouverts et des chevauchements acadiens (Faure *et al.*, 2004).

Tableau 2.1: Récapitulatif des âges des différentes formations de la zone d'étude de la zone Bourque et des lithologies disponibles dans le lexique stratigraphique canadien. * La Formation de Saint Léon est une unité siluro-dévonienne contemporaine aux formations d'Indian point, de Roncelles, de West Point, de Griffon Cove River et de Gascons. **La formation Griffon Cove River est une unité qui se retrouve localement à l'extrême Est sous forme de lentilles à l'intérieur de la Formation de West Point.

Périodes	Groupes	Formations	Âges	Lithologies	
Carbonifère			370	Conglomérat rouge grès, mudstone	
Dévonien	Grès de Gaspé	Malbaie	391,8	Conglomérat calcaire, grès et mudstone rouges	
		Battery Point	397,5	Arénite feldspathique à grain fin à grossier, à feldspaths roses, mudstone gris-vert et parfois rouge, conglomérat polygénique à granules et cailloux, conglomérat intraformationnel, mudstone dolomitique	
		York River	402,5	Grès, mudrock gris-vert, wacke, arénite, volcanoclastites, basalte	
		York Lake	407	Grès et mudrock gris-vert, wacke, calcaire, conglomérat, basalte	
	Calcaires Supérieurs de Gaspé	Indian Cove	407,2	Calcaire, mudstone calcaireux, wacke, volcanites et volcanoclastiques	
		Shiphead	408,4	Mudstones calcaireux, grès, calcaire, volcanoclastites	
		Forillon	409,8	Calcaires, calcaire argileux, mudstone	
	Silurien	Chaleurs	Indian Point	411,2	Siltstone/grès fin, calcilutite, mudstone
			Roncelles	414,4	Grès fin à siltstone calcaireux et calcarénite
			Saint Léon*	411,2	Mudstones et siltstones calcaireux ou non
West Point			415	Calcaires récifales	
Griffon Cove River**			416	Mudstones, siltstones, grès, calcaires Base conglomératiques	
Gascons			417,3	Grès mudstone, siltstone, mudstone	
Laforce			422	À l'Est = conglomérats calcaires (car source démantèlement Anticosti) À l'Ouest = mudstones, grès, calcarénites	
Sayabec			424	Calcaires variés (calcaire gréseux, calcaire nodulaire, calcaire péritidaux et calcaire nodulaire)	
Burnt Jam Brook			428,2	Shales, mudstones, grès	
Val Brillant			428,2	Grès quartzitique	
Source	432	Calcilutite avec interlits de shale calcaireux			
	Matapédia	White Head	437,5	Calcilutite, calcaire argileux, calcaire silteux	
Cambro-Ordovicien	Supergroupe de Québec	Tourelle	463,9	Grès, mudrock, wacke lithique, arénite, calcaire	
		Rivière Ouelle	468,5	Mudrock, grès, calcaire, arénite quartzitique, conglomérat	
		Romieu	473,6	Claystone dolomitique, calcilutite, conglomérat calcaire et arénite quartzitique	



Bassin du PALÉOZOÏQUE TARDIF

Bassin des Maritimes
Carbonifère

Formation de Bonaventure
et équivalents

Symboles

— Contacts géologiques

— Failles

↗ Failles taconiennes chevauchantes

↘ Failles acadiennes décrochantes

⋯ Périimètre approximatif de la zone Bourque

X—X' Localisation des coupes présentées dans le texte

□ Périimètre approximatif de la Figure noté C

Ceinture du PALÉOZOÏQUE MOYEN

Ceinture de Gaspé

Ordovicien tardif à Dévonien moyen

■ Intrusions dévoniennes

▨ Groupe des Grès de Gaspé

▩ Groupes des Calcaires supérieur de Gaspé,
de Fortin et de Témisoucata

▧ Groupe de Chaleurs

▦ Groupe de Matapédia

◊ Groupe d'Honorat (Formation de Garin)

▤ Groupe de Cabano

Zones du PALÉOZOÏQUE PRÉCOCE

Zone de Humber

Zone de Dunnage

Domaine Parautochtone
Ordovicien tardif

▨ Formation de Cloridorme

Domaine des nappes externes
Cambrien à Ordovicien tardif

▨ Mélange de Cap-Chat

▩ Nappe de la Rivière Marsoui

▧ Nappe de la Rivière Ste-Anne

▦ Groupe de Trinité

Domaine des nappes internes
Néoprotérozoïque tardif (?) à Cambrien précoce

▨ Nappe du Mont Logan

▩ Groupe de Maquereau

Ordovicien précoce à tardif

■ Nappe du Mont Aibert

▨ Mélanges, déposition d'arrière-arc,
shales, roches ultramafiques,
amphibolites

Figure 2.16 : Carte montrant les unités stratigraphiques et tectoniques en Gaspésie et la localisation des coupes structurales présentées dans le texte (modifiée de Malo et Kirkwood, 1995).

Le nord de la zone Bourque a été étudié en détail par Lynch et Arsenault (1997). Sur la coupe (Figure 2.17), les auteurs ont interprété la structure des unités (évaluée à 10-12 km d'épaisseur) comme un enchevêtrement sur une courte distance (15 à 20 km) suite à l'aplatissement d'une rampe abrupte convexe qui s'est transformée en une zone de décollement en direction de l'avant-pays (Lynch et Arsenault, 1997). Les failles de Shickshock-Sud et de la Rivière Madeleine sont interprétées comme des failles de décrochement acadien et recourent la zone de Humber (Lynch et Arsenault, 1997).

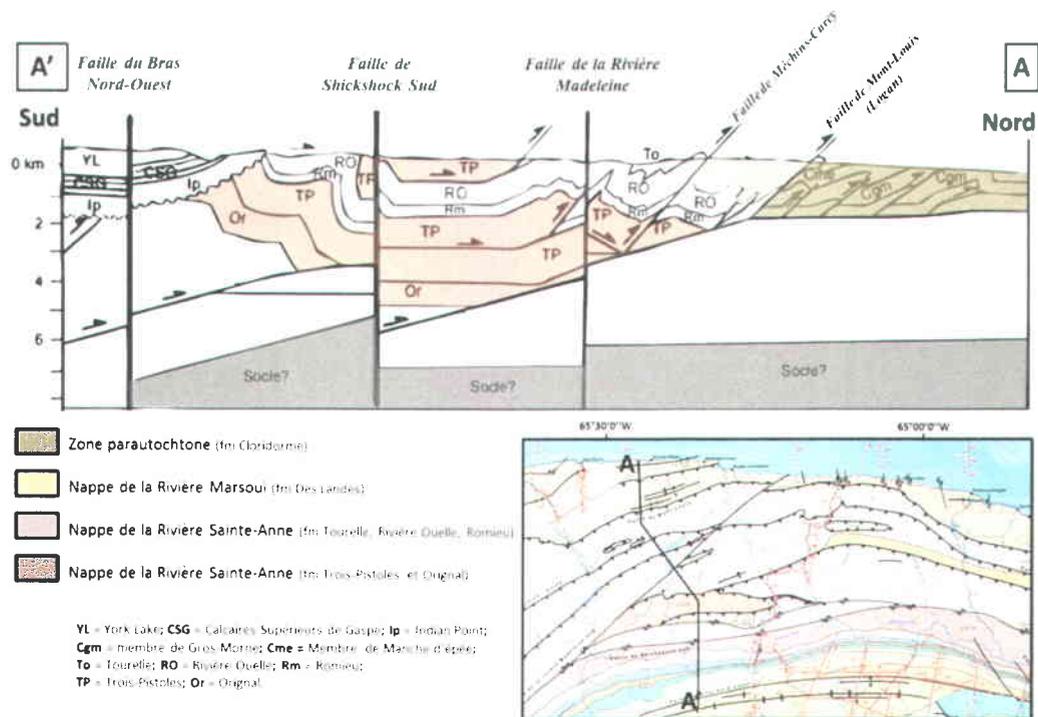


Figure 2.17 : Coupe structurale de la zone de Humber, dans le nord de la zone Bourque et la carte de localisation de la coupe structurale. Localisation de la coupe AA' Figure 2.16 (modifiée de Lynch et Arseneault, 1997).

2.4.6.2. La ceinture de Gaspé dans la zone Bourque

En 2001, Bertrand et Malo ont fait plusieurs coupes au nord-est de la Gaspésie dont la coupe BB' (Figure 2.18). Cette coupe structurale construite à partir de données de surface montre les plis acadiens ouverts de direction E-O associés, dans la partie nord, à des failles de même direction. La FBNO illustrée en faille inverse dans la Figure 2.18 est également interprétée comme une faille de décrochement dextre.

Sur l'ensemble de la zone Bourque, les plis acadiens et les failles inverses sont recoupés par plusieurs failles de décrochement orientées NO-SE (entre autres : la FBNO et la FTL). **Sur le terrain**, les principales failles de direction NO montrent des zones de déformation larges de 300 m avec un sens de cisaillement dextre prédominant (Brisebois, 1981 ; Kirkwood *et al.*, 2004). Ces failles ont une histoire géologique complexe (voir 2.4.1) : elles ont possiblement fonctionné en failles normales lors de la sédimentation des séquences siluriennes à dévoniennes précoces, elles ont rejoué en failles inverses lors du plissement acadien et finalement elles ont agi comme failles de décrochement dextre à la fin de l'orogénèse acadienne.

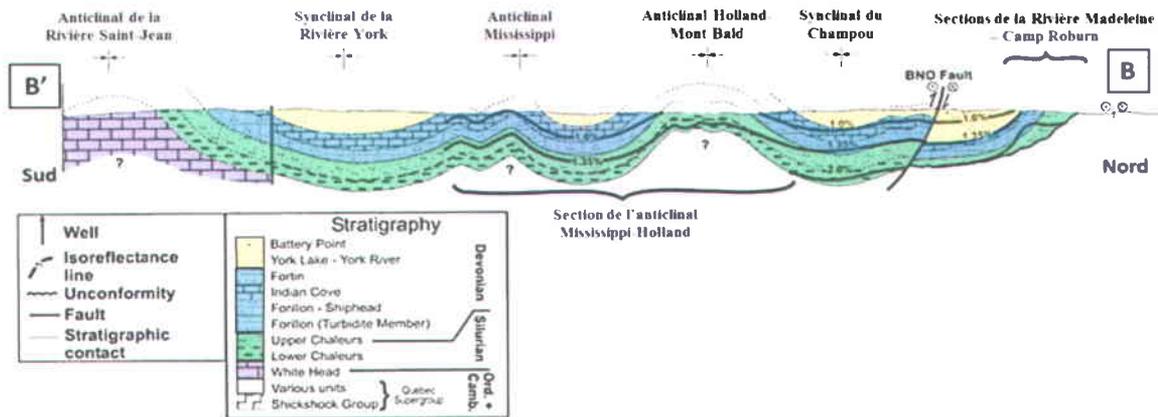


Figure 2.18 : Coupe structurale BB' de la zone Bourque localisée sur la Figure 2.16 (modifiée de Bertrand et Malo, 2001).

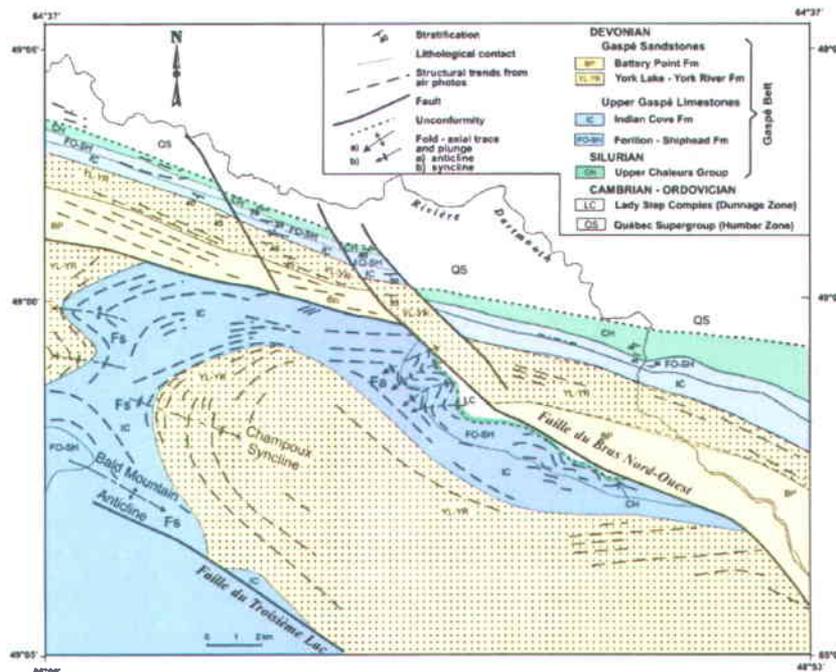


Figure 2.19 : Carte géologique du synclinal de Champoux montrant les relations entre la géologie structurale d'une déformation salinique (plis de direction NO : Fs) et d'une déformation acadienne (plis de direction NE : Fa) situé à l'est de la zone Bourque. Localisation de la carte C sur la Figure 2.16 (modifiée de Malo, 2001).

L'analyse des traits structuraux de la carte du synclinal de Champoux (Figure 2.19) montre la présence de plis de direction NO-SE (Figure 2.19, Fs) dans les formations d'Indian Cove, de York Lake et de York River entre les failles du Bras Nord-Ouest et du Troisième Lac. Près de la zone où se trouvent les roches du Complexe de Lady Step, des plis de direction NE-SO (Figure 2.19, Fa) sont visibles et se superposent sur le synclinal de Champoux à l'ouest. Cela suggère que les plis Fs précèdent les plis Fa de direction NE-SO. Les plis Fa sont considérés par Malo (2001) comme des plis régionaux acadiens. Et les plis Fs qui sont sans clivage à l'opposé des plis Fa, sont interprétés comme des plis d'extension longitudinale (Figure 2.20 : Schlishe, 1995) génétiquement reliés aux mouvements précoces en faille normale de la FBNO et de la FTL (Malo, 2001).

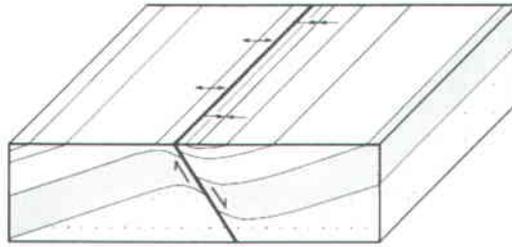


Figure 2.20 : Bloc diagramme illustrant la géométrie théorique d'un pli d'extension longitudinale (Schlische, 1995).

Au sud de la zone Bourque se trouve l'anticlinal de la Rivière Saint-Jean qui présente une géométrie bien différente. L'interprétation structurale de Kirkwood *et al.* (2004) suggère qu'il s'agit d'un anticlinal déversé vers le sud et localisé au-dessus d'un rétrochevauchement d'extension régionale. Ce rétrochevauchement correspond au décollement principal au-dessus d'un empilement d'écailles chevauchées en profondeur et localisées dans les unités du Matapédia, le tout présentant une géométrie globale de duplex.

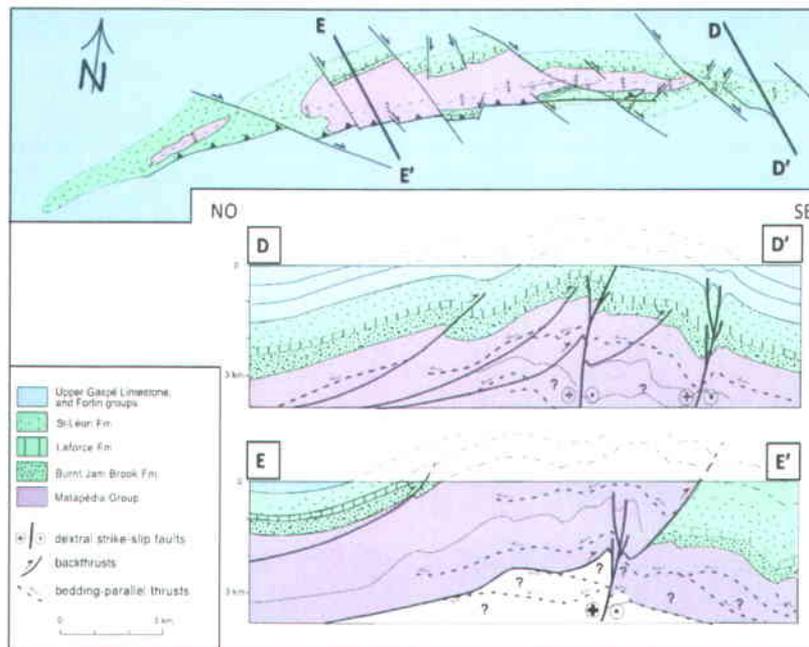


Figure 2.21 : Deux coupes schématiques (DD' et EE') à travers l'anticlinal de la Rivière Saint-Jean au sud de la zone Bourque, illustrant les relations structurales et chronologiques entre les plis et les failles de cette partie de la Gaspésie, localisées sur le schéma de la même figure et sur la Figure 2.16 (modifiées de Kirkwood *et al.*, 2004).

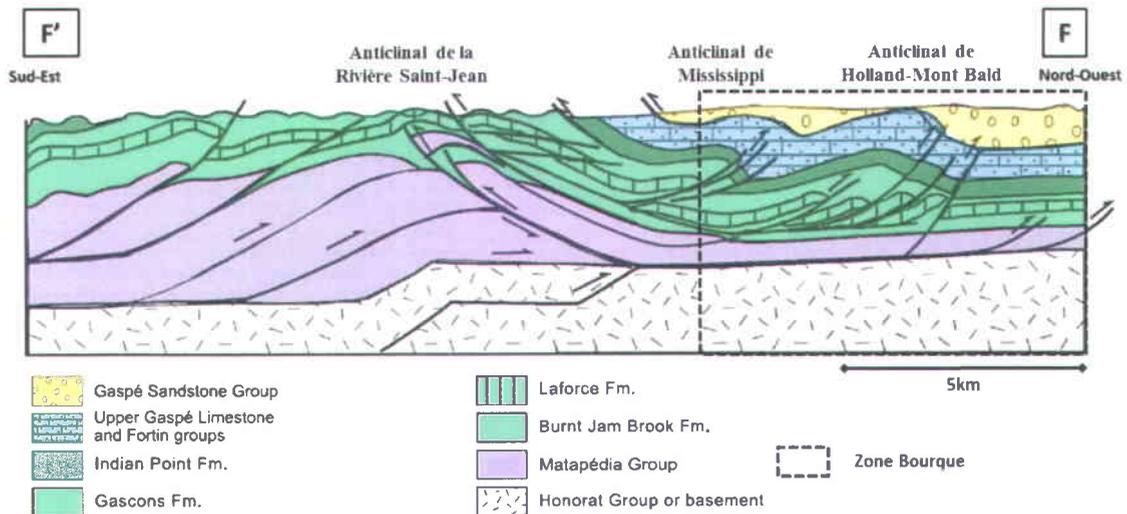


Figure 2.22 : Coupe schématique FF' montrant les relations tectono-stratigraphiques entre la partie nord et la partie centre du nord-est de la Gaspésie. Coupe localisée sur la Figure 2.16 (modifiée de Kirkwood *et al.*, 2004).

Les chercheurs associés ou travaillant pour la Commission géologique du Canada ont mis à disposition du public une compilation géologique de la Gaspésie. Leurs travaux publiés en 2005 ont fait ressortir plusieurs problématiques qui demeurent mal comprises :

- Les relations géométriques entre les unités syn-orogéniques (formations de Tourelle et de Deslandes) et la Formation de Romieu sont incertaines (Figure 2.23). Ils préconisent une révision des cartes et une étude structurale régionale et de la cinématique des failles et de leurs relations avec les plis environnants (Castonguay *et al.*, 2005).
- Le prolongement des grandes failles majeures demeure incertain (Figure 2.23). Ils conseillent une étude sur la chronologie et la cinématique des failles régionales (Castonguay *et al.*, 2005).

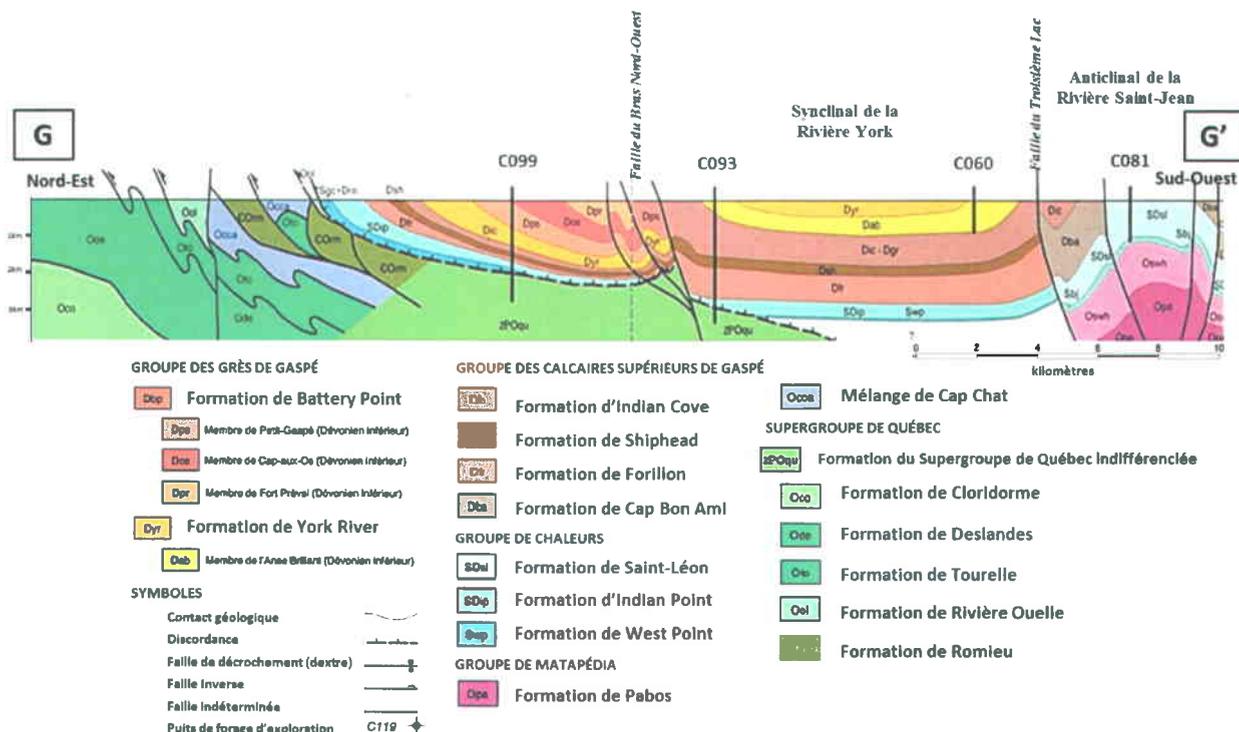


Figure 2.23 : Coupe géologique (localisée sur la Figure 2.16) montrant la relation entre les roches du Supergroupe de Québec et les roches plus jeunes. Aucune structuration des roches du Cambro-Ordovicien n'est identifiée sous la Ceinture de Gaspé (modifiée de Castonguay *et al.*, 2005).

2.4.7. LES AUTRES DONNÉES GEOPHYSIQUES DISPONIBLES

L'étude des données géophysiques, autres que les lignes sismiques, va permettre, tout comme l'étude des données de géologie structurale, de mieux comprendre et d'appréhender les différentes structures qui ne sont pas du tout visibles en surface. Cette étude constitue la quatrième étape de la deuxième partie de la méthode de travail (Figure 2.2). Cette section résume certains détails concernant la zone Bourque qui se trouvent dans les articles de Pinet *et al.* (2005, 2006a, 2006b, 2008 et 2010).

La **carte de l'anomalie de Bouger** (Figure 2.24, carte A) montre que la zone Bourque se situe sur une anomalie magnétique positive en forme d'arc parallèle à la rive nord-est de la péninsule de la Gaspésie (anomalie de Bouger maximum entre 10 et 32 mGal; Pinet *et al.*, 2006a). Deux anomalies de longueur d'onde plus courtes (Figure 2.24, carte A, « z » et « y ») situées près du contact de la zone de Humber et de la ceinture de Gaspé et près de la rive du fleuve Saint-Laurent sont superposées à la grande anomalie de longueur d'onde. La coexistence d'anomalies de grande longueur d'onde et de deux autres plus courtes a été interprétée comme le résultat d'une seule source (correspondant à la haute densité des roches métavolcaniques du Groupe de Shickshock) (Pinet *et al.*, 2006b) (Figure 2.25).

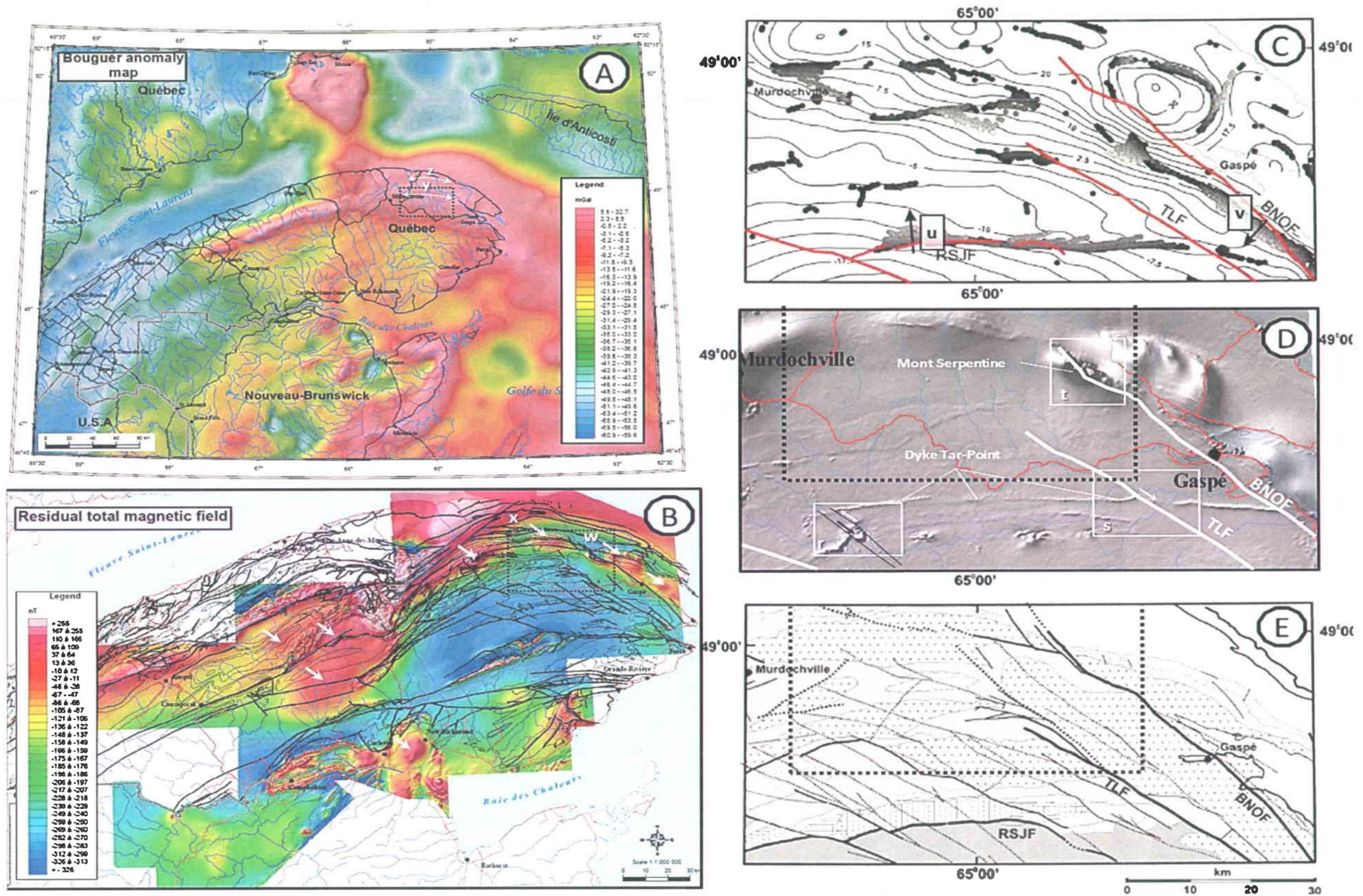


Figure 2.24 : Ensemble de cartes faites à partir de données géophysiques. Le rectangle en pointillé localisé sur les cartes A, B, D et E représente le périmètre de la zone Bourque. Carte A : carte des anomalies de Bouguer. Les flèches blanches (y et z) sont discutées dans le texte et représentent deux anomalies de longueur d'onde plus courte. Carte B : carte de la composante résiduelle du champ magnétique total de la Gaspésie et du Nouveau Brunswick. Les flèches blanches correspondent à des anomalies magnétiques spécifiques identifiées par Pinet *et al.*, 2008. Les flèches x et w sont discutées dans le texte; Carte C : agrandissement d'une carte du maximum de dérivée horizontale du champ de gravité pour différentes valeurs entre 1 et 10km superposée à la carte de l'anomalie de Bouguer. Les flèches noires (u et v) sont discutées dans le texte et représentent le pendage des limites de contraste de la densité; Carte D : agrandissement de la carte de l'ombre projetée (illumination : NO à 45°) des anomalies de la composante résiduelle du champ magnétique total de Pinet *et al.*, 2005. Les encadrés représentent les points d'intérêt discutés dans le texte; Carte E : Carte géologique améliorée à partir des données du champ magnétique. Le positionnement possible des failles aveugles est représenté en pointillés gris.

La **dérivée horizontale du champ de gravité** montre que la signature gravimétrique de la FBNO (Figure 2.24, carte C) est plus nette que celle de la FTL. Ce contraste gravimétrique le long de la faille indique un pendage de la FBNO vers le sud-ouest (Figure 2.24, carte C « v »). Au sud de la zone Bourque, la faille de la Rivière Saint-Jean est également bien définie et démontre un pendage vers le nord (Figure 2.24, carte C « u ») (Pinet *et al.*, 2008). Ce pendage est en accord avec le scénario de rétrochevauchement proposé par Kirkwood *et al.* (2004) (Figure 2.22).

Les **données aéromagnétiques** soulignent une zone d'anomalies positives intenses qui se situent à l'extrémité nord de la ceinture de Gaspé dans les roches du Siluro-Dévonien, visible entre autre dans le bloc Nord de la zone Bourque (Figure 2.24, carte B, « w » et « x »). Ces anomalies aéromagnétiques prennent l'allure d'anomalies déconnectées de forme ovoïde (Figure 2.24, carte B, flèches blanches) (Pinet *et al.*, 2008).

Sur l'image **ombrée du champ magnétique total résiduel**, le seul élément clair est l'anomalie magnétique positive associée à l'extension ouest de la FBNO (Figure 2.24, carte D, encadré « t »), probablement due à la présence de roches à forte susceptibilité magnétique le long du plan de faille. Ces roches peuvent être corrélées avec les roches mafiques/ultramafiques du mélange du Complexe de Lady Step au Mont Serpentine que l'on retrouve le long de cette faille (Berger et Ramsay, 1993). L'anomalie magnétique positive de forme conique est interprétée comme un morceau déconnecté de l'anomalie magnétique de forme ovoïde retrouvée de l'autre côté de la FBNO (Figure 2.24, carte B, « w ») (Pinet *et al.*, 2008). Les failles de directions NO (failles du Bras Nord-Ouest et du Troisième Lac) montrent une structure en queue de cheval à leur extrême NO, ce qui dénote une diminution de la propagation du mouvement le long des failles (Figure 2.24, carte E) (Pinet *et al.*, 2008).

Le **dyke de Tar-Point** est très bien représenté (Figure 2.24, carte D). Il est daté de 332 ± 15 Ma (Pinet *et al.*, 2008), ce qui lui donne un âge Carbonifère. Ce dyke a pris place après le Dévonien le long des failles d'orientation NO déjà en place. Ce dyke recoupe plusieurs failles. Le mouvement indiqué par le dyke de Tar-Point le long de certaines failles donne un mouvement senestre au sud de Murdochville et un mouvement dextre dans la partie orientale de la péninsule gaspésienne le long de trois failles d'orientation NO dont la FTL (Figure 2.24, carte D, encadré « s ») (Pinet *et al.*, 2008). Un dyke plus ancien (Skidmore, 1965) (Figure 2.24, carte D, encadré « r ») montre un mouvement pré-acadien dextre le long de la faille (Figure 2.24, encadré « r », flèche noire) indiquant plutôt un déplacement senestre post-acadien du dyke de Tar Point (Figure 2.24, l'encadré « r », flèche blanche) (Pinet *et al.*, 2008).

Le long de la coupe **HH'** (Figure 2.25), les metabasaltes retrouvés à la surface au nord-est de la zone Bourque correspondant au Groupe de Shickshock (Figure 2.25, (1)) sont limités à un mince lambeau de charriage sur le dessus de la zone externe de Humber. La succession du Siluro-Dévonien repose en discordance sur la zone de Humber (Figure

2.25, (1)) et est impliquée dans de larges plis ouverts imagés sur les profils sismiques présentés dans cette thèse (Pinet *et al.*, 2010).

La densité relativement faible des unités exposées ne peut rendre compte de l'anomalie positive de Bouguer de grande longueur d'onde. Afin d'obtenir un ajustement géologiquement raisonnable entre les valeurs de la gravité observées et calculées, un corps de haute densité est interprété comme étant présent à la base de la zone de Humber, au-dessous de la succession du Siluro-Dévonien. L'anomalie (Figure 2.25 (2)) est considérée comme le résultat d'une source unique qui comprend deux culminations qui pourraient être interprétées comme des chevauchements du Groupe de Shickshock. La limite de répartition du Groupe de Shickshock au sud correspondrait à la faille de la Rivière Saint-Jean.

Le corps haute densité (Groupe de Shickshock) reste relativement profondément enfoui au nord-est de la Gaspésie malgré les imbrications structurales telles que celles trouvées au nord-est de la zone Bourque entre la zone de Humber et la ceinture de Gaspé (Figure 2.25). Cette géométrie indique que le raccourcissement tectonique aurait été principalement encaissé par les roches situées dans le nord-ouest de la Gaspésie (Pinet *et al.*, 2010).

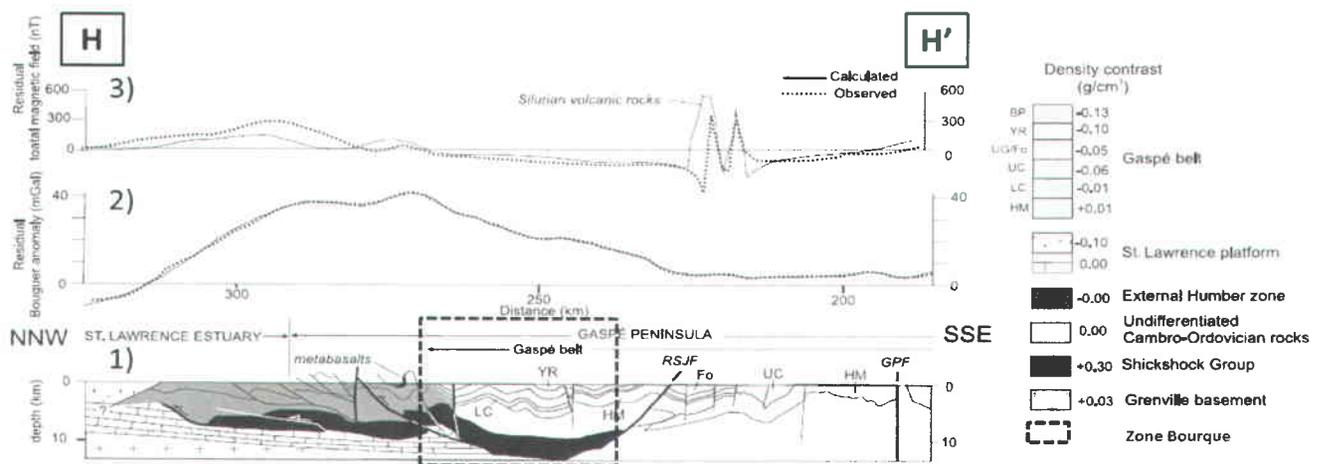


Figure 2.25 : Coupe HH' faite à partir de la géologie de terrain et d'un modèle de champ potentiel (localisée sur la Figure 2.16). GPF : Faille du Grand Pabos ; RSJF : Faille de la Rivière Saint-Jean ; BP : Formation de Battery Point ; HM : Groupes de Matapédia et d'Honorat ; LC : Groupe de Chaleurs inférieur ; UC : Groupe de Chaleurs supérieur ; UG/Fo : Groupes des Calcaires Supérieurs de Gaspé et de Fortin ; YR : Formations de York Lake et York River (modifiée de Pinet *et al.*, 2010).

2.5. INTERPRÉTATION DES LIGNES SISMIQUES MIGRÉES EN PROFONDEURS

2.5.1. REGROUPEMENT DE CERTAINES LIGNES SISMIQUES

Les lignes sismiques 82-149, 82-150, 82-153A et B de direction **nord-sud** recoupent le même secteur nord de la zone Bourque (Figure 2.3). Ces lignes qui ont le même profil permettent de i) visualiser le demi-bassin présent entre la nappe de la Rivière

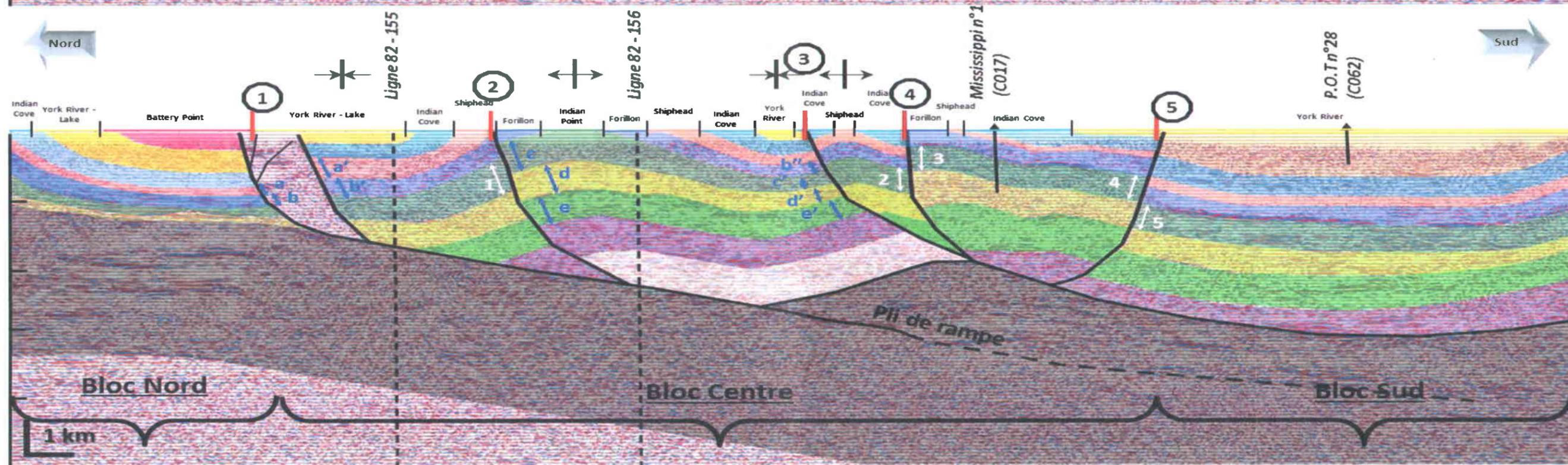
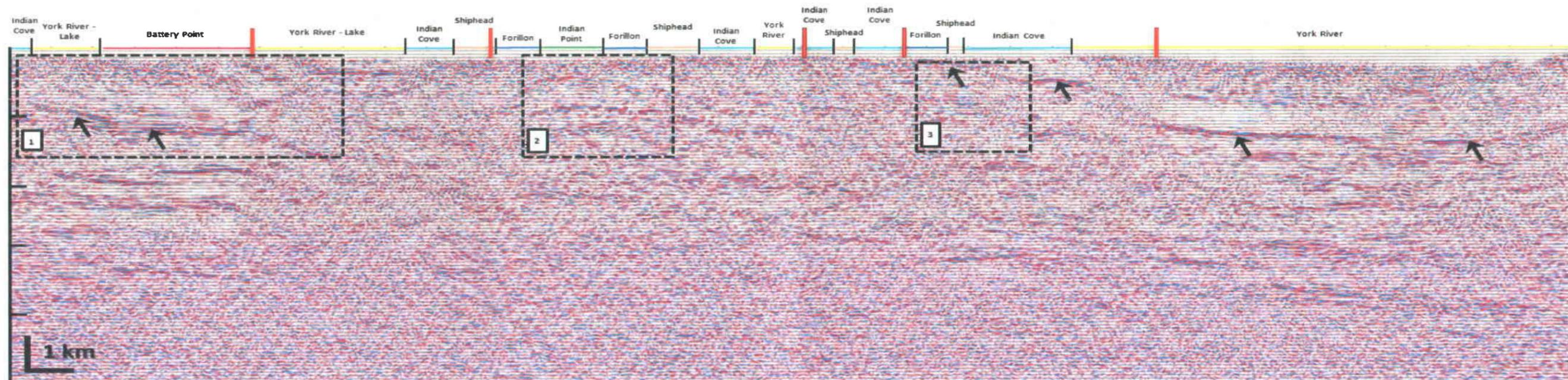


Figure 2.26 : Image sismique profondeur de la ligne 82-152 et interprétation schématique de cette ligne.

Sainte-Anne et la FBNO ; ii) pointer la FBNO et de montrer sa complexité ; iii) voir la structure du synclinal au sud de la FBNO.

Les lignes sismiques 80-44 et 82-152 montrent également, dans leur partie nord, ces mêmes structures. Elles montrent en plus la structure du pli Holland – Mont Bald : la ligne 80-44 recoupe ce pli en son centre et la ligne 82-152 le recoupe dans sa partie est. Néanmoins, **la ligne sismique 82-152** est la seule qui permette d’avoir une vue d’ensemble sur la zone Bourque car elle est la seule à traverser la zone du nord au sud. La ligne 82-152 a également l’avantage de recouper les deux principales failles (FBNO et FTL). Pour ces raisons, la ligne 82-152 sera la ligne nord-sud de référence discutée dans ce chapitre.

Les lignes sismiques de direction approximative **est-ouest** sont au nombre de deux (Figure 2.3) : la 82-155 et la 82-156. Ces deux lignes apportent beaucoup d’information sur la géométrie en profondeur des structures mais la **ligne 82-156** permet de visualiser le lien et la continuité entre le bloc Ouest et le bloc Centre. Cette ligne va permettre d’expliquer certains choix faits dans cette thèse.

2.5.2. DESCRIPTION ET INTERPRETATION DE LA LIGNE 82-152

La ligne sismique 82-152 (Figure 2.26) a été faite en aout 1982 et a été migrée en profondeur en 2008 à l’IFPEN. Elle est de direction nord-sud, possède 509 points de tir et mesure 34100 m de long. Elle recoupe les lignes sismiques 82-155 et 82-156 dans sa moitié nord et les puits Mississippi n°1 (C017) et P.O.T n°28 (C062) dans sa moitié sud (Figure 2.13). Aucune diagraphie n’est disponible pour les deux puits, l’un datant de 1897 et l’autre de 1939. Ils ont néanmoins été alignés à la sismique et les détails stratigraphiques ont été comparés aux réflexions le long de la ligne sismique.

Dans la partie septentrionale du profil sismique 82-152, les formations d’Indian Cove, de York River – Lake et de Battery Point affleurent. Dans la partie centrale, les formations d’Indian Cove, de Shiphead, de Forillon et d’Indian Point s’alternent à la surface. Enfin dans la partie méridionale, seule la Formation de York River se retrouve à l’affleurement. L’image sismique en profondeur obtenue de la ligne 82-152 montre des réflexions continues et apporte plus de précisions sur l’architecture des couches sédimentaire dans le Siluro-Dévonien et sur la géométrie des failles et des plis affectant la ceinture de Gaspé. Il est possible de distinguer plusieurs éléments sur le profil 82-152 qui sont détaillés à la suite du texte.

- **La réflexion Forillon / Indian Point :**

La Formation de Forillon est représentée par une succession homogène de calcilutites grises dolomitiques, schisteuses et siliceuses (Lespérance, 1980 ; Bourque *et al.*, 2001). Le Groupe de Chaleurs supérieur constitué des formations d’Indian Point, de Roncelles, de Saint-Léon, de West Point et de Gascons, est un assemblage qui rassemble des roches terrigènes silicoclastiques à grain fin, des conglomérats, des roches volcaniques et des

calcaires récifaux pour la Formation de West Point. La réflexion Forillon / Indian Point est marquée par une amplitude élevée et une signature caractéristique liée à la variation rapide de la lithologie. En effet, le passage d'une formation calcaireuse homogène à une formation terrigène permet de bien réfléchir les ondes et d'être visible sur une ligne sismique. La réflexion Forillon / Indian Point se termine en *onlap* sur le toit du West Point (Figure 2.27, flèche rouge). Cette réflexion (Figure 2.26, flèches noires) peut être suivie sur une grande partie des lignes sismiques de la zone Bourque (Figure 2.27).

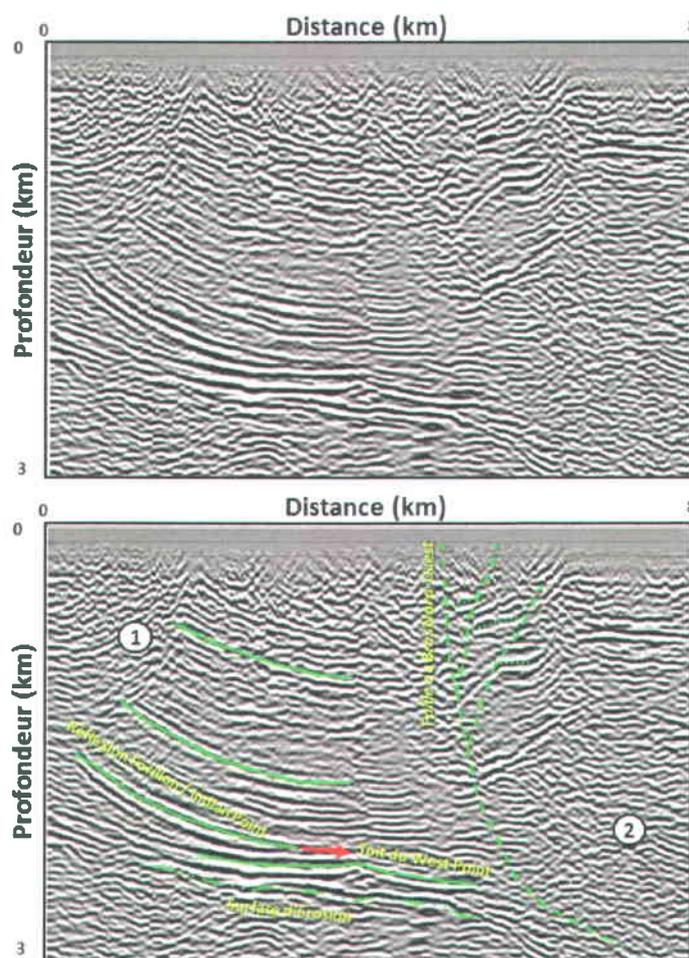


Figure 2.27 : Interprétation du bloc Nord de la ligne sismique 82-152 montrant la structure en fleurs de la FBNO, la réflexion Forillon / Indian Point, la terminaison de la réflexion Forillon / Indian Point en *onlap* (flèche rouge), la Formation de West Point et la zone d'érosion qui met en contact la Formation de West Point avec le Cambro-Ordovicien sous-jacent (Figure 2.26, image 1). Les points 1 et 2 sont discutés dans le texte.

- **La zone d'érosion dans le bloc Nord :**

Sur le terrain, dans le nord de la zone Bourque, les roches du Groupe de Chaleurs supérieur sont en contact avec les roches cambro-ordoviennes de la nappe de Sainte-

Anne. Ce contact est également visible en profondeur sur la partie septentrionale de la ligne sismique 82-152 correspondant au bloc Nord de la zone Bourque (Figure 2.27) et est représenté par une surface d'érosion. Cette surface d'érosion correspond au cumul des discordances taconique et salinique (Bourque *et al.*, 1993). Entre cette surface d'érosion et la réflexion Forillon – Indian Point visible au-dessus (Figure 2.26, flèches noires), il semble y avoir une zone avec une réflexion non-linéaire qui correspondrait à la Formation de West Point (Figure 2.27).

- **La structure de la faille du Bras Nord-Ouest :**

Les études menées jusqu'à ce jour sur la FBNO indique un mouvement décrochant dextre. Ce mouvement décrochant est confirmé par la vue en coupe des failles secondaires rattachées à la faille principale formant une structure en fleurs positive typique des failles transpressives (Christie-Blick et Biddle, 1985) (Figure 2.27). De plus la FBNO séparant le bloc Nord du bloc Centre (Figure 2.26, rond 1) s'enracine dans les roches du Cambro-Ordovicien. En regardant le déplacement des réflexions correspondantes aux formations de Shiphead (Figure 2.26, a<a') et de Forillon (Figure 2.26, b<b'), la FBNO démontre également un mouvement inverse. Néanmoins, le bloc Nord de la FBNO (Figure 2.27, point 1) est caractérisé par des réflexions parallèles ou subparallèles alors que le bloc Centre (Figure 2.27, point 2) est caractérisé par des réflexions chaotiques. N'ayant pas de puits à proximité, l'interprétation a été faite en extrapolant les données de surface. Enfin, la structure en éventail des formations de Shiphead et de Forillon démontre un déplacement normal au moment de la déposition de ces formations.

- **La structure de la faille du Troisième Lac :**

Une terminaison en queue de cheval indique l'arrêt de la propagation d'une faille décrochante (Christie-Blick et Biddle, 1985; Woodcock et Fischer, 1986). La ligne sismique 82-152 recoupe une série de failles appartenant à la FTL (Figure 2.26, ronds 2, 3 et 4). La présence de ces failles (Figure 2.26, ronds 2 et 3) dans le bloc Centre confirme que la FTL se propage jusque dans l'anticlinal de Holland – Mont Bald. La zone d'encaissement de la FTL se situerait dans l'anticlinal mais cela ne peut être confirmé par le profil sismique 80-44 qui recoupe l'anticlinal en son centre puisque la partie méridionale de cette ligne ne contient aucune réflexion identifiable. La localisation de la zone de propagation des failles n'est donc pas possible. Au niveau de l'anticlinal, les formations du Groupe de Chaleurs montrent une structure en éventail (Figure 2.26, c>c', d>d' et e>e'). Tout comme pour la FBNO, cela indique une faille syn-sédimentaire, i.e. sédimentation en éventail lors d'un mouvement en extension. La structure en éventail n'est pas visible pour la Formation de Forillon au niveau de la faille 2 (Figure 2.26, rond 2) mais la différence d'épaisseur (Figure 2.26, b'<b'') est observable au niveau de la faille du Bras Nord Ouest (Figure 2.26, rond 1).

Pour la composante inverse, la structure est moins visible pour la branche au nord (Figure 2.26, rond 2, différence flèches 1 et c). Etant donné que la ligne sismique se situe dans la zone d'atténuation du mouvement de la FTL, cette zone pourrait ne pas avoir enregistré les effets du mouvement. Néanmoins, la composante inverse de la FTL est bien représentée dans la partie sud de la ligne 82-152 par le déplacement visible des formations du Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé (Figure 2.26, différence flèches 2 et 3) qui pourrait être dû à la terminaison en compression de la faille et indiquer un mouvement plicatif tardif (Figure 2.28).

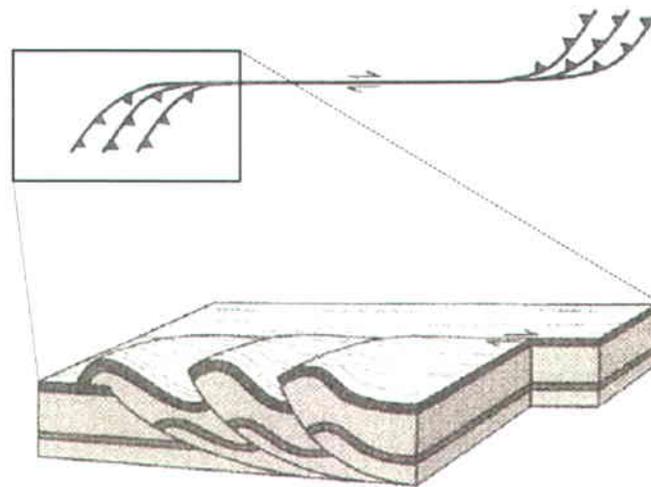


Figure 2.28 : Bloc diagramme et vue en carte idéalisée de la géométrie d'une terminaison compressive en « queue de cheval » avec les plis et les failles chevauchantes (modifiés de Freund, 1974).

- **L'anticlinal de Holland – Mont Bald :**

L'anticlinal de Holland-Mont Bald est un grand pli ouvert qui affecte clairement l'ensemble des roches siluro-dévonienne (Figure 2.26 et Figure 2.30). Il est caractérisé par des réflexions subparallèles de forme arrondie, avec trois réflexions de forte amplitude (Figure 2.30). La projection du puits Impérial, Gaspé n°1 (C023) (Figure 2.13), en prenant en compte le plongement de l'anticlinal, indique que ces trois réflexions sont: i) la première en partant du haut est caractérisée par le passage des formations d'Indian Point/Roncelles causées par le passage d'une lithologie avec des mudstones, siltstones et grès fins à une séquence monotone de mudstones très calacreux, ii) les deuxièmes réflexions identifiables sont générées par le contact des formations de Laforce/Burnt Jam Brook marqué par l'apparition de bancs massifs de grès calcaires appartenant à la Formation de Laforce (Bourque et Lachambre, 1980) et iii) les dernières réflexions (Figure 2.30) pourraient être dues à la zone de transition entre les shales calcaireux de la Formation de Burnt Jam Brook et les calcaires argileux de la Formation de White Head. La présence de la Formation de White Head est incertaine mais les analyses de restauration (voir chapitre 3) présentent de meilleurs résultats avec une formation sous-jacente correspondant au Groupe de Matapédia. De plus, les roches de la Formation de White Head sont à l'affleurement dans l'anticlinal de la Rivière Saint-Jean au sud de la zone Bourque et se retrouvent dans l'extrême sud du bloc Centre en passant par le bloc Sud (Figure 2.26 et Figure 2.29).

L'anticlinal de Holland-Mont Bald est un bel exemple d'une déformation plicative de forte amplitude d'un mouvement de faille normale réactivée en faille inverse. Cependant la présence du pli de rampe (Figure 2.26) en dessous pourrait également être la cause de ce plissement dans le cadre d'un pli d'entraînement.

- **La dernière faille au sud de la ligne sismique** (Figure 2.26, rond 5):

La limite du bloc Centre et du bloc Sud est une faille inverse antithétique. Aucune formation n'a de changement d'épaisseur au niveau de cette faille (Figure 2.26, 4 = 5). La Formation de York River n'illustre pas de changement d'épaisseur puisque cette dernière a été érodée entre les failles 3, 4 et 5. Les données de cartographie n'indiquent pas si la faille 5 appartient à la FTL (Figure 2.26).

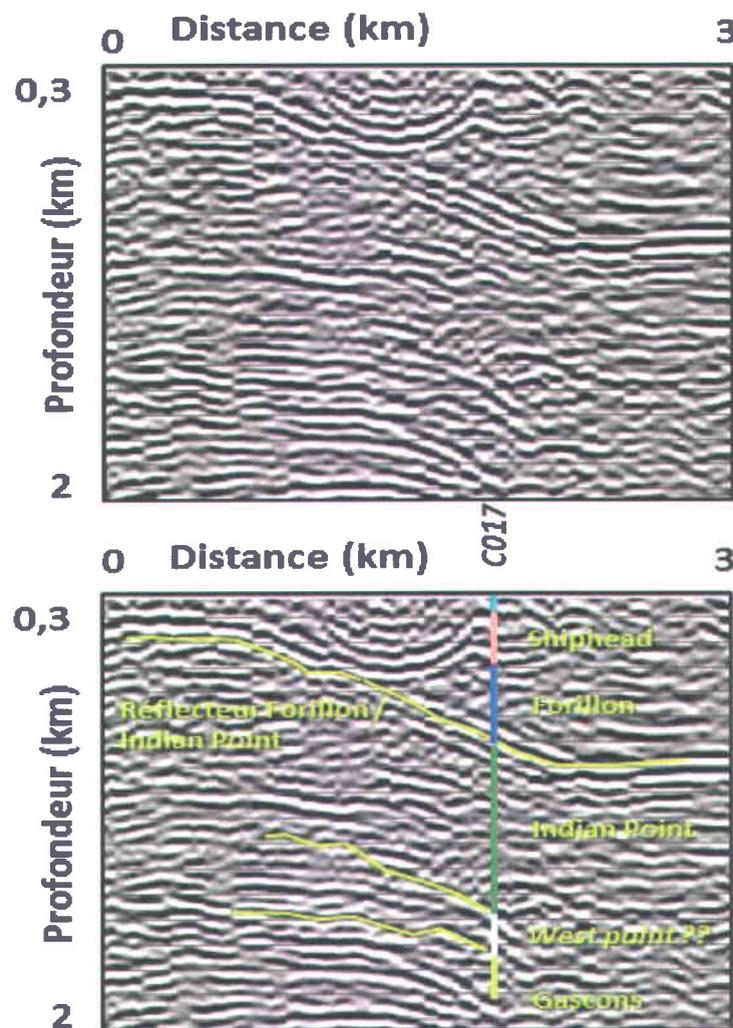


Figure 2.29 : Interprétation du pourtour du puits Mississippi n°1 (C017) le long de la ligne sismique 82-152 montrant le réflecteur Forillon / Indian Point corroboré par les données du puits, la possible présence de la formation de West Point le long de la FTL et la présence de la Formation de Gascons dans le bloc Centre (Figure 2.26, image 3).

- **Les roches cambro-ordoviennes :**

La présence d'un pli de rampe (Figure 2.26) localisé dans la partie méridionale de la ligne sismique pourrait être attribuée aux roches du Cambro-Ordovicien (Figure 2.26). Les estimations des épaisseurs et la stratigraphie indiquent qu'il est plus probable que ces roches soient cambro-ordoviciennes que celles du Groupe de Matapédia. D'après les interprétations des lignes sismiques plus à l'ouest, il existe une série de failles de chevauchement vers le nord en profondeur ainsi que des failles aveugles dans la ceinture taconienne. Comme les styles structuraux sont semblables, cela laisse un doute raisonnable à cette interprétation. Mais le moyen le plus certain serait de vérifier la cohérence de ce choix par la restauration de l'interprétation de la ligne 82-152.

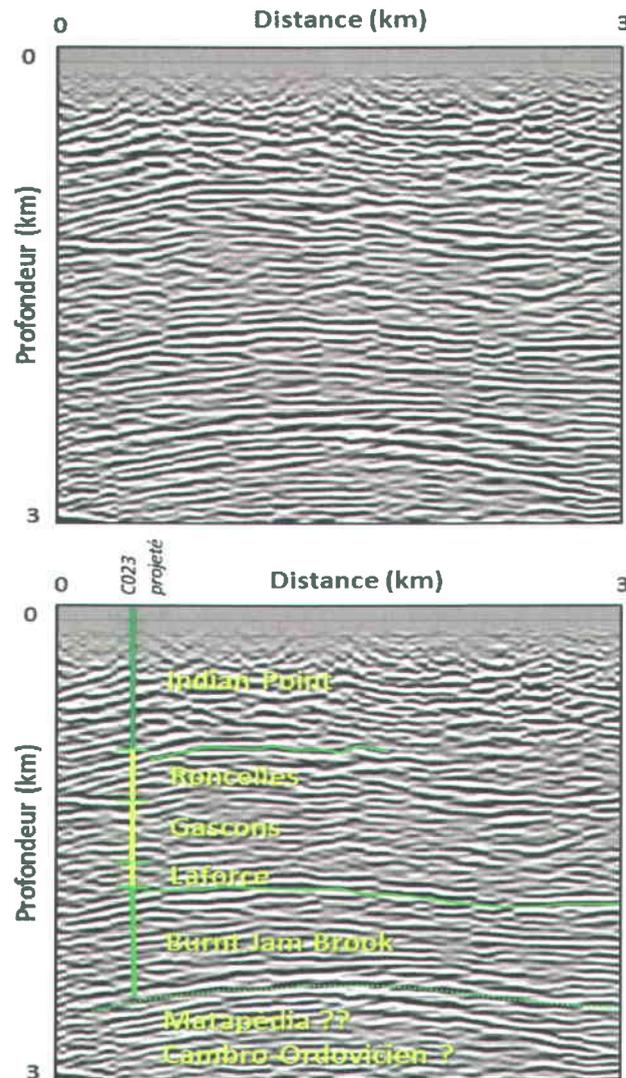


Figure 2.30 : Interprétation de l'anticlinal Holland/Mont Bald avec la projection du puits Impérial. Gaspé n°1 (C023) le long de la ligne sismique 82-152 montrant a) le réflexion Indian Point / Roncelles dus au passage d'une lithologie avec des mudstones, siltstones et grès fins à une séquence monotone de mudstone très calcaireux, b) le réflexion Laforce/Burnt Jam Brook dû à l'apparition de bancs massifs de grès calcaires appartenant à la Formation de Laforce, c) le réflexion possible dû à la transition entre les shales calcaireux de la Formation de Burnt Jam Brook aux calcilutites et calcaires argileux de la Formation de White Head (Figure 2.26, image 2).

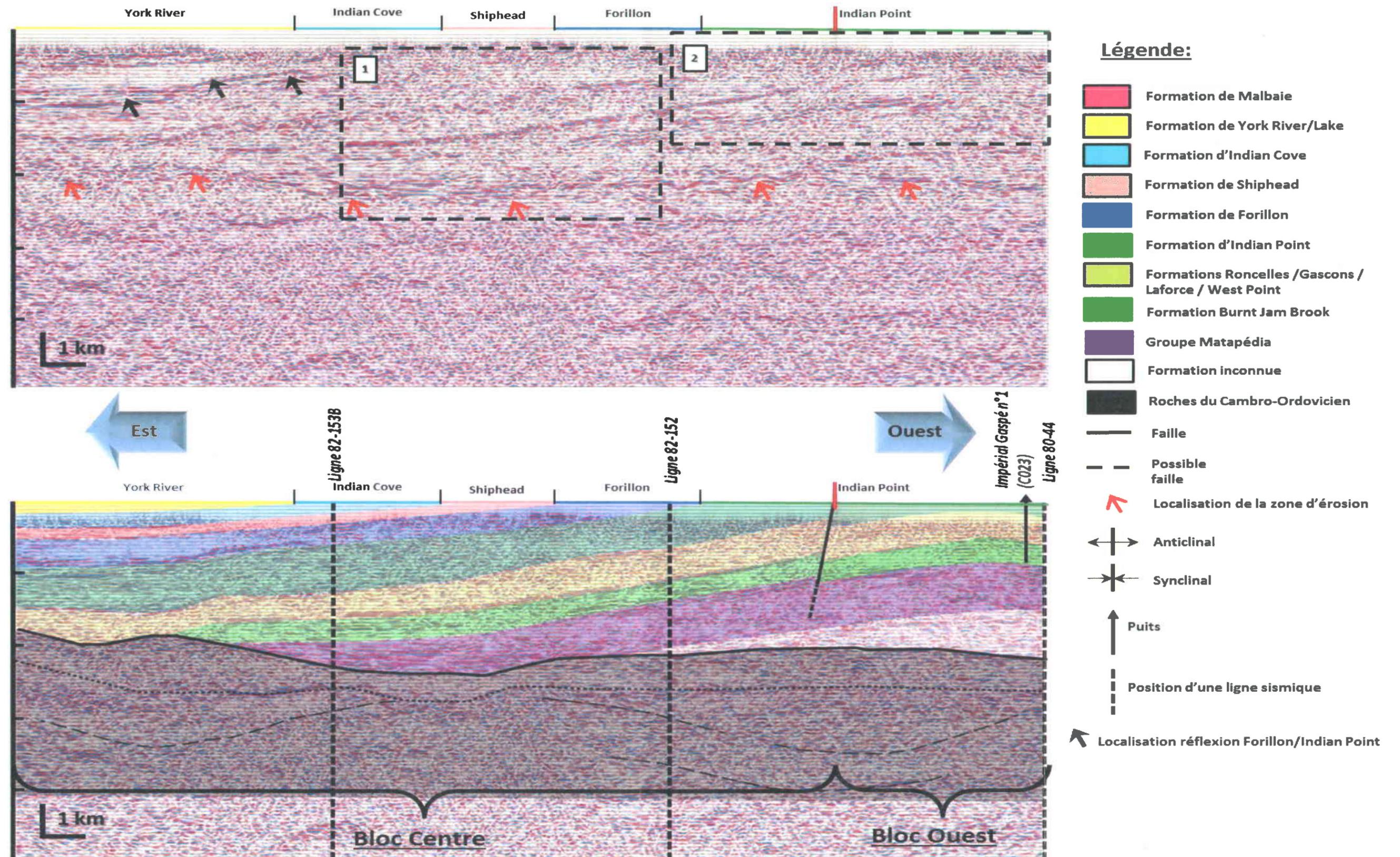


Figure 2.31 : Imagerie sismique profondeur de la ligne 82-156 et interprétation schématique de cette ligne.

2.5.3. DESCRIPTION ET INTERPRETATION DE LA LIGNE 82-156

La ligne sismique 82-156 a été faite en aout 1982 et a été migrée en profondeur en 2008 à l'IFPEN. Elle est de direction est-ouest, possède 344 points de tir et mesure 23043 m de long. Elle recoupe les lignes sismiques 82-153B et 82-156 et commence à l'ouest par la limite sud de la ligne 80-44. Les puits Bald Mountain n°2 (C003) et Impérial Gaspé n°1 (C023) (Figure 2.13) se trouvent à quelques mètres de son extrémité ouest le long de la ligne 80-44 (Figure 2.31).

Dans la partie occidentale du profil sismique 82-156, les formations d'Indian Point et de Forillon affleurent. Dans la partie centrale, la Formation de Shiphead se retrouve à la surface suivie des formations d'Indian Cove et de York River dans la partie orientale. L'image sismique en profondeur obtenue de la ligne 82-156 montre des réflexions continues formant de gauche à droite un synclinal et un anticlinal et une réflexion marquée sub-horizontale au milieu du profil entre 3200 et 4200 m. Il est possible de distinguer plusieurs éléments sur le profil 82-156 :

- **La réflexion Forillon/Indian Point :**

Tout comme dans la ligne sismique 82-152, la réflexion correspondant au passage de la Formation de Forillon à la Formation d'Indian Point est bien visible (Figure 2.31, flèches noires). C'est une réflexion de forte amplitude qui est visible à l'est de la ligne sismique 82-156. Les épaisseurs des formations d'Indian Cove, de Shiphead, de Forillon et d'Indian Point sont constantes d'est en ouest. De plus, le tracé de la réflexion Forillon / Indian Point permet de constater que le synclinal de Champou est un synclinal à fond plat. Il est à noter que la Formation de Forillon est caractérisée par une configuration sans réflexion parfois transparente (Figure 2.26 et Figure 2.31).

- **La faille :**

Dans la partie occidentale de la ligne sismique 82-156, un problème d'épaisseur s'est posé. Il a donc fallu rajouter une faille (Figure 2.32). L'étude des données cartographiques permet de donner une origine à cette faille. Elle concorde avec l'une des branches de la FTL. Cette faille correspond également sur le profil à la limite entre le bloc Centre à l'est et le bloc Ouest.

- **La zone d'érosion et les réflexions en demi-cercle :**

Une série de réflexions de forte amplitude située entre 3200 et 4200 m, traverse la ligne sismique de part en part (Figure 2.31, Flèches rouges ; Figure 2.33). Ces réflexions situées au-dessus d'une zone où les réflexions sont chaotiques, sont considérées comme une zone d'érosion grâce à la présence de réflexions formant des *onlaps* au-dessus. Ces terminaisons latérales (Figure 2.33, flèches rouges) peuvent être des *onlaps* de transgression confirmant que la surface sous-jacente est une surface d'érosion. Sous cette limite, il y a une zone sourde d'environ 1000 m d'épaisseur et sous cette dernière une autre zone contenant

quelques réflexions formant des demi-cercles (Figure 2.31, traits en tiretés noirs). En recoupant les lignes sismiques 82-152 et 82-156, les roches concernées par cette surface d'érosion sont les roches cambro-ordoviciennes. Les formes en demi-cercle qui auraient pu être considérées comme des artefacts de migration sont interprétées comme des structures plissées (aux vues des lignes sismiques 80-40 et 80-48 voir CD joint) : synclinal à l'est – anticlinal au centre – synclinal à l'est et peuvent être interprétées comme des chevauchements à l'intérieur des roches du Supergroupe de Québec. Ces structures pourraient être des artefacts mais elles se retrouvent dans d'autres lignes sismiques telles que la 80-48, la 82-162, la P-25 et la 80-39.

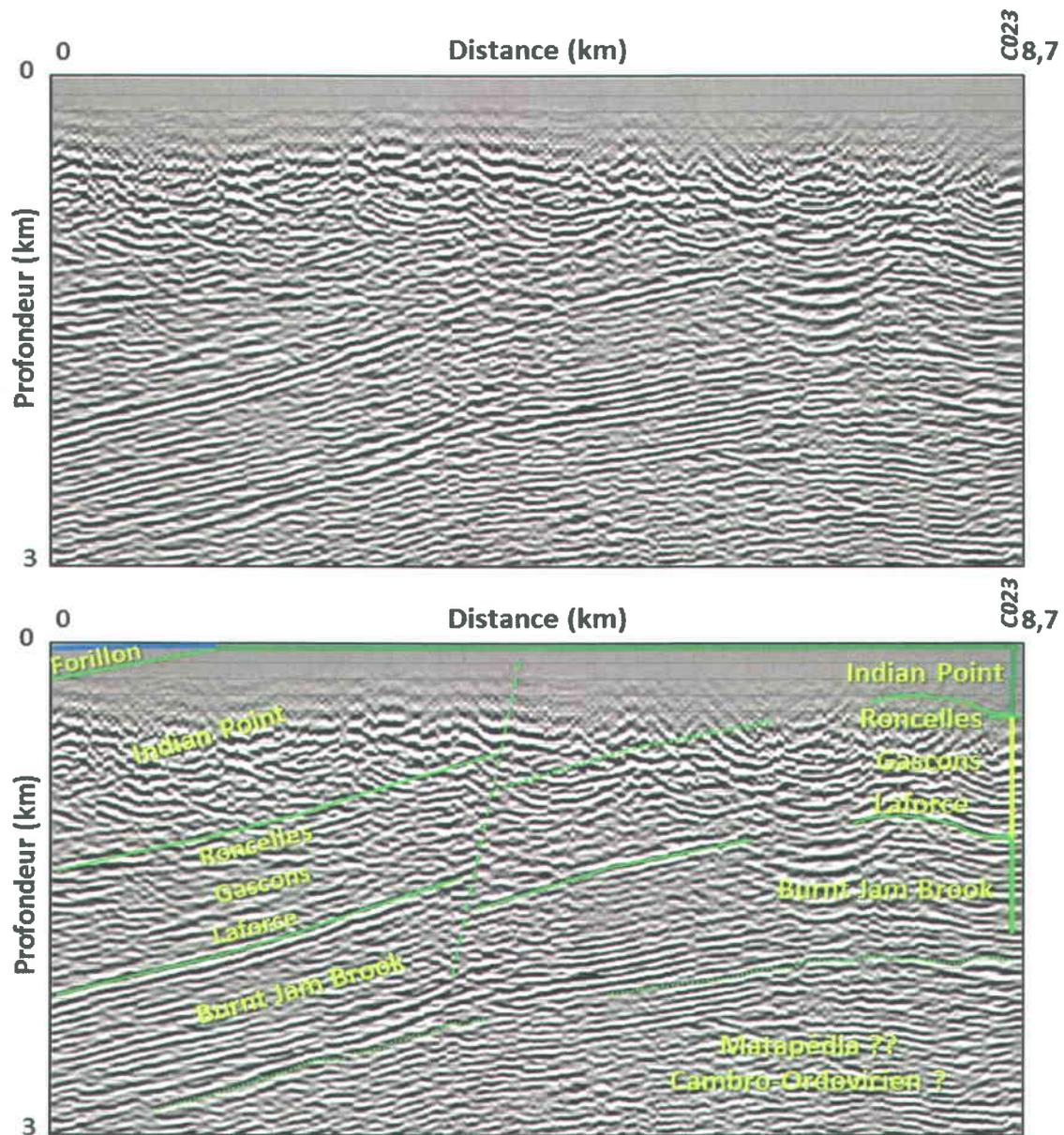


Figure 2.32 : Interprétation de la partie est de l'axe du pli Holland/Mont Bald avec le puits Impérial, Gaspé n°1 (C023) montrant a) la réflexion Indian Point / Roncelles, b) la réflexion Laforce/Burnt Jam Brook, c) la réflexion possible Burnt Jam Brook / White Head (Figure 2.31, image 2).

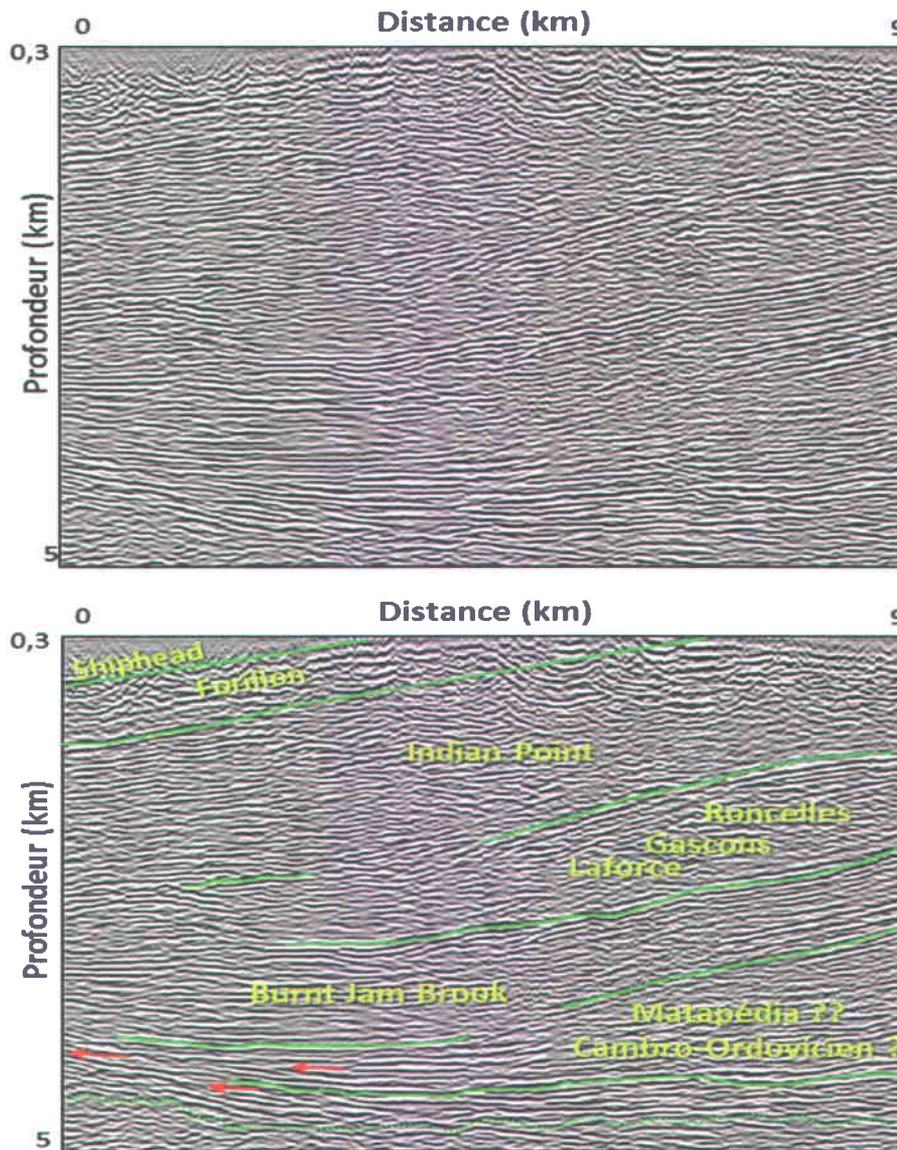


Figure 2.33 : Interprétation de la zone d'érosion située le long de la ligne sismique 82-156 montrant les terminaisons en *onlap* (fleches rouges) et les formations sus-jacentes concernées (Figure 2.31, image 1).

2.6. DISCUSSION DES RESULTATS

A partir des interprétations sismiques disponibles dans la zone Bourque, il est possible de déterminer la chronologie du jeu des failles. Les différences d'épaisseur des formations de Forillon, d'Indian Point, de Roncelles, de Gascons et de Laforce dans le bloc Centre, montrent que le jeu normal de la FTL a eu lieu dès la fin du Silurien (Figure 2.26, $b' < b''$, $c < c'$, $d < d'$, $e < e'$). Les différences d'épaisseur nord/sud des formations de Shiphead et de Forillon (Figure 2.26, $a < a'$ et $b < b'$) permettent d'estimer que la FBNO avait un jeu normal lors de leur déposition au Praguien. Les réflexions sous-jacentes n'étant pas clair, nous avons estimé que les formations du Groupe de Chaleurs avaient également subi le jeu normal de la FBNO durant la fin du Silurien puisque i) c'est le cas pour la FTL et que ii) le

bloc Nord était plus haut durant le dépôt des récifs de la Formation de West Point, ce qui correspond justement à la limite Silurien/Dévonien.

Les failles du Bras Nord-Ouest et du Troisième Lac sont de parfaits exemples de structures que l'on peut retrouver le long d'une faille décrochante compressive, respectivement une structure en fleurs (Figure 2.27) et des duplex de transpression (Figure 2.26, rond 2, 3 et 4 ; Figure 2.28). La ligne sismique 82-152 recoupe la zone de fin de propagation de la FTL, alors que la FBNO se propage probablement vers l'ouest. Ces deux systèmes en décrochement sont post-déposition. Ces deux failles sont des failles majeures qui s'enracinent profondément dans les unités cambro-ordoviciennes. Le changement dextre à senestre, reconnu dans le sud de la zone, grâce au dyke de Tar Point (Pinet *et al.*, 2008) n'est pas identifiable sur les profils sismiques étudiés.

L'interprétation de la ligne sismique 82-152 met en évidence l'existence de failles chevauchantes qui partent d'une zone de décollement au sein des formations cambro-ordoviciennes (Figure 2.26, rond 2). La zone de décollement ayant permis la remontée de la nappe de la Rivière Sainte-Anne n'est pas visible sur les profils sismiques.

La ceinture taconienne est considérée comme une structure en nappes avec de grandes failles profondes qui ont probablement joué lors de l'orogénèse acadienne mais cette caractéristique n'est pas démontrable juste à partir de l'interprétation sismique. Ces observations soutiennent les interprétations décrivant le style structural de l'orogénèse acadienne comme un style en ceinture de plis et chevauchements (Kirkwood *et al.*, 2004). Les interprétations structurales de ces images apportent des réponses sur le prolongement des grandes failles majeures dans le nord-est de la Gaspésie.

Le profil sismique 82-156 (Figure 2.31) met en évidence le contact entre les formations du Cambro-Ordovicien et la Formation de Roncelles dans le bloc Centre vers l'est. Ce fait est corroboré par les puits Blanchet n°1 (C096) et Gaspé Sud n°1 (C093) (Figure 2.13) forés dans ce bloc (Hu et Lavoie, 2008) (localisation Figure 2.13). En effet, les deux puits l'un localisé au niveau du Mont Serpentine, l'autre plus au sud non-loin de la FBNO, montrent les formations d'Indian Point et de Roncelles en contact avec les roches du Supergroupe de Québec, le premier à une profondeur de 1185 m et l'autre à 2860 m (voir Tableau 3.2). L'étude des lignes sismiques nous a permis d'avoir une première estimation des épaisseurs en profondeur des formations.

Il reste maintenant à valider l'interprétation sismique, étudier la chronologie et comprendre la cinématique de la FBNO et de la FTL. Pour cela, dans le chapitre 3, la restauration équilibrée a été utilisée pour: i) la validation du modèle de départ qui doit être rétro-déformable pour être géométriquement acceptable (Suppe, 1985); ii) la détermination des déplacements au sein de ce système; iii) la quantification de la déformation du système restauré. La construction du modèle surfacique 3D à l'âge actuel est également expliquée.

3. CHAPITRE 3 : RESTAURATION STRUCTURALE ET CONSTRUCTION D'UN MODELE STRUCTURAL SURFACIQUE 3D A L'AGE ACTUEL

3.1. BIBLIOGRAPHIE DE LA MODELISATION SURFACIQUE 3D EN GASPESIE

En Gaspésie centrale, l'étude de la géologie structurale de la ceinture de Gaspé et particulièrement l'étude de l'image sismique 2001-MRN-10B (Figures 2.11, Chapitre 2) a amené Bêche (2008) à créer un modèle structural en trois dimensions du synclinal du Lac des Huit Miles. La construction de ce modèle structural avait pour but de vérifier la cohérence du réseau de failles, de mieux localiser les problèmes relatifs aux incohérences géométriques et de vérifier les contacts horizons/failles (Bêche *et al.*, 2008).

Dans le nord-est de la Gaspésie, aucune modélisation en 3D n'a été faite. Même si ce n'est pas de la modélisation, des études sur le Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé ont permis à Lavoie *et al.*, (1990) de dessiner la répartition stratigraphique en trois dimensions des formations d'Indian Cove, de Shiphead et de Forillon et du Groupe de Fortin dans le nord-est de la Gaspésie. De même, Bourque *et al.*, (1993 et 2001) ont étudié l'ensemble des relations entre stratigraphie, géologie structurale et sédimentation des roches datant de l'Ordovicien supérieur jusqu'au Dévonien moyen. Ils ont pu ainsi dessiner les relations lithostratigraphiques par segment (du nord au sud : les segments de la bande Nord, des rivières Cascapédia/Saint-Jean, d'Angers-Dugal/Percé et de la baie des Chaleurs).

3.2. INTRODUCTION A LA MODELISATION SURFACIQUE 3D AVEC LE LOGICIEL GOCAD

Un modèle est une représentation possible d'objets. Le terme « modèle géologique » est difficile à définir puisque sa signification varie selon la spécialité et le domaine d'étude des géologues qui l'utilisent. Pour le géologue structural, un **modèle géologique statique** est une image possible de la géométrie des failles et des horizons présents dans la région étudiée. Un **modèle géologique dynamique** est une image possible qui simule l'histoire géologique de la zone d'étude.

Quel que soit la définition du modèle géologique 3D, le but est toujours le même: mettre en cohérence des données d'origines diverses, par un ensemble de règles et de principes afin de comprendre la géométrie et la mise en place des structures naturelles.

Un **logiciel de modélisation** en géologie est appelé un géomodeleur. Il permet de construire de façon cohérente à partir de données de type, de qualité et de géographie différentes un modèle qui est une **représentation spatiale** d'une réalité répondant à un objectif précis qu'il soit structural, pétrophysique, géochimique, etc.

3.2.1. PRESENTATION DU GEOMODELEUR GOCAD

Dans le cadre de cette thèse, le logiciel gOcad a été utilisé pour modéliser la structure géologique de la zone Bourque. Le logiciel **gOcad** (*Geological Objects Computer Aided Design*) est un géomodeleur. Il a été créé en 1988 par une équipe spécialisée en informatique de l'école nationale supérieure de géologie (ENSG) à Nancy, dirigée par le Professeur Jean-Laurent Mallet (Mallet, 2001).

Un modèle géologique peut contenir des propriétés sur les points, lignes, surfaces, blocs et grilles. Il existe deux sortes de propriétés :

- Les propriétés dites continues sont définies par une fonction en tout point de l'espace : fonction constante, linéaire (selon la profondeur) ou plus compliquée.
- Les propriétés dites discrètes sont définies en certains points seulement, par exemple sur les nœuds de la grille qui est contenue dans une région donnée. Ces propriétés ne peuvent pas être connues en tout point par des fonctions mathématiques. Par exemple, elles sont connues en certains endroits grâce aux forages et sont ensuite interpolées dans tout le modèle. Ces propriétés peuvent correspondre, par exemple, aux coordonnées géographiques (X, Y, Z) du nœud α ou bien à des propriétés physiques, chimiques ou géologiques comme la valeur de la porosité, de la perméabilité, un paramètre géomécanique, etc.

En modélisation, un horizon géologique est représenté par un ensemble de nœuds reliés par des liens qui forment des triangles. D'une manière générale, un objet discrétisé est assimilé à un ensemble Ω de M nœuds. En utilisant ce principe simple de construction, il est possible d'imaginer des objets de plus en plus complexes (Massot, 2002; Souche, 2005) (Tableau 3.1) :

1. Un ensemble de nœuds libres, déconnectés les uns des autres.
2. Une courbe constituée de nœuds liés deux à deux par des segments. Chaque nœud peut avoir au minimum un unique voisin et deux voisins au maximum.
3. Une surface faite de nœuds reliés de façon à former des triangles (principe de construction des surfaces dans gOcad).
4. Un volume tétraédrique formé de nœuds connectés entre eux dans les trois dimensions (principe de construction des volumes dans gOcad).
5. Une grille régulière ou non, formée de cellules parallélépipédiques à géométrie fixe ou variable constituées chacune de huit nœuds connectés (principe de construction des volumes dans gOcad).

Exemples appliqués pour les représentations les plus simples:

- des ensembles de points. Ces points représentent la plupart du temps des interprétations de données sismiques, marqueurs de forages, etc. Ce sont par exemple des horizons pointés manuellement ou à l'aide de processus semi-automatiques ou des failles pointées sur des sections sismiques.
- des lignes. Elles peuvent correspondre à des interprétations de failles dessinées par le géologue structural lors de la mise en cohérence du modèle. Elles correspondent

aussi aux délimitations du modèle sur une coupe verticale (modèle en 2D) (Lecours, 2000).

Tableau 3.1 : Représentation des différentes dimensions des objets géométriques et de leur complexité dans le géomoteur gOcad.

	Dimension des objets	Type d'objets	Représentation des objets
Augmentation de la complexité des objets	0 D	Objet ponctuel = Nœud libre	
	1D	Objet linéaire = Courbe constituée de nœuds liés deux à deux par des segments	
	2D	Objet surfacique = Surface faite de nœuds reliés en forme de triangle	
	3D	Objet volumique = Volume tétraédrique formé de nœuds connectés dans les trois dimensions	

3.2.2. INTERPOLATION D'UNE PROPRIÉTÉ DANS UN MODELE DISCRET

Les valeurs des propriétés sont fixées sur certains nœuds du modèle et pour pouvoir déterminer les valeurs manquantes sur l'ensemble des nœuds de Ω , celles-ci sont interpolées sur l'ensemble des nœuds de l'objet traité.

Dans le logiciel gOcad, la méthode d'interpolation pour les surface est appelée DSI (*Discrete Smooth Interpolation* : approche lisse discrète). C'est cette méthode qui a été utilisée pour la modélisation de la zone Bourque. Parmi l'infinité de solutions possibles, DSI choisit celle qui correspond au minimum de variation de la propriété d'un nœud à l'autre dans les zones de valeurs manquantes (Massot, 2002). Cet interpolateur peut avec un minimum de données, modéliser une surface qui va se rapprocher au mieux de la réalité de la surface géologique, s'il n'y a pas de discontinuité.

3.2.3. NOTION DE RUGOSITE

Le concept de critère de rugosité locale de la propriété φ au nœud α est introduit dans la méthode d'interpolation DSI. L'interpolateur tend localement à faire converger φ en α vers la valeur moyenne de φ calculée dans le voisinage de α et modulée par des coefficients pondérateurs. Cette notion de variation minimale explique le caractère « lisse ».

En plus de prendre en compte la rugosité locale, DSI permet d'ajouter des contraintes exprimées linéairement qui « contrôlent » l'interpolation. La prise en compte, au sens des

moindres carrés, de ces contraintes se fait par l'ajout d'une composante au critère de rugosité global (Mallet, 2001; Souche, 2005).

3.3. INTRODUCTION A LA RESTAURATION

Énoncer que « les roches étaient à l'origine non déformées » peut sembler trivial, mais c'est une donnée importante pour résoudre de nombreux problèmes de construction d'un modèle géologique. Il doit être géométriquement possible de remettre à plat tout modèle à un état antérieur peu ou pas déformé: le modèle doit être rétro-déformable (Suppe, 1985). L'une des méthodes de vérification de la rétro-déformabilité d'un modèle est la restauration équilibrée.

3.3.1. OBJECTIFS DE LA RESTAURATION

L'utilisation la plus courante de la restauration est le contrôle de la construction d'un modèle géologique par observation des incohérences géométriques apparaissant dans le modèle à l'état restauré qu'elles soient naturelles (présence de failles normales, inverses ou décrochantes) ou artificielles (problème de dépliage du modèle). Lors du dépliage d'un horizon, les incohérences géométriques apparaissent sous la forme de vides ou de recouvrements constatés, entre les différents blocs composant le modèle (Lepage *et al.* 2004; Muron, 2005).

La **deuxième utilisation** de la restauration équilibrée est l'étude des champs de déplacement et de déformation qui affectent un modèle. Les calculs de la rétro-déformation peuvent permettre de comprendre les mécanismes de déformation affectant les blocs composant le modèle (Schultz-Ela, 1992; Lepage *et al.*, 2004; Moretti *et al.*, 2006).

La **troisième utilisation** est la représentation de l'environnement géologique à un temps donné du secteur étudié. Cette représentation correspond à un modèle paléogéométrique.

En résumé, la restauration équilibrée a plusieurs objectifs qui sont la quantification de la déformation, la détermination des déplacements, l'acceptabilité du modèle déformé et la construction d'un modèle paléogéométrique.

3.3.2. METHODES DE RESTAURATION EN COUPE EN CONTEXTE COMPRESSIF

Historiquement, les méthodes de restauration équilibrées ont été mises au point pour des domaines en contexte compressif (Chamberlin, 1910). Mais l'idée de formaliser des règles a été introduite dans la construction de coupes géologiques (Dahlstrom, 1969).

La loi fondamentale qui est appliquée à la restauration équilibrée dérive du principe de conservation de la matière. Si les phénomènes de compaction et de dissolution sous pression sont négligés, cette loi peut se limiter à deux hypothèses de départ : la

conservation du volume des roches et la considération des niveaux repères comme initialement horizontaux et d'épaisseurs constantes.

Néanmoins, les couches géologiques se déforment de manière complexe et variée suivant les échelles considérées et les contextes tectoniques étudiés.

Trois méthodes existent : i) la méthode où la surface transférée est conservée, ii) la méthode où la conservation concerne la surface totale et iii) la méthode de conservation de la longueur et de l'épaisseur de niveaux repères.

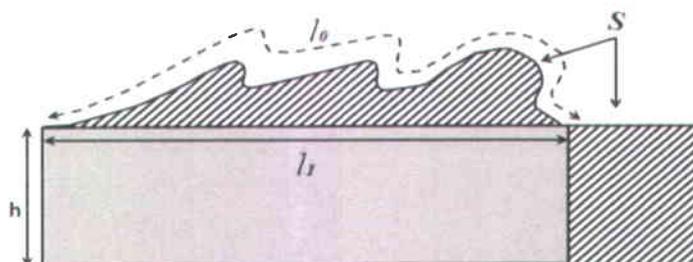


Figure 3.1: Méthode de la surface transférée pour la détermination de la profondeur du niveau de décollement. Avec l_0 la longueur initiale, l_1 la longueur finale, S la surface en excès et h l'épaisseur initiale (modifiée de Chamberlin, 1910 ; d'après Rouby, 1994).

La **méthode de la surface transférée** (Figure 3.1) est la première à avoir été développée par Chamberlin (1910) et formalisée par Dahlstrom (1969) et Hossack (1983). Soit une coupe de longueur initiale l_0 , la déformation engendre le soulèvement du niveau de référence. Ce soulèvement définit une surface en excès S par rapport à l'épaisseur initiale h de la couche. La longueur de la coupe est désormais l_1 (Eq. 3.1). Le principe de conservation de la matière impose que la surface perdue lors du raccourcissement soit égale à la surface transférée (Figure 3.1).

$$h = \frac{S}{(l_0 - l_1)} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$l_0 = \left(\frac{S}{h}\right) + l_1$$

La **méthode de la conservation de la surface totale de la coupe** (Figure 3.2, B) a été mise au point par Dennison et Woodward (1963) et formalisée par Hossack (1979). Si l'épaisseur de la couche passe de t_0 à t_1 et la longueur de la couche passe de l_0 à l_1 , alors le principe de conservation de la surface totale est formalisé par l'équation suivante :

$$l_1 \cdot t_1 = l_0 \cdot t_0 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Certains auteurs (Ménard, 1988 ; Mitra et Namson, 1989) ont jugé plus approprié de combiner la méthode de conservation de la surface à celle de la conservation des longueurs de certains niveaux repères : cette méthode est appelée **conservation de la longueur et de l'épaisseur de niveaux repères** (Figure 3.2, C). La conservation des longueurs est utilisée pour des niveaux compétents susceptibles de se déformer par plissement flexural. La conservation des surfaces est maintenue pour les unités moins compétentes comme des

marnes ou pour les parties moins bien contraintes de la coupe (Rouby, 1994). Il est alors possible de mesurer le raccourcissement des structures par simple comparaison des longueurs avant et après le raccourcissement (R) (Eq. 3.3) (Rouby, 1994):

$$R = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

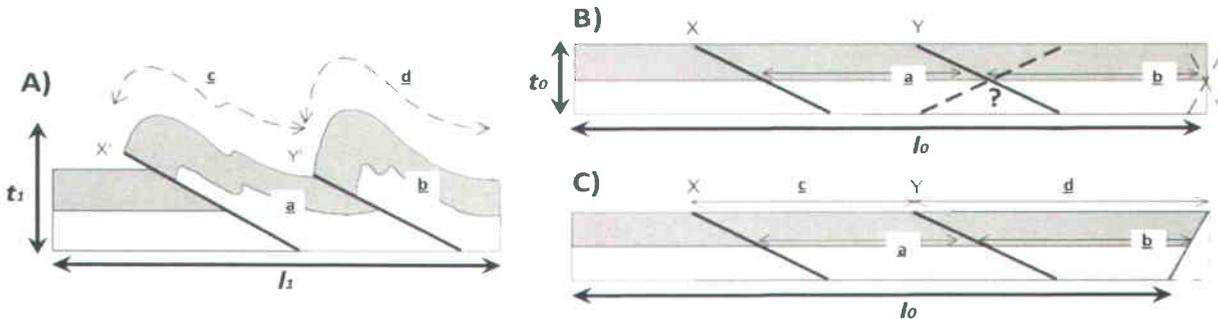


Figure 3.2: Combinaison des méthodes de conservation de niveaux repères et de la longueur. (A) Section déformée; (B) Section restaurée avec la méthode de la conservation de la surface. Cette méthode ne fournit pas une solution unique pour la position des rampes (lignes en pointillés). L'utilisation de niveaux repères dont on conserve la longueur (a et b) sert à contraindre la position des rampes; (C) Section restaurée avec la méthode de la conservation de l'épaisseur de niveaux repères (a, b, c et d avec X et Y) ET de la conservation des longueurs (modifiée de Rouby, 1994).

Conclusions sur les méthodes de restauration en coupe

Dans cette thèse, c'est la méthode de conservation de la longueur et de l'épaisseur de niveaux repères qui a été utilisée afin de vérifier l'interprétation de la ligne sismique 82-152 (présentée dans le chapitre 2).

Les méthodes en coupe ont des limitations intrinsèques liées au plongement 2D des coupes, qui impose l'hypothèse d'une déformation plane parallèle au plan de coupe. Toute déformation transverse est ignorée. Par exemple dans le cas de failles décrochantes, l'utilisation de coupes, même sériées et de qualité, ne permet pas d'approcher la déformation et les déplacements affectant les couches géologiques, ce qui est le cas de la zone d'étude de cette thèse (la zone Bourque) qui possède deux grandes failles décrochantes (la FBNO et la FTL).

Néanmoins, une surface (ou horizon) représente un événement géologique ponctuel alors qu'une coupe représente un événement sédimentaire continu (une ou plusieurs couches). En conséquence, la restauration d'une surface ne fournit la géométrie initiale que d'un horizon là où la restauration d'une coupe fournit la géométrie d'une série sédimentaire. **Dans cette thèse, les restaurations en coupe et surfacique sont donc complémentaires.**

3.3.3. METHODES DE RESTAURATION SURFACIQUE

La restauration surfacique tente de répondre aux limitations de la restauration en coupe, en considérant la structure géologique dans son extension horizontale et en accommodant potentiellement les déformations dans toutes les directions. L'utilisation de la restauration

en contexte décrochant est maintenant réalisable. Le fait que la surface soit plongée dans un espace tridimensionnel rend les opérations manuelles (projection, rotation...) complexes et de fait, la plupart des méthodes sont informatisées.

Historiquement, il existe pour les méthodes de restauration surfacique, deux types de déformation : l'une continue et l'autre discontinue.

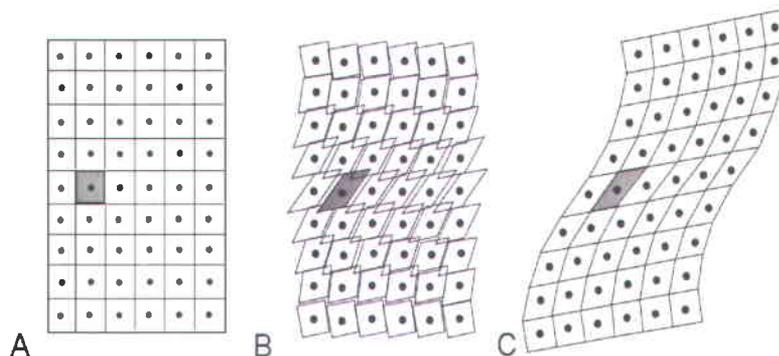


Figure 3.3 : Restauration surfacique par la méthode de déformation continue. A) L'horizon, dans son état déformé, est divisé en éléments polygonaux au sein desquels la déformation est supposée homogène. B) Chaque élément est restauré grâce à la déformation mesurée ou interpolée à la déformation mesurée ou interpolée à partir de la déformation des éléments voisins. C) Les éléments sont ajustés afin de minimiser les vides et les recouvrements apparus lors de la restauration (modifiée de Schultz-Ela, 1988).

La **déformation continue** est adaptée pour les plis. Les méthodes de restauration surfacique par déformation continue discrétisent le domaine en un ensemble d'éléments finis de petite taille à l'échelle desquels la déformation est supposée homogène (Etchecopar, 1974; Schulzt-Ela, 1988) (Figure 3.3). Cette déformation, mesurée sur le terrain, est appliquée sur chacun des éléments qui sont finalement ajustés, par rotation et translation, de façon à minimiser, par la méthode des moindres carrés, les vides et les recouvrements entre les éléments.

La **déformation discontinue** (également appelée séquentielle) est adaptée pour les failles, quel que soit le contexte tectonique. Cette méthode discrétise le domaine à restaurer en blocs rigides définis à partir de la carte des rejets horizontaux. Les surfaces à restaurer divisées en plusieurs parties rigides possèdent soit un pendage égal, soit appartiennent au même bloc de failles, ceci dans le but de pouvoir les remettre à plat, puis d'annuler le jeu des failles. La déformation discontinue est donc essentiellement accommodée par des mouvements de corps rigides. La surface restaurée représente les rejets d'une faille normale par un vide entre deux blocs et les rejets d'une faille inverse par un recouvrement d'un bloc sur son voisin (Figure 3.4) (Audibert, 1991; Rouby et Cobbold, 1996; Bourgeois *et al.*, 1997).

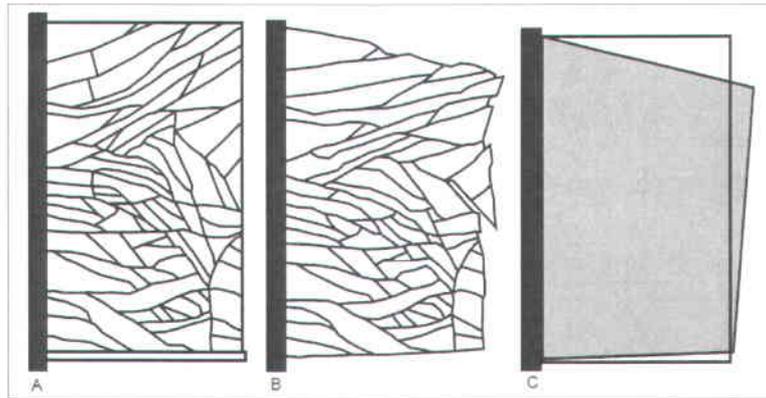


Figure 3.4 : Restauration d'une surface par la méthode de déformation discontinue. A) A partir de la carte structurale, création d'une carte modifiée rassemblant un ensemble de blocs délimités par des failles. B) Restauration de la carte en utilisant les déformations déduites des mesures de paléomagnétisme en considérant que le bord gauche (en noir) est fixe durant le processus. C) Visualisation de la composante décrochante de la déformation en comparant l'état restauré et l'état initial (Audibert, 1991).

Dans le cadre de cette thèse, c'est la restauration surfacique continue disponible dans le logiciel gOcad qui a été utilisée.

3.3.4. METHODE DE RESTAURATION SURFACIQUE DANS GOCAD

Le module de restauration surfacique avec le logiciel gOcad est issu des travaux des thèses de Samson (1996), Massot (2002) et Muron (2005). Ce module de restauration est basé sur **la méthode continue**. Elle remet à plat les surfaces triangulées sur un plan cible. Cette méthode permet d'annuler le plissement et le jeu des failles (les failles qui sont discontinues) en une seule étape (Massot, 2002).

Il existe deux types de mécanismes pour la restauration surfacique continue dans gOcad :

- Le plissement par flexion (Ramsay et Huber, 1987), dont le plus courant est le mécanisme de flexion-glisement appelé *flexural slip* : mécanisme du glissement banc sur banc. Ce dernier est adapté pour une succession de couches compétentes et incompétentes;
- La déformation en cisaillement simple (Kerr *et al.*, 1993) ou *simple shear*. Ce mécanisme est adapté pour des roches incompétentes et le phénomène essentiel est le déplacement relatif des grains de la roche par un jeu de glissement, dont les directions sont plus ou moins parallèles. Les plans de glissement sont indépendants de la disposition des bancs.

Massot (2002) propose une approche basée sur la **flexion-glisement** par une **approche paramétrique**. L'explication de la méthode est simple : un triangle de la surface à restaurer sera choisi par l'utilisateur et mis à plat, tout en considérant ce triangle comme fixe pour la restauration, c'est-à-dire qu'il correspond à **un point d'ancrage de la surface** (chaque triangle de cette surface est considéré rigide et indéformable et les triangles sont traités individuellement afin d'éviter les recouvrements et les espaces vacants). À partir de ce triangle, et par relation de propagation aux triangles voisins, la surface pourra être mise à

plat. Dans le cas d'un modèle en flexion-glissement, **la propagation aux triangles voisins est régulière** (conservation des aires et longueurs), **orthogonale** (conservation des angles) **et continue à travers les failles** (fermeture des failles) (Muron *et al.*, 2005).

Dans le module de restauration surfacique du logiciel gOcad, le calcul de l'espace 2D via *parameterizer 2D* se fait de trois façons différentes tout en respectant au mieux la conservation de l'aire de la surface à restaurer : i) soit par une transformation isométrique, c'est-à-dire une transformation qui conserve les longueurs de la surface (*Isometric Mapping*); ii) soit en tenant compte des contraintes géométriques (*Constrained Mapping*); iii) ou alors en respectant la conformité géométrique de la surface à restaurer, c'est-à-dire que si deux lignes sur la surface à restaurer se coupent avec un angle donné, les images de ces lignes sur le plan cible se couperont avec le même angle (*Conformal Mapping*). D'après Aubiès-Trouilh (2009), dans le cas d'une restauration complexe, à savoir un modèle géologique comportant des surfaces plissées et faillées, le calcul de la paramétrisation par méthode *Constrained mapping* offre une solution plus acceptable. D'après Aubiès-Trouilh (2009) « la géométrie finale de la surface restaurée est conforme, d'un point de vue géologique (à ce que l'auteur attendait) à savoir une surface rectangulaire découpée par des failles qui correspond en fait au modèle de départ, avec des bordures non-déformées après restauration, ce qui présentent un résultat géologiquement valide ».

Dans cette thèse, la méthode continue par flexion-glissement (*flexural slip*) avec la méthode de paramétrisation *Constrained mapping* a été privilégiée.

3.4. METHODE DE TRAVAIL POUR LA CONSTRUCTION D'UN MODELE STRUCTURAL SURFACIQUE 3D

La compréhension de l'évolution des structures géologiques et des mécanismes de déformation peut être appréhendée de deux façons (Figure 3.5) :

- à partir d'un état non-déformé pour arriver à un état déformé : il s'agit de la **méthode directe** correspondant à la modélisation directe.
- à partir d'un état déformé pour arriver à l'état non-déformé : il s'agit de la **méthode inverse** correspondant à la restauration.

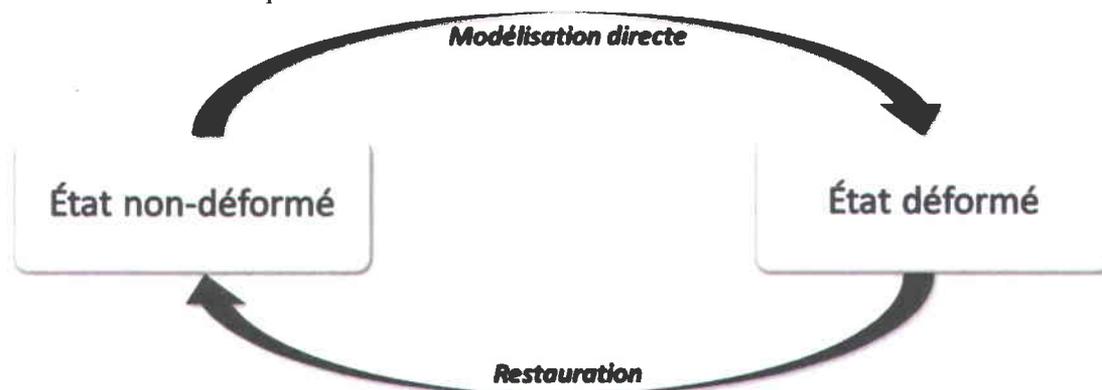


Figure 3.5 : Schéma général pour la construction de modèles géologiques équilibrés soit par méthode directe (modélisation directe), soit par méthode inverse (restauration).

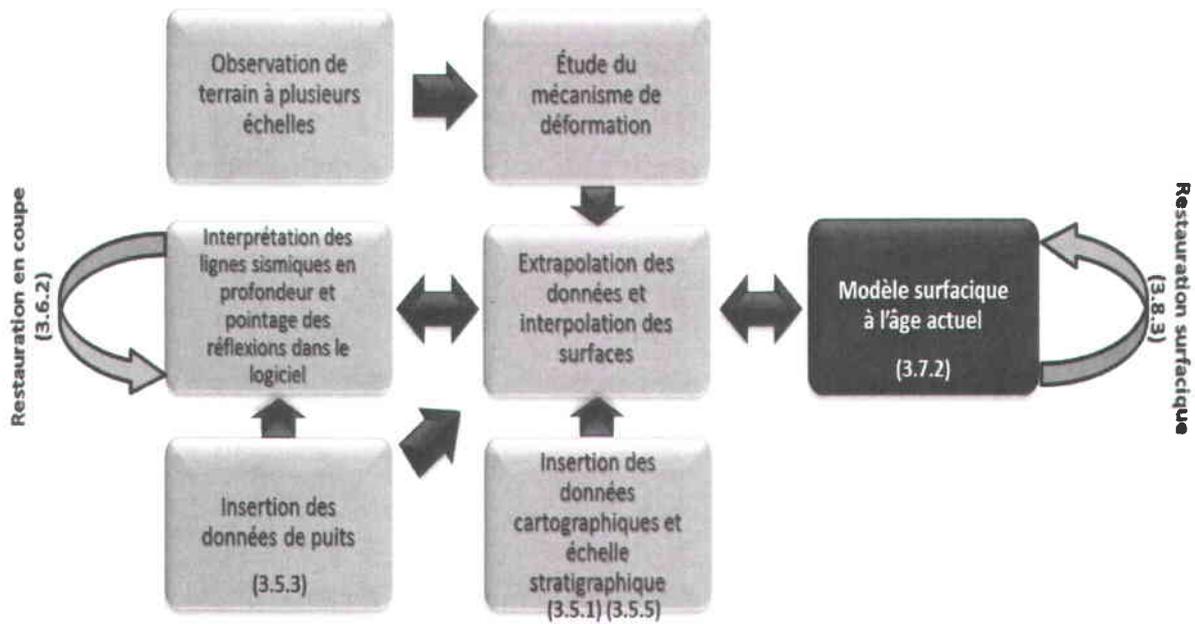


Figure 3.6 : Méthode de travail générale appliquée pour la construction d'un modèle surfacique à l'âge actuel contraint par la restauration en coupe pour la partie interprétation des lignes sismiques et la restauration surfacique après la construction des surfaces dans un environnement en 3D.

La méthode de travail proposée dans le chapitre 3 de cette thèse est une méthode itérative. La **première étape** est la restauration de la ligne sismique 82-152 (Figure 2.26). Il faut s'assurer que la coupe est rétro-déformable (si ce n'est pas le cas, il faut revoir l'interprétation). La **deuxième étape** (Figure 3.6, cases grises) est l'étude du mécanisme de déformation de la zone Bourque et l'acceptabilité de l'interprétation des lignes sismiques 2D (faite dans le chapitre 2) dans un environnement en trois dimensions. Les lignes sismiques n'étant pas suffisantes pour interpréter l'ensemble de la zone d'étude, d'autres données sont intégrées dans cet environnement 3D comme par exemple : des données de puits, de cartes géologiques, de coupes géologiques et de colonnes stratigraphiques. Ces données vont permettre de combler une partie des vides dans le modèle. La **troisième étape** est l'extrapolation de l'ensemble des données insérées dans le modèle et l'interpolation de toutes les surfaces afin d'obtenir le modèle surfacique à l'âge actuel (Figure 3.6, case noire). Enfin, la **quatrième étape** est de s'assurer que le modèle surfacique est cohérent grâce à la restauration surfacique.

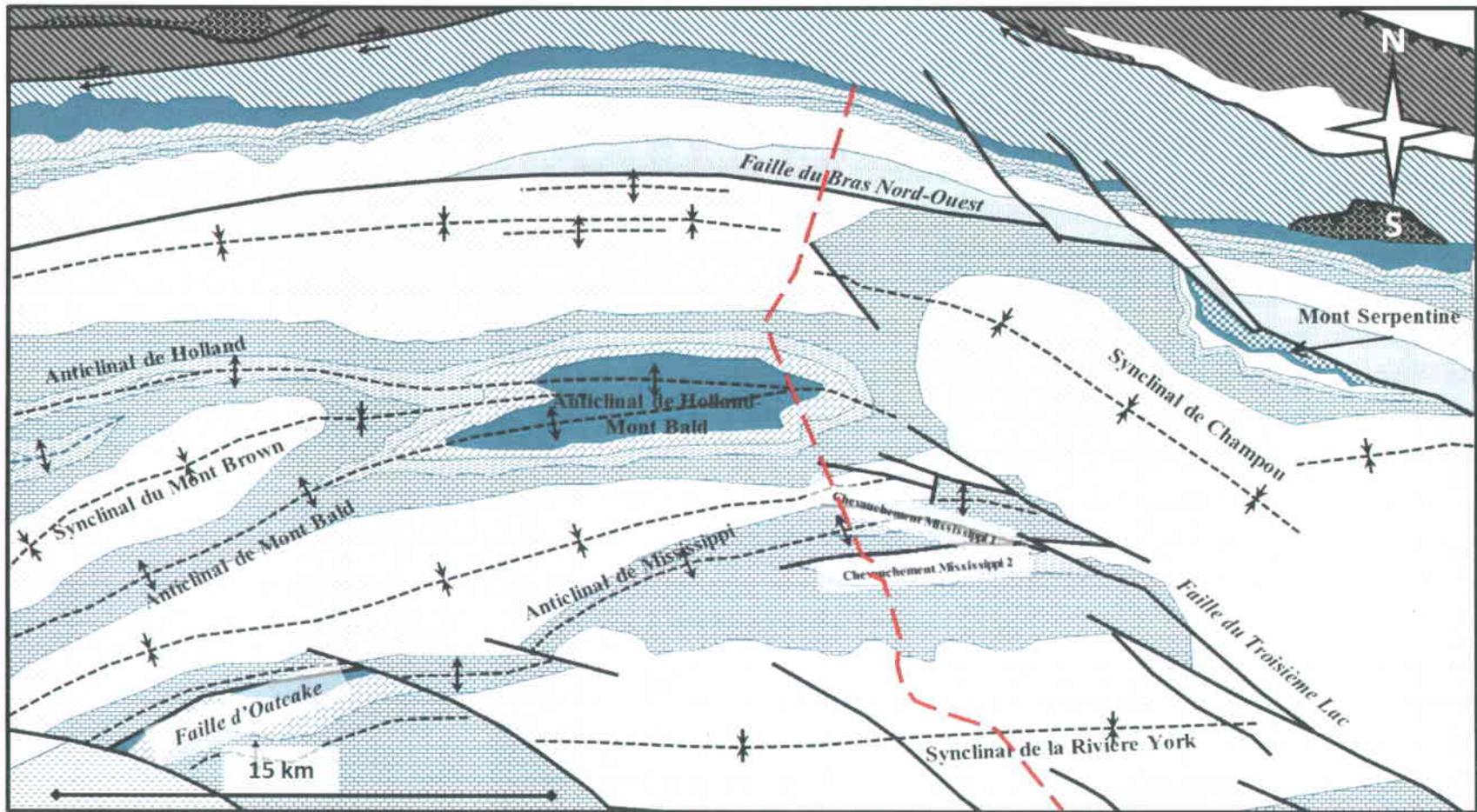
3.5. DONNEES DISPONIBLES POUR LA MODELISATION SURFACIQUE EN 3D ET LA RESTAURATION

3.5.1. LA CARTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE BOURQUE

Dans la zone Bourque, les structures cartographiées à la surface du nord vers le sud sont les suivantes (Figure 3.7):

- À l'extrême nord se trouve la nappe de la Rivière Sainte-Anne avec des roches du Cambro-Ordovicien.

- Entre la nappe au nord et la faille du Bras Nord-Ouest (FBNO) au sud, des roches siluro-dévonienues forment un demi-bassin ;
- À l'ouest de la zone Bourque, au sud de la FBNO et au nord de l'anticlinal de Holland-Mont Bald, les roches siluro-dévonienues forment une succession de plis (synclinal, anticlinal et synclinal) ;
- À l'est de la zone Bourque, entre la FBNO et la faille du Troisième Lac (FTL) se trouve le synclinal de Champou ;
- Au sud-est de la FBNO, au Mont Serpentine, des roches mafiques à ultramafiques appartenant au Complexe de Lady Step se retrouvent à la surface. La FBNO est marquée par des plis syn-acadien dus à son mouvement décrochant dextre.
- Au milieu de la zone Bourque, l'anticlinal Holland-Mont Bald forme un pli d'orientation est-ouest à tendance conique dont le vortex se trouve à l'est et permet de découvrir en son centre, les roches du Groupe de Chaleurs.
- À l'ouest, l'axe central du pli Holland-Mont Bald se prolonge en un synclinal appelé synclinal du Mont Brown. Ce synclinal est entouré de deux anticlinaux qui convergent à l'est dans le pli Holland-Mont Bald.
- À l'est du pli Holland-Mont Bald, la FTL s'amortit dans cet anticlinal. La FTL se termine en « queue de cheval » et forme une série de plis dont deux synclinaux appelés dans cette thèse : le chevauchement de Mississippi 1 découvrant en son centre la Formation de Shiphead et le chevauchement de Mississippi 2 qui permet aux formations de Forillon et Shiphead de se retrouver à la surface.
- Au sud, une continuité de synclinal – anticlinal – synclinal se succèdent, dont le dernier se nomme synclinal de la Rivière York et forme la frontière sud de la zone Bourque.
- À l'extrême sud-ouest, la zone Bourque est marquée par un chevauchement vers le nord dont la faille est appelée (dans cette thèse) faille d'Oatcake.



GRÈS DE GASPÉ

- Formation de Battery Point
- Formations de York River et York Lake

CALCAIRES SUPÉRIEURS DE GASPÉ

- Formation d'Indian Cove
- Formation de Shiphead
- Formation de Forillon

- Faille
- Faille inverse
- Faille dextre

GRUPE DE CHALEURS (partie supérieure)

- Formation d'Indian Point
- Formations de Saint-Léon, West Point, Gascons, Roncelles

ZONE DE DUNNAGE

- Complexe de Lady Step

- Trace axiale antiforme
- Trace axiale synforme
- Trace du profil sismique 82-152

SUPERGRUPE DE QUÉBEC

- Formation de Tourelle
- Formation de Rivière Ouelle
- Formation de Romieu

GRUPE DE SHICKSHOCK

- Sédiments et métasédiments; Basaltes et metabasaltes

Figure 3.7 : Carte géologique de la zone Bourque avec la localisation de la trace de la coupe faite à partir de la ligne sismique 82-152.

3.5.2. LES FICHIERS SEGY DES LIGNES SISMIQUES

Les neuf lignes sismiques présentées dans le chapitre 2 sont en format SEGY et ont été intégrées au modèle gOcad afin de reporter les interprétations qui ont été faites dans le chapitre 2 et de voir leur cohérences dans un univers en trois dimensions.

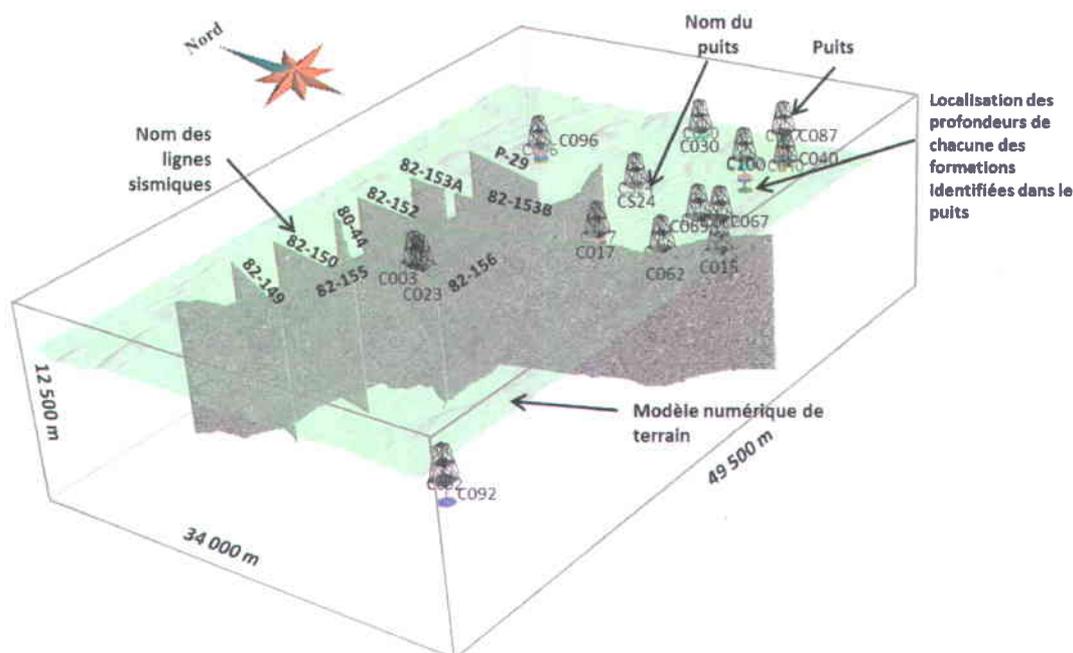


Figure 3.8 : Visualisation dans gOcad des lignes sismiques, des données de puits, du modèle numérique de terrain interpolé sous forme de carte.

3.5.3. L'ENSEMBLE DES PUIITS DISPONIBLES ET LES EPAISSEURS DES FORMATIONS

Le gouvernement du Québec possède une base de données complète sur une grande partie des puits en Gaspésie. Les données des toits de chacune des formations ont été intégrées au modèle afin de les contraindre dans l'environnement 3D. Dans la zone Bourque, l'ensemble des puits se trouve à l'est de la zone (Figure 3.8). La zone sud-ouest est dépourvue de lignes sismiques et de données de puits. Même avec l'agrandissement de la zone d'étude, il a fallu étudier l'ensemble des puits du nord-est de la Gaspésie, pour faire une estimation des épaisseurs à l'âge actuel de toutes les formations.

Le Tableau 3.2 montre les épaisseurs des différentes formations dans les principaux puits de la zone nord-est de la Gaspésie et les épaisseurs indiquées dans le lexique stratigraphique canadien qui regroupe l'ensemble des formations. 1) **Le Paléozoïque inférieur** : la plus grande incertitude existe au niveau des formations du Cambro-Ordovicien. Peu de puits sont assez profonds pour toucher le Supergroupe de Québec et aucun ne le traverse de part en part (Tableau 3.2). De plus, les formations du Cambro-Ordovicien se retrouvent dans des nappes de chevauchement (Malo *et al.*, 2008) ce qui

rend plus difficile toute estimation de leur épaisseur. **2) Le Paléozoïque moyen** : pour les formations du Siluro-Dévonien, la structure en bloc-basculé syn-sédimentaire de l'orogénèse salinienne engendre une répartition en trois dimensions des diverses unités stratigraphiques très problématique à estimer à l'âge actuel. La séparation par les deux failles majeures (FBNO et FTL) de la zone Bourque en quatre blocs distincts (voir chapitre 2) : bloc Nord – bloc Centre – bloc Sud – bloc Ouest, permet de calculer des moyennes des épaisseurs en fonctions des blocs afin d'avoir une plus faible incertitude pour le taux de sédimentation. Le bloc Nord a des taux de sédimentation plus faible et a subi une érosion salinienne plus forte. Le bloc Centre a des taux de sédimentation moyen et a subi une érosion salinienne faible. Le bloc Sud a de fort taux de sédimentation et n'a quasiment pas subi d'érosion salinienne. Le bloc Ouest pose problème puisqu'il se trouve entre le bloc centre et sud et ne dispose d'aucun puits profond. Le taux de sédimentation est considéré comme la moyenne des blocs Centre et Sud. **3) Le Paléozoïque supérieur** : les formations du Paléozoïque supérieur de la région des Appalaches canadiennes sont principalement d'âge carbonifère (Williams, 1995). Il n'y a aucune roche carbonifère dans la zone Bourque, mais on retrouve ces roches dans l'est et le sud de la Gaspésie et à l'intérieur d'un certain nombre de bassins (comme par exemple le bassin des Maritimes qui contient les plus anciens dépôts et les plus épais : jusqu'à 12 km d'épaisseur). Les roches du Carbonifère recouvrent en discordance la quasi-totalité des roches qui définissent les zones du Paléozoïque précocé et les ceintures du Paléozoïque moyen (Williams, 1995). Dans la thèse de Roy (2008), l'épaisseur du Carbonifère déposée en discordance dans le bloc Centre est estimée à 500 m d'épaisseur et dans le lexique stratigraphique canadien, l'épaisseur est reconnue jusqu'à 12 km dans le bassin des Maritimes (Tableau 3.2).

3.5.4. LES AUTRES DONNEES GEOREFERENCEES

D'autres données ont été intégrées dans le géomodeleur gOcad pour une meilleure interprétation en trois dimensions :

- Un modèle numérique de terrain (en anglais *DEM* : *Digital Elevation Model*) avec une résolution de 50 m (www.geobase.ca Gouvernement du Canada, 2000) (Figure 3.8).
- Des cartes géologiques (à l'échelle 1/250000 ; Brisebois et Nadeau, 2003, à l'échelle 1/50000 ; Lachambre et Brisebois, 1990, et les cartes : 22H/2, 22H/3, 22A/14) géoréférencées dans le cadre de cette thèse avec le logiciel ArcGIS.
- Des coupes structurales également géoréférencées avec le logiciel ArcGIS ont été faites lors de cette thèse, à partir des cartes citées ci-dessus pour contraindre le toit des formations là où les données sismiques ou de puits manquaient (i.e. dans le sud-ouest de la zone Bourque ; Figure 3.8).

Tableau 3.2 : Ce tableau montre les âges des différentes formations de la zone d'étude du projet Bourque. Les puits et leur épaisseur de sédimentation (en mètres), ainsi que les épaisseurs minimale et maximale de ces puits et les épaisseurs minimale et maximale disponibles dans le lexique stratigraphique canadien y sont aussi représentés, afin d'estimer les épaisseurs érodées dans la région nord-est de la Gaspésie. * Le Griffon Cove River est une unité qui se retrouve sous forme de lentilles à l'intérieur de la Formation de West Point. **St Léon.

Formation	Groupe	Âge top (Ma)	Bald Mountain n°2	Mississippi n°1	Impérial, Gaspé n°1	Venture n°2	Venture n°3	P.O.T n°28	P.O.T n°33	P.O.T n°35	Puits Tar Point n°1	Puits York	Holland n°2	Sunny Bank n°1	Gastonguay n°1	Puits Gaspé Sud	Puits Douglas n°1	Puits Gaspé Nord n°1	Puits Galt n°1	Puits Haldimand n°1	CS24	CS24	Épaisseur minimum dans les puits répertoriés	Épaisseur maximum dans les puits répertoriés	Épaisseur minimum dans la littérature	Épaisseur maximum dans la littérature			
			C003	C017	C023	C029	C030	C062	C067	C069	C079	C081	C083	C087	C092	C093	C097	C099	C100	C131	CS24								
Carbonifère		370																							180	12000			
Malbaie		391,8																							600	?			
Battery Point	Grès de Gaspé	397,5															1405	793		815				793	1405	2120	3000		
York River		402,5				1930	1935	1074	791	542	1957			670		431	113	349	490	606	300			113	1957	300	3500		
York Lake		407														45			88						45	88		1300	
Indian Cove	Calcaire supérieur de Gaspé	407,2		375		127	399			3	188			879		1050		114	773						3	1050	140	850	
Shiphead		408,4		119									610	436*		450		98	271						98	610	163	515	
Forillon		409,8		299									100	538		725		221	810						100	810	275	582	
Indian Point	Groupe de Chaleurs	411,2	395	726	580									1093		150		288	117						117	1938	200	1000	
Roncelles		414,4	1624		330										992**				42						42	1624	40	300	
West Point		415		117																					117	200	10	800	
Giffon Cove River*		416																							110	110	10	60	
Gascon		417,3		191	403																					30	403	10	608
Laforce		422			59											543										59	543	15	260
Sayabec		424																										10	600
Burnt Jam Brook		428,2			547								140			439										140	547	20	600
Val Brillant		428,2																										60	200
Source		432																											9
White Head	Matapédia	437,5													493										493	493	720	2400	
Tourelle	Supergroupe de Québec	463,9																									?	?	
Rivière Ouelle		468,5														494	160	840							160	840	700	10000	
Romieu		473,6																									?	?	

- Des cartes correspondant aux données aéromagnétiques et à l'anomalie de Bouguer (présentées dans le chapitre 2, Pinet *et al.*, 2005).
- Des coupes structurales et des interprétations sismiques provenant de la littérature scientifique (Thériault et Laliberté, 2006 ; Pétrolia, 2007 et 2008 ; St-Julien et Bourque, 1990 ; Lynch et Arsenault, 1997; Bertrand et Malo, 2001 ; Castonguay *et al.*, 2005 ; présentées dans le chapitre 2) et géoréférencées dans le cadre de cette thèse avec le logiciel ArcGIS.

3.5.5. LES ETUDES ANTERIEURES SUR LA RESTAURATION

Aucun calcul du taux de raccourcissement n'a été effectué dans la zone Bourque. Néanmoins, une étude effectuée par Kirkwood (1986), avait estimé le déplacement dextre le long de la FTL à 10 km. Une autre étude effectuée par Kirkwood (1993) avait estimé le déplacement dextre le long de la FBNO à 8 km.

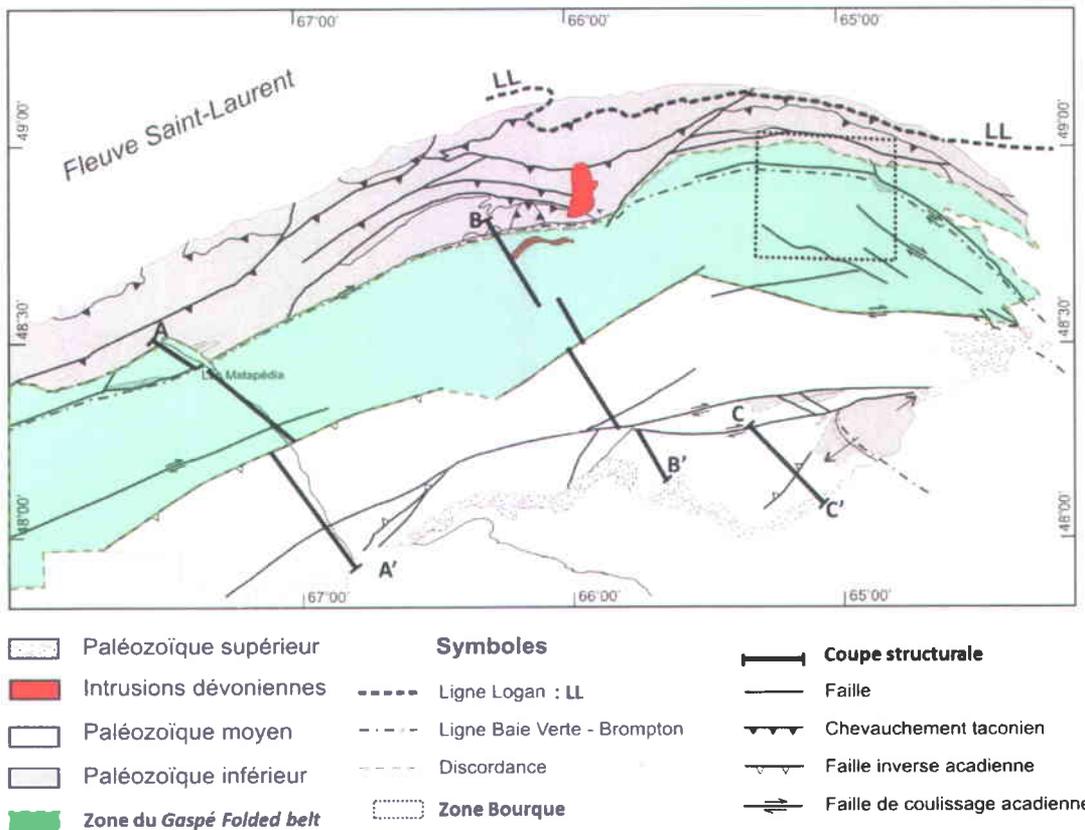


Figure 3.9 : Carte montrant la localisation du Gaspé Folded Belt, de la zone Bourque et des coupes structurales présentées dans la thèse de Kirkwood (1993) (carte modifiée de Malo et Kirkwood, 1995).

Dans le cadre de l'étude qualitative et quantitative de la déformation acadienne du bassin siluro-dévonien de la péninsule gaspésienne, Kirkwood (1993) a évalué les taux de raccourcissement tectonique dans des régions éloignées au sud et à l'ouest de la zone Bourque (Figure 3.9). L'auteur a obtenu de forts taux de raccourcissement dans des

régions où le clivage est intense (*Gaspé Trough* et anticlinorium d'Aroostook-Percé). Le *Gaspé Fold Belt* est une structure synclinoriale très ouverte et peu plissée caractérisée par un clivage disjonctif grossier à anastomosé (Kirkwood et St-Julien, 1987), c'est-à-dire, par comparaison aux autres régions, un clivage faible. Dans cette région le **taux de raccourcissement est compris entre 5 et 20 %** (Kirkwood, 1993).

La zone Bourque est dans la région est du *Gaspé Folded Belt* (Figure 3.9). Lors des deux campagnes de terrain effectuées au cours de cette thèse, aucun clivage significatif n'a pu être observé. On s'attend donc à un faible taux de raccourcissement.

Deux logiciels de restauration ont été utilisés dans la thèse de Bêche (2008) pour la ligne 2001-MRN-10B (LOCACE qui utilise le principe de *flexural slip* et Temis 2D qui utilise le principe du *Backstripping* (voir chapitre 4)). Les deux logiciels utilisés dans la thèse de Bêche (2008) ont servi à vérifier la cohérence du modèle et aucun calcul du taux de raccourcissement n'a été effectué.

3.6. ANALYSE DES RESULTATS DE LA RESTAURATION EN COUPE DE LA LIGNE SISMIQUE 82-152

D'après Elliott (1983), une coupe équilibrée est admissible si :

1. la section choisie pour la restauration est la plus représentative du secteur d'étude. Dans le cas de cette thèse, la ligne sismique 82-152 est la plus indiquée car elle est la seule ligne sismique à traverser la zone Bourque de part en part;
2. la coupe respecte les contraintes géologiques de la région d'étude. Le style structural des roches du Cambro-Ordovicien dans le nord-est de la Gaspésie est dominé par les grandes structures régionales en chevauchement dont l'orientation varie d'E-O à NO-SE avec des plis orientés E-O à NO-SE, déversés à couchés vers le N-NNO (Faure *et al.*, 2004). Les données de surface des roches du Siluro-Dévonien montrent des plis acadiens ouverts de direction E-O associés à des failles inverses de même direction (Figure 2.17; Kirkwood *et al.*, 2004). Or la ligne sismique 82-152 est de direction NNO-SSE, c'est-à-dire dans le sens du raccourcissement régional;
3. la coupe est rétro-déformable. Ce point sera validé par la restauration de la ligne sismique 82-152.

La méthode de travail choisie est la **méthode inverse qui consiste à partir d'un état déformé pour arriver à un état non-déformé**; c'est la restauration en coupe (Figure 3.10). En premier, il faut choisir un niveau compétent qui sert de niveau repère afin de positionner le point d'ancrage. La présence d'un niveau compétent permet d'utiliser la méthode appelée **conservation de la longueur et de l'épaisseur de niveaux repères**. Ensuite, la restauration peut s'effectuer et il est alors possible de calculer les taux de

raccourcissement du niveau repère choisi (Eq 3.5). Enfin, il faut construire la paléogéométrie pour pouvoir étudier la cohérence de la restauration et étudier la cinématique des failles.



Figure 3.10 : Méthode de travail appliquée à la restauration en coupe de la ligne sismique profondeur 82-152. Le contrôle des incohérences géométriques apparaissant dans le modèle à l'état restauré, naturelles ou artificielles permet un travail itératif afin d'obtenir une coupe rétro-déformable et donc une meilleure interprétation. La restauration en coupe permet également de construire un ensemble de coupes paléogéométriques de cette même ligne.

3.6.1. CHOIX D'UN NIVEAU COMPETENT DE REFERENCE

D'après Ramsay et Huber (1987), un corps rocheux constitué d'une alternance de strates de compétence variable soumis à une contrainte tectonique, n'a pas une réaction homogène car les **strates réagissent différemment en fonction de leur compétence**. Les strates compétentes (calcaires massifs, quartzites) forment des plis, alors que les niveaux moins compétents (shales, calcaires argileux) ont tendance à remplir les espaces entre les bancs et à s'épaissir au lieu de plisser. Néanmoins lors d'une déformation plus intense, même les strates incompetentes se déforment par plissement. Il est donc nécessaire de trouver une formation dont les strates sont les plus compétentes possibles car elles enregistrent la déformation précoce contrairement aux lits incompetents.

Le choix s'est porté sur la **Formation de Forillon** qui est décrite par Lespérance (1980) comme une séquence monotone de calcaires très silteux (chertoux dans l'est) interlités de calcaires argileux. Cette formation est recoupée dans les puits Mississippi, Sunny-Bank, Gaspé-Sud, Blanchet et Gaspé-Nord et est très bien représentée le long de la ligne sismique 82-152. Le choix aurait pu se porter également sur la Formation d'Indian Cove, mais cette dernière a été beaucoup plus érodée que la Formation de Forillon, elle n'est donc pas bien quantifiable. La Formation de Shiphead quant à elle, est très hétérogène et contient environ 40 % de mudstone. Ce n'est donc pas une formation assez compétente.

Deux campagnes de terrain ont permis de vérifier qu'il n'y a pas de déformation tectonique importante dans la Formation de Forillon. En effet, un clivage de fractures n'a

été observé que rarement. L'évaluation sommaire de cette formation confirme donc sa nature compétente.

3.6.2. RESTAURATION EN COUPE DE LA LIGNE 82-152

La méthode de restauration utilisée dans cette thèse est la conservation de la longueur et de l'épaisseur de niveaux repères. Les conditions aux limites sont connues le long d'une ligne verticale (le **point d'ancrage**; Figure 3.11) qui est restée fixe au cours de la déformation et qui a été choisie le long d'un horizon compétent (la Formation de Forillon). Pour arriver à l'horizontalité des couches, il a fallu tenir compte de :

- la géologie structurale (c'est-à-dire les failles et les types de plis). La coupe structurale est perpendiculaire à l'axe des plis, afin de respecter la morphologie réelle des structures;
- la sédimentologie et plus particulièrement l'érosion. Lorsque la coupe a été dépliée, les zones d'érosion ont été représentées par des trous.

Par contre, toutes les contraintes sédimentologiques n'ont pas été prises en compte. En effet, les différences d'épaisseur dues à la variation du taux de sédimentation lors des mouvements de failles, ont été prises en compte. Mais nous n'avons pas utilisé le phénomène de décompaction des roches.

La restauration de la base de la Formation de Forillon a permis de retrouver la géométrie des roches avant la déformation acadienne. Le dépliage de la coupe montre que (Figure 3.11) :

Dans le **bloc Nord**, les formations présentent une érosion mais leur épaisseur est constante. La FBNO (Figure 3.11, numérotée 1) présente un jeu normal sur la coupe restaurée. Cette faille était donc active avant la déformation acadienne

Le **bloc Centre-Ouest** est marqué par une érosion au centre due à la présence d'un anticlinal qui a été érodé pendant ou après la déformation acadienne. Le bloc Centre-Ouest montre une différence d'épaisseur de la Formations de Forillon (Figure 3.11, $a > a'$), de la Formation d'Indian Point (Figure 3.11, $b > b'$), des formations Roncelles/ Gascons/ Laforce/West Point (Figure 3.11, $c > c'$) et de la Formation de Burnt Jam Brook (Figure 3.11, $d > d'$), ce qui forme un système en éventail. Ces formations se sont donc sédimentées lors du jeu normal de la FBNO. La faille numérotée 2 ne montre aucun décalage sur la coupe restaurée, ce qui signifie que cette faille n'était pas présente avant la déformation acadienne.

Dans le **bloc Sud**, la FTL (Figure 3.11, numérotée 3) montre un jeu normal sur la coupe restaurée. Tout comme la FBNO, la FTL était donc active avant la déformation acadienne. La Formation de Forillon présente un problème d'épaisseur entre

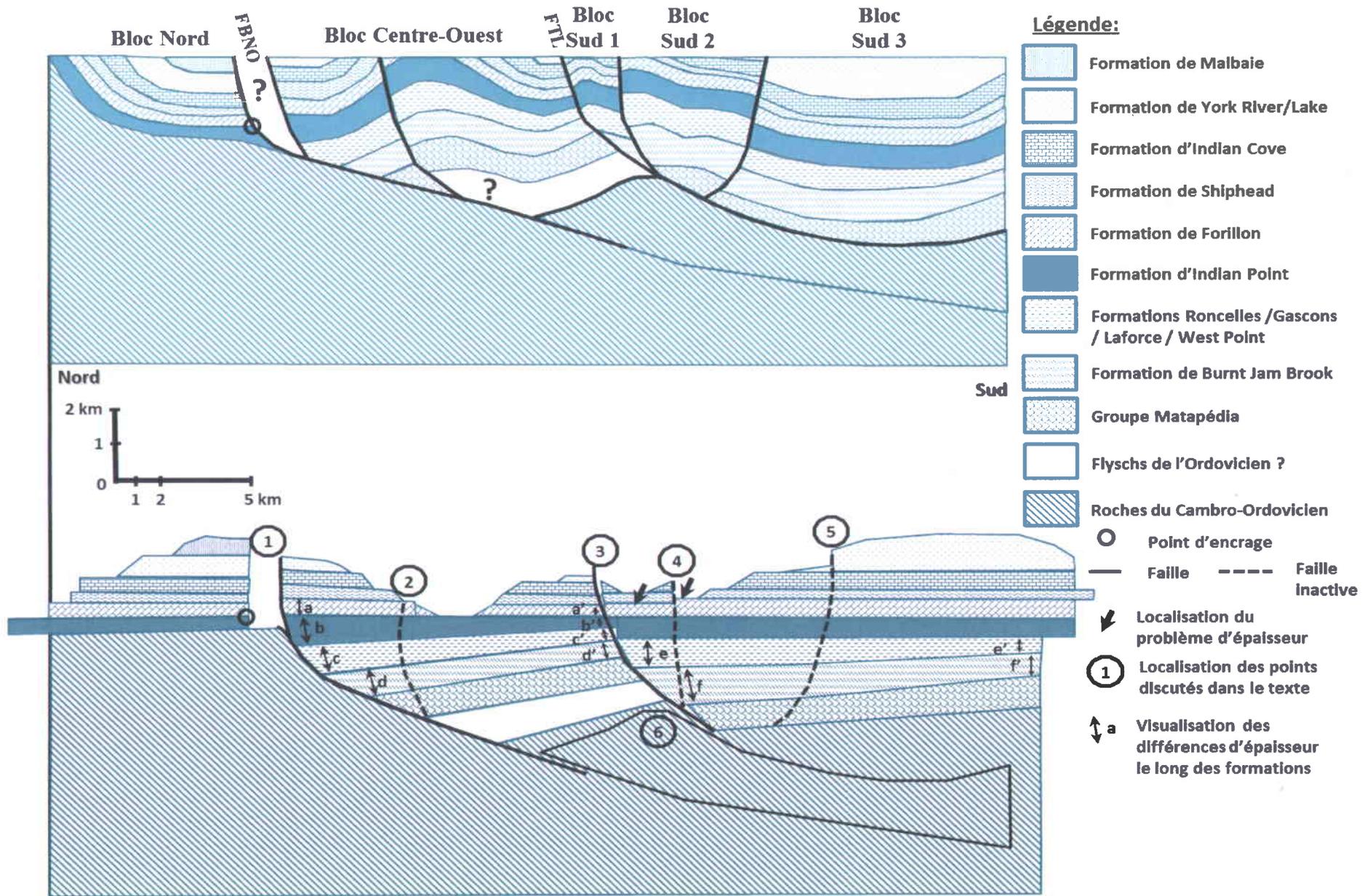


Figure 3.11 : Coupes initiale et restaurée de la ligne sismique 82-152 montrant la géométrie des différentes formations avant et après la déformation acadienne. La localisation de la coupe est visible sur la Figure 3.7.

les failles 3 et 4 (Figure 3.11, flèches noires). Comme la déformation acadienne a eu lieu après le dépôt de cette formation et que la FTL est interprétée comme une faille transpressionnelle durant la déformation acadienne, la différence d'épaisseur peut être due au jeu décrochant de cette faille. Le bloc Sud est marqué par plusieurs zones d'érosion : au centre du bloc Sud 1, au nord du bloc Sud 2 et dans le bloc Sud 3. Ces érosions sont syn- ou post-acadiennes. Globalement, la faille 4 ne présente aucun décalage sur les formations d'Indian Point, de Roncelles, de Gascons, de Laforce, de West Point et de Burnt Jam Brook. La faille 4 est donc considérée comme inexistante avant la déformation acadienne. Le bloc Sud est marqué par des différences d'épaisseur dans les formations de Roncelles, de Gascons, de Laforce, de West Point (Figure 3.11, $e > e'$) et de Burnt Jam Brook (Figure 3.11, $f > f'$). Le dépôt de ces formations a eu lieu lors du jeu normal de la FTL, ce qui forme un système en éventail. A signaler que : contrairement au bloc Centre, les formations de Forillon et d'Indian Point ne montrent pas de différence d'épaisseur. Cela peut être dû au fait que la FTL n'était plus active en faille normale lors du dépôt de ces formations ou que le jeu transpressionnel acadien de la FTL a effacé les preuves d'une possible différence d'épaisseur. Enfin, la faille numérotée 5 ne présente aucun jeu sur la coupe restaurée. Cette faille est donc une faille acadienne ou post-acadienne.

En dessous des formations siluro-dévonienues, la présence du pli (Figure 3.11, numéroté 6) dans les roches taconiennes ne correspond plus à la géométrie pré-acadienne. Cela indique que ce pli s'est formé lors de l'orogénèse acadienne.

3.6.3. CALCUL DU TAUX DE RACCOURCISSEMENT

Les taux de raccourcissement tectonique minimum sont montrés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3: Mesures (en kilomètre) de chacune des bases des formations de la coupe (Figure 3.11) qui ont servi à calculer le taux de raccourcissement et à faire la reconstruction paléogéométrique. La longueur totale (déplissée : l_0) de chacune des formations est comparée à la longueur (plissée : l_1) mesurée sur la coupe afin de calculer le taux de raccourcissement par la relation $R = (l_0 - l_1) / l_0$.

Formation	Bloc							Longueur totale	Taux de Raccour.
	Bloc Nord	FBNO	Centre 1	Centre 2	Bloc Sud 1	Bloc Sud 2	Bloc Sud 3		
Malbaie	3008,8							3008,8	-
York River/Lake	5014,7	1604,7	2607,6	1504,4		2005,9	9527,9	22265,3	-
Indian Cove	6418,8	1604,7	3610,6	2908,5	2407,1	3510,3	9427,6	29887,6	-
Shiphead	7020,6	1404,1	4412,9	7923,2	2206,5	5516,2	9628,2	38111,8	9%
Forillon	8224,1	1203,5	4212,4	8224,1	2005,9	5415,9	9628,2	38914,1	9%
Indian Point	10029,4	802,4	3911,5	7522,1	1404,1	5215,3	9828,8	38713,5	7%
Chaleur Sup			3610,6	7321,5	1404,1	4713,8	10129,7	27179,7	8%
Burnt Jam Brook			1404,1	7822,9		3008,8	11032,4	23268,2	-
Matapédia				7522,1		3008,8	11032,4	21563,2	-
Tourelle				5014,7				5014,7	-

Le pourcentage de raccourcissement est obtenu par l'équation 3.5 et n'est valable que pour la déformation acadienne. Ce taux de raccourcissement de 9% pour la Formation de Forillon se rapproche probablement du raccourcissement tectonique total puisque dans la zone Bourque aucun clivage important n'a été observé en comparaison avec les autres régions de la Gaspésie qui elles montrent une forte déformation acadienne accompagnée d'un clivage ardoisier intense (Kirkwood, 1993). Ce faible taux de raccourcissement correspond à ce que Kirkwood (1993) trouve dans le même domaine (i.e. le *Gaspé Folded Belt*; Figure 3.9).

3.6.4. CONSTRUCTION DE LA PALEOGEOMETRIE

L'étude de la géométrie des formations qui composent la coupe géologique faite à partir de l'interprétation de la ligne sismique 82-152 (Figure 3.11) a permis de produire une série de coupes paléogéométriques (Figure 3.12) qui exprime l'évolution de la zone Bourque. Il faut noter que l'effet de la décompaction n'a pas été pris en compte.

Ordovicien tardif (Figure 3.12, 14): Une sédimentation flyschique s'est mise en place dans le bassin d'avant-pays. Durant la fin de l'orogénèse taconienne, les formations de Tourelle, de Des Landes et de Cloridorme se sont déposées. Seule la Formation de Tourelle est reconnue le long de la coupe géologique. Les autres formations (comme les formations de Cloridorme ou de Des Landes) sont situées plus au nord.

Silurien précoce (Llandovery) (Figure 3.12, 13): Le remplissage progressif du bassin s'est mis en place avec en premier le dépôt des formations du Groupe de Matapédia qui forment un bassin à turbidites calcaires durant une période de calme tectonique. Ces formations pourraient avoir été déposées jusque dans le bloc Centre, alors qu'elles ne sont reconnues à l'affleurement que dans l'anticlinal de la Rivière Saint-Jean, c'est-à-dire à la frontière sud de la zone Bourque. Plus tard, au nord, la Formation de Val brillant se dépose.

Silurien précoce (Llandovery) (Figure 3.12, 12): Durant la deuxième partie du Llandovery, les failles normales se sont initialisées lors du dépôt des formations de Burnt Jam Brook et de Val Brillant. La Formation de Val Brillant est reconnue dans le bloc Nord à l'extrême ouest de la zone Bourque (Figure 1.13, colonne 4) et dans le centre de la Gaspésie (avec le doublet Val Brillant/Sayabec) (voir Chapitre 2). Mais rien n'indique que cette formation se situe dans l'ensemble de la zone Bourque. Seule la Formation de Burnt Jam Brook, un équivalent du de la Formation Val Brillant, sera considérée dans le bloc Centre et Sud.

Silurien moyen-tardif (Figure 3.12, 11): Les dépôts calcaires ont ensuite dominé les zones de faible profondeur d'eau. C'est dans cet environnement que se sont déposées les

formations de Sayabec au niveau du bloc Nord et de Laforce dans les blocs Centre et Sud puis complété par la Formation de Gascons sur l'ensemble de la zone Bourque.

Silurien tardif (Pridolien) (Figure 3.12, 10) : La fin du Silurien est marquée par une phase régressive (Figure 2.24, R₂) appelé érosion salinique qui a pour conséquence d'éroder, au nord de la zone Bourque, des roches équivalentes aux formations de Sayabec, de Gascons et peut-être même des roches de la nappe de la Rivière Sainte-Anne.

Silurien tardif (Pridolien) – Dévonien précoce (Llochkovien) (Figure 3.12, 9): Le remplissage du bassin s'est poursuivi par la mise en place d'une large ceinture récifale au nord. Ces récifs appartiennent à la Formation de West Point et sont entourés par la Formation d'Indian Point. Au centre et au sud, des sédiments silicoclastiques fins représentés par les formations d'Indian Point et de Saint-Léon se sont déposés dans un milieu plus profond. Le début du Dévonien est marqué par une phase transgressive (Figure 2.24, T₂;) avec localement le dépôt de la Formation de Roncelles.

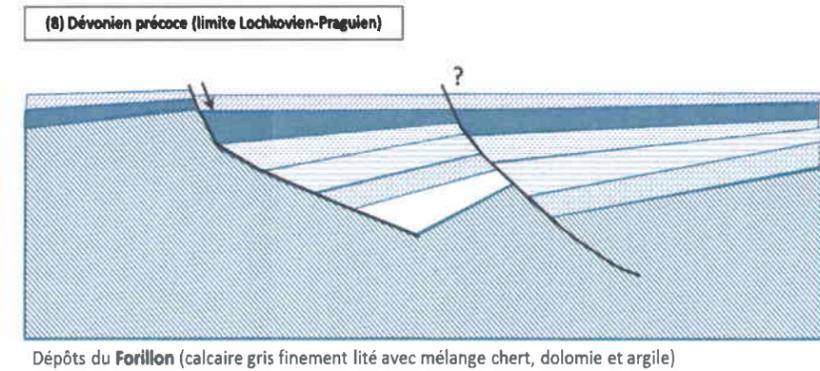
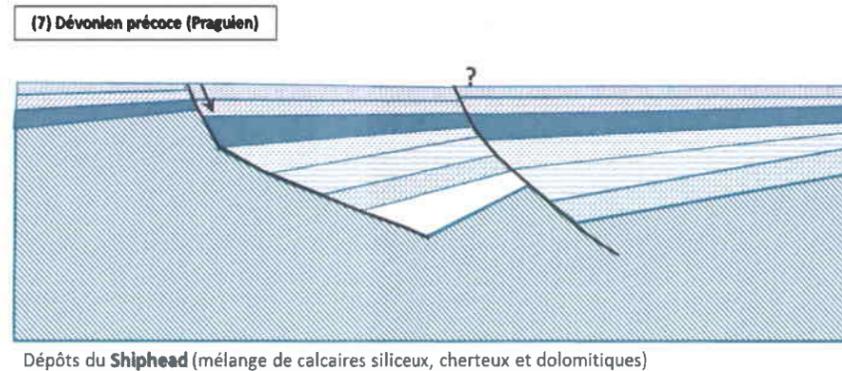
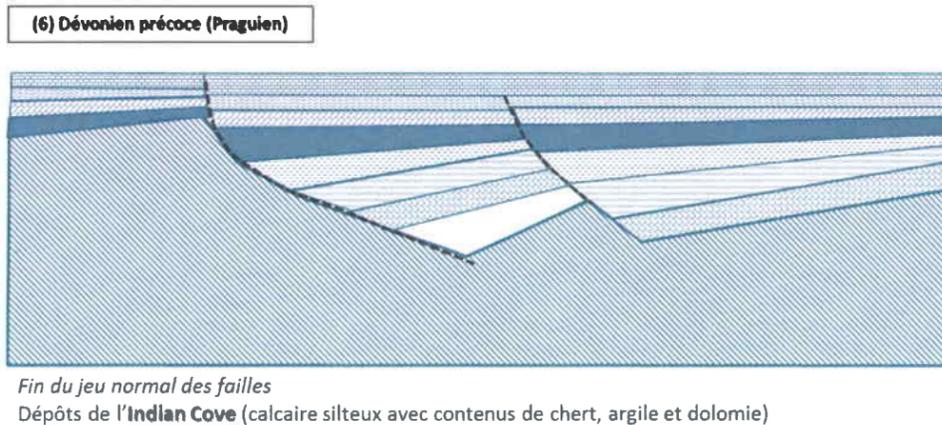
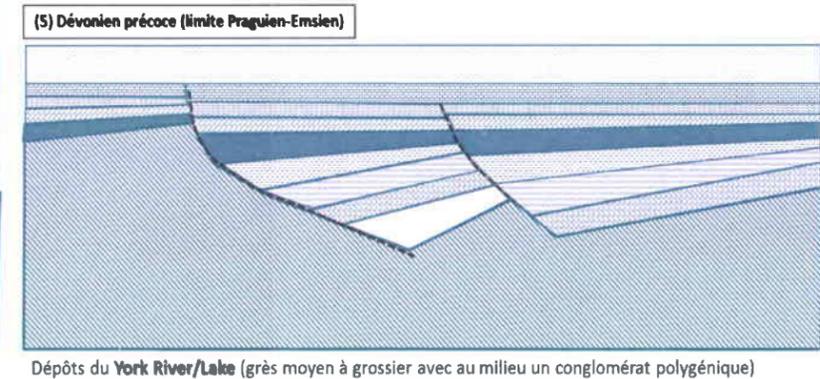
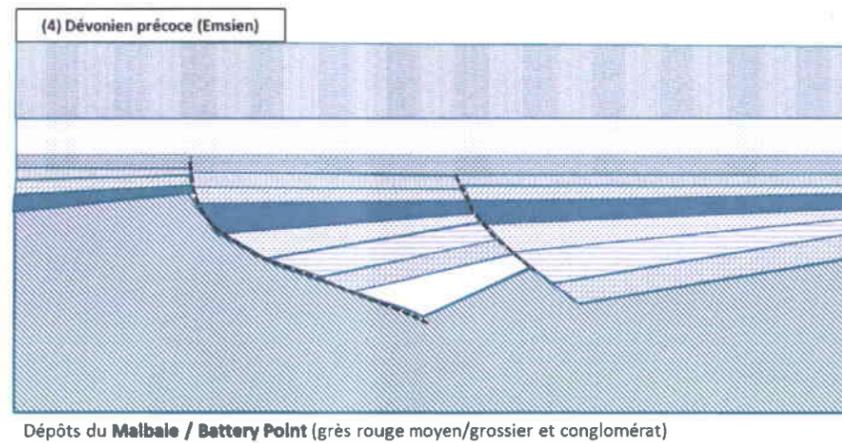
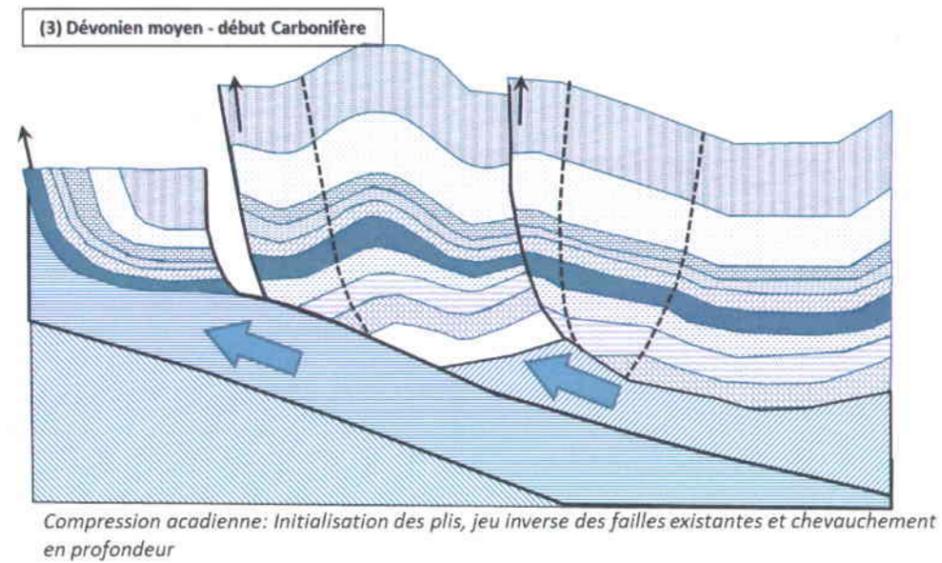
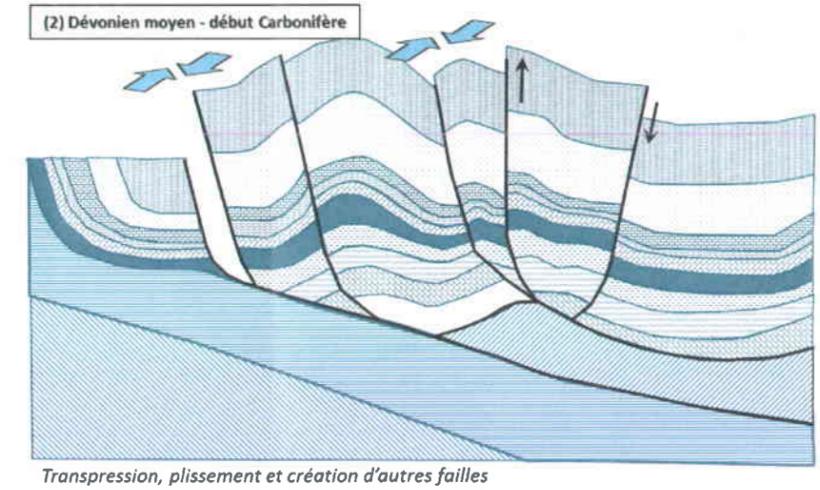
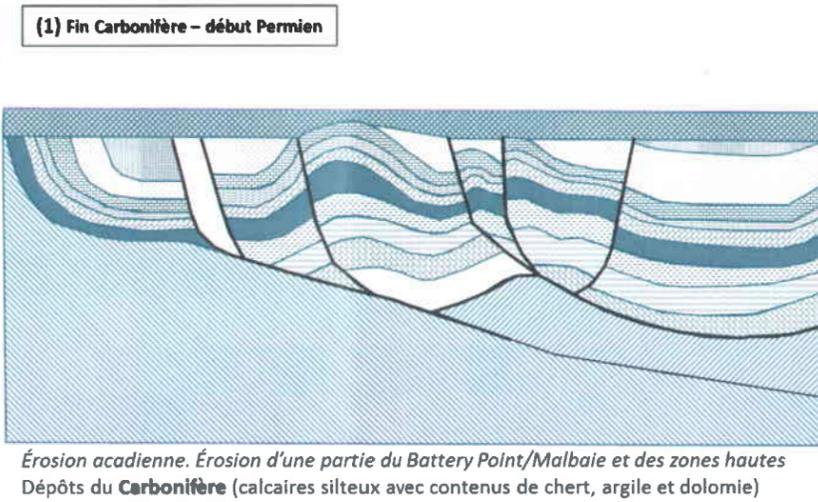
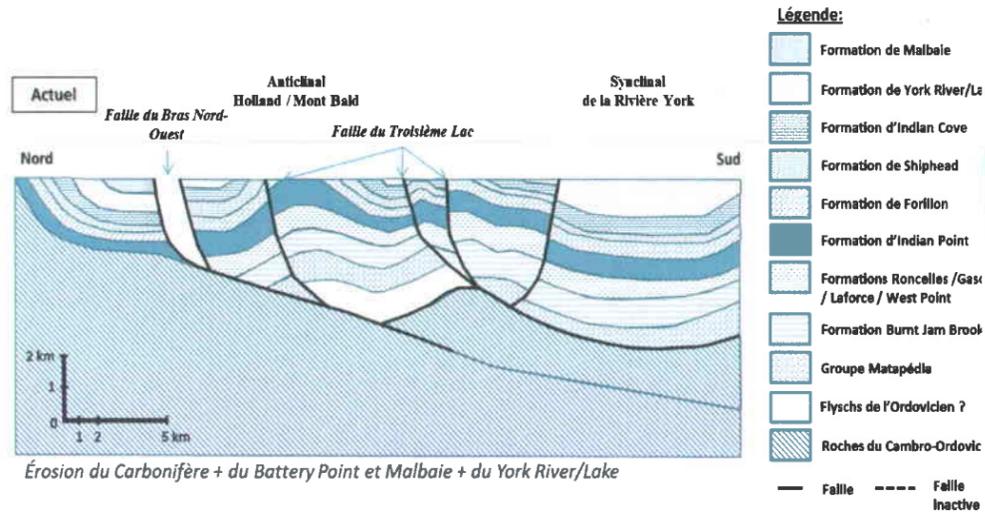
Dévonien précoce (Figure 3.12, 6 à 8): Le jeu des failles normales s'est ralenti. Sur la coupe de la ligne sismique 82-152, seule la FBNO est active en faille normale durant cette période. Les faciès carbonatés et silicoclastiques du Groupe des Calcaires supérieur de Gaspé se sont déposés entre 100 et 200 m de profondeur.

Dévonien précoce (Figure 3.12, 4 et 5) : Cette période est dominée par la phase régressive (Figure 2.24, R₃) et est considérée comme un calme tectonique. Les faciès à grains grossiers du Groupe des Grès de Gaspé se sont déposés sur l'ensemble des blocs dans un environnement proximal à terrestre (entre 0 et 5-10 m de profondeur).

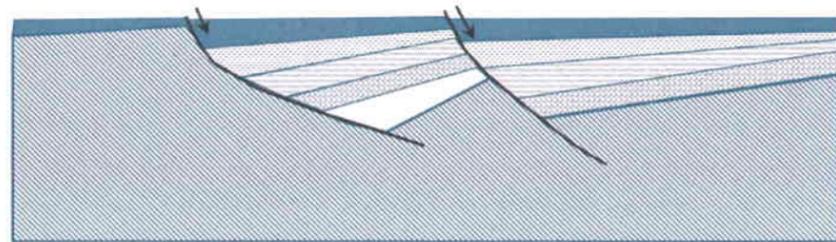
Dévonien moyen – début Carbonifère (Figure 3.12, 2 et 3) : C'est le début de l'orogénèse acadienne avec l'initialisation des plis et des failles. Les formations cambro-ordoviciennes en profondeur sont marquées sur la coupe par un grand chevauchement. La création de nouvelles failles (Figure 3.11, numérotées 2, 4 et 5) et le jeu décrochant des deux principales failles (FBNO et FTL) sont visibles sur la coupe.

Fin Carbonifère – début Permien (Figure 3.12, 1) : Les roches du bassin siluro-dévonien ont subi une importante érosion qu'il n'est pas possible de quantifier avec la reconstitution paléogéométrique. Après l'érosion acadienne, se déposent en discordance les roches du Carbonifère qui sont des dépôts continentaux en eaux peu profondes, donc déposés au-dessus du niveau de la mer.

Début Permien jusqu'à l'actuel : Durant cette longue période, s'est effectuée l'érosion des roches du Carbonifère et sûrement d'une partie des roches du Siluro-Dévonien. La restauration en coupe et l'étude de la paléogéométrie ne permet ni de quantifier ni de savoir quand a eu lieu cette érosion.

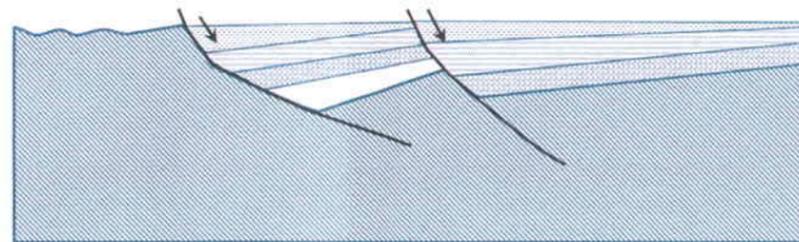


(9) Silurien tardif (Pridolien) – Dévonien précoce (Lochkovien)



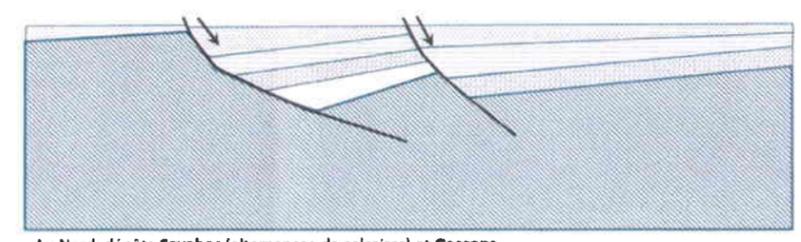
Au Nord: dépôts à la base **West Point** (calcaires récifaux) + **Griffon Cove River** (mudstones et siltstones)
Partout: dépôts **Indian Point** (mudstone + siltstone + grès fin calcaireux) avec localement du **Roncelles** (grès fin calcaireux)

(10) Silurien tardif (Pridolien)



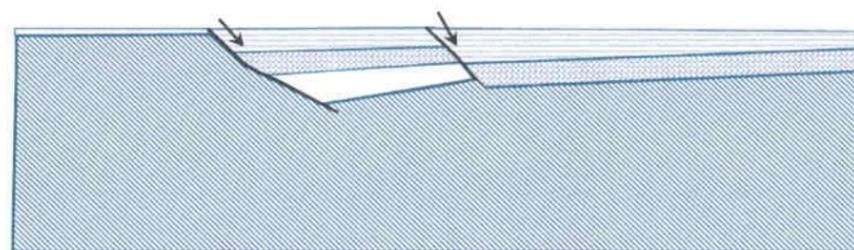
Phase érosive: *érosion salinique*
Érosion au Nord de Sayabec + Gascons + Rivière Ouelle et érosion de Gascons partout ailleurs

(11) Silurien moyen-tardif



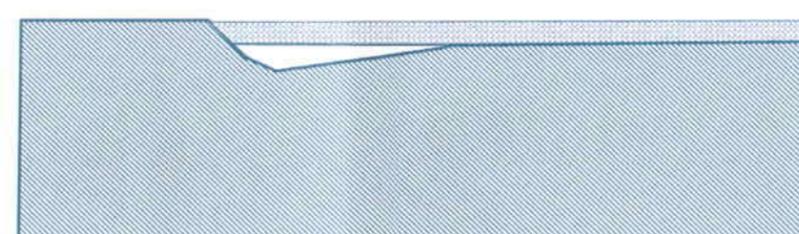
Au Nord: dépôts **Sayabec** (alternances de calcaires) et **Gascons**
Au Centre et Sud: dépôts **Gascons** (bancs de mudstones et siltstones calcaireux) et **Laforce** (mudstones et grès)

(12) Silurien précoce (Llandovery)



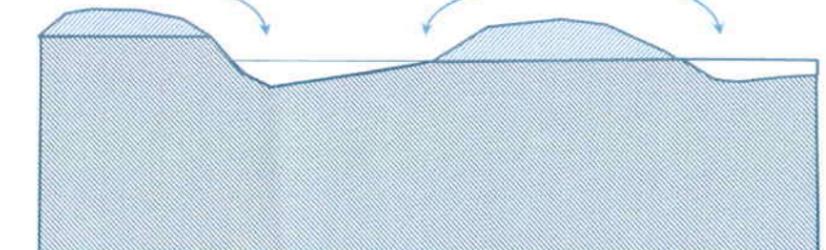
Début du jeu normal le long des failles
Au Nord-Ouest dépôts de **Val Brillant** (grès quartzitiques)
Au Centre et Sud dépôts de **Burnt Jam Brook** (shales, mudstones, grès)

(13) Silurien précoce (Llandovery)



Au Centre et Sud, dépôts **Matapédia** (turbidites)

(14) Ordovicien tardif



Chevauchement **TACONIQUE** + dépôt syntectonique dans les bassins secondaires
Dépôts de **flyschs**

Figure 3.12 : Série de coupes paléogéométriques faites à partir de la restauration de la ligne sismique 82-152. Les différentes étapes sont expliquées en dessous de chacune des coupes et détaillées dans le texte.

3.7. ANALYSE DES RESULTATS DU MODELE SURFACIQUE A L'AGE ACTUEL DE LA ZONE BOURQUE

3.7.1. PROBLEMES RENCONTRES LORS DE LA CONSTRUCTION DU MODELE AVEC LE LOGICIEL GOCAD

L'interpolateur DSI a eu tendance à avoir des effets de résonance, c'est-à-dire : i) à accentuer la courbure de certains points dans les zones où les données étaient disparates (par exemple entre les pointés sismiques, Figure 3.13) ; ii) à horizontaliser les surfaces là où il n'y avait pas assez de données (par exemple dans la partie sud-ouest de la zone Bourque ; Figure 3.8). Pour résoudre le premier problème, il a fallu insérer des points interpolés visuellement entre les données des coupes sismiques suivant un quadrillage serré (coupes parallèles et perpendiculaires aux structures représentées par des courbes afin de former un squelette correspondant par exemple à des axes de plis antiforme et synforme) afin d'éviter les courbures involontaires. Pour résoudre le deuxième problème, il a fallu intégrer aux modèles une série de coupes structurales faite à partir des cartes géologiques afin de mieux contraindre les zones ne possédant pas assez d'informations en profondeur.

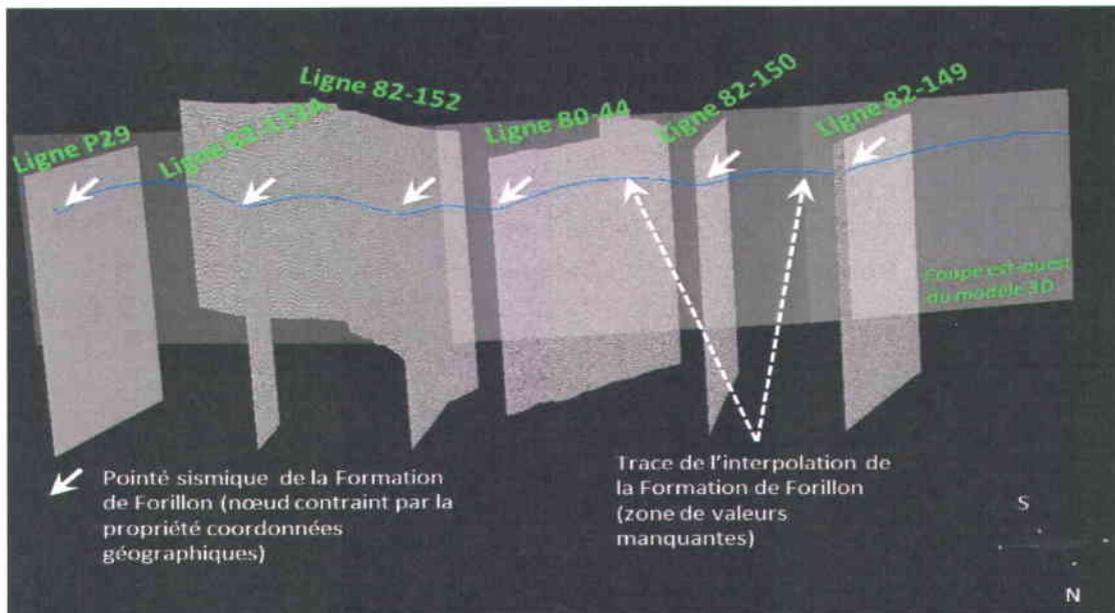


Figure 3.13 : Coupe est-ouest dans gOcad montrant l'accentuation de la courbure survenue lors de l'interpolation de la Formation de Forillon. La première interpolation effectuée à partir des données provenant des lignes sismiques, a provoqué une courbure qui n'était pas liée à l'interprétation.

Des problèmes sont également apparus lors de la mise en place d'horizons faillés. Dans le cadre de l'interpolation de surfaces triangulées qui ont été découpées par des failles inverses, les pointés sismiques (et autres points de données) proches d'une faille inverse, étaient attirés par des points situés de l'autre côté de la faille (Figure 3.14). Les surfaces correspondant aux horizons croisaient les surfaces correspondant aux failles. Une première méthode a été testée : toutes les données proches des failles inverses ont été

retirées laissant l'interpolateur gérer le jeu des failles (jeu qui a été précisé dans le *workflow* du logiciel) puis réarrangées manuellement. Ainsi, les points de données ne sont plus attirés par l'autre côté de la faille.

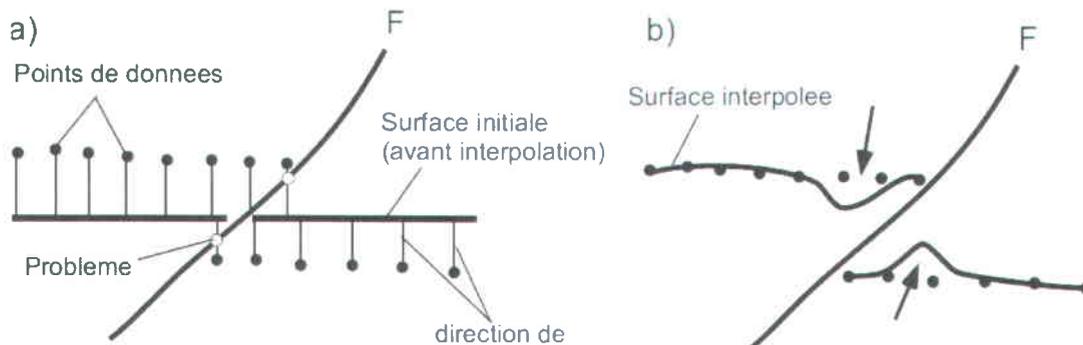


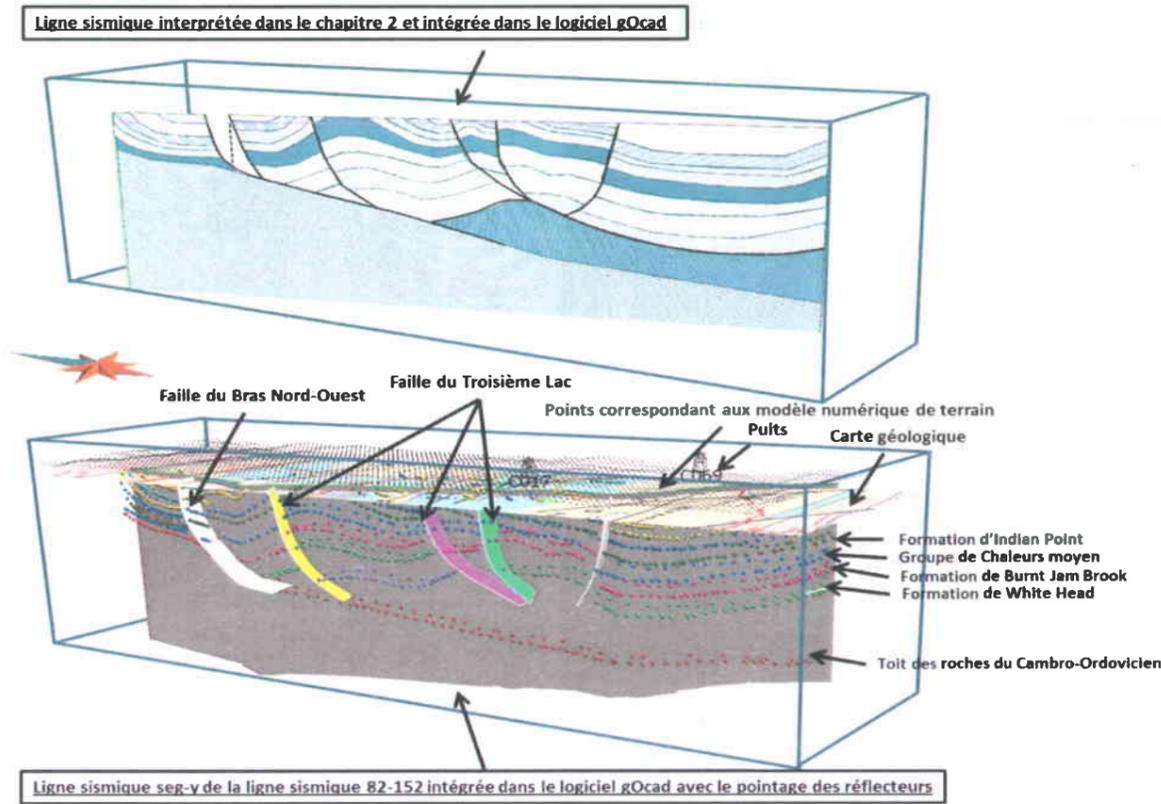
Figure 3.14 : La direction des contraintes (a) est telle que la surface triangulée (présentée en coupe) ne peut être correctement interpolée (b) de chaque côté de la faille (F) (Souche, 2005).

3.7.2. CONSTRUCTION DU MODELE SURFACIQUE EN TROIS DIMENSIONS

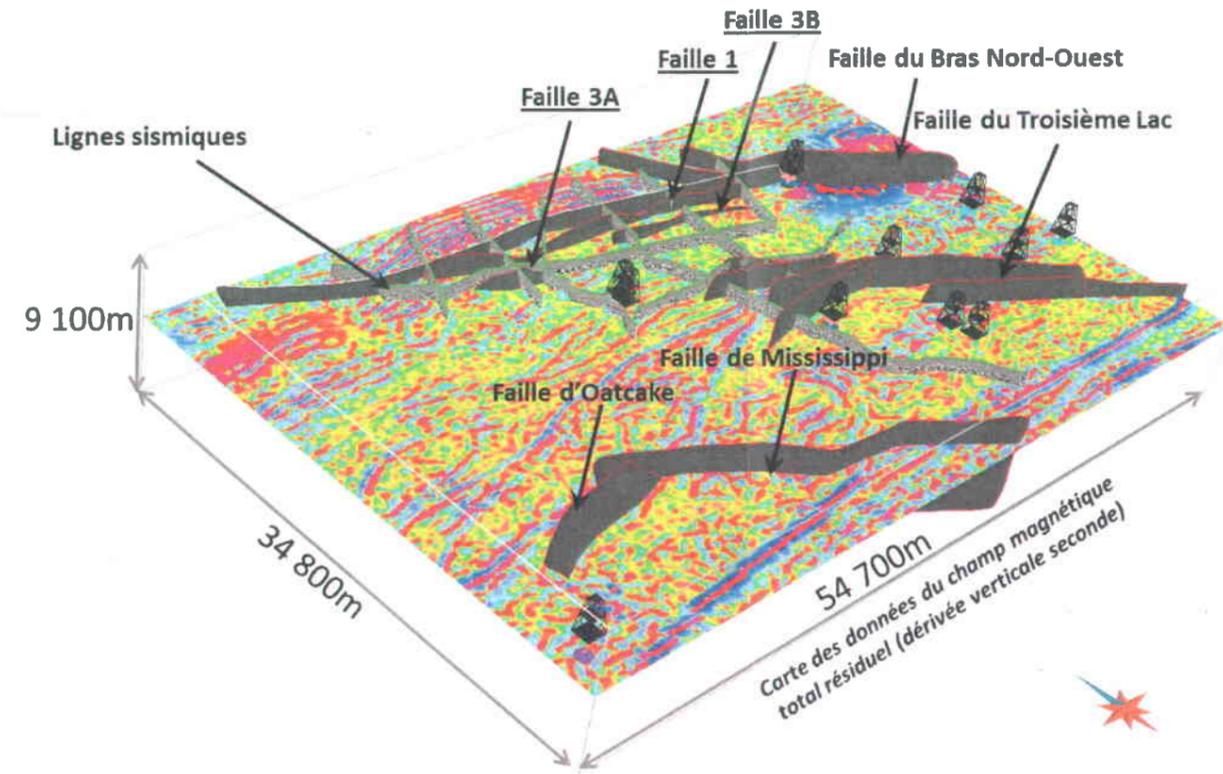
Le modèle surfacique en trois dimensions à l'âge actuel (Figure 3.15, C) nous renseigne sur la géométrie de la zone Bourque. L'interprétation des données sismiques dans un univers en trois dimensions a permis d'améliorer le positionnement des horizons entre les lignes sismiques et des failles existantes et de répertorier de nouvelles failles (Figure 3.15, A). En effet, en mettant en lien l'interprétation de l'ensemble des lignes sismiques et les données de puits, il s'avère que le **toit des roches du Cambro-Ordovicien** (Figure 3.15, D) est : i) **moins profond dans le bloc Nord** (entre 0 et 2000 m de profondeur : les données cartographiques et l'interprétation des lignes sismiques indiquent que les roches du Cambro-Ordovicien sont en contact avec la Formation d'Indian Point et localement la Formation de West Point), ii) **un peu plus profond dans le bloc Est** (entre 2000 et 3000 m de profondeur : les puits Gaspé Sud n°1 (C093) et Blanchet situés dans le bloc Centre, indique le sommet des roches du Cambro-Ordovicien respectivement à 2860 m et à 1185 m) et iii) **profondément enfouis dans le bloc Ouest** (entre 5000 et 6000 m ; par contre il existe une grosse incertitude sur la profondeur exacte des roches taconiennes dans le bloc Ouest puisqu'il n'y a aucune ligne sismique ni aucun puits qui peuvent nous renseigner dans cette zone).

L'interprétation des lignes sismiques dans un univers en trois dimensions permet également d'avoir une vue d'ensemble du réseau de failles (Figure 3.15, B). Ainsi, plusieurs failles ont été interprétées sur différents profils sismiques et s'avèrent faire partie de trois failles (**failles 1, 3A et 3B**; Figure 3.15, B) appartenant au même système de faille que la FBNO. La création d'un réseau de failles en 3D a permis par la suite de vérifier la cohérence de ce réseau en ajoutant aux interprétations des lignes sismiques d'autres données (par exemple des données de cartographie, de géophysique comme la carte du maximum de dérivée horizontale du champ de gravité, etc.).

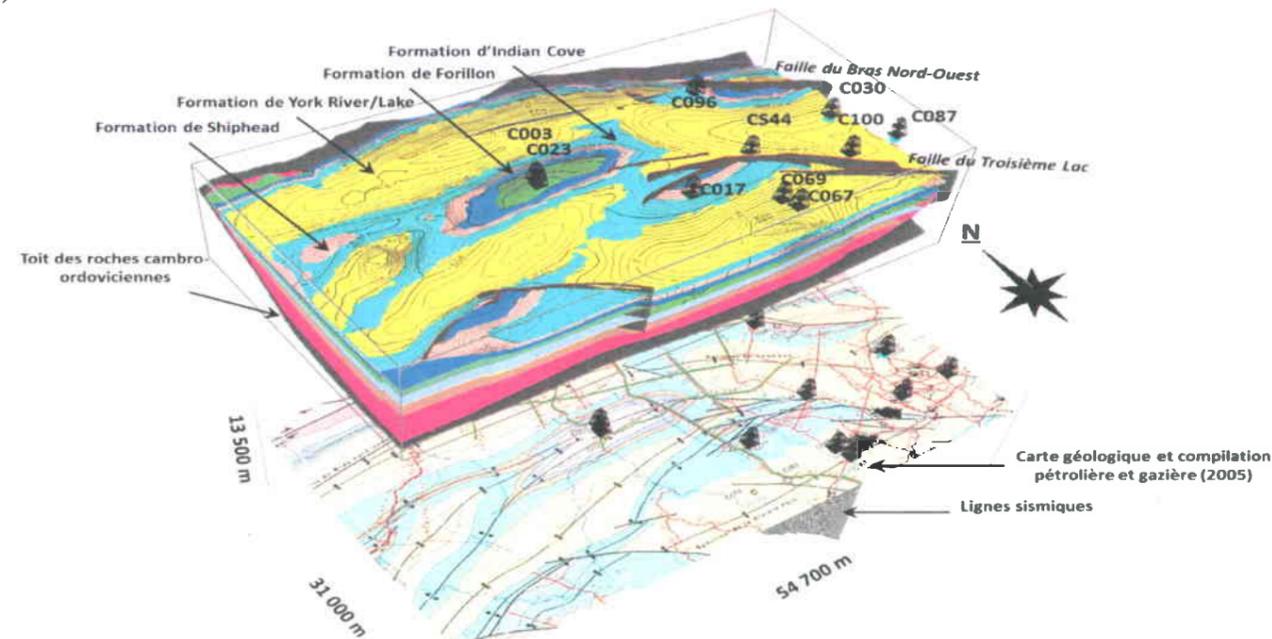
A)



B)



C)



D)

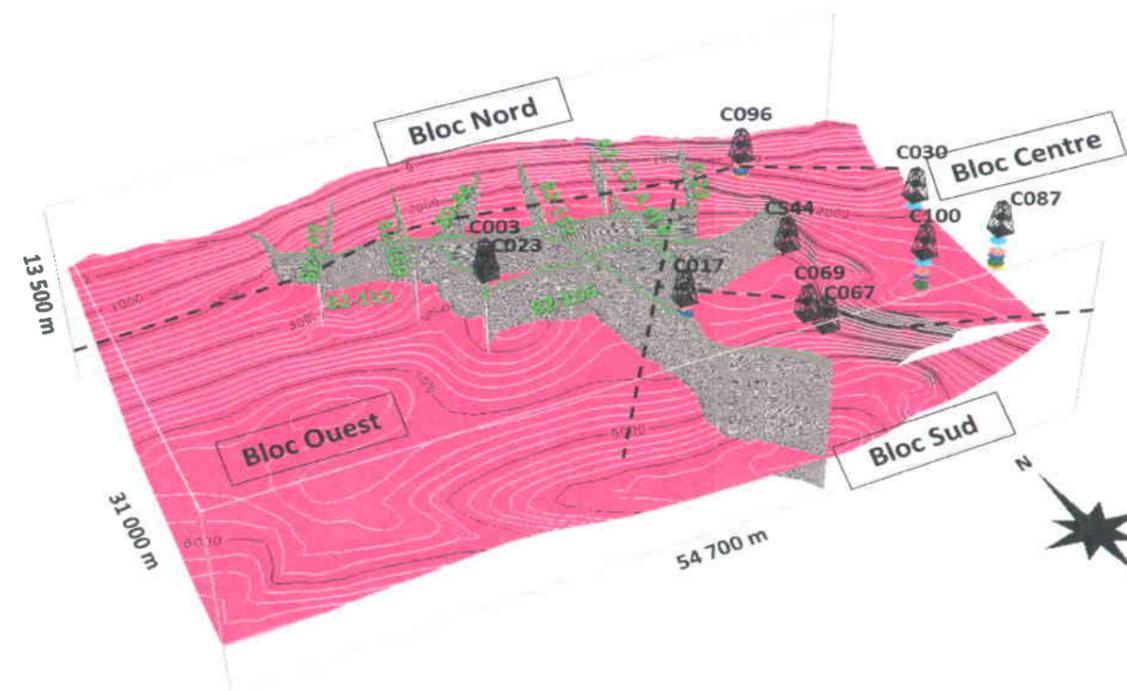


Figure 3.15 : Différentes visualisations en trois dimensions dans le logiciel gOcad. A) Visualisation 3D de l'interprétation de la ligne sismique 82-152 provenant du chapitre 2 et des données SEG-Y de cette même ligne, avec les données des points des réflexions et la surface des failles; B) Visualisation 3D du réseau de failles, des lignes sismiques, des puits et de la carte des données du champ magnétique total résiduel; C) Visualisation 3D de l'ensemble des horizons, modélisés en surface, qui composent la zone Bourque avec le réseau de failles et la position des puits et la correspondance sur la carte géologique; D) Visualisation 3D de la forme du toit des roches cambro-ordoviciennes, des puits, des lignes sismiques et des différents blocs (bloc Nord, bloc, Centre, bloc Sud et bloc Ouest) délimités par des pointillés. Le toit de cette formation est plus haut à l'est (entre 2000 et 3000m de profondeur) qu'à l'ouest (entre 5000 et 6000 m).

3.8. ANALYSE DES RESULTATS DE LA RESTAURATION SURFACIQUE DE LA FORMATION DE FORILLON

L'interpolation des surfaces peut engendrer des erreurs, il est donc nécessaire de vérifier le modèle surfacique. Pour cela la méthode inverse (la restauration surfacique) a été choisie (Figure 3.16). Le logiciel gOcad permet d'effectuer des restaurations surfaciques selon plusieurs méthodes. Il faut choisir en premier la méthode la plus adaptée au cas d'étude parmi celles proposées dans ce logiciel. Il faut ensuite choisir une surface à restaurer correspondant à un niveau compétent. Ensuite, la réalisation de tests est nécessaire afin de déterminer la marge d'erreur acceptable du pourcentage de déformation de la surface restaurée. Pour finir, la surface est restaurée et il est alors possible de calculer son taux de raccourcissement.



Figure 3.16 : Méthode de travail pour la restauration surfacique du toit de la Formation de Forillon. L'étude de la dilatation sur la surface restaurée permet de faire un travail itératif afin d'obtenir une surface avec un minimum de déformation partant du postulat que la Formation de Forillon est une formation pas ou peu déformée.

3.8.1. CHOIX DE LA METHODE DE RESTAURATION

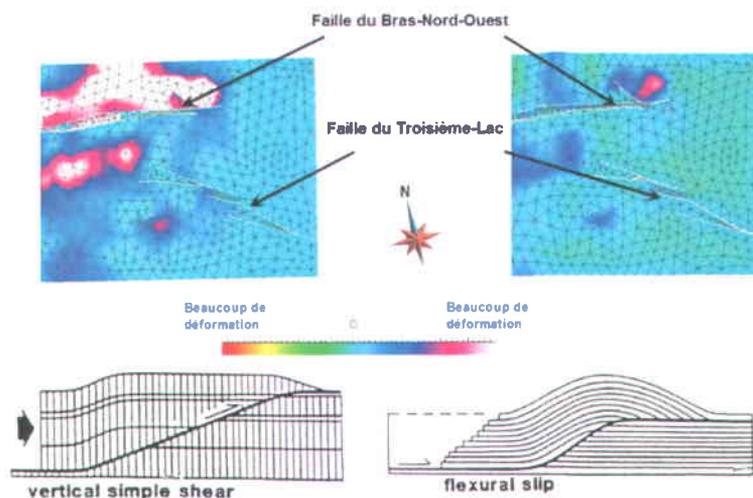


Figure 3.17 : Les deux types de méthode de restauration (surface correspondant à la base de la Formation de Forillon restaurée grâce aux deux méthodes proposées dans gOcad). La méthode de *vertical simple shear* engendre beaucoup de déformation contrairement à la méthode du *flexural slip*.

En géologie, il existe deux sortes de plis : les plis isopaques (l'épaisseur des couches est conservée) et les plis anisopaques (l'épaisseur des couches n'est pas conservée). La zone Bourque étant du type compressif-décrochant et étant caractérisée par des plis de type isopaques, la méthode du *flexural slip* dans gOcad a été privilégiée. De plus, la méthode par *flexural slip* est plus stable car elle engendre moins de déformation du modèle (Figure 3.17).

3.8.2. TEST DE LA RETRO-DEFORMABILITE D'UNE FEUILLE DE PAPIER DANS GOCAD

Au cours des essais de restauration avec le logiciel gOcad, aucun résultat n'était probant. Afin de s'assurer de la fiabilité de la méthode de restauration dans le logiciel, un objet rétro-déformable (une feuille de papier pliée) a été restauré. Le choix de la forme de cette feuille pliée est important pour deux raisons : elle est proche de la géométrie de la principale structure plicative de la zone Bourque (i.e. l'anticlinal d'Holland-Mont Bald) et cette forme est rétro-déformable.

La technique de restauration surfacique dans gOcad est basée sur les propriétés géologiques suivantes : **la conservation des aires, la conservation des longueurs, et la minimisation de la déformation.** Les essais de restauration grâce au logiciel gOcad avec la méthode de *flexural slip* pour la feuille de papier pliée, permet de constater que l'aire total de l'objet est respectée, mais que les longueurs des arrêtes de l'objet atteignent jusqu'à 12 % de différence. Localement, des déformations dues à une forte dilatation des triangles ont été observées sur la surface restaurée. Elles atteignent jusqu'à 20% dans les zones éloignées du point d'ancrage de la restauration qui se trouve en haut de la pyramide. L'ensemble des pourcentages de déformations locales qui apparaissent après restauration de la feuille de papier pliée montre une moyenne comprise entre -3 et 3 %, sauf exception locale qui peut atteindre jusque 20% de différence (Figure 3.18, D). **Nous estimons donc comme admissible une surface qui, après restauration, a des défauts de dépliage locaux de moins de 3 %.**

Ces constatations indiquent qu'il faudra faire attention aux résultats de restauration affichés grâce au logiciel gOcad. Les résultats du taux de raccourcissement de la restauration surfacique grâce à une méthode géométrique (conservation de l'aire totale et conservation des longueurs) seront conservés. La méthode de minimisation de la déformation sera utilisée juste pour repérer et réajuster des points de données où les zones de déformations seront jugées excessives.

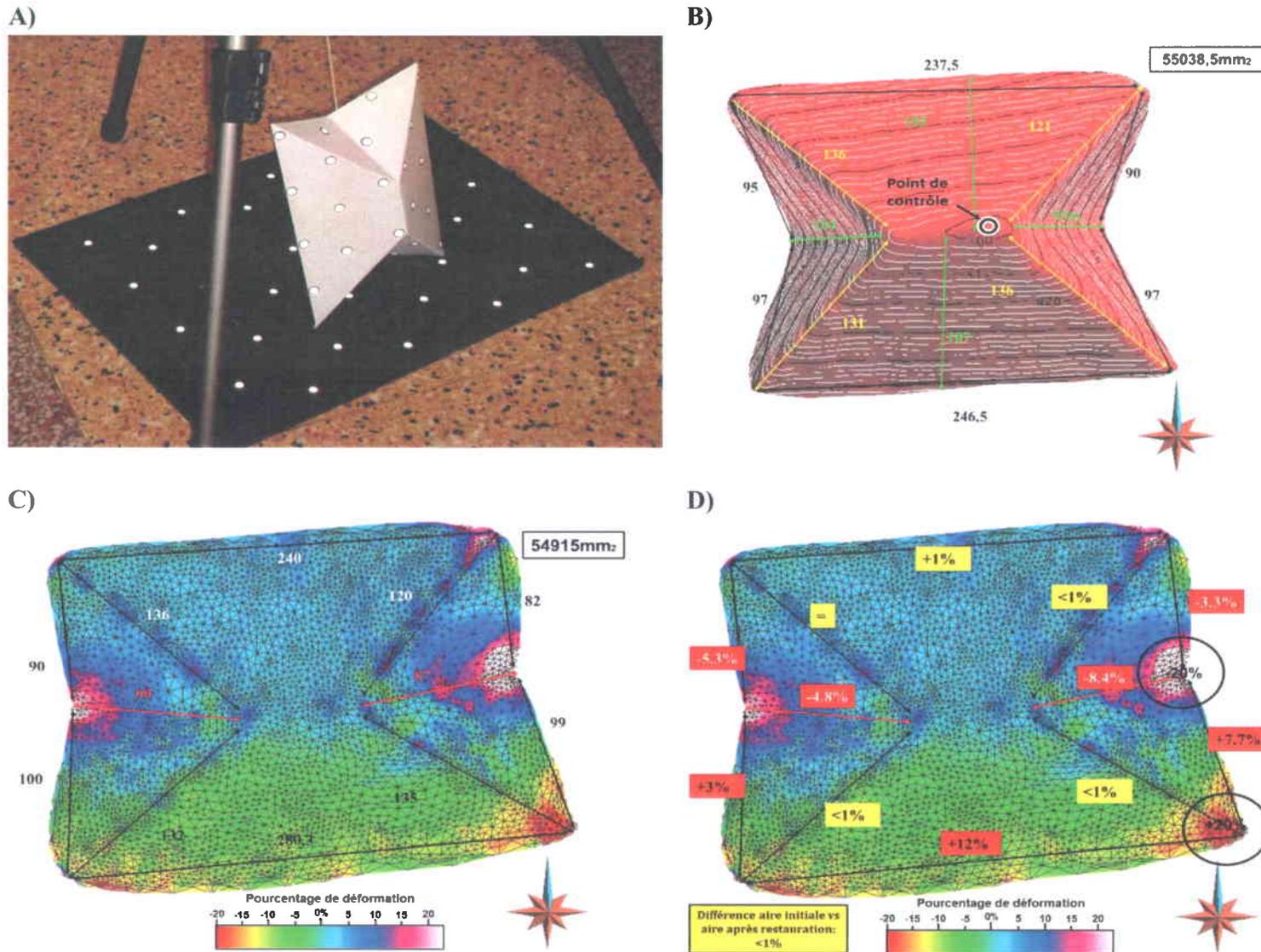


Figure 3.18: Essai de restauration grâce au logiciel gOcad avec la méthode de *flexural slip* pour un pli rétro-déformable. A) Feuille de papier modélisée avec Handyscan à l'université Laval en 2009 ; B) Feuille de papier modélisée dans gOcad. Les unités sont en millimètre. L'aire totale de cette surface est de 55038mm² ; C) Restauration de la surface et comparaison des distances. Ces dernières ne sont pas respectées, ainsi que la forme initiale de l'objet (i.e. une feuille de papier rectangulaire). Néanmoins l'air total ne varie que d'1% ; D) Des déformations sont visibles sur la surface restaurée. Elles atteignent jusqu'à 20% dans les zones éloignées du point d'ancrage de la surface restaurée qui se trouve en haut de la pyramide.

3.8.3. RESTAURATION DE LA SURFACE CORRESPONDANT A LA BASE DE LA FORMATION DE FORILLON

Tout comme dans la restauration en coupe, le choix de la surface de référence s'est porté sur la surface représentant la base de la Formation de Forillon pour les mêmes raisons indiquées dans la partie 3.6.1. Cette surface restaurée a permis l'étude de la dilatation de la surface subie suite à la restauration. La dilatation montre les endroits où il y a une déformation exagérée de la surface indiquant généralement soit une mauvaise interprétation, soit une déformation ductile locale à vérifier.

Après avoir testé les deux techniques de restauration dans gOcad, il a été convenu d'utiliser la méthode *flexural slip*, or dans le logiciel il existe deux fonctions pour cette méthode : la fonction simple et la fonction *flexural slip and unfault* (raccord des failles). La fonction *flexural slip and unfault* a été testée en comparant un dépliage global (méthode de déformation continue) et un dépliage « bloc plissé » par « bloc plissé » (méthode de déformation discontinue). La différence (Figure 3.19) s'avère importante parce que la restauration avec raccord des failles force une déformation en cisaillement des surfaces pour les ajuster, ce qui est incompatible avec le respect du principe de développabilité (cette déformation s'additionne à celle liée aux défauts du dépliage, elle atteignait plus de 10 % localement **sur les premières surfaces modélisées** présentées sur la Figure 3.19). La méthode de travail s'est donc effectuée en deux étapes :

1. Utiliser la méthode de déformation discontinue, jusqu'à ce que les failles se raccordent le mieux possible.
2. Puis, utiliser la méthode de déformation continue pour une étude de la restauration plus rapide et globale de la surface.

Après restauration de la surface correspondant à la base de la Formation de Forillon, le taux de raccourcissement a été estimé à 3,8 % (très faible) (Figure 3.21) avec des déformations internes ne dépassant pas $\pm 2,5$ %. Il a été estimé comme admissible une surface qui, après restauration, avait des défauts de dépliage locaux de moins de 3 % (valeur calibrée lors du dépliage de la feuille de papier) (Figure 3.18; Figure 3.20). Ce taux de raccourcissement de 3,8 % ne représente qu'un minimum, car une partie de la surface s'est tout de même adaptée par cisaillement lors de la restauration, autant au niveau du rejet des failles (avec le *Constrained Mapping*) autant avec la déformation interne au niveau du flanc des plis.

Des tests sur une restauration simultanée de plusieurs surfaces n'ont pas été probants. Ceci implique qu'avec le logiciel gOcad, les surfaces d'un même modèle ne définissent pas un volume (une strate rocheuse) avec une épaisseur variable, mais juste plusieurs surfaces. En effet, les surfaces restaurées sont remises à l'horizontale quel que soit la géométrie du modèle géologique initial et il n'est donc pas possible de restaurer une surface en fonction de l'autre. Cette remarque a aussi été constatée dans la thèse d'Aubiès-Trouilh (2009).

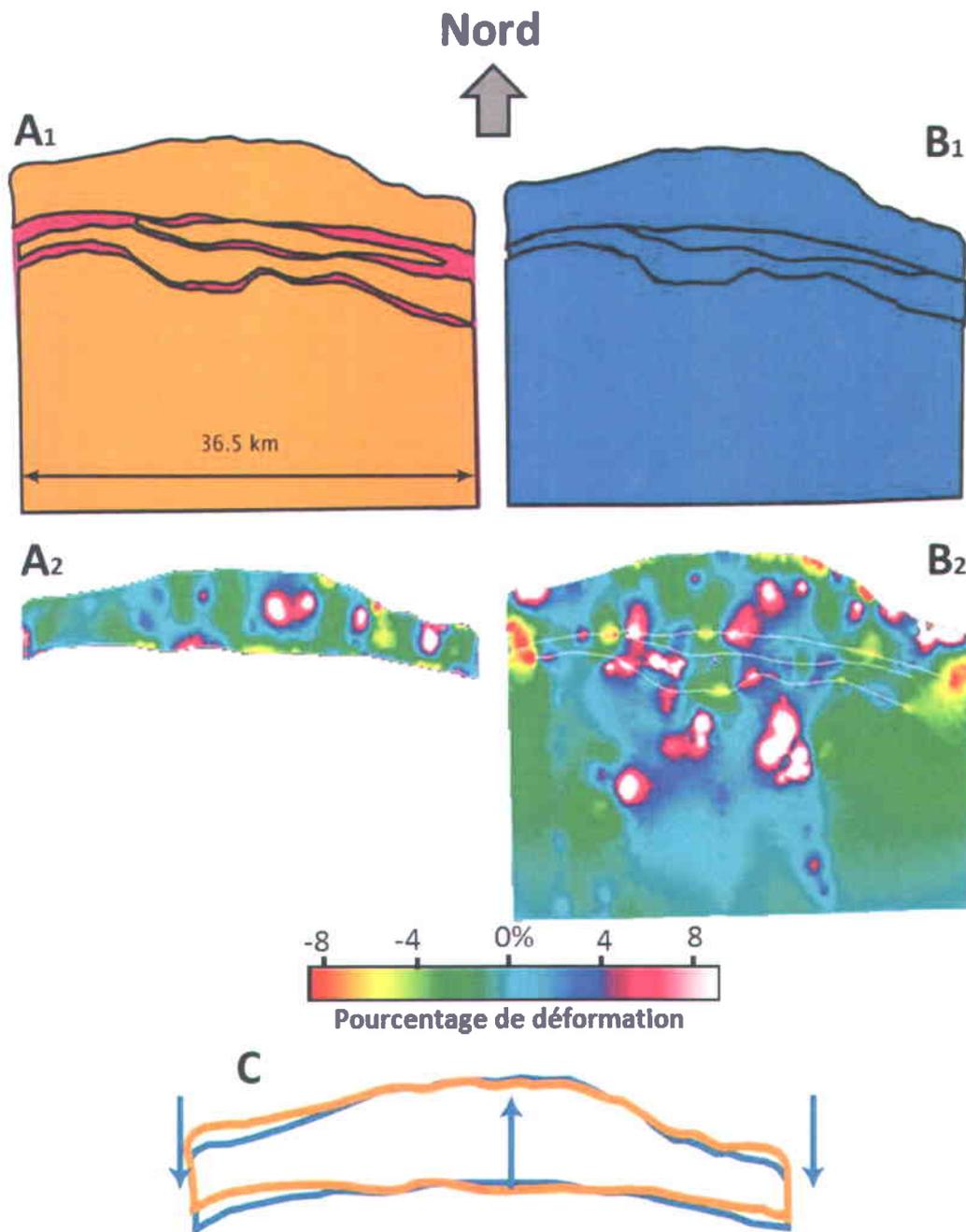


Figure 3.19 : Étude des deux fonctions (avec ou sans raccord des failles) de la méthode *flexural slip* sur la surface Forillon découpée par trois failles. A₁) Restauration par bloc plissés indépendants avec visualisation de défauts de raccord le long des failles (en rouge); A₂) déformations internes associées à la restauration bloc par bloc (donc sans raccord de la faille sous-jacente); B₁) Restauration globale en ajustant les failles par déformation en cisaillement simple des surfaces plissées : ajustage parfait; B₂) Déformations internes associées à la restauration globale. Les déformations de 10 % sont plus nombreuses sur la surface restaurée par la fonction avec raccord des failles. Les déformations sont également localisées sur les bords de l'anticlinal; C) Comparaison de la déformation d'un même bloc selon la fonction de dépliage : par bloc indépendant (jaune) ou globalement (bleu), la surface bleu a été cisailée pour s'ajuster sur les failles.

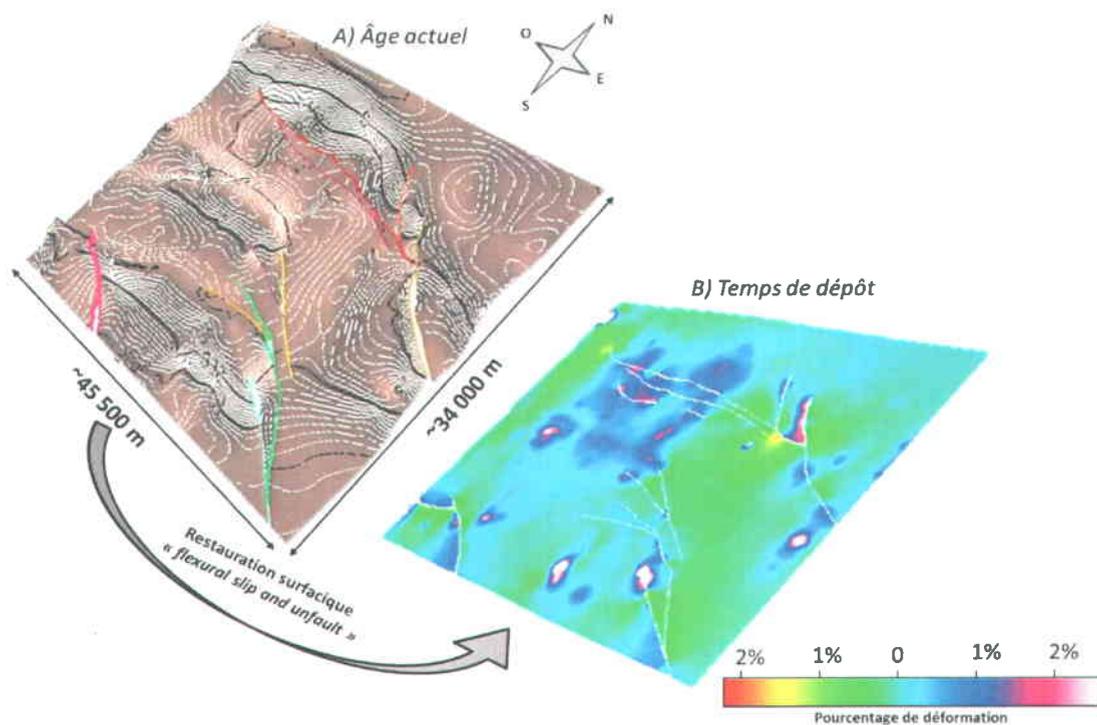


Figure 3.20 : Mise en valeur de la déformation sur la surface Forillon restaurée par la méthode *flexural slip and unfault*. La déformation n'atteint plus que 2,5 % localement.

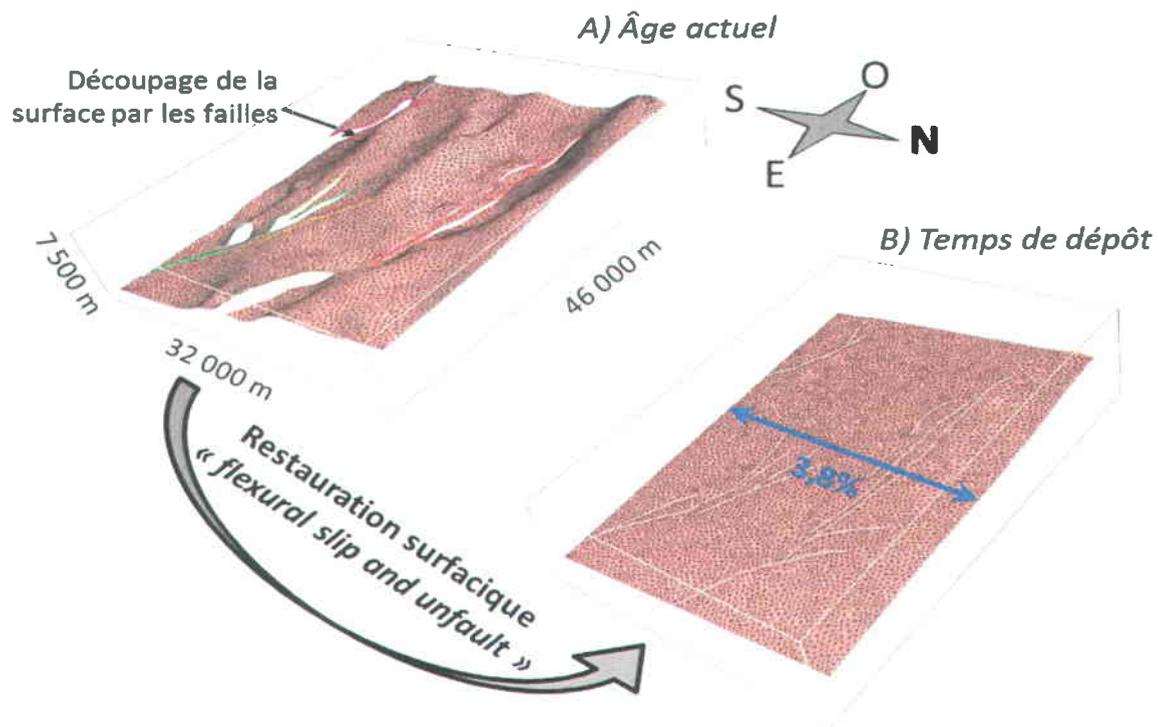


Figure 3.21 : Restauration de la surface correspondant à la base de la Formation de Forillon. Le taux de raccourcissement a été évalué à 3,8 %.

3.9. DISCUSSION DES RESULTATS

La restauration d'une coupe permet de tester l'acceptabilité d'une interprétation et peut fournir la géométrie d'une série sédimentaire avant déformation. C'est avec cette méthode que la paléogéométrie de la ligne sismique 82-152 a été réalisée. La série de coupes paléogéométriques nous a fourni une première hypothèse sur l'évolution de la zone Bourque et nous a permis d'étudier et de comprendre la chronologie des failles. Les points à retenir sont les suivants (voir Figure 2.14 et Figure 3.12):

- Au Silurien précoce (Llandovérien tardif), les failles normales (FBNO et FTL) se sont initialisées lors du dépôt des formations de Burnt Jam Brook et de Val Brillant.
- Au Siluro-Dévonien, une phase régressive (l'érosion salinique) a érodé au nord des roches inférieures à la Formation de West Point jusqu'aux roches de la nappe de la Rivière Sainte-Anne. La paléogéométrie ne permet pas de savoir quelles sont ces roches concernées par cette érosion et quelle était l'épaisseur déposée puis érodée.
- Au Praguien, le jeu des failles normales s'est ralenti. Sur la coupe de la ligne sismique 82-152, seule la FBNO est active en faille normale durant cette période.
- Au Dévonien précoce (Emsien), aucun élément n'indique sur la coupe que les failles étaient actives.
- Du Dévonien moyen jusqu'au Carbonifère précoce : C'est le début de l'orogénèse acadienne avec l'initialisation des plis, de grands chevauchements dans les formations cambro-ordoviciennes et la création de nouvelles failles (Figure 3.11, numérotées 2, 4 et 5) et le jeu décrochant des deux principales failles (FBNO et FTL).
- Du Carbonifère précoce jusqu'au tout début du Permien : Les roches du bassin siluro-dévonien ont subi une importante érosion qui n'est pas quantifiable avec la reconstitution paléogéométrique, tout comme le dépôt en discordance des roches du Carbonifère, après l'érosion acadienne.
- A partir du Permien et jusqu'à l'âge actuel, s'est effectuée l'érosion des roches du Carbonifère et sûrement d'une partie des roches du Siluro-Dévonien. La restauration en coupe et l'étude de la paléogéométrie ne permet ni de quantifier ni de savoir quand a eu lieu cette érosion.

Les déplacements le long des failles ont été étudiés, il reste donc à quantifier les taux de sédimentation/d'érosion. Pour cela nous préconisons l'utilisation d'un simulateur de bassin et l'étude des données de réflectance de la vitrinite.

Dans ce chapitre, nous cherchions également à quantifier la déformation au sein du système. L'étude de la **restauration en coupe** a permis de calculer un **taux de raccourcissement de 9 %** pour la Formation de Forillon qui se rapproche du raccourcissement tectonique total puisque dans la zone Bourque aucun clivage important

n'a été observé. C'est un résultat en accord avec ceux trouvés par Kirkwood (1993) dans le même domaine (i.e. le *Gaspé Folded Belt*). L'étude de la restauration surfacique a été effectuée en complément de la restauration en coupe, puisque cette dernière ignore toutes les déformations transverses à cause du plongement 2D des coupes, qui impose l'hypothèse d'une déformation plane parallèle au plan de coupe. Or, lors de l'orogénèse acadienne, la zone Bourque a subi un mouvement en décrochement dextre au niveau de ses deux failles principales (i.e. FBNO et FTL). Le **taux de raccourcissement** calculé après la **restauration surfacique** a été estimé à **3,8 %**. Ces deux résultats démontrent que la zone Bourque est très peu déformée par rapport à d'autres endroits en Gaspésie et cela justifie l'utilisation du simulateur de bassin qui utilise la méthode de restauration en *Backstripping* dans le chapitre 4.

La construction du modèle surfacique 3D à l'âge actuel nous a permis d'avoir la géométrie de la zone Bourque, d'améliorer le positionnement des horizons et des failles existantes et de répertorier de nouvelles failles. C'est ainsi que plusieurs failles interprétées sur différents profils sismiques et ne correspondant à aucune faille sur la carte géologique, ont été attribuées à trois failles (failles 1, 3A et 3B ; Figure 3.15, B). En ce qui concerne la cohérence de ce réseau de failles, il s'avère que les failles du Bras Nord-Ouest et du Troisième Lac sont des failles possédant plusieurs ramifications, ce qui les rend beaucoup plus complexe pour l'étude des migrations de fluides.

Dans le chapitre 2, le profil sismique 82-156 (corroboré par les puits Blanchet n°1 (C096) et Gaspé Sud n°1 (C093) ; Figure 2.13) mettait en évidence le fait que les formations du Cambro-Ordovicien sont en contact avec celle de la Formation d'Indian Point dans le bloc Centre. Dans ce chapitre, l'interprétation dans son ensemble des lignes sismiques et les données de puits permet d'avoir en trois dimensions la surface correspondant au toit des roches cambro-ordoviciennes (Figure 3.15, D). Ainsi la géométrie de cette surface est représentée par un demi bassin (entre 0 et 2000 m) dans le bloc Nord, un haut-fond à environ 2000 m de profondeur dans le bloc Centre et une « cuvette » (à plus de 4000 m de profondeur) dans les blocs Sud et Ouest.

4. CHAPITRE 4 : APPLICATION DE LA MODELISATION DE BASSIN A LA ZONE BOURQUE DANS LE NORD-EST DE LA GASPEISIE

4.1. INTRODUCTION AU SYSTEME PETROLIER

La formation d'un gisement pétrolier est un enchaînement de processus sédimentaires, géochimiques et tectoniques s'étalant sur plusieurs millions d'années. Bien qu'il existe de nombreux types de gisements, il faut réunir cinq conditions pour que se développe un système pétrolier conventionnel dans un bassin sédimentaire (Tissot et Welte, 1984) :

1) disponibilité d'une roche mère (Figure 4.1, a) dont la matière organique s'est transformée en HC sous l'effet d'une augmentation progressive de la pression/température et qui a expulsé ces HC,

2) disponibilité de conduits (roches, failles, réseaux fracturés; Figure 4.1, b) suffisamment perméables pour permettre la migration des HC,

3) disponibilité d'une roche réservoir (Figure 4.1, c), c'est-à-dire une roche poreuse et perméable se trouvant sur le chemin des migrations.

4) disponibilité d'un piège correspondant à un type d'architecture des couches géologiques (exemple d'un anticlinal; Figure 4.1, e) et incluant une roche couverture empêchant la fuite des fluides (roche couverture; Figure 4.1, d).

5) une chronologie adéquate, ce que les pétroliers ont coutume d'appeler : le « moment critique ». « Il est nécessaire que le piège pétrolier soit formé antérieurement ou de manière synchrone de la maturation des roches mères et de la migration des HC, sous peine que tout le pétrole généré ne puisse s'accumuler dans les zones réservoirs et soit altéré lors de son arrivée en surface » Baudin *et al.*, 2007.

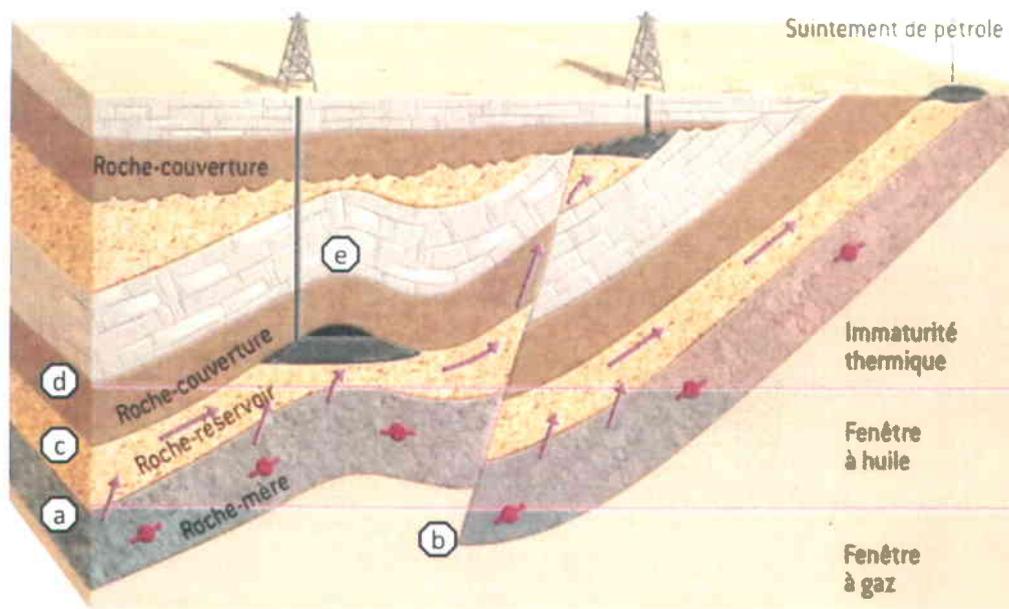


Figure 4.1: Représentation simplifiée d'un système pétrolier. Avec en (a), une roche mère, (b) une faille, (c) une roche réservoir, (d) une roche-couverture, (e) un anticlinal. Les flèches correspondent aux chemins de migrations primaires et secondaires des HC (modifiée de Huc, 2003).

4.2. INTRODUCTION A LA MODELISATION DE BASSIN AVEC L'OUTIL TEMIS 3D

La modélisation de bassin est une modélisation numérique des phénomènes physiques et chimiques qui permet d'estimer les probabilités de présence et de quantité des fluides pétroliers, de localiser les gisements et de recréer l'historique d'un bassin (Tissot et Welte, 1984; Ungerer *et al.*, 1984). Elle est également devenue une technologie importante pour le calcul du risque en exploration et un support indispensable pour les décisions dans les compagnies pétrolières.

Les simulateurs de bassin 1D et 2D sont utilisés depuis les années 1980-90 par les compagnies pétrolières (Doligez *et al.*, 1986; Doligez *et al.*, 1999; Guérillot *et al.*, 1989; Ungerer *et al.*, 1990; Wendebourg and Düppenbecker, 2003). La modélisation de bassin en 1D est utilisée pour la reconstruction de l'histoire thermique et l'évaluation de la maturité de la roche mère. L'approche en 1D peut être satisfaisante pour les transferts thermiques car ils sont généralement verticaux. Les modèles en 2D, en plus des fonctionnalités du 1D, permettent le calcul des pressions, la modélisation des chemins de migration et le remplissage du réservoir. La migration des fluides en 2D ne peut être que qualitative puisqu'elle est sensible à la géométrie 3D et à l'anisotropie (Schneider et Wolf, 2000). C'est pourquoi, dans le cadre de cette thèse, le logiciel Temis 3D a été utilisé.

4.2.1. PRESENTATION DE L'OUTIL DE MODELISATION TEMIS 3D

Le logiciel Temis 3D s'organise de manière intégrée autour de cinq modules principaux (Tableau 4.1 ; Figure 4.4) permettant de traiter les différents phénomènes se produisant dans un bassin pétrolier (Ungerer *et al.*, 1991).

Tableau 4.1 : Les cinq modules pris en compte dans le logiciel Temis 3D. La ligne du haut représente le nom des cinq modules. La ligne intermédiaire donne la liste des principes, lois ou équations contenue dans chacun des modules. La dernière ligne correspond aux principales données simulées.

(a) Géométrie	(b) Température	(c) Circulation monophasique	(d) Maturation et genèse des hydrocarbures	(e) Expulsion et migration des hydrocarbures
<i>Backstripping</i>	<i>Équation de la chaleur selon la loi de Fourier</i>	<i>Loi de Darcy Loi de Terzaghi</i>	<i>Composition du kérogène et craquage en huile selon la loi d'Arrhenius</i>	<i>Flux diphasiques selon la loi modifiée de Darcy</i>
Coupe/surface /modèle à l'état initial	Historique température	Historique de pression Flux aqueux	Historique du Transformation Ratio	Historique saturation Composition des HC GOR, API

- Le **module géométrique** (Tableau 4.1, a) simule l'histoire du bassin, c'est-à-dire la sédimentation, l'érosion et la compaction normale du bassin sans prise en compte des surpressions,
- Le **module thermique** (Tableau 4.1, b) reconstruit l'histoire des températures, en considérant un flux thermique basal et une température de surface fixée,
- Le **module de circulation monophasique** (Tableau 4.1, c) simule la circulation de l'eau et l'évolution de la pression de pores,
- Le **module de maturation et de genèse des hydrocarbures** (Tableau 4.1, d) calcule les taux de transformation du kérogène dans la roche mère,
- Le **module d'expulsion et de migration des hydrocarbures** (Tableau 4.1, e) intègre les modules de circulation monophasique, thermique, de maturation et de genèse des HC. Le formalisme utilisé est une modification de la loi de Darcy, considérant un transport en phase séparée.

4.2.1.1. Le module géométrique

En géologie, la subsidence représente l'enfouissement au cours du temps d'un bassin sédimentaire. Dans le logiciel Temis 3D, l'étude de l'évolution de la subsidence consiste à reconstituer l'état de la colonne sédimentaire aux époques de dépôts en décompactant les épaisseurs actuelles selon la technique connue sous le nom de *Backstripping* (Figure 4.2 ; Perrier et Quilbier, 1974; Ungerer *et al.*, 1991) Le processus est en une dimension.

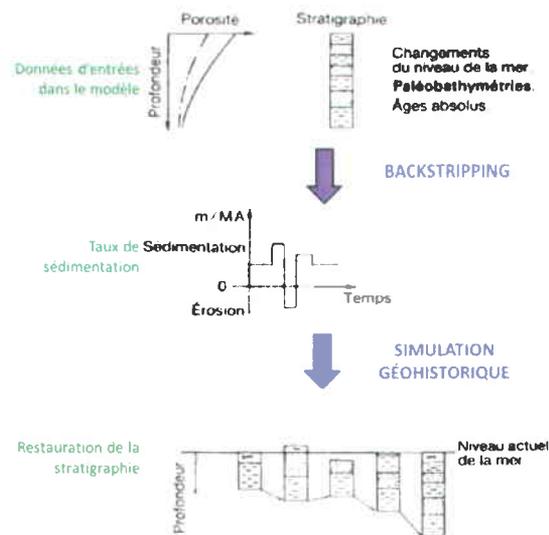


Figure 4.2 : Simulation de la restauration géométrique d'une colonne sédimentaire 1D (modifié d'Ungerer *et al.*, 1991). Seuls les déplacements verticaux sont pris en considération, ce qui revient à négliger les déplacements et les déformations liés au jeu de failles et aux plissements. Des courbes normales d'évolution de la porosité en fonction de la profondeur, jointes à la stratigraphie, sont utilisées pour calculer les vitesses de sédimentation aux diverses étapes par la méthode de *Backstripping*.

Cette technique d'analyse utilise la loi de variation de la porosité en fonction de la profondeur (Eq. 4.1) :

$$\Phi(z) = \Phi_0 e^{-cz} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

- Φ : porosité de la roche (%)
- Φ_0 : porosité primaire de la roche (%)
- c : constante de compaction en fonction de la lithologie
- z : profondeur (m)

La géométrie du toit de chaque unité stratigraphique peut être ainsi reconstruite au cours des temps géologiques, puisque les courbes de porosité en fonction de la profondeur permettent de décompacter les différentes couches et déterminent leur épaisseur à travers le temps (Figure 4.2). Ces courbes normales d'évolution de la porosité en fonction de la profondeur, jointes à la stratigraphie, sont utilisées également pour calculer les vitesses de sédimentation aux diverses étapes. Ces vitesses de sédimentation permettent une simulation des géométries pour laquelle deux possibilités existent (Ungerer *et al.*, 1991) :

- 1) la compaction est calculée d'après les courbes initiales de porosité/profondeur et l'effet de surpressions éventuelles sur les épaisseurs est alors négligé (la géométrie de la colonne à la fin de la simulation est exactement celle introduite en données) ;
- 2) la compaction est calculée en reliant la porosité à la contrainte effective et en utilisant la loi de Darcy (Eq. 4.6) pour quantifier l'écoulement des fluides, ce qui permet de tenir compte des surpressions et de la sous-compaction (des différences sensibles peuvent s'observer si certains niveaux sont sous-compactés).

4.2.1.2. Le module thermique

Dans un bassin sédimentaire, les phénomènes thermiques sont importants. Ils influencent les phénomènes géologiques à différentes échelles, la diagénèse minérale, la maturation de la matière organique, etc. Les phénomènes thermiques ont une source externe (l'énergie solaire : non explicitée ici) et deux sources internes, l'une provenant de la chaleur générée par le manteau et par les sédiments (**flux thermique**) et l'autre provenant de la chaleur radiogénique produite par la croûte terrestre (Lachenbruch, 1970). Il existe plusieurs modes de transfert de chaleur qui doivent être distingués (Biju-Duval, 1999) :

- La convection (transfert de masse) qui est liée aux circulations des fluides,
- La conduction (agitation moléculaire), mode dominant dans les bassins sédimentaires, la conductivité thermique étant très variable selon le type de roches,
- Le rayonnement, négligeable par rapport aux modes précédents.

Dans le logiciel Temis 3D, le lien entre ces trois modes de transfert thermique se fait par l'équation de la Chaleur (Eq. 4.2) (Ungerer *et al.*, 1991):

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \underbrace{-(\rho C \vec{V}_s + \rho_w C_w \vec{u}) \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{Convection}} + \underbrace{\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}}_{\text{Conduction}} + PCR \quad (\text{Eq. 4.2})$$

ρ, ρ_w = respectivement la densité des sédiments et de l'eau (kg.m^{-3})

C, C_w = respectivement la capacité calorifique de la roche et de l'eau ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

V_s = vitesse d'enfouissement (m.s^{-1})

\vec{u} = vitesse de filtration de l'eau en fonction de la matrice encaissante (m.s^{-1})

λ = conductivité thermique des sédiments en fonction de l'enfouissement ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

PCR = Production de Chaleur par Rayonnement (W.m^{-3})

Z = profondeur (m)

T = température (K)

t = temps (s)

Le flux de chaleur correspond à une énergie par unité de surface. Sa valeur peut aller de 30 mW.m^{-2} à 300 mW.m^{-2} . Lorsque la chaleur W traverse une surface S, on obtient la densité de flux de chaleur **HF** (Eq. 4.3) qui correspond à l'énergie dissipée par unité de surface (en mW.m^{-2}).

$$HF = \frac{W}{S} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

En moyenne, le flux de chaleur est de $65 \pm 1,6 \text{ mW.m}^{-2}$ pour les continents et de $101 \pm 2,2 \text{ mW.m}^{-2}$ pour les océans (Turcotte et Schubert, 2002).

Dans le logiciel Temis 3D, le lien entre le flux de chaleur et le gradient géothermique est donné par la **loi de Fourier** (Eq. 4.4):

$$HF = \Lambda . dT/dz \quad (\text{Eq. 4.4})$$

HF = flux de chaleur (mW.m^{-2})
 Λ = conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 dT/dz = gradient géothermique (K.m^{-1})

La loi de Fourier montre que l'augmentation de la température n'est pas linéaire avec la profondeur mais dépend de la **conductivité thermique**. Cette dernière est importante puisqu'elle est variable selon le type de roches et varie en fonction de la profondeur (Turcotte et Schubert, 1982). Elle est fonction de la conductivité thermique de l'eau, de celle des sédiments et de la porosité de la roche. Elle est donnée par la relation empirique de l'équation 4.5 :

$$\Lambda = \Lambda_S \left(\frac{\Lambda_W}{\Lambda_S} \right)^\Phi \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Λ_W = conductivité thermique de l'eau ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 Λ_S = conductivité thermique du sédiment ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 Φ = porosité (%)

4.2.1.3. Le module de la circulation monophasique

Le logiciel Temis 3D permet de considérer deux types de circulation de fluides : d'une part une circulation liée à la compaction et d'autre part, une circulation hydrodynamique régionale. La formulation universelle pour décrire les écoulements en milieux poreux est la **loi de Darcy** (Eq. 4.6):

$$V_w = - \frac{K}{\mu_w} (\nabla P - \rho_w g) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

V_w = vitesse de filtration dans le référentiel de la matière rocheuse (m.s^{-1})
 K = perméabilité intrinsèque (m^2)
 ρ_w = masse volumique de l'eau (kg.m^{-3})
 g = accélération de la pesanteur (m.s^{-2})
 μ_w = viscosité de l'eau (Pa.s)
 P = pression de pores (Pa)

Dans le logiciel Temis 3D, la perméabilité intrinsèque est définie par une loi de type **Kozeny-Karman**, Cette relation traduit la variation de la perméabilité en fonction de la surface spécifique et de la porosité (Ungerer *et al.*, 1991). Deux formules sont possibles (Eq. 4.7, a et b):

$$K = \frac{0,2 \Phi^3}{S_0^2(1 - \Phi)^2} \text{ si } \Phi \geq 10\% \text{ (sables et grès)} \quad (\text{a}) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$K = \frac{20 \Phi^5}{S_0^2(1 - \Phi)^2} \text{ si } \Phi < 10\% \text{ (argiles)} \quad (\text{b}) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

K = perméabilité intrinsèque de la lithologie (m²)

S₀ = surface spécifique de la matrice rocheuse (m².m⁻³)

Φ = porosité globale (%)

L'adaptation de la loi de Kozeny-Karman pour des porosités faibles (Eq. 4.7, b) va permettre de rendre compte de flux très lents.

Pour ce qui est de la compaction et des surpressions, la description de ces phénomènes est fondée sur la **loi de Terzaghi**. La loi porosité - contrainte effective est utilisée pour décrire l'évolution de la porosité lors de l'enfouissement, prenant en compte la contrainte lithostatique et la pression de fluide. Une relation empirique (Eq. 4.8) permet de relier ces deux paramètres pour chaque type de lithologie considéré :

$$\Phi(\sigma) = \Phi_1 + \Phi_a \cdot e^{(-\frac{\sigma}{\sigma_a})} + \Phi_b \cdot e^{(-\frac{\sigma}{\sigma_b})} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Φ₁ = porosité minimum définie par les courbes porosité/profondeur

Φ_a et Φ_b = respectivement : premier et deuxième coefficient de porosité

σ_a et σ_b = respectivement : premier et deuxième facteur exponentiel de contrainte effective (Pa)

La porosité de surface est considérée comme égale à la somme Φ₁ + Φ_a + Φ_b et la contrainte effective est nulle à la surface. La pression initiale est hydrostatique.

4.2.1.4. Le module de maturation et genèse des hydrocarbures

Ce module calcule le taux de transformation des kérogènes et la composition des HC selon le formalisme cinétique classique : **la loi d'Arrhénius** (Tissot et Espitalié, 1975; Ungerer *et al.*, 1991). L'équation 4.9, utilisée dans le logiciel Temis 3D, permet de décrire plus précisément les influences respectives du temps et de la température.

$$\frac{dX}{dt} = -A e^{-Ea/RT} X \quad (\text{Eq. 4.9})$$

dX/dt = vitesse de craquage de la fraction X

A = facteur pré-exponentiel ou facteur de fréquence (s⁻¹)

Ea = énergie d'activation « d'Arrhénius » de la réaction (J.mol⁻¹)

T = température (K)

R = constante des gaz parfaits (J.mol⁻¹.K⁻¹)

Le taux de transformation est le rapport d'hydrocarbure généré sur la quantité totale d'hydrocarbure que le kérogène peut générer, soit l'équivalent de l'indice de production du Rock Eval (Tissot et Welte, 1984; Espitalié *et al.*, 1985). Le taux de transformation (noté TR pour *transformation ratio*) est calculé par l'équation 4.10 (Pelet, 1985) :

$$TR = 1200 (IH_0 - IH_p) / IH_0 (1200 - IH_p) \quad (\text{Eq. 4.10})$$

IH_p = indice d'hydrogène à la profondeur p
 IH_0 = indice d'hydrogène initial
 1200 = la quantité maximum d'HC (en mg) correspondant à un gramme de carbone organique pyrolysé, sur la base d'une teneur en COT de 83 %.

Le TR est calculé à partir de la réaction cinétique de la formation du pétrole. Il n'est pas dépendant du potentiel de la roche mère et peut être utilisé pour évaluer le niveau de maturité de la roche mère. Le TR est compris entre 0 et 1. Il a une valeur de 0 lorsque la roche mère est immature et il augmente progressivement à 1 lorsque la roche mère est supramature. Le type de kérogène (c'est-à-dire sa composition élémentaire en hydrogène, oxygène et carbone) est pris en compte dans le logiciel Temis 3D. Il va influencer à la fois la quantité maximale d'HC engendrés et la profondeur de la zone de formation des HC (Espitalié *et al.*, 1980, 1985; Ungerer *et al.*, 1991).

Espitalié *et al.* (1985) ont corrélié les variations de T_{max} (température maximale de pyrolyse mesurée avec la méthode Rock Eval) avec les valeurs de réflectance de la vitrinite (R_0) et le TR. Le T_{max} correspond à un indicateur d'évolution de la matière organique (MO). La R_0 est une méthode d'analyse utilisée pour déterminer la maturité de la MO, afin de savoir si la roche échantillonnée a généré des HC ou pourrait être une roche mère potentielle.

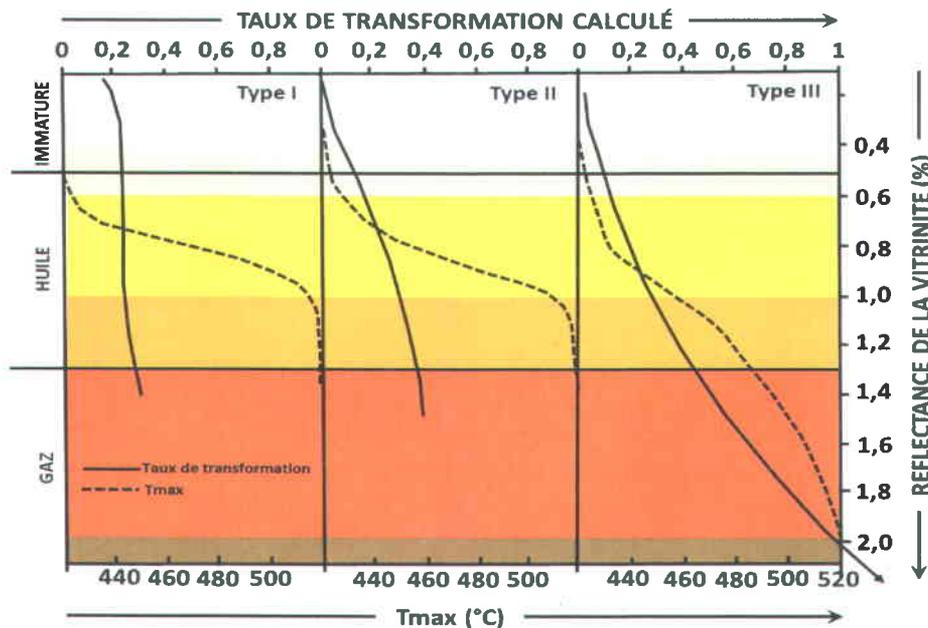


Figure 4.3: Évolution comparée des T_{max} et des taux de transformation calculés en fonction de la réflectance de la vitrinite pour les trois grands types de matière organique étudiés (modifiée d'Espitalié *et al.*, 1985).

La corrélation du TR avec la R_0 (Figure 4.3) est intégrée dans le logiciel Temis 3D. Le TR est calculé uniquement dans les cellules portant le kérogène.

Le rapport TR/R₀ (Tableau 4.2) est utilisé par le calculateur du logiciel Temis 3D pour calculer la réflectance de la vitrinite dans chacune des mailles géologiques du modèle. Pour chaque maille et pas de temps de calcul, la quantité totale d'HC est la somme cumulée des produits des réactions en parallèle. Dans le logiciel Temis 3D, la réflectance de la vitrinite est calculée à partir du rapport de transformation du kérogène de référence, en utilisant la valeur par défaut proposée dans le tableau de correspondance TR-R₀ (Tableau 4.2) ou définie par l'utilisateur.

Tableau 4.2 : Correspondance du taux de transformation avec la réflectance de la vitrinite proposée dans le logiciel Temis 3D, faite à partir de l'évolution comparée des Tmax, TR et R₀ de la Figure 4.3.

R ₀	0,2	0,47	0,68	0,83	0,93	1,18	1,45	1,87	2,35	3,2
TR	0,01	0,025	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

En conclusion, le TR dépend de la nature du matériel organique ainsi que de l'histoire géologique du bassin et donc du gradient géothermique, de la subsidence et de la tectonique (Tissot et Welte, 1984).

4.2.1.5. Le module d'expulsion et de migration des hydrocarbures

Le module d'expulsion et de migration permet de coupler le module de maturité avec celui de la circulation monophasique. La **loi de Darcy** (Eq. 4.6) est reformulée pour devenir une loi sur les écoulements diphasiques (eau – huile) en milieux poreux (Eq. 4.11 a et b) pour simuler l'expulsion et la migration secondaire (Marle, 1972) :

$$V_w = \frac{-K K_{rw}}{\mu_w} (\nabla P - \rho_w g) \quad (\text{Eq. 4.11 a})$$

$$V_h = \frac{-K K_{rh}}{\mu_h} \{\nabla (P + P_c) - \rho_h g\} \quad (\text{Eq. 4.11 b})$$

V_w = vitesse de filtration dans le référentiel de la matière rocheuse (m.s⁻¹)

K = perméabilité intrinsèque (m²)

ρ_w = masse volumique de l'eau (kg.m⁻³)

g = accélération de la pesanteur (m.s⁻²)

μ_w = viscosité de l'eau (Pa.s)

V_h = vitesse de filtration des hydrocarbures (m.s⁻¹)

K_{rw}, K_{rh} = perméabilités relatives de l'eau et des hydrocarbures

ρ_h = masse volumique des hydrocarbures (kg.m⁻³)

μ_h = viscosité des hydrocarbures (Pa.s)

P = pression de pore dans la phase eau (Pa)

P_c = pression capillaire (Pa).

Dans ce module, les inconnues supplémentaires calculées sont les saturations en HC. La saturation est l'état de la matière poreuse dans laquelle le volume poreux est totalement ou partiellement envahi par le/les fluide(s), ici les HC. La mesure de la saturation en HC

est la fraction du volume du fluide dans le volume poreux total, un pourcentage compris entre 0-100%.

Les paramètres supplémentaires requis sont la pression capillaire pour chaque type de lithologie, les courbes de perméabilités relatives (roches mères, drains et couvertures), et la loi de variations de la masse volumique et de la viscosité de phase huile avec la pression et la température.

4.2.2. METHODOLOGIE APPLIQUEE AVEC L'OUTIL TEMIS 3D

Pour la compréhension du système pétrolier du nord-est de la Gaspésie, il reste des points inexpliqués :

- **Quand l'enfouissement maximal a-t-il eu lieu ?**
- **Comment l'enfouissement et les érosions ont pu influencer la génération des hydrocarbures et leur expulsion des roches mères?**
- **Comment et quand s'est fait la migration des hydrocarbures en fonction de la structure?**
- **Comment des roches mères ordoviciennes ont-elles pu survivre à l'enfouissement tectonique (taconique) et sédimentaire (séquence siluro-dévonienne) et avoir encore des taux de vitrinite équivalent aussi bas que ceux dans les puits dans le bloc Nord?**

L'étude de bassin traitée dans cette thèse porte sur la maturation des roches mères et la saturation dans les niveaux réservoirs. Pour comprendre ces deux phénomènes des tests de sensibilité sur le flux de chaleur et l'impact de l'épaisseur des érosions ont été analysés pour mieux appréhender leur impact sur le potentiel pétrolier de notre zone afin de répondre aux questions ci-dessus.

La méthode appliquée au logiciel Temis 3D consiste dans une première étape à intégrer les éléments suivants (Figure 4.4, cases blanches) :

- le modèle structural en profondeur à l'âge actuel (Figure 4.4, (4.3.1)) construit avec le logiciel gOcad (voir chapitre 3),
- la colonne stratigraphique et les cartes lithologiques (Figure 4.4, (4.3.2)),
- les cartes de paléobathymétrie (Figure 4.4, (4.3.3)),
- une hypothèse de départ du taux de sédimentation afin de construire des cartes d'épaisseur d'érosion (Figure 4.4, (4.3.4)),
- les données de roche mère (COT et type de kérogène (Figure 4.4, (4.4.1))),
- une hypothèse de flux de chaleur et de température de surface en fonction du temps (Figure 4.4, (4.3.5)),
- les données de porosité et de perméabilité intrinsèque pour chaque type de roche (Figure 4.4, (4.4.2)).

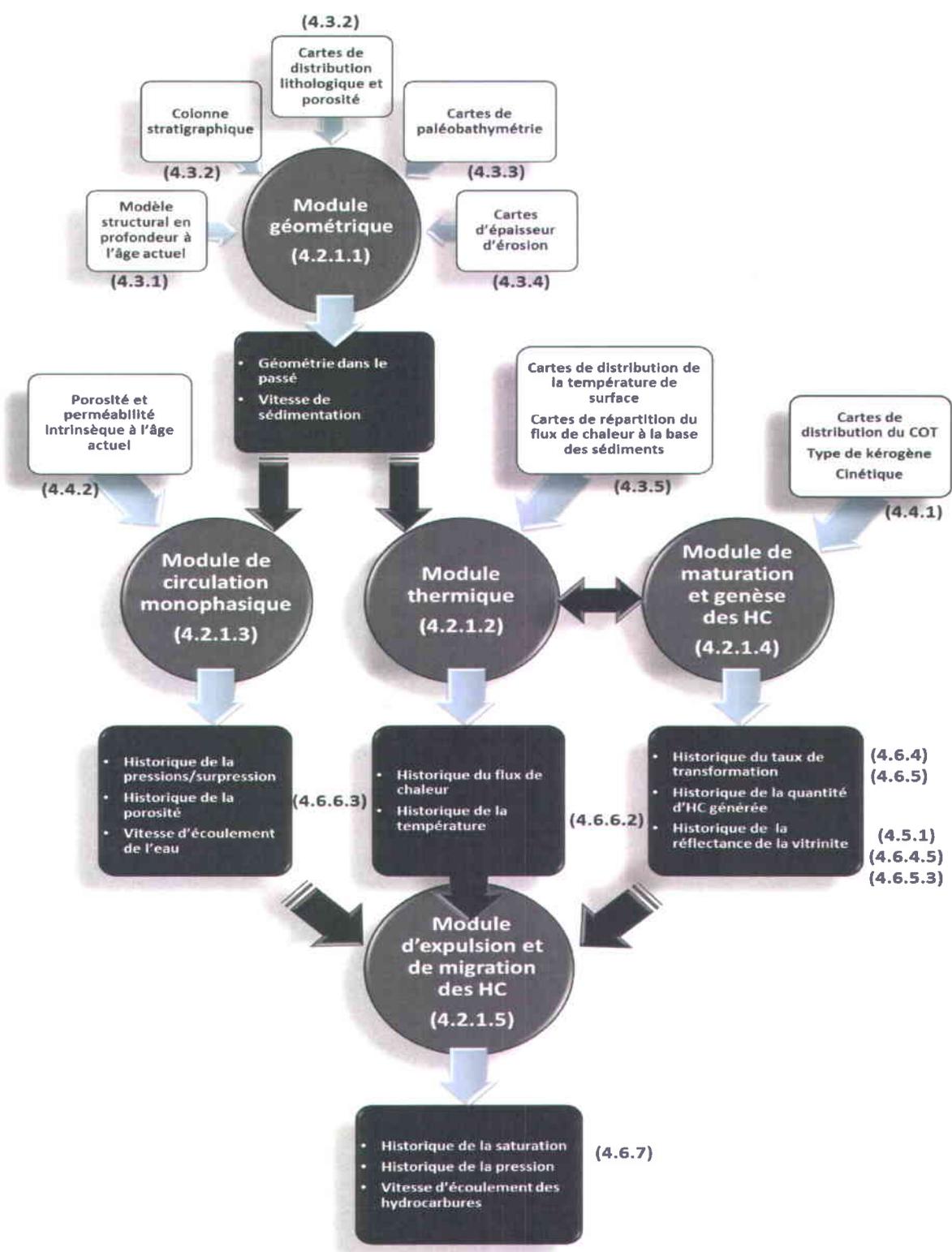


Figure 4.4 : Schéma représentatif d'une étude avec le logiciel Temis 3D avec la liste des données d'entrée (cases blanches) et des données simulées (cases noires) en fonction des modules utilisés (ronds). Les différents modules peuvent être utilisés ensemble ou indépendamment, selon l'objectif de l'étude. Néanmoins le module d'expulsion et de migration des HC a besoin d'être couplé avec le module de circulation monophasique et le module de maturation et genèse pour fonctionner. Tout comme le module de maturation et genèse ne peut s'exécuter sans le module thermique. Ces couplages entre modules sont représentés par des flèches noires. Les chiffres entre parenthèse correspondent au numéro de chapitre où l'on peut retrouver ces notions.

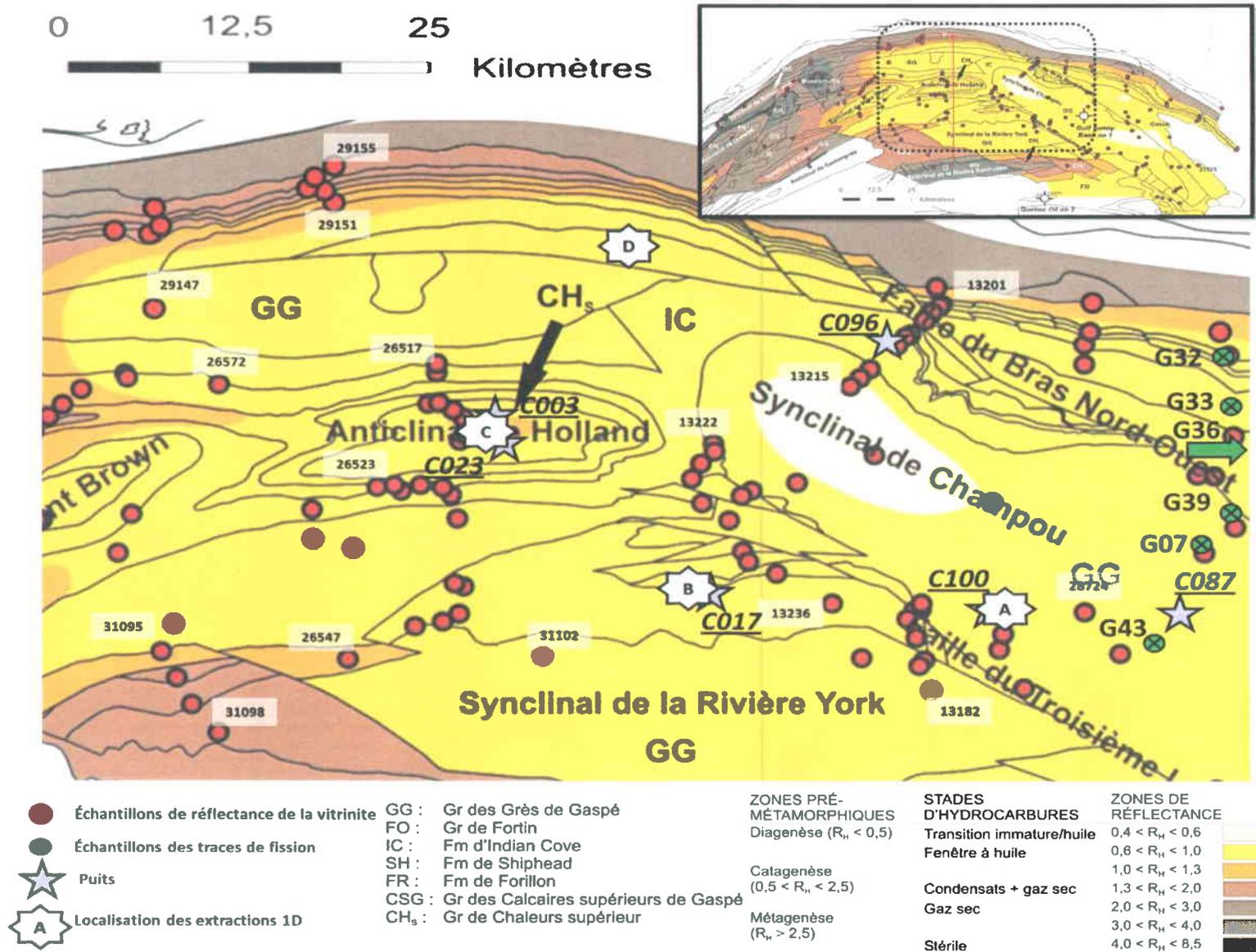


Figure 4.5 : Carte de localisation des données de calibration disponibles sur la zone Bourque au nord-est de la Gaspésie (Modifiée de Bertrand et Malo, 2001). Le dégradé de couleurs allant du jaune pâle au gris-foncé représente les zones de réflectance de la vitrinite et est aussi considéré comme une donnée de calibration. La zone en tireté sur la carte globale représente la zone d'étude.

Le bassin du nord-est de la Gaspésie possède une série de données : porosité à l'actuel, flux de chaleur à l'actuel, carte de vitrinite et traces de fission. Ces données sont dites de calibration et sont détaillées dans la partie 4.5. Il existe également des simulations antérieures qui peuvent servir de comparaison. **La deuxième partie** de cette méthodologie est d'utiliser l'ensemble de ces données comme point de comparaison/calibration avec les données simulées résultant du logiciel Temis 3D (Figure 4.4, cases noires) pour déterminer le meilleur scénario.

La dernière partie contient l'ensemble des fonctionnalités du logiciel Temis 3D afin d'utiliser le module d'expulsion et de migration des HC (Figure 4.4 ; partie 4.2.1.5) qui permet l'étude de l'historique de la saturation des HC dans le bassin. Cette partie permettra donc de savoir quelles sont les roches réservoirs, les roches couvertures, les pièges et les chemins de migration.

Les parties discutées dans la suite de ce chapitre 4 seront composées comme suit : i) une synthèse des données d'entrée du bassin de la zone Bourque, ii) un résumé des données d'entrée correspondant au système pétrolier en Gaspésie, iii) une description des données de calibration, iv) une analyse des résultats de simulation, et v) une conclusion générale.

4.3. DESCRIPTION DES DONNEES DU BASSIN DE LA ZONE BOURQUE

4.3.1. LE MODELE STRUCTURAL EN PROFONDEUR A L'AGE ACTUEL ET LES PIEGES STRUCTURAUX POTENTIELS

La première étape pour comprendre l'historique d'un bassin est d'étudier sa géométrie à l'actuel. Ainsi, le modèle surfacique construit et expliqué dans le chapitre 3 est intégré dans le logiciel Temis 3D. Il est à noter que le logiciel gOcad représente les failles comme des objets géométriques (surfaces de failles) alors que dans le logiciel Temis 3D, les failles sont différenciées avec une lithologie spécifique (voir partie 4.6.4).

L'étude de la géométrie à l'âge actuel de la zone Bourque a permis de déterminer des pièges structuraux potentiels. Dans le chapitre 2, la ligne sismique 82-152 (Figure 2.26) et la coupe structurale construite à partir de données de surface (Figure 2.18 ; Bertrand et Malo, 2001) montrent des plis acadiens ouverts de direction E-O associés à des failles inverses de même direction. Ces anticlinaux pourraient constituer des pièges structuraux **localisés au point haut des plis anticlinaux**.

La ligne sismique 82-152 (Figure 2.26) a permis de constater que l'anticlinal de Holland-Mont Bald était localisé au-dessus d'une faille de chevauchement aveugle. Un piège de type **plis de propagation au-dessus de chevauchement aveugles** lié à la tectonique de ceinture de plis-et-chevauchement est envisageable, tout comme le préconise Bêche (2008) dans la partie ouest de la Gaspésie (Figure 2.11).

Ces plis sont recoupés par deux failles de décrochement à composante dextre orientées NO-SE (FBNO et FTL) (Figure 2.19, Malo, 2001). Ces failles de décrochement ont été importantes car elles ont découpé les plis en compartimentant du même coup ces structures. Au stade précoce d'effondrement, ces failles ont induit des plis dans les roches de couverture, les plis Fa décrits dans le chapitre 2 sont interprétés par Malo (2001) comme des plis de couverture de type *longitudinal extensional folds* (Figure 2.20). Cette géométrie présente une **fermeture quadruple** (*4-way closure*) qui pourrait constituer un type de piège structural, avec les flancs des plis fermant la structure au nord et au sud et les failles de décrochement de direction NO scellant les extrémités est et ouest de la structure. Le synclinal de Champou correspondant au type *longitudinal extensional folds* (Malo, 2001) pourrait être un parfait exemple d'un piège structural à fermeture quadruple.

Plus au sud, l'anticlinal de la Rivière Saint-Jean présente une géométrie bien différente. Il s'agit d'un anticlinal déversé vers le sud et localisé au-dessus d'un rétrochevauchement d'extension régionale (Figure 2.22, Kirkwood *et al.*, 2004). Ce rétrochevauchement correspond au décollement principal au-dessus d'un empilement d'écaillés chevauchées en profondeur et localisées dans les unités du Matapédia, le tout présentant une géométrie globale d'anticlinal de duplex (Figure 2.21, Kirkwood *et al.*, 2004). La zone d'étude ne prend pas en compte l'ensemble de cette structure. Il est donc peu probable que le piège structural de type anticlinal de duplex lié à des failles inverses et des imbrications soit vérifié grâce aux simulations.

4.3.2. LA COLONNE STRATIGRAPHIQUE ET LES DONNEES LITHOLOGIQUES

La lithologie de chaque formation, expliquée dans les chapitres 1, 2 et 3, provient des données du Lexique Stratigraphique Canadien écrit par Globensky *et al.* (1993). Une table de lithologies de référence existe dans le logiciel Temis 3D mais de nouvelles lithologies de mélange sont nécessaires. Ces lithologies de référence sont faites à partir d'échantillons dit « purs » : 100 % sable, 100 % carbonate, 100 % silt, etc. Ces lithologies ne sont pas applicables au bassin de la Gaspésie, puisqu'aucune formation n'est homogène, mais constituée de plusieurs types de roches, ce qui nécessite d'effectuer un mélange.

Le Tableau 4.3 présente les lithologies dont la composition est simplifiée aux éléments les plus répandues dans chaque formation rencontrée dans la région d'étude. Ce tableau

Périodes	Groupes	Formations	Lithologies simplifiées	Lithologies dans Temis 3D		
Carbonifère	Dévotionien		Conglomérat rouge grès, mudstone	80%conгло + 10%shale + 10%sand		
		Malbaie	Conglomérat calcaire, grès et mudstone rouges	60%lim + 40%sand		
		Battery Point	Arénite feldspathique à grain fin à grossier, à feldspaths roses, mudstone gris-vert et parfois rouge, conglomérat polygénique à granules et cailloux, conglomérat intraformationnel, mudstone dolomitique	15%silt + 50%sand + 15%shale + 20%conгло		
		York River	Grès, mudrock gris-vert, wacke, arénite, volcanoclastites, basalte	70%sand + 10%shale + 10%conгло + 10%silt		
		York Lake	Grès et mudrock gris-vert, wacke, calcaire, conglomérat, basalte	70%sand + 10%shales + 10%conгло + 10%silt		
		Indian Cove	Calcaire, mudstone calcaireux, wacke, volcanites et volcanoclastiques	50%lim + 30%silt + 20%shale		
		Shiphead	Mudstones calcaireux, grès, calcaire, volcanoclastites	40%shale + 30%lim + 30%sand		
		Forillon	Calcaires, calcaire argileux, mudstone	45%lim + 25%silt + 30%shale		
		Indian Point	Siltstone/grès fin, calcilutite, mudstone	50%silt + 20%lim + 30%shale		
		Roncelles	Grès fin à siltstone calcaireux et calcarénite	50%lim + 50%silt		
		West Point*	Calcaires récifales	90%lim + 10%silt		
		Saint Léon*	Mudstones et siltstones calcaireux ou non	30%sand + 40%silt + 30%shale		
		Silurien	Chaleurs	Griffon Cove River**	Mudstones, siltstones, grès, calcaires Base conglomératiques	50%shale + 25%silt + 20%sand + 5%lim 40%shale + 40%sand + 20lim
				Gascons	Grès mudstone, siltstone, mudstone	50%sand + 30%silt + 10%shale + 10%lim 80%lim + 20%silt
Laforce	À l'Est = conglomérats calcaires (car source démantèlement Anticosti) À l'Ouest = mudstones, grès, calcarénites			45%lim + 45%sand + 10%shale		
Sayabec	Calcaires variés (calcaire gréseux, calcaire nodulaire, calcaire péritidaux et calcaire nodulaire)			80%lim + 20%shale		
Burnt Jam Brook	Shales, mudstones, grès			40%shale + 40%lim + 20%sand		
Val Brillant	Grès quartzitique			90%sand + 10%silt		
Source	Calcilutite avec interlits de shale calcaireux			70%lim + 30%shale		
Matapédia	White Head			Calcilutite, calcaire argileux, calcaire silteux	70%lim + 20%shale + 10%silt	
Cambro-Ordovicien	Supergroupe de Québec			Cloridorme	Shales noirs avec interlits de calcaire silteux, de dolomie	60%shale + 20%silt + 20%lim
				Des Landes	Siltstones calcaireux, grès fin dolomitique, shales noirs	60%silt + 30%lim + 10%shale
		Tourelle	Grès, mudrock, wacke lithique, arénite, calcaire	70%sand + 20%silt + 10%shale		
		Rivière Ouelle	Mudrock, grès, calcaire, arénite quartzitique, conglomérat	60%shale + 20%lim + 20%silt		
		Romieu	Claystone dolomitique, calcilutite, conglomérat calcaire et arénite quartzitique	10%conгло + 15%lim + 15%silt + 60%shale		

Tableau 4.3: Liste des unités utilisée dans le logiciel Temis 3D avec la lithologie simplifiée et les pourcentages moyens de chacun des composants. Silt= siltstone, lim=limstone, sand=sandstone, conгло=conglomerate. * Le West Point et le Saint Léon sont des formations siluro-dévoniennes. **La formation Griffon Cove River est locale à l'extrême Est.

montre également les pourcentages moyens de la composition de chacune des formations dans le logiciel Temis 3D. Dans le logiciel, les lithologies se présentent sous forme de cartes d'index entier qui représentent chaque lithologie, ce qui permet d'avoir une répartition spatiale afin de modéliser au mieux la répartition sédimentaire. Cela permet également pour des formations d'un même âge avec une répartition latérale différente, d'être sur la même carte lithologique, comme par exemple :

- les formations de Roncelles et d'Indian Point,
- les formations de Saint-Léon et de West Point et d'Indian Point,
- les formations de Laforce et de Sayabec,
- les formations de Val Brillant et de Burnt Jam Brook.

4.3.3. LES PALEOBATHYMETRIES

Les faciès de bassin des roches cambro-ordoviciennes, ainsi que les faciès profonds clastiques carbonatés à grains fins des groupes d'Honorat et de Matapédia peuvent être considérés comme déposés à des profondeurs d'environ 1000 m (Figure 1.16, a) et 100 à 200 m (Figure 1.16, b), respectivement. D'après Bourque (2001), les faciès de plate-forme d'eau peu profonde à profonde du Silurien au Dévonien du Groupe de Chaleurs se sont déposés à 100 m de profondeur (Figure 1.16, c). Cependant, la Formation de West Point fait exception puisqu'elle est composée de récifs, déposés entre 0 et 2 m de profondeur (Figure 1.16, d). Les faciès carbonatés et silicoclastiques dévoniens de bassin et de plate-forme profonde, à grains fins, du Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé se sont déposés entre 100 et 200 m de profondeur (Figure 1.16, e). Les faciès à grains grossiers dévoniens du Groupe des Grès de Gaspé sont proximaux à terrestres (Figure 1.16, f). Cela signifie qu'ils se sont déposés entre 0 et 5-10 m de profondeur (Bourque, 2001). Enfin les dépôts du Carbonifère sont continentaux, donc déposés au-dessus du niveau de la mer (Figure 1.16, g).

Dans le logiciel Temis 3D, les paléobathymétries sont représentées sous forme de cartes de profondeur des fonds sous-marins pour chacune des périodes géologiques.

4.3.4. LES TAUX DE SEDIMENTATION ET LES EPAISSEURS DES EROSIONS

Dans le logiciel Temis 3D, les événements érosifs sont représentés sous forme de cartes d'épaisseurs érodées. Le logiciel prend en compte la quantité érodée et l'âge de fin de l'érosion. Les épaisseurs dans le passé sont reconstruites à partir de la décompaction des épaisseurs actuelles et des courbes de porosité en fonction de la profondeur (voir Le module géométrique et l'Eq. 4.1). L'estimation des érosions dans la zone Bourque doit faire l'objet d'une hypothèse de départ pour effectuer une simulation avec le logiciel Temis 3D. La construction de cartes d'épaisseurs érodées demande une évaluation en

trois dimensions du taux de sédimentation. Pour cela, il faut prendre en compte plusieurs paramètres:

- 1) les discordances (chapitres 1 et 2),
- 2) les évènements tectoniques majeurs (chapitre 1),
- 3) l'étude des taux de sédimentation dans les différents puits de la zone (chapitre 3),
- 4) les maxima et minima de sédimentation sur l'ensemble de la Gaspésie (chapitre 3),
- 5) les données de vitrinite couplées avec la méthode de Dow (1977) de l'article de Bertrand et Malo (2001).

Taux d'érosion dans la littérature : la publication de Bertrand et Malo (2001) fait référence à la méthode de Dow qui permet d'évaluer les épaisseurs des strates érodées en fonction de la réflectance de la vitrinite (R_0) en partant du postulat que le R_0 initial est de 0,2 %. Les auteurs ont calculé les taux d'érosion pour plusieurs puits ou coupes (Tableau 4.4).

Tableau 4.4: Tableau de valeurs du coefficient linéaire de régression logarithmique de $R_{0 \text{ collotelinite}}$ en fonction de la profondeur, pour l'estimation des érosions venant des données surfaciques ou de puits de réflectance de la vitrinite (Bertrand et Malo, 2001).

Sections stratigraphiques et puits	Blocs tectoniques	Nombre de données	Erosions (km) calculées par la méthode de Dow (1977)
Rivière Madeleine	Nord	6	7,3
Roburn Camp	Nord	8	5,8
Bazire Brook	Centre/Sud	6	2,9
Anticlinal Mississippi-Holland	Centre/Ouest	16	9,7
Puits Gaspé Sud n°1	Centre	7	6,9
Puits Sunny Bank n°1	Centre	18	3,5
Puits Quebec Oil n°2	Sud	10	3,6

4.3.5. LES CONDITIONS THERMIQUES

Comme décrit dans la partie 4.2.1.2., la connaissance des conditions thermiques est essentielle pour l'étude d'un bassin pétrolier. Dans le logiciel Temis 3D, les historiques de flux de chaleur, de gradients géothermiques et de température de surface sont pris en compte. Dans cette étude, seules les données de flux de chaleur et les températures de surface sont utilisées comme données d'entrée. Les données de flux de chaleur disponibles dans la littérature sont des flux de chaleur récents. L'évolution du flux de chaleur au cours des temps géologiques est une hypothèse à tester pour caler des marqueurs de thermicité comme les données de vitrinite. Les épaisseurs érodées vont aussi avoir un impact sur l'historique des températures.

4.3.5.1. La température de surface

La paléotempérature de surface a une influence significative sur l'histoire thermique du bassin. Une augmentation de 10 à 20 °C peut réduire la profondeur de la fenêtre à huile d'environ 0,5 km (Barker, 2000). La paléotempérature air/eau peut être facilement évaluée à partir de la température moyenne de l'air. En revanche, la température à l'interface eau/sédiment (*Sediment Water Interface Temperature : SWIT*) est plus compliquée à estimer car elle dépend de nombreux paramètres dont les plus importants sont : i) la profondeur de la colonne d'eau, ii) la position paléogéographique du bassin, iii) le climat et iv) les courants océaniques globaux. Ces différents paramètres ont énormément évolué au cours de l'histoire de la Terre. Différentes approches peuvent être utilisées pour estimer la paléotempérature à l'interface eau/sédiment, par exemple, l'étude des faciès des unités sédimentaires, l'étude des flores et faunes fossiles et le $\delta^{18}\text{O}$ sur des coquilles fossiles (ex : foraminifères planctoniques et benthiques).

De l'Ordovicien tardif au Dévonien médian, le bassin de la Gaspésie était situé dans la zone tropicale de l'hémisphère sud (Figure 4.6) avec une température à l'interface air/eau d'environ 20 à 25 °C, sauf à la fin de l'Ordovicien où elle a atteint les 10 °C. Il n'y a eu en Gaspésie aucune étude spécifique sur les paléo-températures à l'interface eau/sédiment, néanmoins, l'utilisation des données paléo-environnementales et fauniques peut permettre de faire quelques estimations pour le nord-est de la péninsule:

- Environnement fluvial à littoral : Formation de Battery Point et Malbaie : 20 – 25 °C (Bertrand et Malo, 2001);
- Environnement marin peu profond et tropical, plate-forme à carbonates : Formation de Sayabec et de West Point (récifs siluriens et pinacles) : 25 – 30 °C;
- Environnement littoral - péritidal, probablement tropical : Formation de Val-Brillant, Roncelles : 25 – 30 °C;
- Environnement de plate-forme subtidale, médiane : Formations d'Awantjish - Sources, Calcaires Supérieurs de Gaspé : 10 – 15 °C;
- Environnement de plate-forme profonde (sous la zone d'action des vagues) : Formations de Saint-Léon, Gascon, Indian Point, White Head et Burnt Jam Brook : 5 -10 °C;
- Environnements de bassin - pente et pied de pente continentale : L'ensemble des unités du Humber du Nord (Cambrien-Ordovicien médian) : 0 – 5 °C.

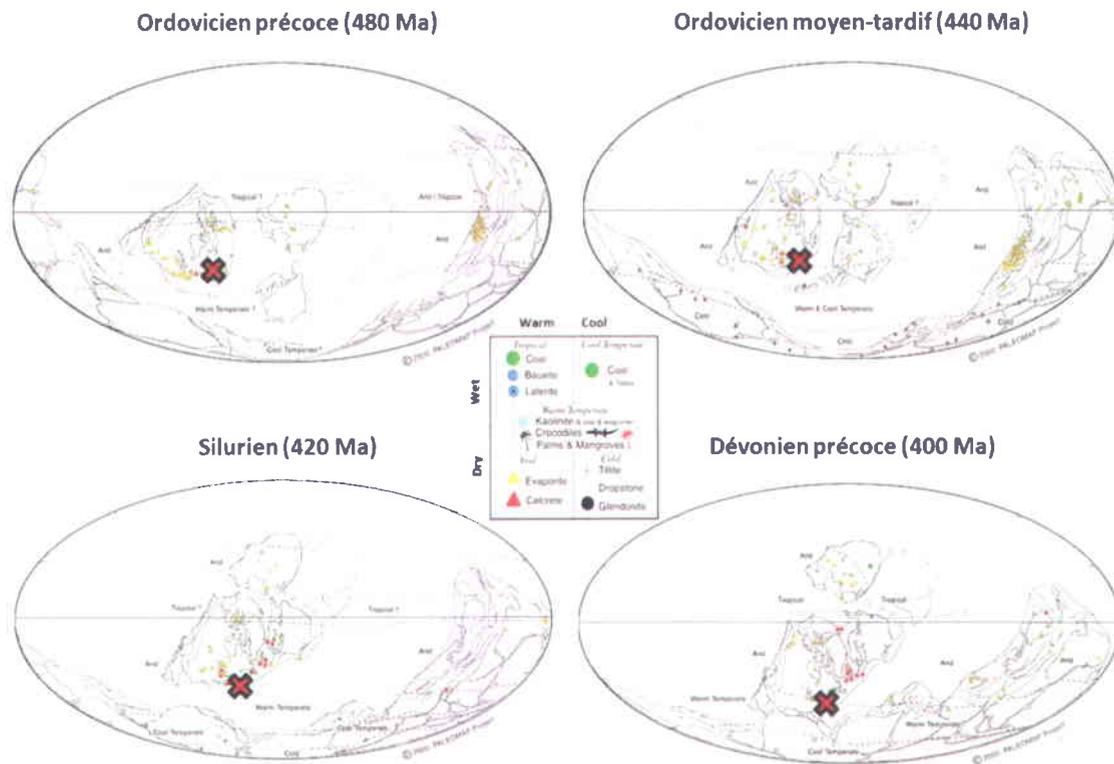


Figure 4.6 : Cartes paléogéographiques allant de l'Ordovicien précoce au Dévonien précoce. La croix rouge localise la Gaspésie. Durant cette période, la Gaspésie est restée dans la zone tropicale et la température à la surface de la Terre était en moyenne de 25°C, sauf à la fin de l'Ordovicien où elle a atteint les 10 °C (Scotese, 2006 : [Projet Paleomap http://www.scotese.com/climate.htm](http://www.scotese.com/climate.htm)).

4.3.5.2. Le flux de chaleur à la base du bassin

Drury *et al.*, (1987) ont mesuré une valeur actuelle de 48 mW.m⁻² dans le puits Sunny Bank entre 680 et 1524 m de profondeur et de 50 mW.m⁻² à Murdochville entre 1000 et 1420m de profondeur. L'*International Heat Flow Commission (IHFC)* de l'*International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI)* a calculé une valeur actuelle de 51 mW.m⁻² au Mont-Vallière de Saint-Réal. Blackwell et Richard (2004) font une estimation, toujours à l'actuel, comprise entre 50 et 54 mW.m⁻² de la zone au nord-est de la Gaspésie. D'après Turcotte et Schubert (2002), en moyenne, le flux de chaleur est de 65±1,6 mW.m⁻² pour les continents et de 101±2,2 mW.m⁻² pour les océans. Avec un flux de chaleur autour de 50 mW.m⁻², la Gaspésie est considérée comme une zone froide.

La première hypothèse de travail est d'essayer un flux de chaleur de 50 mW.m⁻² pour l'ensemble des temps géologiques et l'ensemble de la zone géographique.

4.4. DESCRIPTION DES DONNEES DU SYSTEME PETROLIER

Dans cette partie, les données listées dans le Tableau 4.5, les roches mères, les roches réservoirs et les pièges stratigraphiques sont discutés en détail.

Tableau 4.5 : Liste des roches mères, réservoirs et couvertures de la Gaspésie en fonction des âges géologiques. (d'après Lavoie *et al.*, 2009).

Age	Roches mères	Roches réservoirs	Roches couvertures
Dévonien	York River (charbon)	Grès de Gaspé Indian Cove	York River (shales fins)
	Shiphead Forillon	Shiphead Forillon West Point (récifs pinacles)	Indian Point (boue silicoclastique +transition dolomitisée)
Silurien		West Point Laforce Sayabec (avec dissolution) Val Brillant	Sayabec
Ordovicien	Rivière Ouelle	White Head	

4.4.1. LES DONNEES SUR LES ROCHES MERES

Deux groupes de roches mères se distinguent dans le système pétrolier de la Gaspésie : les roches **cambro-ordoviennes** et **siluro-dévonniennes**. Ces roches mères ont été décrites dans le chapitre 1 et proviennent des publications de Bertrand et Malo (2001), Roy (2008) et Lavoie *et al.* (2009) et rappelées dans le Tableau 4.5.

D'après les données de INRS-Pétrole, 1972, 1974; Lefebvre, 1982; INRS-Géoressources, 1983; Bertrand, 1987, 1996; Bertrand et Idiz, 1997; Héroux *et al.*, 1997; Bertrand et Malo, 2001, 2007, Bertrand *et al.*, 2003 et Roy, 2004 et 2008, la roche mère la plus riche dans la zone de Humber se trouve dans le mélange de Cap-Chat (COT = 2,2 %) qui est une association des formations de Rivière-Ouelle, de Tourelle et de Des Landes. Les autres roches datant du Cambro-Ordovicien et ayant des valeurs de COT et de réflectance élevées sont la Formation de Rivière Ouelle (COT : entre 1,0 et 2,0 %, réflectance : environ 2,0 %; Bertrand *et al.*, 2003). Les données de COT et de réflectance des roches cambro-ordoviennes du puits Gaspé Sud n°1 (qui est un puits assez profond pour atteindre les roches cambro-ordoviennes) sont comparables avec celles de la Formation de Rivière Ouelle (Roy, 2008).

La Formation de Forillon est l'unité dans la zone Bourque qui, d'après quelques teneurs en COT, montre un certain potentiel de roche mère à gaz et dans certain cas à huile (valeur de COT 1,6 % pour la Formation de Forillon; Bertrand et Malo, 2001). Dans le puits Gaspé Sud n°1, trois roches mères sont identifiées : les roches mères cambro-ordoviennes, la Formation de Forillon et la Formation de Shiphead. Dans le puits Sunny

Bank n°1, seule la Formation de Forillon est reconnue comme roche mère potentielle, puisque ce puits n'atteint pas les roches cambro-ordoviciennes.

La roche mère cambro-ordovicienne considérée est **500 m de roches à l'intérieur de la Formation de Rivière-Ouelle**. Et les roches mères siluro-dévoniennees considérées sont la **Formation de Forillon** et la **Formation de Shiphead**.

Dans le logiciel Temis 3D, ce sont les valeurs de COT initiales qui sont prises en compte. Dans la thèse de Roy (2008), des calculs de COT initiaux ont été effectués afin de pouvoir simuler l'impact de la température sur la matière organique le long des puits Sunny Bank n°1 (C087) et Gaspé Sud n°1 (C093) (Tableau 4.6) avec le logiciel Temis 1D. Trois roches mères ont été identifiées dans ces deux puits : les roches du Cambro-Ordovicien (COT actuel 0,9 %, COT initial 1,8 %), la Formation de Forillon (COT actuel 0,45 %, COT initial 0,8 %) et la Formation de Shiphead (COT actuel 0,31 %, COT initial 0,5 %) (Roy, 2008). Comme ces deux puits se situent dans la zone Bourque, nous utiliserons les COT initiaux de ces 3 roches mères pour l'ensemble de notre modèle 3D.

Dans la modélisation de bassin, il faut connaître les paramètres cinétiques de la roche mère. Les paramètres cinétiques sont obtenus par la maturation artificielle du kérogène en laboratoire. À défaut d'avoir les paramètres cinétiques de l'une de nos roches mères, nous avons choisi les paramètres cinétiques dans une bibliothèque disponible dans le logiciel Temis 3D qui se rapprochent le plus de celles que nous présumons être les roches mères de notre bassin. Bertrand et Malo (2001) ont considéré que le mélange des roches mères Forillon-Shiphead étaient un mélange de type II-III et la roche mère Forillon de type II. Les études géochimiques effectuées par Roy (2008) ont permis de déterminer que la roche mère Forillon et la roche mère Shiphead étaient également de type II ou un mélange de type II-III malgré l'origine marine des deux formations. Enfin, pour la roche mère cambro-ordovicienne, une étude de Bertrand et Malo (2007) présente des kérogènes de type II et III pour les échantillons du fond du puits Pérolia-Haldimand n°1, ce qui pour les kérogènes de type II est en accord avec l'environnement de dépôt (marin) du Supergroupe de Québec.

Dans la bibliothèque du logiciel Temis 3D, l'IH le plus faible pour un kérogène de type II est de 469 mg/gC. C'est celui qui a été choisi pour les formations de Forillon et de Shiphead. Pour différencier les roches cambro-ordoviciennes qui ont dans le puits Blanchet (C096) un IH à l'actuel plus élevé que les roches siluro-dévoniennees ($IH_{\text{Shiphead}} = 175$, $IH_{\text{Forillon}} = 168$ et $IH_{\text{Supergroupe de Québec}} = 262$ mg/gC; Bertrand, 1987), nous avons choisi un IH de 500 mg/gC.

Tableau 4.6: Valeurs du COT actuel et initial pour les roches mères utilisées dans la modélisation du puits Gaspé Sud n°1 (modifiées de Roy, 2008) et paramètres choisis pour la modélisation avec Temis 3D.

Formation/groupe	Intervalle Roche mère		COT (%)			Résultats réflectance		Paramètres choisis dans Temis 3D	
	No	(m)	Actuel	Initial	R ₀ (%)	Zone pré-métamorphisme	Zone HC	Type de Kérogène	IH (mg/gC)
Shiphead	1	1530-1820	0,31	0,50	1,09	Catagenèse	Fenêtre à huile	II	469
Forillon	2	1820-2800	0,44	0,80	1,31	Catagenèse	Fenêtre à huile	II	469
Roches cambro-ordoviciennes	3	2850-3360	0,90	1,80	1,67	Catagenèse	Condensats	II	500

4.4.2. LES DONNEES DES ROCHES RESERVOIRS

La zone d'étude (Figure 4.5) est caractérisée par la présence des unités du sommet de la succession stratigraphique de **la nappe de la Rivière Sainte-Anne**, soit les formations de Romieu, de Rivière-Ouelle et de Tourelle. Ces unités ne montrent pas de potentiel en roche réservoir intéressant.

Les unités du nord-est de la Gaspésie offrant un intérêt en tant que réservoirs potentiels sont les formations de White Head, de Val-Brillant, de Sayabec, de Laforce, de West Point, de Forillon, de Shiphead et d'Indian Cove, ainsi que les Grès de Gaspé (Lavoie *et al.*, 2009). Ces unités sont répertoriées dans le Tableau 4.7.

Formation de White Head (Kirkwood *et al.*, 2001). Les calcaires de la Formation de White Head représentent principalement des boues calcaires déposées sur une plate-forme relativement profonde (sous la zone d'action de vagues) et montre un potentiel de porosité primaire très faible. Une étude faite par Kirkwood *et al.* (2001) décrit le potentiel de porogénèse secondaire par fracturation des calcaires du White Head affectés par les déformations acadiennes. L'étude a permis de distinguer cinq épisodes de fracturation basés sur les relations de recoupements mutuels des fractures et des autres éléments tectono-diagénétiques (stylolites, clivage). Les fractures développées dans les calcaires du White Head lors des déformations acadiennes ont contribué à générer un système de porosité-perméabilité efficace.

Formation de Val-Brillant. Cette formation est principalement un grès quartzueux représentant des sables déposés en milieu littoral de haute énergie (Bourque *et al.*, 1995 ; Bourque, 2001; Hu et Lavoie, 2008). Les grès du Val-Brillant sont composés, généralement à plus de 90 %, de grains de quartz moyens bien arrondis cimentés le plus souvent par de la silice (Lavoie *et al.*, 2009). Les sables du Val-Brillant devaient avoir une porosité primaire importante avant la compaction. Localement, dans la partie supérieure de cette formation, les grès sont calcareux (Lachambre, 1987). De plus, certains de ces grès à divers niveaux stratigraphiques, présentent une porosité de terrain relativement importante ($\Phi \sim 5-10\%$) avec une moyenne de $\Phi \sim 2\%$ et une perméabilité de 0,02 mD (Tableau 4.7) (Lavoie *et al.*, 2009).

Formation de Sayabec. Lavoie *et al.*, (1992) ont reconnu quatre membres informels dans le Sayabec, deux niveaux de calcaires nodulaires de plate-forme externe séparés par deux niveaux de calcaires purs déposés en milieu intertidal et infratidal supérieur ainsi que des sables calcaires bien triés, ces deux faciès pouvant constituer des cibles intéressantes pour leur porosité primaire plus élevée (25 % sables; 35 % bioconstructions; Lavoie et Bourque, 1993; Lavoie et Chi, 2001). Au niveau de la diagenèse, les premiers travaux de Lavoie (1988) et de Lavoie et Bourque (1993) ont permis de préciser que la porosité primaire du Sayabec fut obturée assez rapidement lors de l'enfouissement. Des dolomies hydrothermales ont été documentées dans les roches du Silurien inférieur dans la formation de Sayabec (Lavoie et Morin, 2004 ; Lavoie et Chi, 2006). Ces roches montrent des cavités de dissolution majeure et des zones de fracturation bréchiques qui sont irrégulières et entourées de beaucoup de dolomies. Les unités bréchiques et dolomitiques sont poreuses (porosité visuelle supérieure à 25 % sur une partie des échantillons de Lavoie *et al.*, 2009) (Tableau 4.7).

Formation de West Point. Dans le bloc Nord, il existe un assemblage de récifs pinacles composé de calcaire plutôt massifs, très purs, d'âge Dévonien inférieur (Lochkovien) appartenant à la Formation de West Point. Les récifs pinacles sont des calcaires purs, massifs, à crinoïdes et stromatopores, formant des édifices atteignant des hauteurs de 300 m et des largeurs de 2 à 3 km. Au moment de leur formation, ces calcaires bioconstruits présentaient des porosités élevées, jusqu'à 40% (Bourque *et al.*, 1986; Lachambre, 1987; Bourque, 2001). Ils se situent proche des failles majeures qui offrent une voie préférentielle pour la migration de fluides hydrothermaux, il n'est donc pas rare de trouver des récifs ayant subi une altération hydrothermale (Lavoie *et al.*, 2009).

Calcaires Supérieurs de Gaspé (Lavoie *et al.*, 2001). La quasi-totalité des Calcaires Supérieurs de Gaspé dans le secteur de la zone d'étude montre peu de potentiel de porosité primaire, du fait de leur microcristallinité (Lavoie, 1992b). Néanmoins beaucoup de porosité de fracturation sont identifiées dans le secteur nord-ouest, proche des failles majeures. La synthèse des données des puits Galt et Sunny Bank et celles des sections affleurantes de Calcaires Supérieurs de Gaspé est présentée dans Lavoie *et al.* (2001). Un épisode de fracturation et de diagenèse météoritique (possiblement syn- ou post-acadien) fut reconnu dans les calcaires de l'Indian Cove au nord de la péninsule (Lavoie *et al.*, 2001). Trois épisodes de fracturation furent constatés dans les formations de Forillon et d'Indian Cove, la Formation de Shiphead affleurant mal. La génération de la porosité secondaire observée dans les Calcaires Supérieurs de Gaspé résulte ainsi du couple fracturation – dissolution, suivi d'un colmatage imparfait de cette porosité secondaire (Lavoie *et al.*, 2001). Des dolomies hydrothermales ont été observées proches des zones de fracturation. La dolomitisation a contribué à augmenter la perméabilité des Calcaires Supérieurs de Gaspé (Lavoie *et al.*, 2009). Des échantillons du champ pétrolier de la zone

du puits Galt indiquent que la Formation de Forillon a une porosité de fracturation de 2,33 % et une perméabilité de 0,59 mD (Tableau 4.7; Hu et Lavoie, 2008).

Grès de Gaspé. Une étude de Lavoie (2009) a indiqué des valeurs de porosité moyenne de 6,3 % pour la Formation de York River et 9,4% pour la Formation à grains grossiers du Battery Point. Une réévaluation des données des diagraphies des différents puits faite par Hu et Lavoie (2008) montre des valeurs de porosité autour de 5 % (Tableau 4.7). Les données du champ pétrolier de Haldimand présentent sur 22 m d'épaisseur une porosité comprise entre 5 et 15 % pour la Formation de York River (Tableau 4.7 ; Lavoie *et al.*, 2009).

4.4.3. LES PIEGES STRATIGRAPHIQUES POTENTIELS DE LA CEINTURE DE GASPE

Quatre groupes de pièges stratigraphiques sont susceptibles de se retrouver dans le nord-est de la Gaspésie (Lavoie *et al.*, 2009) :

- Des pièges reliés à des changements latéraux de faciès ou à des biseaux sédimentaires poreux, comme dans les Grès de Gaspé qui sont caractérisés par des zones contenant des couches argilo-silteuses imperméables (les lentilles grésos-conglomératiques).
- Les masses récifales de la Formation de West Point incorporées dans les faciès silto-argileux des formations d'Indian Point ou de Saint-Léon.
- Des pièges de type diagénétique pourraient caractériser la Formation de Sayabec. Cette dernière montre une zonation latérale marquée, avec en aval des faciès sablonneux et récifaux et en amont des faciès péritidaux bien cimentés précocement. Les calcaires récifaux de West Point dans le bloc centre pourraient aussi être considérés comme des pièges diagénétiques mais cette fois de dolomitisation.
- Un des types de pièges stratigraphiques les plus susceptibles de se retrouver dans le nord-est de la Gaspésie est le piège correspondant à la discordance salinique qui est bien présente dans une grande partie du secteur.

4.5. DESCRIPTION DES DONNEES DE CALIBRATION

Pour le nord-est de la Gaspésie, il existe plusieurs types de données disponibles, qui sont localisées sur la Figure 4.5, i) les valeurs de porosité et de flux de chaleur à l'âge actuel (ces données ont déjà été détaillées : la porosité dans le sous-chapitre 4.5.2 et le flux de chaleur dans la partie 4.4.5.2), ii) les données de vitrinite qui permettent de calibrer les érosions et les données thermiques et iii) les traces de fission qui permettent de calibrer l'enfouissement et donc par extension les érosions.

Ces données, dites de calibration, mentionnées ci-dessus vont être comparées aux données simulées provenant du logiciel Temis 3D (Figure 4.4, cases noires). Cette comparaison va permettre de mieux contraindre le modèle.

Tableau 4.7 : Liste des formations classifiées comme roches réservoirs avec la description de leur porosité primaire et secondaire. Leur taux de porosité et de perméabilité actuelle d'après des descriptions de terrain et des analyses de diagraphies.

Nom de la formation	Description de la porosité primaire	Description de la porosité secondaire	Porosité actuelle D'après Lavoie <i>et al.</i> , 2009	Perméabilité D'après Lavoie <i>et al.</i> , 2009	Porosité diagraphie Hu et Lavoie, 2008	Perméabilité diagraphie Hu et Lavoie, 2008
White Head	Faible (boue calcaire)	Fracturation des calcaires à l'Acadien			1 < Φ < 3% (puits Gastonguay)	>0,1 mD (puits Gastonguay)
Val-Brillant	Importante avant compaction (grès quartzueux)		5 < Φ < 10%	0,02 mD	1 < Φ < 3% (puits La Vérendy)	>0,1 mD (puits La Vérendy)
Sayabec	Faible (obstruée très rapidement)	Dolomies hydrothermale	$\Phi \sim 25\%$		1 < Φ < 3% (puits La Vérendy)	>0,1 mD (puits La Vérendy)
West Point (assemblage tabulaire)			$\Phi \sim 1,2\%$	0,22 mD		
West Point (assemblage récifs pinacles)	$\Phi_0 \sim 40\%$	Fluides hydrothermaux le long des failles				
Forillon	Faible (car microcristallinité)	Fracturation le long des failles	$\Phi \sim 2,33\%$ (zone Galt)	0,59 mD (zone Galt)	1 < Φ < 3% (puits Galt, Gaspé Nord)	>0,1 mD (puits Galt, Sunny Bank, Gaspé Sud, Blanchet, Gaspé Nord)
Indian Cove	Faible (car microcristallinité)	Fracturation le long des failles	1 < Φ < 3%		1 < Φ < 2% (puits Sunny Bank, Blanchet, Gaspé Sud)	0,1 < K < 1 mD (puits Gaspé Nord, Blanchet, Galt)
Grès de Gaspé (York River)	25 < Φ_0 < 40%		5 < Φ < 15% (puits Haldimand)		>5% (puits Galt)	1 < K < 10 mD (puits Galt)
Grès de Gaspé (Battery Point)	25 < Φ_0 < 40%		$\Phi \sim 9,4\%$		1 < Φ < 5% (puits Gaspé Nord, Douglas)	0,1 < K < 1 mD (puits Gaspé Nord)

4.5.1. LES CARTES DE VITRINITE

La Figure 4.7 illustre les niveaux de maturation thermique connus dans le nord-est de la Gaspésie et leur correspondance en phase hydrocarbure. Les résultats illustrés dans la Figure 4.7 montrent que i) la réflectance dans les successions siluro-dévonienne de la ceinture de Gaspé est généralement moins élevée (valeurs inférieures à 1,3 % pour la plupart) que celle dans les successions cambro-ordoviciennes de la zone de Humber (Bertrand et Malo, 2001), ii) les successions de la zone de Humber montrent des valeurs généralement supérieures à 2,0 % et sont toutes supramatures et se situent dans le stade à gaz sec (Roy, 2008), et iii) les zones d'isovaleurs de la réflectance estimée de la vitrinite, allant de la région de Gaspé jusqu'à une distance d'environ 15 km à l'est de Murdochville, suivent généralement les contours des unités stratigraphique (Roy, 2008): cette situation est normale lorsque la maturation thermique est essentiellement due à l'enfouissement. **Quelques exceptions sont à noter** : des données provenant des formations d'Indian Cove, de Forillon et d'Indian Point montrent des valeurs de réflectance supérieures à 5 %. Ces analyses proviennent de l'auréole métamorphique lié à l'intrusion de roches granitiques et à la circulation de fluides hydrothermaux (Héroux *et al.*, 1996) du gîte cuprifère de Murdochville du Dévonien tardif (Bertrand et Malo, 2001).

La Figure 4.8 (Figure 4.7, coupe FG) montre la coupe structurale avec les courbes d'isovaleurs de la réflectance de la vitrinite en profondeur (Roy, 2008). Les courbes d'isovaleurs de la réflectance estimée de la vitrinite montrent un plissement qui est, là aussi, moins important que celui des contacts géologiques (Figure 4.7; Bertrand et Malo, 2001). Ce décalage est moins prononcé dans le synclinal de la Rivière York et dans l'anticlinal de Mississippi (Figure 4.8, points de repère 1 et 2; Roy, 2008), mais il est plus important dans les anticlinaux de la Rivière Saint- Jean et de Holland (Figure 4.8, points de repère 3 et 4; Roy, 2008).

Il apparaît que : i) en surface (Figure 4.7), la maturité croît, sans interruption, dans les successions de la ceinture de Gaspé puis augmente d'un léger saut lorsqu'elle atteint la zone de Humber en particulier au nord-est; ii) en coupe (Figure 4.8), la faille de décrochement au sud de la zone Bourque sépare des domaines de maturité thermique alors que les courbes d'isovaleurs de la réflectance estimée de la vitrinite à travers la FBNO (et en surface : la faille du Troisième Lac) sont sans discontinuité.

Les puits Gaspé Nord et Gaspé Sud sont particuliers (Figure 4.10). Ces deux puits atteignent les roches ordoviciennes, mettant à jour le dépôt en discordance des roches du Groupe de Chaleurs sur celles du Supergroupe de Québec. Pourtant les valeurs de réflectance de la vitrinite sont différentes prouvant que l'histoire géologique de ces deux puits est dissemblable. Le puits Gaspé Nord situé dans le bloc Nord (Figure 4.7) montre un saut des valeurs de réflectance de la vitrinite passant de 1 % au niveau de la Formation de Forillon à presque 8 % au niveau du Supergroupe de Québec (Figure 4.10). Cela

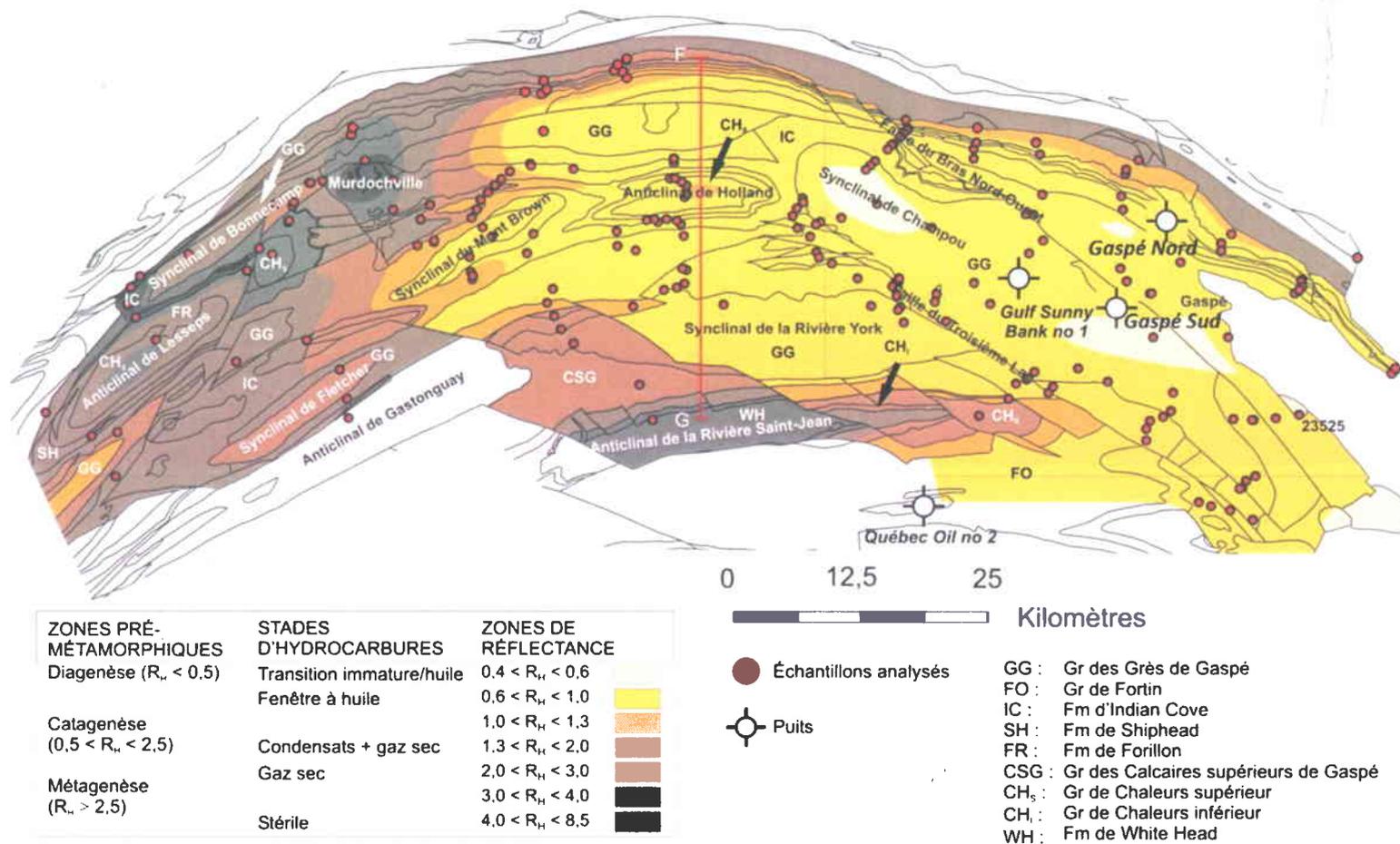


Figure 4.7: Zones d'isovaleurs de la réflectance estimée de la vitrinite et des stades de génération des HC basés sur l'analyse des échantillons de surface du secteur Est du synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé. La ligne FG indique la localisation de la coupe structurale de la Figure 4.8. R_H : Réflectance en immersion d'huile (modifiée de Roy, (2008) venant d'une carte géologique modifiée de Brisebois et Nadeau (2003) et carte de maturation modifiée de Bertrand et Malo (2001)).

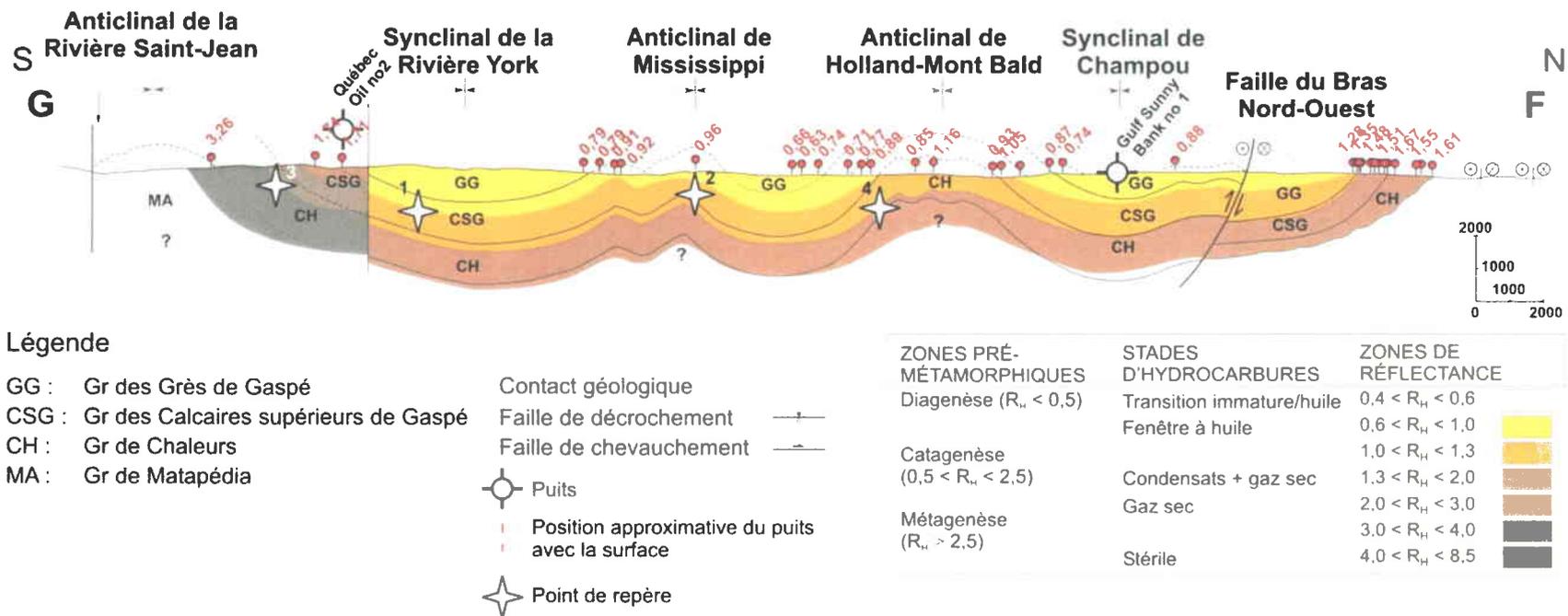
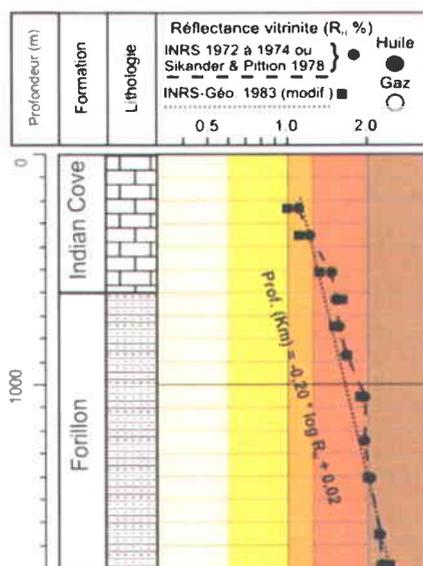


Figure 4.8 : Coupe structurale FG de la Figure 4.7 montrant les zones d'isovaleurs de la réflectance estimée de la vitrinite et des stades de génération des HC en profondeur. R_H : Réflectance en immersion d'huile. (Coupe de Roy, (2008) modifiée de Bertrand et Malo (2001)).

Québec Oil no 2



ZONES PRÉ-MÉTAMORPHIQUES	STADES D'HYDROCARBURES	ZONES DE RÉFLECTANCE
Diagenèse (R _H < 0.5)	Transition immature/huile	0.4 < R _H < 0.6
	Fenêtre à huile	0.6 < R _H < 1.0
Catagenèse (0.5 < R _H < 2.5)	Condensats + gaz sec	1.0 < R _H < 1.3
	Gaz sec	1.3 < R _H < 2.0
Metagenèse (R _H > 2.5)	Sterile	2.0 < R _H < 3.0
		3.0 < R _H < 4.0
		4.0 < R _H < 8.5

Légende

Lithologies

	Calcaire		Siltstone / Mudstone
	Calcaire impur		Shale
	Grès		

Gulf Sunny Bank no 1

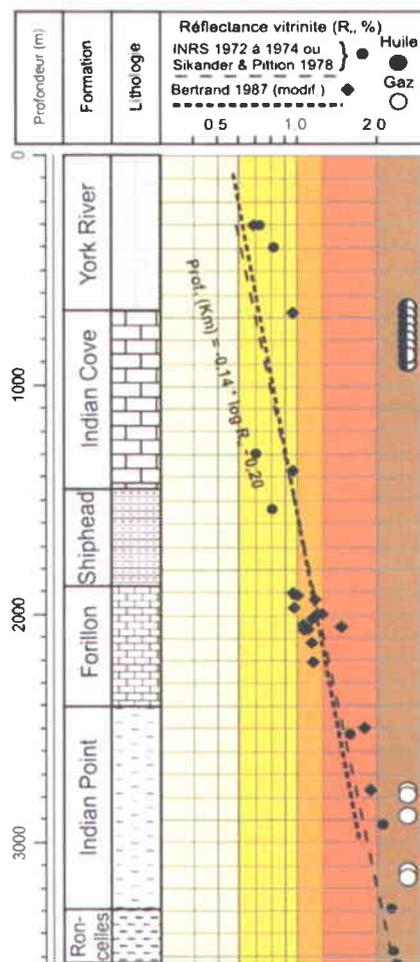


Figure 4.9: Profils des puits Sunny Bank n°1 et Québec Oil n°2. Prof. : Profondeur et R_H : Réflectance estimée de la vitrinite. D'après Roy (2008), modifiée de Bertrand et Malo (2001).

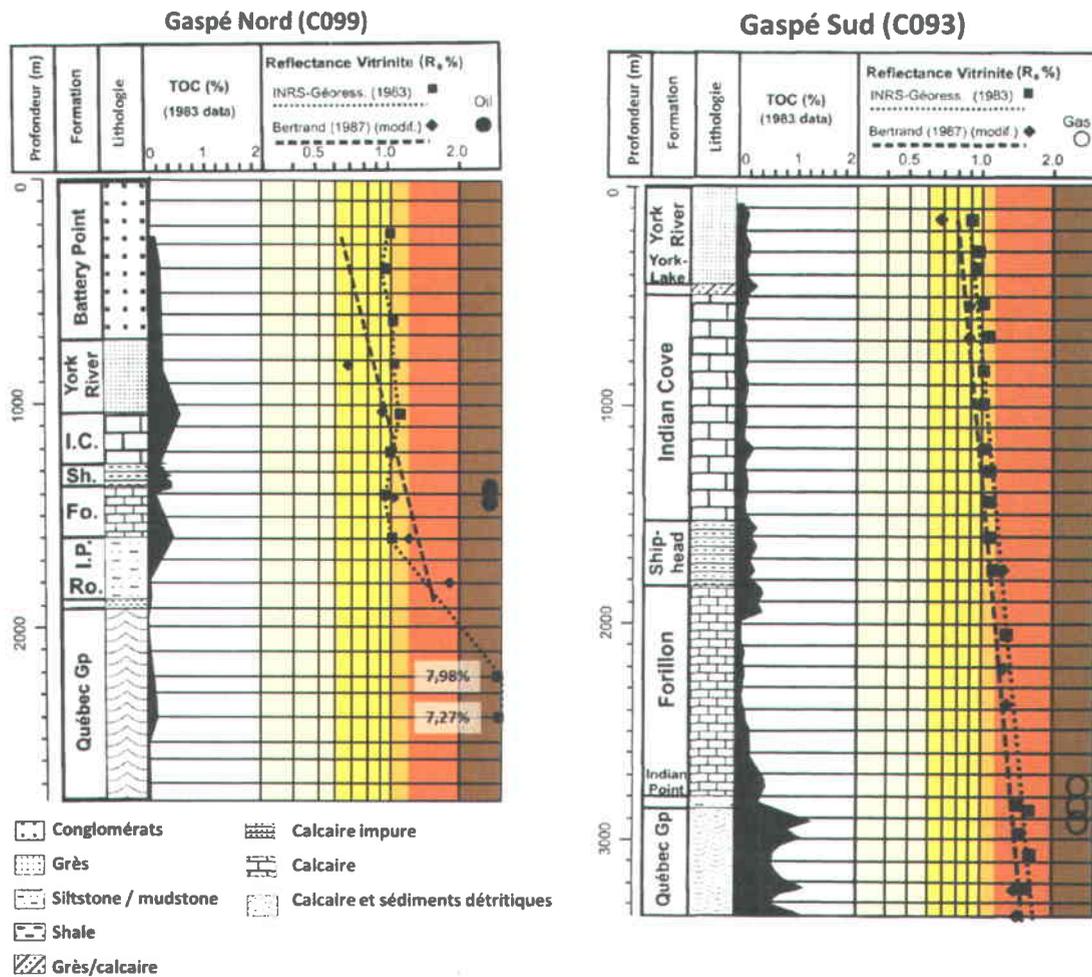


Figure 4.10 : Profils des puits Gaspé Nord et Gaspé Sud. I.C. : Indian Cove ; Sh. : Shiphead ; Fo. : Forillon ; I.P. : Indian Point ; Ro. : Roncelles ; Québec Gp : Supergroupe de Québec ; R_v : Réflectance de la vitrinite (modifiée de Bertrand et Malo, 2001).

indique un enfouissement discontinu avec une période d'érosion qui succède l'enfouissement maximal. Au contraire, le puits Gaspé Sud situé dans le bloc Centre (Figure 4.7) ne montre aucun saut des valeurs de réflectance de la vitrinite entre les roches du Groupe de Chaleurs et celles du Supergroupe de Québec (Figure 4.10). Cela indique un enfouissement continu ou que les périodes d'érosion précèdent l'enfouissement maximal.

4.5.2. LES TRACES DE FISSION

Une campagne d'échantillonnage durant l'été 2009 a été effectuée pour étudier les traces de fission dans les roches du Dévonien situées au nord-est de la Gaspésie. Les roches silicoclastiques du Dévonien des formations d'Indian Point, de York River et de Battery Point ont été recueillies sur les deux côtés de la faille du Bras Nord-Ouest (Figure 4.5)

pour étudier la thermochronologie basse température des apatites (*AFT* : *Apatite Fission-Track* ou l'étude des traces de fission dans les apatites).

La méthode de thermochronologie basse température des apatites est basée sur la quantité d'uranium, dont l'isotope 238, qui se désintègre au cours du temps en entraînant une déformation du réseau cristallin (ce qu'on appelle une "trace de fission"). Ces traces sont en permanence résorbées si le minéral se situe à une température supérieure à 100 °C (± 20 °C). En deçà de cette température, elles sont conservées dans le minéral. En utilisant la constante de désintégration de l'isotope ^{238}U , le comptage de ces traces permet de calculer l'âge de la roche lors de son passage de l'isotherme 100 °C.

Sept échantillons de surface ont donné une quantité suffisante d'apatite pour permettre d'étudier les traces de fission (Malo *et al.*, 2012). Les âges varient entre 284 ± 35 et 247 ± 27 Ma (Permien précoce à Trias tardif) avec une longueur de trace moyenne, passant de 11,7 à $12,3 \pm 1,7$ microns. L'âge des traces de fission est plus jeune que l'âge des roches encaissantes (les Grès de Gaspé), ce qui indique que les Grès de Gaspé auraient quitté la zone de recuit partiel de l'apatite (~ 60 -120 °C; la fenêtre à huile) plus tard, après la sédimentation du bassin des Maritimes du Paléozoïque supérieur.

Des études antérieures de modélisation thermique (Bertrand et Malo, 2001 et Roy, 2008) ont estimé que l'enfouissement maximum a eu lieu au cours de la sédimentation de la Formation Malbaie au Dévonien moyen, puis a été suivie par la déformation acadienne avec érosion, avant le dépôt d'une couverture carbonifère relativement mince (~ 500 m), et une dénudation à faible débit allant jusqu'au Permien. Ces études ne sont pas en accord avec les données de traces de fission. En effet, si on calcule, en première approximation, la profondeur atteinte par la Formation de Battery Point (G36) à 274 Ma, en utilisant la formule suivante (4.12):

$$T = T_0 + (g * z) \quad (\text{Eq. 4.12})$$

T : température à 100°C

T₀ : la température de surface (°C)

g : gradient géothermique moyen (°C/km)

z : profondeur inconnue (m)

Tableau 4.8 : Liste des échantillons de la campagne de terrain 2008 (Malo *et al.*, 2012) localisation Figure 4.5. TFA : Traces de fission de l'apatite.

Numéro d'échantillon	Nom des formations	Localisation	Coordonnées		Age Central des TFA (Ma)	χ^2 Age	Total grains	U (ppm)
			UTME	UTMN				
G07	York River	Bloc Centre	3 79 110	54 14 051	321 ± 47	237 ± 29	20	22
G32	Indian Point	Bloc Nord	3 82 850	54 26 105	247 ± 27	245 ± 24	20	19
G33	York River	Bloc Nord	3 81 726	54 23 004	262 ± 26	261 ± 25	20	23
G36	Battery Point	Bloc Nord	3 87 403	54 15 384	274 ± 37	265 ± 28	20	18
G39	York River	Bloc Centre	3 81 521	54 16 224	267 ± 25	267 ± 24	21	27
G43	York River	Bloc Centre	3 78 212	54 09 699	267 ± 28	265 ± 25	20	19

Avec un gradient constant de 23 °C/km (proposé par Grundman *et al.*, 2012) et une température de surface de 20 °C durant le Carbonifère (Scotese et McEnroe, 1990), l'échantillon G36 devait être à une profondeur de 3478 m à 274 Ma lors de son passage de l'isotherme 100 °C. Il a donc fallu un enfouissement de plus 3500 m au Carbonifère.

4.6.SIMULATIONS ET ANALYSE DES RESULTATS

Le cheminement scientifique permettant de comprendre les hypothèses prises en compte dans cette dernière partie, est résumé ci-dessous :

- La première étape est la construction du modèle géologique avec le module géométrique (Figure 4.4, 4.2.1.1). Le modèle 3D est présenté dans la partie 4.6.1.

- La deuxième étape prend en compte les hypothèses publiées (Bertrand et Malo, 2001 et Roy, 2008) sur les épaisseurs d'érosion et les gradients géothermiques et de nouvelles hypothèses sur le flux de chaleur. Les résultats sont présentés dans la partie 4.6.2. Des extractions 1D sur le modèle 3D au niveau de la localisation des puits Sunny Bank et Gaspé Sud (Figure 4.11) sont faites afin de comparer les données de vitrinite (R_0) observées en profondeur avec celles simulées à l'aide du logiciel Temis 3D et celles calculées par différentes méthodes (Bertrand et Malo, 2001 ; Roy, 2008).

- La troisième étape prend en compte de nouvelles hypothèses d'épaisseur de sédimentation/érosion et de flux de chaleur. Les résultats de la réflectance de la vitrinite en carte sont comparés à la carte publiée (Bertrand et Malo, 2001) faite à partir des échantillons de surface de la réflectance de la vitrinite. L'étude du taux de transformation (TR) est étudiée en détail dans les parties 4.6.1 et 4.6.2. Le résultat qui a donné la meilleure calibration aux données de réflectance de la vitrinite en carte et en profondeur, de traces de fission et de porosité a été utilisé pour la prochaine étape.

- La quatrième et dernière étape prend en compte deux hypothèses : l'une avec des failles perméables et l'autre avec des failles imperméables. Ces deux hypothèses ont été testées avec le module d'expulsion et de migration des HC (Figure 4.4, 4.2.1.5) du logiciel Temis 3D. L'historique de la saturation a permis de déterminer les roches réservoirs, les roches couvertures, les pièges potentiels et les chemins de migration (voir la partie 4.6.4).

4.6.1. CONSTRUCTION DU MODELE GEOLOGIQUE AVEC LE LOGICIEL TEMIS 3D

Les données qui permettent de construire un modèle de bassin pour le logiciel Temis 3D, sont des cartes. Il y a une carte pour chacune des données (Figure 4.4, 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.4.1, 4.3.5). Ces cartes sont définies pour un intervalle de la colonne stratigraphique (Figure 4.4, 4.3.2). Le modèle 3D est présenté dans la Figure 4.11.

Quinze horizons stratigraphiques ont été modélisés dans cette étude. Ils sont datés du Cambro-Ordovicien à l'âge actuel. Chaque horizon (représenté par une surface correspondant au toit de chacune de ces formations) a été importé du logiciel gOcad (voir Chapitre 3). Une grille complète a été créée grâce au logiciel Temis 3D à partir de ces surfaces. La résolution horizontale de cette grille est de **166 (est-ouest) x 105 (nord-sud)** cellules, chaque cellule faisant **15x22 m**. La résolution verticale dans notre cas est fonction de l'épaisseur des différentes formations, c'est-à-dire supérieure à 80m. La grille géologique contient un peu moins d'un **demi-million** de cellules pour ce modèle (Figure 4.11).

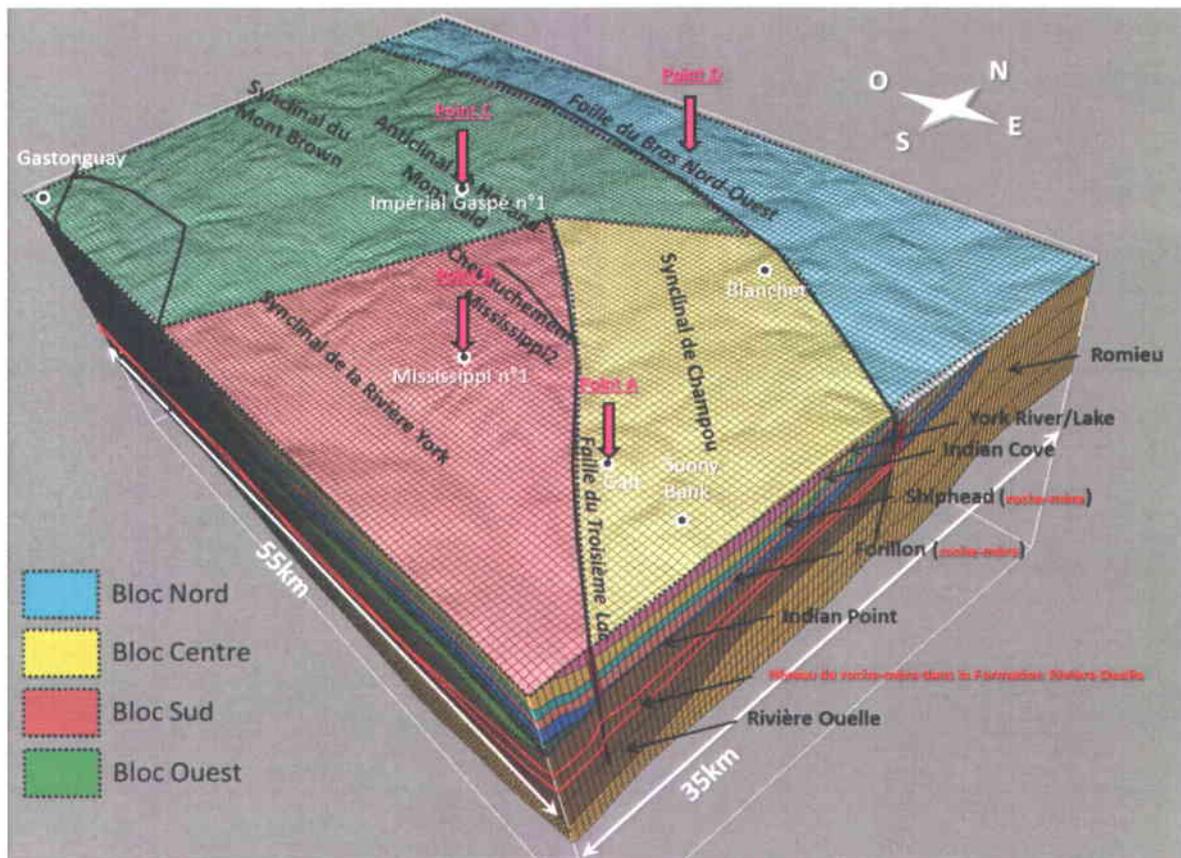


Figure 4.11 : Visualisation du modèle 3D à l'âge actuel dans le logiciel Temis 3D et localisation des points A, B, C et D discutés dans le texte et des blocs Nord, Centre, Sud et Ouest. Ce modèle 3D contient 15 horizons stratigraphiques. La grille contient un peu moins d'un demi-million de cellules.

4.6.2. SIMULATION THERMIQUE LE LONG DES PUIXS SUNNY BANK ET GASPE SUD ET COMPARAISON AVEC LES DONNEES PUBLIEES

Dans cette étape, nous cherchons à savoir si les hypothèses sur les épaisseurs d'érosion et les gradients géothermiques publiées sont applicables à l'ensemble de la zone Bourque. Deux études de modélisation thermique (Bertrand et Malo, 2001 ; Roy, 2008) ont été faites le long des puits Sunny Bank n°1 et Gaspé Sud n°1 qui se situent à la frontière E-

SE de la zone Bourque (Figure 4.11). La méthode dans Roy (2008) utilise le logiciel Temis 1D. La méthode dans l'article de Bertrand et Malo (2001) est celle de Hunt (Hunt *et al.*, 1991) basée sur les équations d'Arrhenius (Eq. 4.9). Ces équations sont intégrées dans le logiciel Temis 3D (Cf. 4.2.1.4. Le module de maturation et genèse des hydrocarbures).

Les données de calibration (Figure 4.12) sont la carte de R_0 sur l'ensemble de la zone Bourque et les données de R_0 en profondeur le long des puits Gaspé Sud et Sunny Bank. La méthode de travail consiste à comparer les résultats de la simulation avec les données publiées.

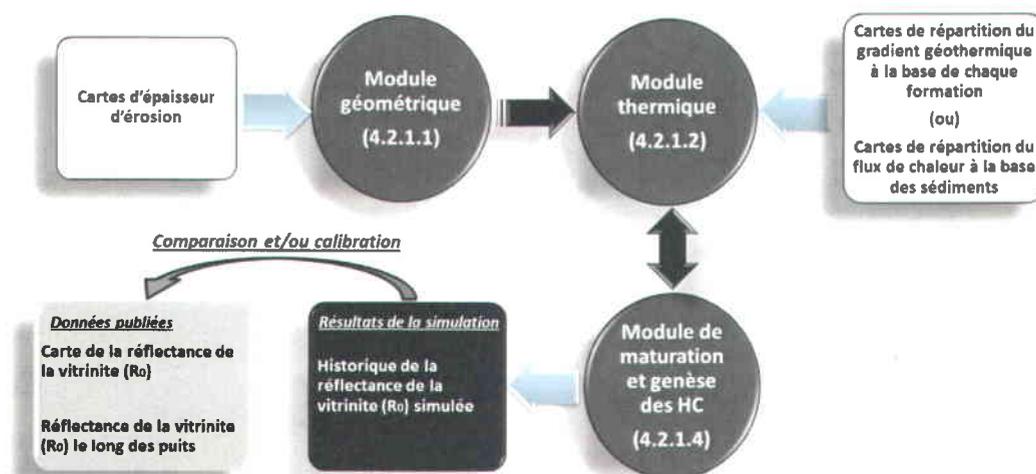


Figure 4.12: Schéma représentant la méthode de travail pour la simulation thermique le long des puits Sunny Bank et Gaspé Sud avec la calibration des épaisseurs d'érosion, du gradient géothermique et du flux de chaleur avec la réflectance de la vitrinite (R_0). Les cases blanches sont les données d'entrée, les cases noires sont les données simulées, les ronds gris sont les modules utilisés dans le logiciel Temis 3D et la case grise contient la liste des données publiées.

Dans cette thèse, le flux de chaleur est privilégié par rapport au gradient géothermique puisque la loi de Fourier (Eq. 4.4) montre que l'augmentation de la température n'est pas linéaire avec la profondeur mais dépend de la conductivité thermique. Cette dernière est importante puisqu'elle est variable selon le type de roches (Turcotte et Schubert, 1982). La prendre en compte permet de considérer la variation de la conductivité des roches en fonction de chacune des lithologies (Turcotte et Schubert, 1982). Des hypothèses de flux de chaleur sont donc proposées dans cette étape.

4.6.2.1. Le puits Sunny Bank n°1

Le Tableau 4.9 présente les données stratigraphiques du puits Sunny Bank n°1 (Figure 2.13; Figure 4.11). Ce sont ces valeurs qui ont servi de données d'entrée pour faire les simulations thermiques. Le Tableau 4.10 montre les moyennes des résultats de Rock Eval et de réflectance de la vitrinite pour ce puits. Ce sont ces valeurs qui ont servi de comparaison aux données simulées.

Tableau 4.9 : Données stratigraphiques du puits Sunny Bank n°1. Tiré d' Amyot (1984).

Groupe	Formation	Lithologie	Profondeur (m)		Épaisseur (m)	Âge (Ma)	
			Sommet	Base		Sommet	Base
Grès de Gaspé	York River	Grès, shale	0	675	675	397,5	407
Calcaires Supérieurs de Gaspé	Indian Cove	Calcaires cherteux	675	1460	785	407	408,4
	Shiphead	Calcaires silteux, grès	1460	1875	415	408,4	409,8
	Forillon	Calcaires cherteux	1875	2410	535	409,8	411,2
Chaleurs	Indian Point	Mudstones calcaireux, calcaires, siltstones	2410	3285	875	411,2	416
Profondeur (m)					3285		

Tableau 4.10 : Résultats des moyennes Rock Eval et de réflectance du puits Sunny Bank no 1. COT : Carbone organique total, T_{max} : température maximale de pyrolyse au pic S₂, IH : Indice d'hydrogène, IO : Indice d'oxygène, R₀ : Réflectance estimée de la vitrinite et HC : Hydrocarbures. L'intervalle roche mère correspond à l'intervalle de la Formation de Forillon dans lequel l'échantillon appartient (affilié au tableau 4.7). Modifié de Roy (2008), Bertrand (1987) et Bertrand et Malo (2001; 2004).

Nombre échantillons	Formation	Profondeur (m)		Résultats Rock Eval				Résultats réflectance		
		Supérieure	Inférieure	COT (%)	T _{max} (°C)	IH (mg/gC)	IO (mg/gC)	R ₀ (%)	Zone pré-métamorphisme	Zone HC
2	York River	308	610	0,46	455	203	7	0,74	Catagenèse	Fenêtre à huile
6	Indian Cove	688	1377	0,28	441	233	10	0,89	Catagenèse	Fenêtre à huile
3	Shiphead	1544	1675	0,38	440	110	11	0,95	Catagenèse	Fenêtre à huile
34	Forillon	1907	2373	0,55	448	101	55	1,20	Catagenèse	Fenêtre à huile
5	Indian Point	2498	3141	0,35	432	20	2	1,74	Catagenèse	Condensats
2	Roncelles	3367	3449	0,15		0	0	2,23	Catagenèse	Gaz sec

Le modèle de Bertrand et Malo (2001) est basé sur une profondeur d'enfouissement maximale de la colonne stratigraphique actuelle de 3500 m qui a été calculée par la méthode de Dow (1977). Les formations érodées sont celles de Malbaie, de Battery Point et une partie du York River (au sommet du puits), ainsi que d'une formation datant du Carbonifère. Les gradients géothermiques ont été estimés entre 23 et 28 °C/km, avec une moyenne de 27 °C/km (Bertrand et Malo, 2001; Tableau 4.11, gradient géothermique B). Le modèle utilisé par Bertrand et Malo (2001) est celui de Baker et Pawlewicz (1986) qui sert à calculer la température maximale lors de l'enfouissement pour chaque profondeur dont la réflectance est connue : $(R_0) = 0,0078 \times T_{max} - 1,2$. Ce modèle tient compte seulement de la température comme facteur de la maturation thermique de la matière organique. Il ne tient pas compte du temps. « La température maximale atteinte lors de l'enfouissement est donc surestimée » d'après Roy (2008).

Pour le modèle de Roy (2008), les gradients géothermiques utilisés sont de 24 °C/km de la sédimentation de la Formation d'Indian Point à celle de la Formation de Malbaie et de 21 °C/km de la discordance acadienne à aujourd'hui (Tableau 4.11, gradient géothermique A).

Expérience : Prenant en compte une même hypothèse de sédimentation/érosion pour le puits Sunny Bank (Bertrand et Malo, 2001), plusieurs **tests de sensibilité des valeurs de gradient géothermique et de flux de chaleur** ont été effectués. Une colonne 1D a été extraite au niveau de la localisation du puits Sunny Bank. Les données simulées en R0 le long de ce puits extrait ont été comparées aux données disponibles le long du puits Sunny Bank (Figure 4.13 et Figure 4.14). Les courbes lissées des données de vitrinite (Figure 4.14) qui sont obtenues par la **moyenne mobile**, ont également été comparées. La moyenne mobile est une moyenne arithmétique de x^i et des deux valeurs qui l'encadrent. Elle s'obtient à partir de l'équation 4.13 d'ordre 3 suivante :

$$y(t) = \frac{x^{(t-1)} + x^{(t)} + x^{(t+1)}}{3} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Analyses des résultats: Sur la Figure 4.13, le test 1 (Tableau 4.11) est une simulation 3D faite avec le gradient géothermique A proposé par Roy (2008). Les résultats du gradient géothermique A ont des valeurs de réflectance différentes du test 1 alors que les deux simulations (en 1D et en 3D) sont basées sur les mêmes hypothèses de taux de sédimentation et de gradient géothermique (Tableau 4.11). Les différences peuvent s'expliquer par le fait que :

- le test 1 se fait en 3D alors que la simulation appelée gradient géothermique A s'est effectuée en 1D;
- les hypothèses de la distribution lithologique ne sont pas les mêmes. Les lithologies utilisées dans la simulation du gradient géothermique A de Roy (2008) ne sont pas détaillées en terme de pourcentage de composition (Tableau 4.9). Les lithologies des tests 1 à 7 sont basées sur le Tableau 4.3 qui représente les pourcentages moyens de chacun des composants de chacune des formations sur l'ensemble de la zone Bourque.

Les valeurs de R_0 simulées avec le logiciel Temis 1D (Figure 4.13, rond blanc) sont supérieures à celles simulées avec Temis 3D (Figure 4.13, carré rose).

Les tests 4, 5 et 7 ont, après la déposition de la Formation de Forillon (409,8Ma), les mêmes hypothèses de flux de chaleur (Tableau 4.11). Avant la déposition de la Formation de Forillon, les valeurs de flux de chaleur varient pour le test 4 de 60 à 55 mW.m^{-2} , pour le test 5 de 55 à 65 à 55 mW.m^{-2} et pour le test 7 de 65 et 55 mW.m^{-2} (Tableau 4.11). Les valeurs de R_0 simulées avec le logiciel Temis 3D pour ces tests sont quasiment les mêmes (Figure 4.13, losange, plus et croix). En conclusion sur ces tests, il n'est pas nécessaire de faire varier le flux de chaleur sur cette période de temps.

Tableau 4.11 : Reconstitution des événements ayant eu lieu dans le puits Sunny Bank n°1. Les épaisseurs des formations d'Indian Point, Forillon, Shiphead, Indian Cove et York River sont les épaisseurs actuelles prises dans le puits Sunny Bank n°1. Deux gradients géothermiques sont répertoriés : en A, celui calculé par Roy (2008) et en B, celui calculé par Bertrand et Malo (2001). L'âge des formations est en millions d'années. Les épaisseurs sont en mètres. Les gradients géothermiques sont en °C/km. La liste des Tests est répertoriée. Le Test 1 est le même que celui utilisé par Roy (2008) mais appliqué au modèle 3D. Les Tests de 2 à 7 sont des Tests faits à partir des flux de chaleur.

Événement	Groupe	Formation	Âge Sommet	Épaisseur sédimentée	Épaisseur érodée	Gradient géothermique A	Gradient géothermique B	Test 1 (gradient géo)	Test 2 (flux de chaleur)	Test 3 (flux de chaleur)	Test 4 (flux de chaleur)	Test 5 (flux de chaleur)	Test 6 (flux de chaleur)	Test 7 (flux de chaleur)
Surface			0											
Discordance 2			2		500 de York River 1000 de Battery Point 500 de Carbonifère	21		21		50		50		50
Sédimentation	Carbonifère		340	500										
Discordance 1			345		1000 de Battery Point 1000 Malbaie					55			50	
Sédimentation	Grès de Gaspé	Malbaie	390	1000						60				
Sédimentation	Grès de Gaspé	Battery Point	395	2000			27							
Sédimentation	Grès de Gaspé	York River	397,5	1175					50					55
Sédimentation	Calcaires Supérieurs de Gaspé	Indian Cove	407	785		24								
Sédimentation	Calcaires Supérieurs de Gaspé	Shiphead	408,4	415				24		65	55	55		
Sédimentation	Calcaires Supérieurs de Gaspé	Forillon	409,8	535									40	40
Sédimentation	Chaleurs	Indian Point	411,2	875										
Sédimentation	Chaleurs inférieur		417,3			-	-							55
Sédimentation	Matapédia		471,8			-	-			55		65		55
Sédimentation	Supergroupe de Québec		478,6			-	-			65	60	55		60

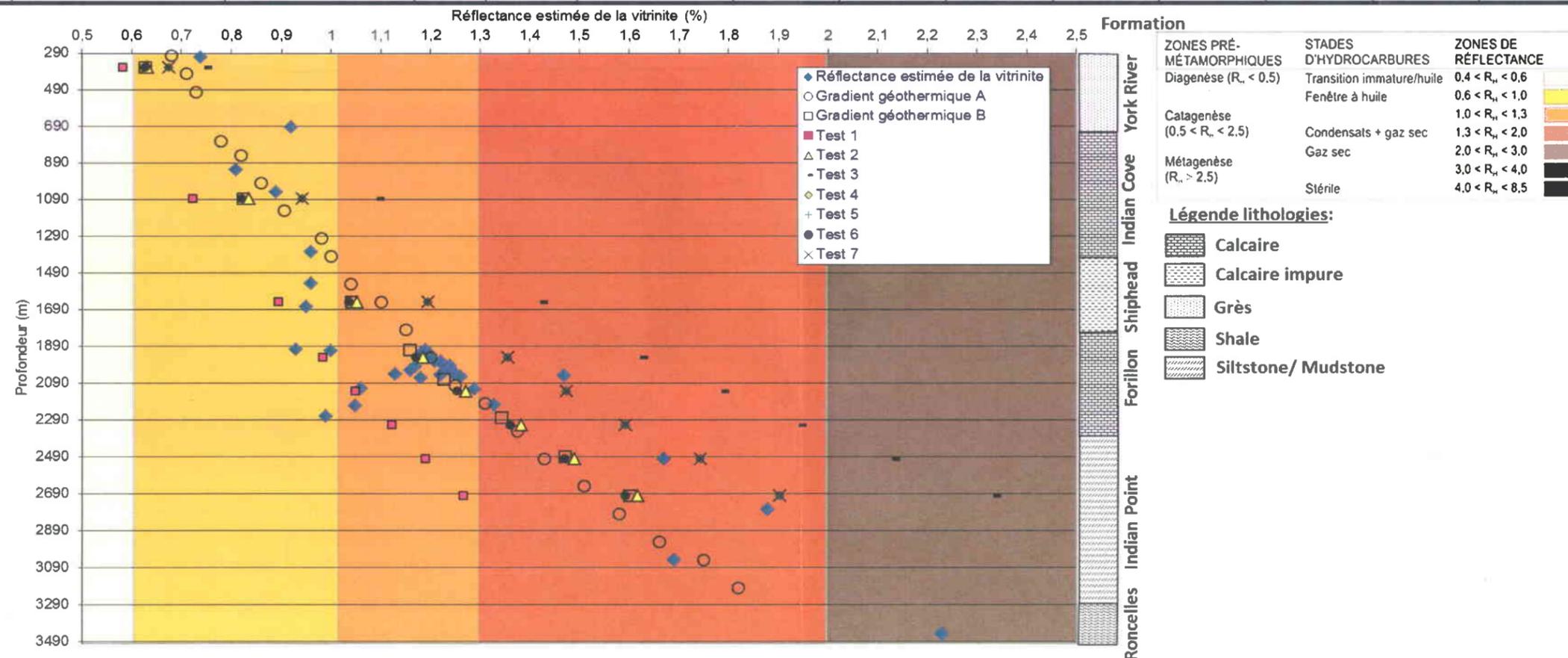


Figure 4.13 : Comparaison des données de réflectance estimée de la vitrinite calculée à partir d'échantillons du puits Sunny Bank n°1 (Tableau 4.10) et celles provenant des données simulées des différentes modélisations répertoriées dans le Tableau 4.11. A noter que les valeurs de R_0 des tests 4, 5 et 7 sont superposées.

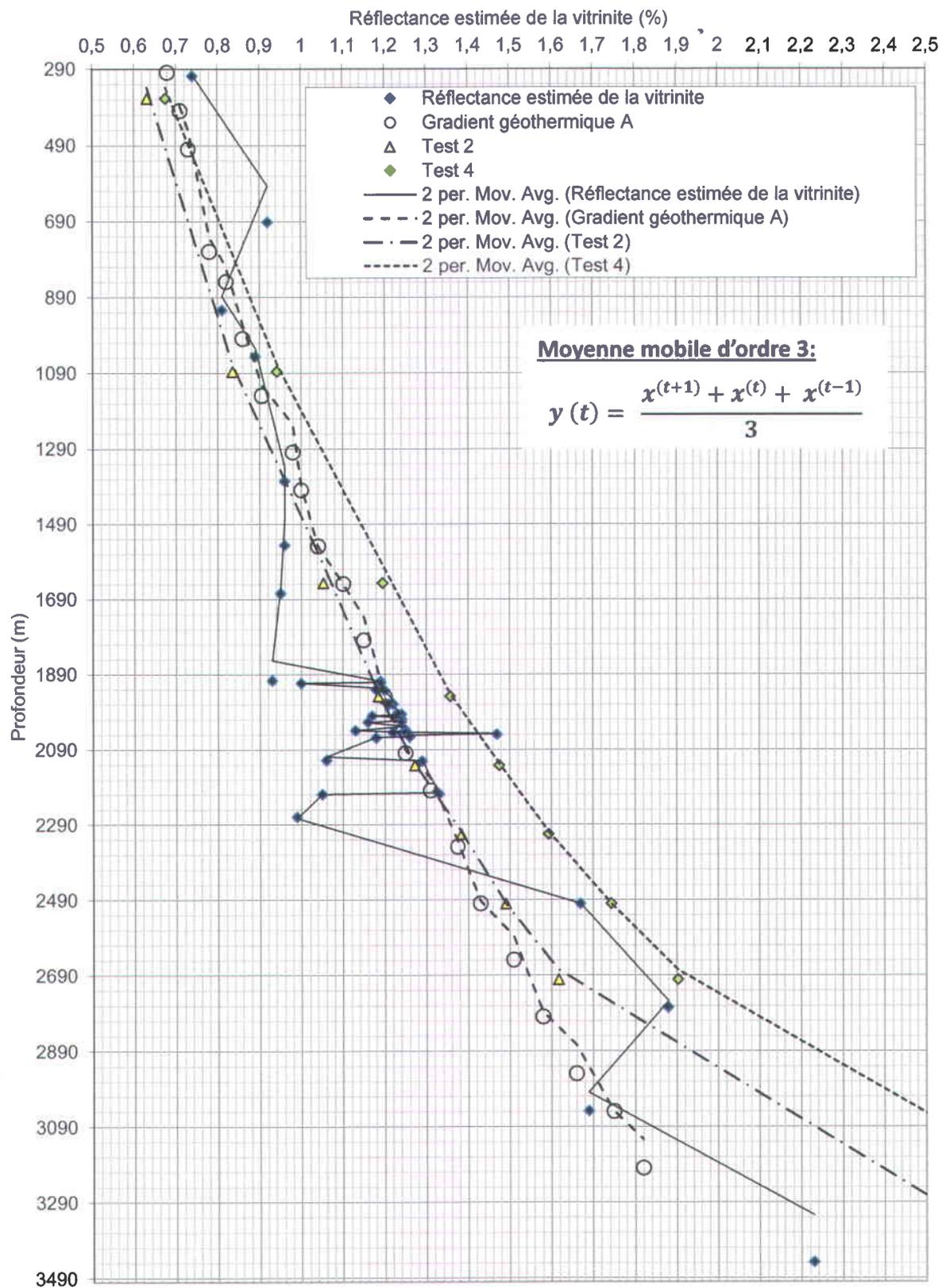


Figure 4.14 : Comparaison et moyenne mobile des données de réflectance estimée de la vitrinite calculée à partir d'échantillons du puits Sunny Bank n°1 (Tableau 4.10) et celles provenant des données simulées des différentes modélisations répertoriées dans le Tableau 4.11.

L'hypothèse du test 2 est un flux de chaleur moyen de 50 mW.m⁻² (Tableau 4.11). L'hypothèse du test 6 est un flux de chaleur variant de 55 à 40 mW.m⁻² avant 409,8 Ma puis à 50 mW.m⁻² après 409,8 Ma (Tableau 4.11). L'hypothèse du gradient géothermique

B (Tableau 4.11) est un gradient géothermique de 27 °C/km provenant de l'article de Bertrand et Malo (2001). Malgré des hypothèses de température ou de flux de chaleur différentes, les valeurs de R₀ simulées résultant des tests 2 et 6 et du gradient géothermique B sont très proches (Figure 4.13).

Les valeurs de R₀ du test 3 correspondant à une variation d'un flux de chaleur élevé à travers le temps (Tableau 4.11) sont très au-dessus des valeurs de R₀ mesurées.

En conclusion des tests sur le puits Sunny Bank n°1, les valeurs du test 2 (Figure 4.14), avec un flux de chaleur constant à 50 mW.m⁻², sont les plus conformes aux données de R₀ mesurées le long de ce puits.

4.6.2.2. Le puits Gaspé Sud n°1

Le Tableau 4.12 présente les données stratigraphiques du puits Gaspé Sud n°1. Ce sont ces valeurs qui ont servi de données d'entrée pour faire les simulations thermiques. Le Tableau 4.13 montre les moyennes des résultats de Rock Eval et de réflectance estimée de la vitrinite pour ce puits. Ce sont ces valeurs qui ont servi de comparaison aux données simulées.

Tableau 4.12: Données stratigraphiques du puits Gaspé Sud n°1. Tiré d'Amyot (1984).

Groupe	Formation	Lithologie	Profondeur (m)		Épaisseur (m)	Âge (Ma)	
			Sommet	Base		Sommet	Base
Grès de Gaspé	York River	Grès, shale	0	450	450	397,5	405
	York Lake	Grès calcaireux	450	490	40	405	407
Calcaires Supérieurs de Gaspé	Indian Cove	Calcaires cherteux	490	1530	1040	407	408,4
	de Shiphead	Calcaires argileux, siltstones dolomitiques, dolomies argileuses	1530	1820	290	408,4	409,8
	Forillon	Calcaires cherteux, siltstones	1820	2800	980	409,8	411,2
Chaleurs	Indian Point	Calcaires argileux, siltstones calcaireux, grès	2800	2850	50	411,2	416
Supergroupe de Québec		Shale	2850	3360	510	472	478
					Profondeur (m)	3360	

Tableau 4.13 : Résultats des moyennes Rock Eval et de réflectance du puits Gaspé Sud no 1. Roches C-O : Roches cambro-ordoviciennes, COT : Carbone organique total, T_{max} : température maximale de pyrolyse au pic S_2 , IH : Indice d'hydrogène, IO : Indice d'oxygène, R_0 : Réflectance estimée de la vitrinite et HC : Hydrocarbures. L'intervalle roche mère correspond à l'intervalle des roches du Supergroupe de Québec et des formations de Forillon et de Shiphead dans lequel l'échantillon appartient (affilié au tableau 4.11). Modifié de Roy (2008), Bertrand (1987) et Bertrand et Malo (2001; 2004).

Nombre échantillons	Formation/groupe	Profondeur (m)		Résultats Rock Eval				Résultats réflectance		
		Supérieure	Inférieure	COT (%)	T_{max} (°C)	IH (mg/gC)	IO (mg/gC)	R_0 (%)	Zone pré-métamorphisme	Zone HC
3	York River	150	390	0,19	447	82	4	0,87	Catagenèse	Fenêtre à huile
7	Indian Cove	530	1450	0,18	440	192	10	1,00	Catagenèse	Fenêtre à huile
8	Shiphead	1450	1835	0,32	446	129	4	1,16	Catagenèse	Fenêtre à huile
25	Forillon	1835	2795	0,25	441	129	12	1,31	Catagenèse	Fenêtre à huile
13	Supergroupe	2795	3260	0,88	467	67	3	1,51	Catagenèse	Condensats

Pour le modèle de Bertrand et Malo (2001), les auteurs estiment que la hauteur d'érosion de 6900 m, calculée à partir de la méthode de Dow (1977), est irréaliste dans ce puits. Aucune modélisation thermique n'a été effectuée pour ce puits. Seules les valeurs expérimentales de la réflectance mesurée de la vitrinite (Bertrand et Malo, 2001), sont disponibles à titre de comparaison (Figure 4.15 et Figure 4.16, losange bleu).

Pour le modèle de Roy (2008), le meilleur calage possible a été fait avec un enfouissement maximal de 6500 m. Les érosions sont celles i) des roches cambro-ordoviciennes (1000 m d'épaisseur) pendant la discordance salinique (Tableau 4.14, discordance 1), ii) 1000 m d'épaisseur de la Formation de Battery Point et 4000 m d'épaisseur de la Formation de Malbaie, durant la discordance acadienne (Tableau 4.14, discordance 2), iii) et enfin, des épaisseurs respectives de 500 m et 1000 m pour les formations de York River et de Battery Point ainsi que 500 m d'épaisseur d'une formation datant du Carbonifère, il y a 2 Ma (Tableau 4.14, discordance 3). Les gradients géothermiques utilisés lors de la simulation avec le logiciel Temis 1D sont de 25 °C/km de la sédimentation des roches cambro-ordoviciennes à la première discordance, de 16 °C/km de la sédimentation de la Formation d'Indian Point à celle de la Formation de Malbaie et de 20 °C/km de la deuxième discordance à aujourd'hui (Tableau 4.14).

Expérience : Pour une même hypothèse de taux de sédimentation/érosion (Roy, 2008), plusieurs tests de gradient géothermique et de flux de chaleur ont été effectués sur l'ensemble du modèle 3D. Une colonne 1D a été extraite au niveau de la localisation du

puits Gaspé Sud. Les données simulées en R_0 le long de ce puits extrait ont été comparées aux données disponibles le long du puits Gaspé Sud (Figure 4.15 et Figure 4.16). Les courbes lissées des données de R_0 (Figure 4.16) qui sont obtenues par la moyenne mobile, ont également été comparées.

Analyses des résultats : L'hypothèse du gradient géothermique A (Roy, 2008) est une variation du gradient géothermique de 25 à 16 puis à 20 °C/km (Tableau 4.14). Les résultats de R_0 du gradient géothermique A ont été simulée avec le logiciel Temis 1D. L'hypothèse du test 1 reprend le gradient géothermique A mais les résultats de R_0 proviennent du logiciel Temis 3D (Tableau 4.14). Dans la Figure 4.15, les valeurs de R_0 du gradient géothermique A et du test 1 sont différentes. Cette constatation est la même que pour le puits Sunny Bank. L'explication est que le modèle du test 1 n'a pas exactement les mêmes lithologies que le modèle de Roy (2008) et la modélisation se fait en trois dimensions pour le test 1 alors que celle du gradient géothermique A s'est effectuée en une dimension.

Le test 4 avec un flux de chaleur qui augmente de 30, à 40 et jusqu'à 50 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ et le test 5 avec un flux de chaleur constant à 40 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, ont les mêmes valeurs simulées de R_0 le long du puits Gaspé Sud. En conclusion, des hypothèses avec des changements de flux de chaleur, n'influencent peu ou pas les valeurs simulées de R_0 , comme dans le puits Sunny Bank n°1.

Les valeurs simulées de vitrinite du test 1 correspondant à l'hypothèse du gradient géothermique A (Tableau 4.14) ont des valeurs très proches des valeurs de vitrinite du test 6 correspondant à un flux de chaleur constant de 33 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (Figure 4.15).

Les valeurs du test 2 provenant de l'hypothèse d'un flux de chaleur constant de 50 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (Tableau 4.14) sont largement au-dessus des valeurs de réflectance estimée de la vitrinite du puits Gaspé Sud (Figure 4.15), contrairement au puits Sunny Bank n°1 (Figure 4.14).

En conclusion des tests sur le puits Gaspé Sud n°1, les valeurs simulées de vitrinite du test 7 correspondant à un flux de chaleur constant à 37 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, sont les plus conformes de celles mesurées le long du puits.

Tableau 4.14: Reconstitution des événements ayant eu lieu dans le puits Gaspé Sud n°1. C-O : Roches cambro-ordoviциennes. Les épaisseurs des formations d'Indian Point, de Forillon, de Shiphead, d'Indian Cove, de York Lake et de York River sont les épaisseurs actuelles prises dans le puits Gaspé Sud n°1. Un gradient géothermique est répertorié en A, celui calculé par Roy (2008). Âge des formations en millions d'années. Les épaisseurs sont en mètres. Les gradients géothermiques sont en °C/km. La liste des Tests est répertoriée. Le Test 1 est le même que celui utilisé par Roy (2008) mais appliqué au modèle 3D. Les Tests de 2 à 7 sont des Tests faits à partir des flux de chaleur.

Événement	Groupe	Formation	Âge Sommet	Épaisseur sédimentée	Épaisseur érodée	Gradient géothermique A	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7
Surface			0										
Discordance 3			2		500 de York River 1000 de Battery Point 500 de Carbonifère	20	20		50	50			
Sédimentation	Carbonifère		340	500									
Discordance 2			345		4000 de Malbaie 1000 de Battery Point								
Sédimentation	Grès de Gaspé	Malbaie	390	4000									
Sédimentation	Grès de Gaspé	Battery Point	395	2000				50			40	33	37
Sédimentation	Grès de Gaspé	York River	397,5	950									
Sédimentation	Grès de Gaspé	York Lake	405	40					30	40			
Sédimentation	Calcaires Supérieurs de Gaspé	Indian Cove	407	1040		16	16						
Sédimentation	Calcaires Supérieurs de Gaspé	Shiphead	408,4	290									
Sédimentation	Calcaires Supérieurs de Gaspé	Forillon	409,8	980									
Sédimentation	Chaleurs	Indian Point	411,2	50									
Discordance 1			418		1000 de roches C-O								
Sédimentation	Supergroupe de Québec		472	1510		25	25			30			

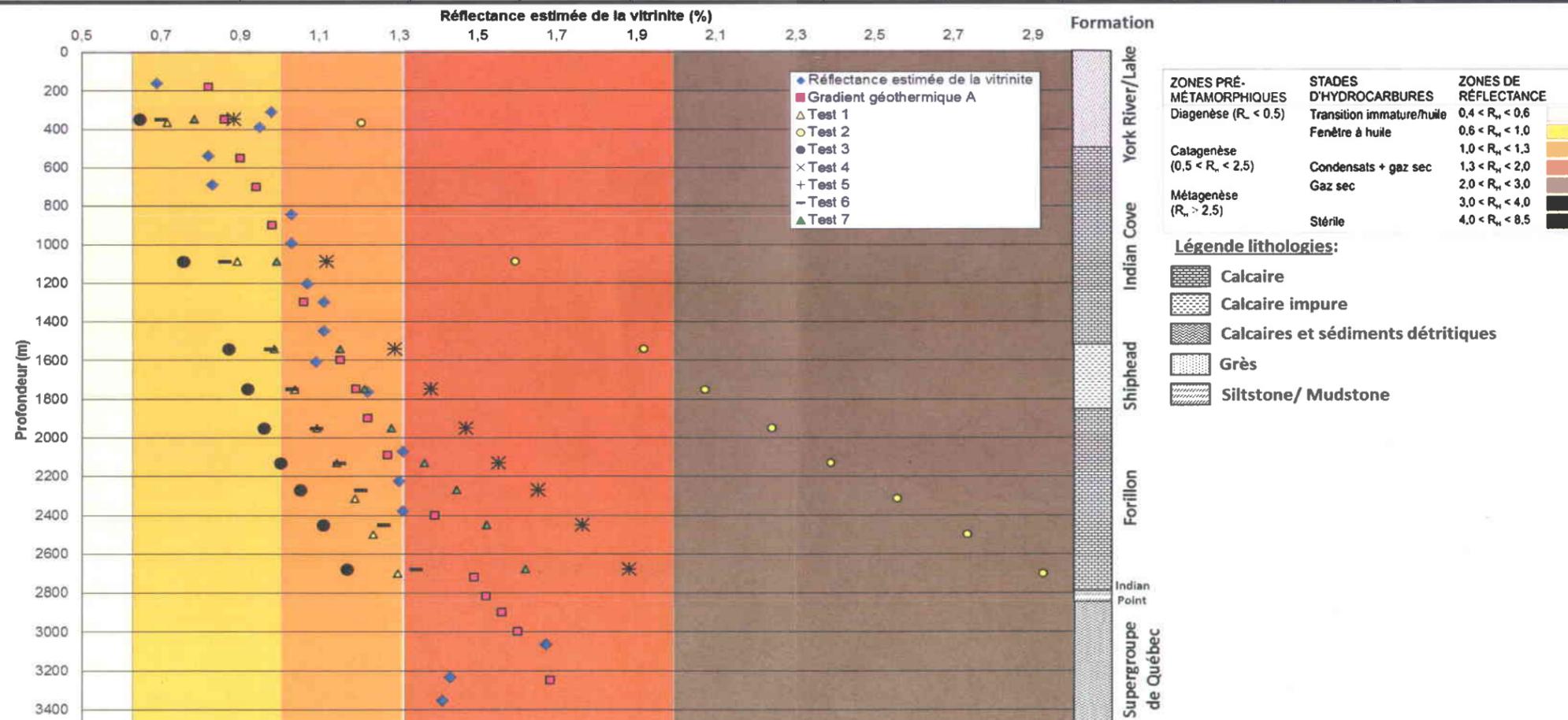


Figure 4.15 : Comparaison des données de réfectance estimée de la vitrinite calculée à partir d'échantillons du puits Gaspé Sud n°1 (Tableau 4.13) et celles provenant des données simulées des différentes modélisations. Le détail des tests se trouve dans le Tableau 4.14.

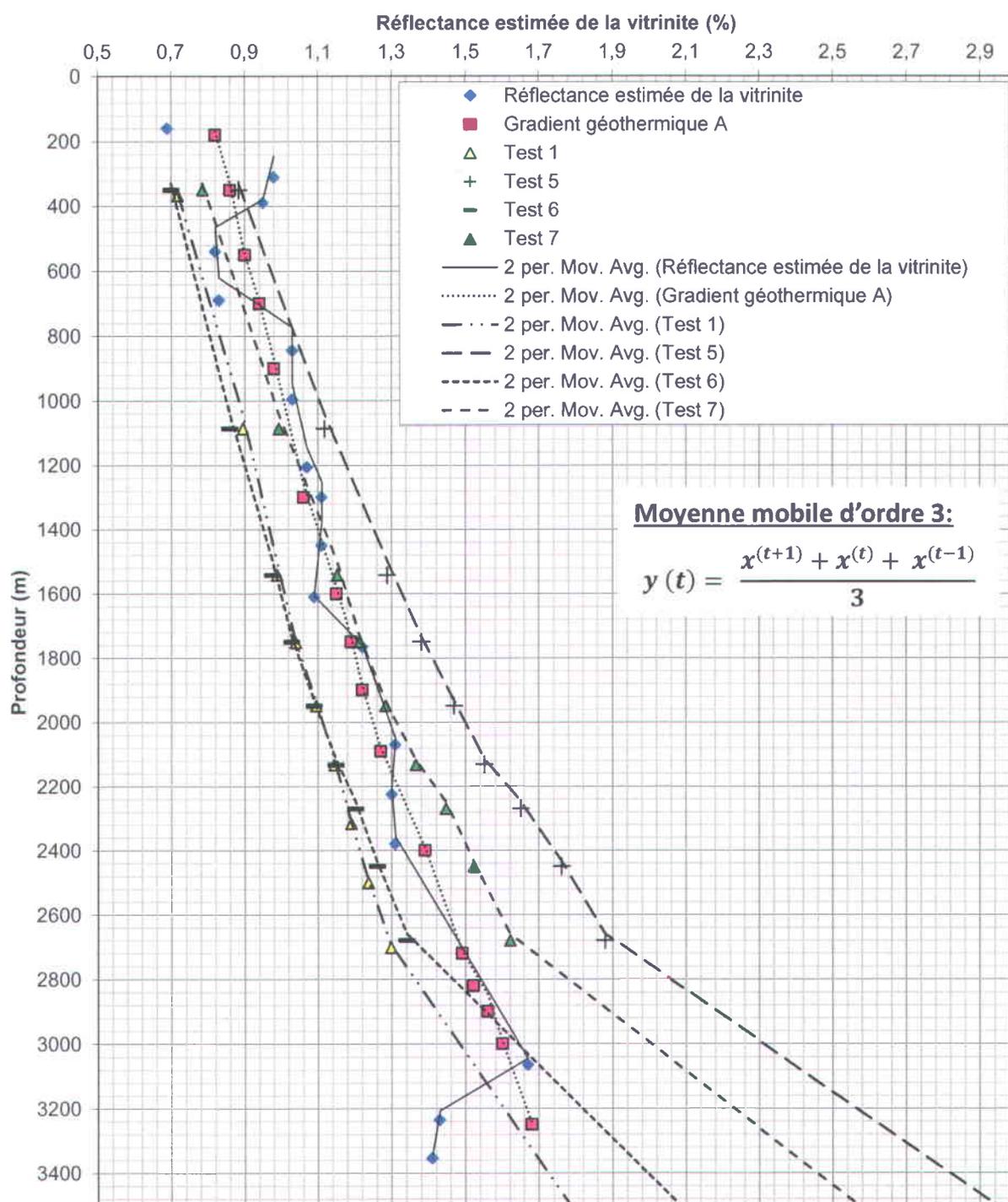


Figure 4.16 : Comparaison et moyenne mobile respective des données de réflectance estimée de la vitrinite calculée à partir d'échantillons du puits Gaspé Sud n°1 (Tableau 4.13) et celles provenant des données simulées des différentes modélisations dont le détail se trouve dans le Tableau 4.14.

4.6.2.3. Comparaison des résultats des puits Sunny Bank n°1 et Gaspé Sud n°1

La Figure 4.18-a présente la carte de réflectance de la vitrinite modélisée à partir des données des épaisseurs d'érosion du puits Sunny Bank (Tableau 4.11 ; Bertrand et Malo, 2001) et un flux de chaleur de 50 mW.m^{-2} . L'ensemble des roches siluro-dévonienne sur la Figure 4.18-a est dans la zone de réflectance comprise entre 0,6 et 1,0 %, sauf la Formation de Battery Point située dans le bloc Nord qui reste inférieure à 0,6 %. Si on compare la Figure 4.18-a avec la Figure 4.18-c, il n'y a pas de zone de réflectance moins élevée dans le synclinal de Champou. Il n'y a pas non plus de zone de réflectance supérieure à 1,0 % dans l'anticlinal de Holland-Mont Bald, dans la zone du puits Gastonguay, ni près de la ville de Murdochville à l'ouest de la zone Bourque. Dans le bloc Nord, la Formation de Battery Point n'a pas les mêmes valeurs de réflectance ($0,4 < R_0 < 0,6$ % comparativement à $0,4 < R_0 < 0,6$ %), et les formations du Supergroupe de Québec ont des zones de réflectance de la vitrinite comprise entre 2,0 et 3,0 % et entre 3,0 et 4,0 %. Les valeurs de R_0 simulées à partir des hypothèses du test 2 du puits Sunny Bank (Figure 4.18, a) ne sont pas comparables aux valeurs de R_0 mesurées (Figure 4.18, c).

La Figure 4.18-b représente la carte de réflectance de la vitrinite modélisée à partir des données des épaisseurs d'érosion du puits Gaspé Sud proposées par Roy (2008) (Tableau 4.14) et un flux de chaleur de 37 mW.m^{-2} . De même que sur la Figure 4.18-a, l'ensemble des roches siluro-dévonienne sont dans la zone de réflectance comprise entre 0,6 et 1,0 %, sauf la Formation de Battery Point située dans le bloc Nord avec une réflectance inférieure à 0,6 %. Par contre, au centre de l'anticlinal Holland-Mont Bald, il y a des valeurs de R_0 comprises entre 1,0 et 1,3 % qui se rapprochent des valeurs de R_0 des échantillons de surface (Figure 4.18, c). Autre différence entre les deux cartes, les roches qui composent le Supergroupe de Québec dans le bloc Nord ont des valeurs de réflectance estimée de la vitrinite comprises $1,3 < R_0 < 2,0$ % là où les valeurs des échantillons de surface sont de comprises $2,0 < R_0 < 3,0$ %. Les valeurs de R_0 simulées à partir des hypothèses du test 7 du puits Gaspé Sud (Figure 4.18, b) ne sont pas comparables aux valeurs de R_0 mesurées.

En conclusion de l'analyse des cartes de réflectance de la vitrinite (Figure 4.18, a et b), les hypothèses proposées par Bertrand et Malo (2001) et Roy (2008) ne sont pas applicables pour l'ensemble de la zone puisque les cartes simulées de R_0 sont différentes de la carte de référence (Figure 4.18, c). De plus, les calculs de gradients géothermique effectués en 1D (Gradients géothermiques A, Figure 4.13 et Figure 4.15 ; Roy, 2008) ne sont pas applicables à l'ensemble du modèle 3D dans la zone Bourque (tests 1, Figure 4.13 et Figure 4.15). Dans notre cas, les valeurs doivent être réévaluées à la hausse, ce qui pourrait être causée par la propagation verticale et latérale de la chaleur dans un environnement en 3D.

Le flux de chaleur à l'âge actuel dans la zone Bourque est de 50 mW.m^{-2} (Drury *et al.*, 1987). L'hypothèse des taux d'érosion du puits Sunny Bank n°1 avec un flux de chaleur de 50 mW.m^{-2} (Figure 4.14, test 2) a donné des valeurs simulées de R_0 les plus conformes à celles mesurées le long du puits. En conclusion, l'hypothèse de flux de chaleur à la base des sédiments de 50 mW.m^{-2} est l'hypothèse retenue pour les simulations détaillées ultérieurement.

4.6.1. SENSIBILITE DU TR ET DE LA VITRINITE A LA VARIATION DES EPAISSEURS D'EROSION

Dans la partie 4.6.2, l'extrapolation des épaisseurs érodées sur l'ensemble de la zone Bourque provenant des hypothèses de taux de sédimentation/érosion et de gradients géothermiques publiés donnaient des valeurs simulées de R_0 différentes de celles calculées à partir des échantillons de surface (Figure 4.18). Il est donc nécessaire de créer de nouvelles hypothèses d'épaisseurs d'érosion avec une variation latérale qui tiennent compte de l'historique du jeu des différentes failles et des principaux évènements tectoniques, tout en gardant un flux de chaleur de 50 mW.m^{-2} .

Pour comprendre l'impact de l'enfouissement/érosion sur les roches mères (Figure 4.17), l'évolution du taux de transformation (Eq. 4.10) du kérogène a été étudiée. Pour cela quatre points ont été choisis. Ils sont localisés chacun dans un des quatre blocs définis dans le chapitre 2 (Figure 4.5, Figure 4.11). Les trois roches mères choisies sont les formations de Forillon et de Shiphead avec un kérogène de type II et un index d'hydrogène de 469 mg/gC et la Formation de Rivière Ouelle avec un kérogène de type II et un index d'hydrogène de 500 mg/gC .

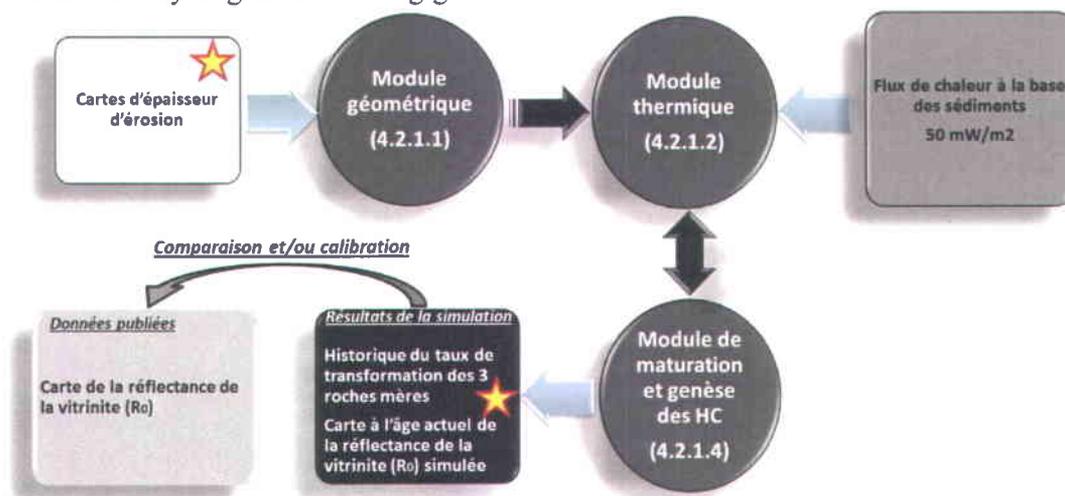
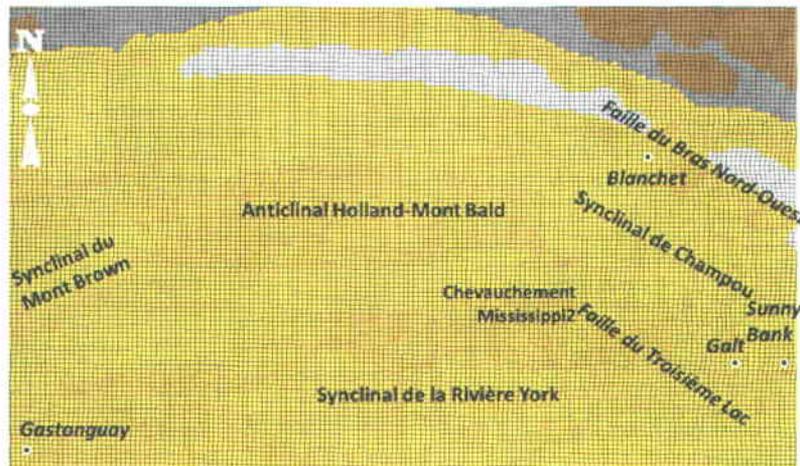
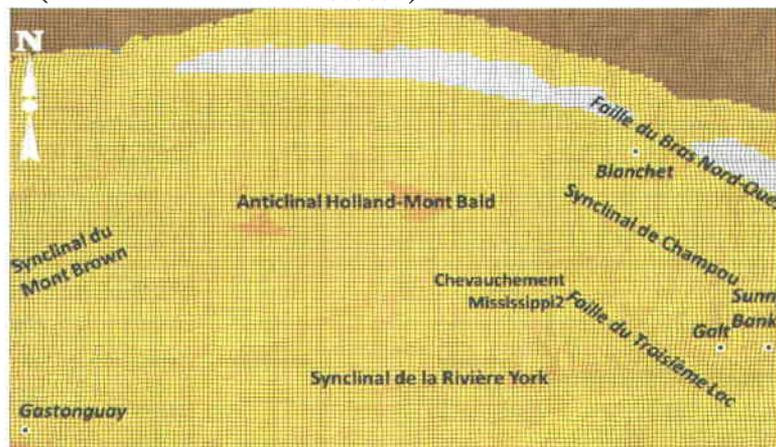


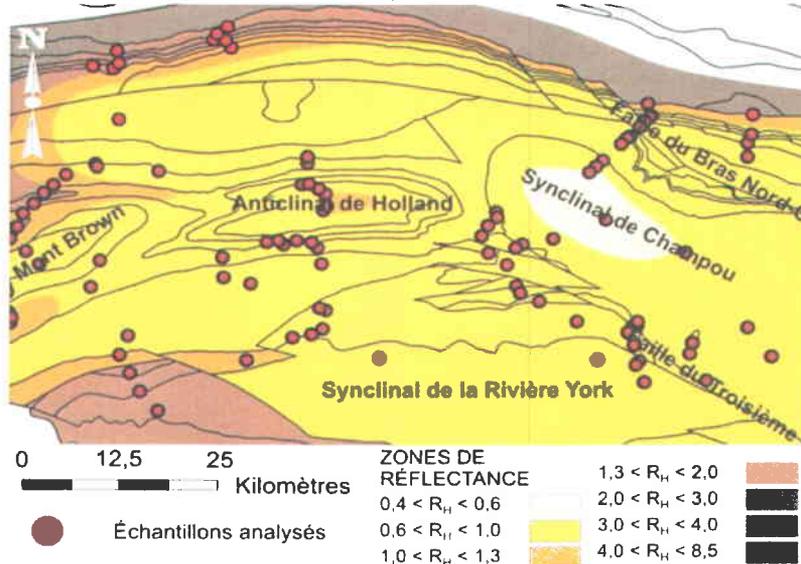
Figure 4.17 : Schéma représentant la méthode de travail pour la sensibilité du TR et de la R_0 à la variation des épaisseurs d'érosion avec un flux de chaleur fixé à 50 mW.m^{-2} . La case blanche est la donnée d'entrée, la case grise foncée est la donnée d'entrée fixe, la case noire représente les données simulées, les ronds gris sont les modules utilisés dans le logiciel Temis 3D, la case grise claire est la donnée de calibration et les étoiles localisent les données qui vont varier.



a) Carte de réflectance estimée de la vitrinite modélisée à partir des données des taux d'érosion du puits Sunny Bank n°1 (soit un enfouissement max de 3500m) et un flux de chaleur de 50mW.m⁻²



b) Carte de réflectance estimée de la vitrinite modélisée à partir des données des taux d'érosion du puits Gaspé Sud n°1 (soit un enfouissement max de 6500m) et un flux de chaleur de 37mW.m⁻²



c) Carte de réflectance estimée de la vitrinite faite à partir d'échantillons de surface (Bertrand et Malo, 2001 : Figure 4.7)

Figure 4.18 : Comparaison des cartes de réflectance estimée de la vitrinite résultant de la modélisation avec le logiciel Temis 3D. Avec en : a) un flux de chaleur de 50 mW.m⁻² en accord avec les données du puits Sunny Bank n°1 et en b) un flux de chaleur de 37 mW.m⁻² en accord avec les données du puits Gaspé Sud n°1 et en c) la carte faite à partir des échantillons de surface.

4.6.3.1. Construction des cartes d'érosion

L'épaisseur des formations dans chacun des puits est variable (Chapitre 3, Tableau 3.2). La première hypothèse prend en compte une épaisseur uniforme pour chacune des formations. Le peu de données disponibles pour quantifier les érosions dans la zone Bourque et la méthode de création des cartes d'épaisseur d'érosion avec le logiciel Temis 3D expliquent ce choix. La méthode de création des cartes d'épaisseur d'érosion consiste à (Figure 4.19):

1. créer une carte d'épaisseur x de la formation à l'âge actuel,
2. créer une carte d'épaisseur y maximale de sédimentation de cette même formation (carte d'épaisseur avant érosion),
3. prendre la carte d'épaisseur y et la soustraire avec la carte d'épaisseur x de la formation à l'âge actuel pour obtenir la carte d'épaisseur z d'érosion de la formation.

Ces cartes d'épaisseur sont i) approximatives puisque par exemple pour les dépôts syn-tectoniques, le taux de sédimentation n'est pas uniforme et ii) qualitatives car il n'y a pas beaucoup de données dans la zone Bourque pour contraindre les taux d'érosion.

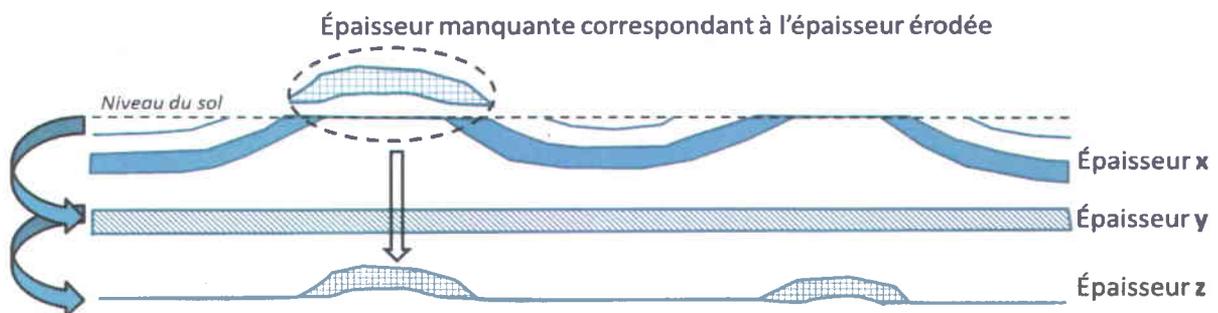


Figure 4.19: Schématisation du processus de construction des épaisseurs érodées dans le logiciel Temis 3D. L'épaisseur x représente l'épaisseur de la formation à l'âge actuel. L'épaisseur y représente l'épaisseur maximale atteinte par la formation. L'épaisseur z représente l'épaisseur érodée qui correspond à la soustraction de l'épaisseur y et l'épaisseur x . Attention : si la formation étudiée est enfouie sous d'autres formations le processus de construction des épaisseurs érodées se complexifie.

4.6.3.2. Choix des scénarios pour la variation des épaisseurs érodées

Le choix des scénarios a été fait pour répondre aux questions posées dans la problématique (Chapitre 1).

Pour savoir pourquoi des roches ordoviciennes ont des valeurs de R_0 à l'âge actuel aussi basses dans le bloc Nord, nous avons fait varier les épaisseurs érodées durant la discordance taconienne (Tableau 4.15, discordance 1, sédiments au nord) dans le bloc Nord. Une hypothèse d'épaisseur d'érosion moindre (1000 m) et plus tardive (418 Ma) des roches cambro-ordoviciennes proposées par Roy (2008 ; Tableau 4.14) a comme conséquence des valeurs de R_0 trop importante par rapport aux valeurs mesurées (Figure 4.18, a et c). Les hypothèses sont donc de faire varier les épaisseurs d'érosion seulement

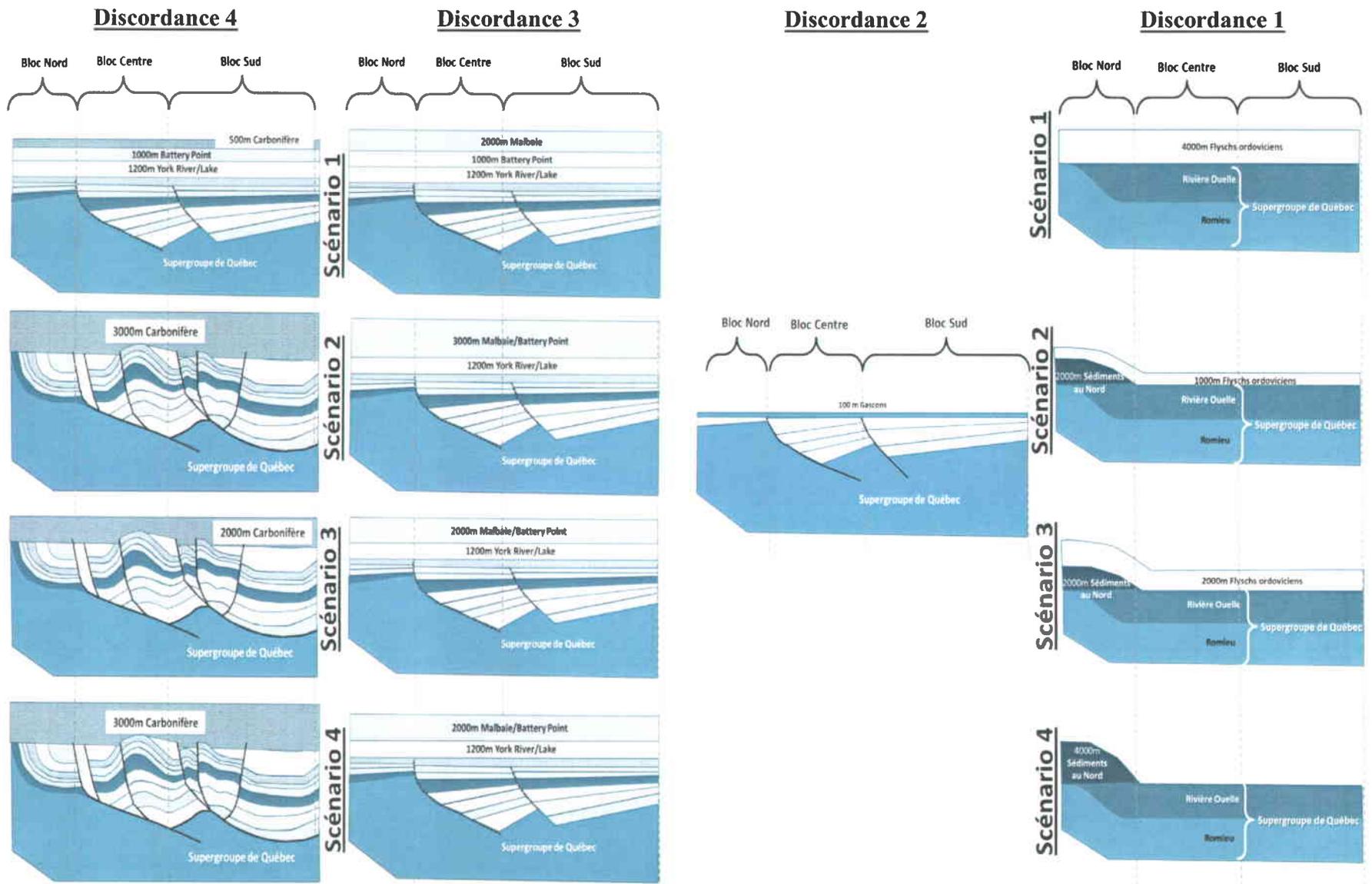


Figure 4.20: Coupes schématiques représentant l'enfouissement des formations le long de la ligne sismique 82-152 (Chapitres 2 et 3) en fonction des hypothèses d'épaisseurs d'érosion choisies (scénarios 1, 2, 3 et 4) et des quatre événements appelés discordances 1, 2, 3 et 4 (Tableau 4.15).

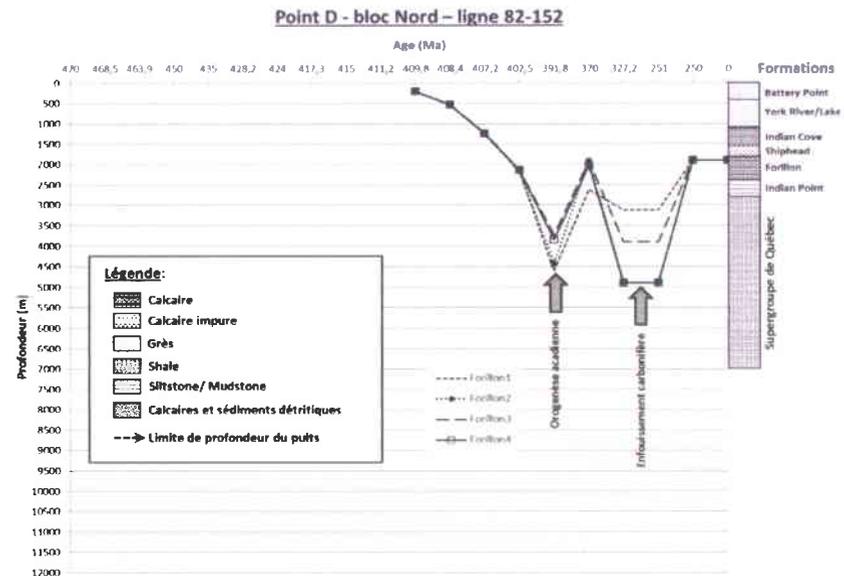
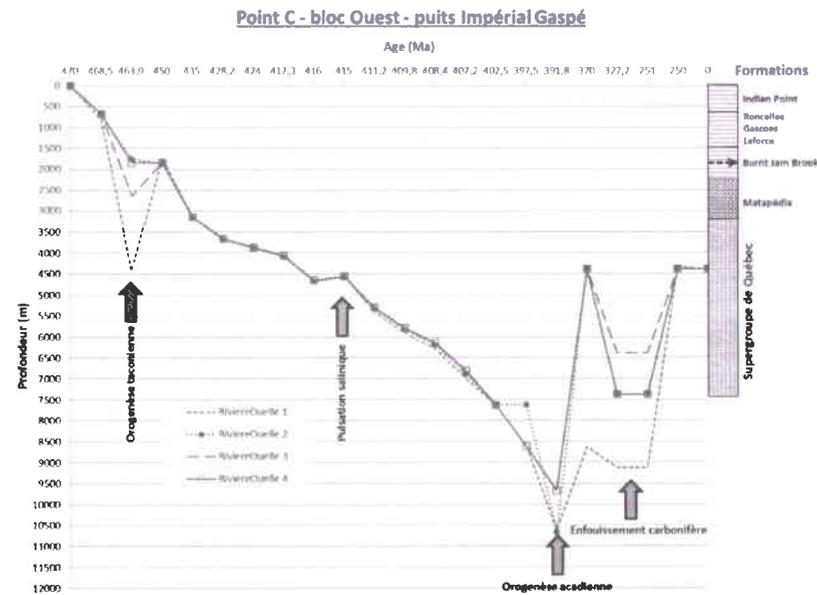
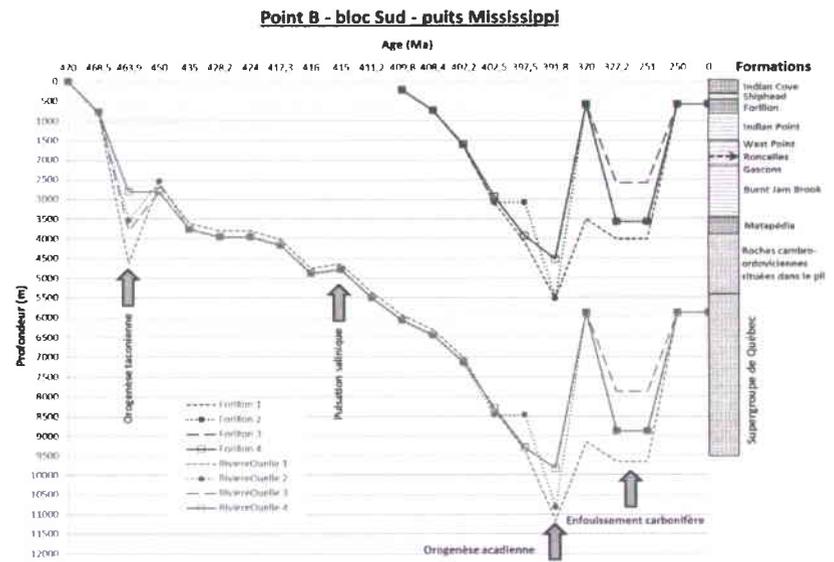
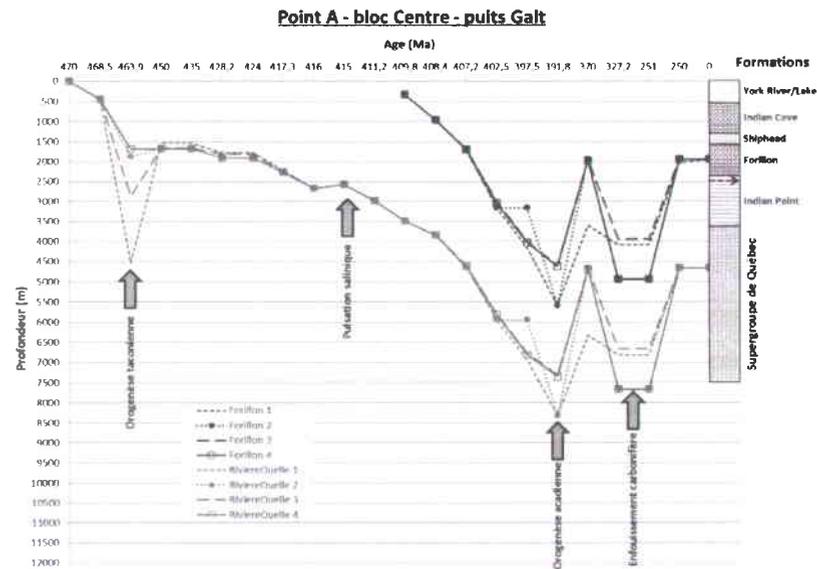


Figure 4.21 : Courbes d'enfouissement des trois roches mères Rivière Ouette, Forillon et Shiphead le long des quatre puits extraits dans le modèle 3D en fonction du temps et des hypothèses d'épaisseurs d'érosion choisis dans les scénarios 1, 2, 3 et 4.

durant l'érosion taconienne. De plus, comme expliqué dans le Chapitre 3, un modèle doit être rétro-déformable (Suppe, 1985). Ce principe a été utilisé pour la restauration avec la méthode *Backstripping* du logiciel Temis 3D. La structure en nappe des roches du Supergroupe de Québec (Figure 4.20, discordance 1) impose d'enfouir plus profondément le bloc Nord pour obtenir un dépôt à l'horizontal de la Formation Rivière Ouelle. Il y a soit 2000 ou 4000 m de sédiments au nord pour pouvoir remettre à plat le modèle durant la discordance 1 (Figure 4.20 et Tableau 4.13).

Pour savoir si le bloc Centre a toujours été un haut fond, nous avons fait varier les épaisseurs durant la discordance taconienne sur l'ensemble de la zone Bourque (Tableau 4.15, discordance 1, Flyschs ordoviciens). Durant la discordance 1, les épaisseurs varient de 0 à 1000, 2000 et 4000 m de flyschs ordoviciens.

Pour savoir si l'enfouissement maximal a eu lieu à l'orogénèse acadienne (Tableau 4.15, discordance 3) ou au Carbonifère (Figure 4.20 et Tableau 4.15, discordance 4), nous avons fait varier les épaisseurs érodées durant ces deux discordances variant de 2000 à 3000 m pour le Groupe des Grès de Gaspé et de 500 à 2000 et 3000 m pour les roches carbonifères.

D'après le puits Gaspé Sud (Figure 4.10 ; C093) situé dans le bloc Centre, les valeurs ne montrent pas de saut de réflectance de la vitrinite entre les roches du Supergroupe de Québec et celles du Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé, ce qui indique un enfouissement continu ou que les périodes d'érosion précèdent l'enfouissement maximal. Ainsi, dans le bloc Centre, nous avons considéré qu'il n'y a eu aucun dépôt de roches des groupes de Matapédia et de Chaleurs inférieur (soit entre 437,5 Ma et 415 Ma).

Les scénarios choisis sont les suivants (Figure 4.20 et Tableau 4.15):

- **Scénario 1** : un enfouissement de la roche mère Rivière Ouelle sous 4000 m de flyschs ordoviciens déposés uniformément, puis érodés. Un enfouissement des trois roches mères sous 3000 m de sédiments de la dernière moitié du Groupe des Grès de Gaspé puis, une érosion de 2000 m de la Formation de Malbaie. Un dépôt de 500 m de la formation datant du Carbonifère et une érosion de 1200 m de la Formation de York River, 1000 m de la Formation de Battery Point et 500 m des roches carbonifères. Ce scénario reprend une partie des hypothèses de Bertrand et Malo (2001) afin de savoir si une meilleure approximation des épaisseurs érodées en prenant en compte les anticlinaux ou les synclinaux peut améliorer la comparaison des résultats de R_0 simulées à celles mesurées.
- **Scénario 2** : un enfouissement de la roche mère Rivière Ouelle sous soit 1000 m de sédiments ou 3000 m de sédiments (2000 m déposés juste au nord et 1000 m déposés uniformément), puis érosion. Un enfouissement des trois roches mères avant les dépôts carbonifères avec 3000 m de sédiments de la dernière moitié du Groupe des Grès de Gaspé puis, une érosion de ces 3000 m en plus des 1200 m de la Formation

York River. Et un dépôt et une érosion de 3000 m de la formation datant du Carbonifère.

- **Scénario 3** : un enfouissement de la roche mère Rivière Ouelle sous soit 2000 m de sédiments, soit 4000 m de sédiments (2000 m déposés juste au nord pour reconstituer un dépôt horizontal avant la déformation taconienne et 2000 m de flyschs ordoviciens déposés uniformément), puis érosion. Un enfouissement des trois roches mères sous 2000 m de roches des formations de Malbaie et Battery Point confondues puis, érosion de ces 2000 m en plus des 1200 m de la Formation de York River. Et un dépôt et une érosion de 2000 m de la formation datant du Carbonifère.
- **Scénario 4** : un enfouissement de la roche mère Rivière Ouelle sous 4000 m de sédiments déposés juste au nord pour reconstituer un dépôt horizontal avant la déformation taconienne, puis érodés. Un enfouissement des trois roches mères sous 2000 m de sédiments de la dernière moitié du Groupe des Grès de Gaspé, puis une érosion de ces 2000 m en plus des 1200 m de la Formation de York River. Enfin, un dépôt et une érosion de 3000 m de la formation datant du Carbonifère.

4.6.3.3. Analyse de l'impact de différentes épaisseurs d'érosion sur l'évolution du TR

- **Pour le point A (bloc Centre)** (Figure 4.22, a et b):

Le point A se situe dans le bloc Centre au niveau du puits Galt (Figure 4.11) proche de la FTL. Le long du puits Galt (C100 ; Figure 4.21), il n'y aucune formation manquante. Les différentes hypothèses d'épaisseurs érodées au niveau de ce point prennent en compte le fait qu'il n'y a pas d'érosion pour les formations d'Indian Point, de Forillon, de Shiphead et d'Indian Cove (Tableau 4.15) et qu'il n'y a pas eu de déposition des roches des groupes de Matapédia et de Chaleurs inférieur (soit entre 437,5 Ma et 415 Ma). Pour les roches déposées à partir du Dévonien médian, la variation des épaisseurs d'érosion ne peut s'effectuer que sur l'épaisseur des formations de York River, de Malbaie, de Battery Point et des roches du Carbonifère et le moment où ces épaisseurs sont érodées. Par exemple, les différences entre les scénarios 1 et 2 pour les roches siluro-dévoniennes et carbonifères (Tableau 4.15 et Figure 4.21) sont i) pour un même taux de sédimentation des formations de Battery Point et de Malbaie, il y a pour le scénario 2, érosion de 1000 m de la Formation de Battery Point à 370 Ma alors que pour le scénario 1, les 1000 m seront érodés à 250 Ma, et ii) le dépôt puis l'érosion de 3000 m de roches au Carbonifère alors qu'il n'y a que 500 m de roches du Carbonifère pour le scénario 1.

La Formation de Forillon : le TR de la Formation de Forillon pour les scénarios 1 et 2 est différent (Figure 4.22, a). A 391,8 Ma, le TR du scénario 1 atteint la valeur de 0,73 et

pour le scénario 2 de 0,84. Pourtant, la roche mère Forillon est enfouie sous la même épaisseur de roches (Figure 4.21). La différence du TR des scénarios 1 et 2 s'explique par la

façon dont les épaisseurs ont été déposées (Figure 4.21): i) les épaisseurs du scénario 1 ont été déposées en deux épisodes : 1000 m Battery Point déposés à 397,5 Ma et 2000 m Malbaie déposés à 391,8 Ma, ii) les épaisseurs du scénario 2 ont été déposées en une fois: 3000 m Malbaie/Battery Point à 391,8 Ma. A 370 Ma, le TR des scénarios 1 et 2 atteint la valeur de 0,95 car il y a eu la même quantité de roches au-dessus de la Formation de Forillon depuis environ 20 Ma pour ces deux scénarios (Figure 4.20). A partir de 327,2 Ma, les valeurs de TR des scénarios 1 et 2 diffèrent. Le scénario 1 a une hypothèse d'épaisseur érodée de 500 m de roches du Carbonifère qui s'ajoute aux roches du Dévonien qui n'ont toujours pas été érodées. L'enfouissement maximal entre 327,2 Ma et 251 Ma est de 4044 m. Au contraire, le scénario 2 avec une hypothèse d'épaisseur érodée de 3000 m de roches du Carbonifère, a un enfouissement maximal de 4922 m. La réelle différence pour l'enfouissement de la roche mère Forillon entre ces deux scénarios est de 878 m (Figure 4.21). Malgré cette différence d'épaisseur, entre 327,2 et 251 Ma, le TR du scénario 2 augmente légèrement passant de 0,95 à 0,96. L'une des différences entre les scénarios 1 et 2 et le scénario 4 est le dépôt de 1000 m en moins de la Formation de Malbaie pour le scénario 4 (Tableau 4.15 ; Figure 4.20 ; discordance 3). Le TR du scénario 4 à l'âge actuel atteint une valeur de 0,94, équivalente aux valeurs de TR des scénarios 1 et 2. La Formation de Forillon atteint un TR de 0,94 pour le scénario 4 parce que l'hypothèse d'enfouissement est de 4922 m à 251 Ma, alors qu'à 391,8 Ma, l'épaisseur était de 4644 m. Finalement, le TR du scénario 3 à l'âge actuel est de 0,66 car la Formation de Forillon n'atteint jamais la profondeur de 4922 m (4644 m à 391,8 Ma et 3944 m à 251 Ma ; Figure 4.21). La légère augmentation est due à la durée de l'enfouissement de la Formation de Forillon sous un minimum 3944 m durant 21,8 Ma puis durant 77,2 Ma.

Les valeurs du TR de la roche mère Forillon des scénarios 1, 2 et 4 sont très proches, respectivement 0,93, 0,94 et 0,96, à partir de 251 Ma. Ces trois scénarios ont des hypothèses d'enfouissement de 2500 à 3000 m de sédiments durant le Carbonifère. **En conclusion, la variation du TR dépend aussi bien du temps de dépôt des roches que de l'épaisseur du dépôt.**

La Formation de Shiphead : aucune courbe d'évolution du TR n'est la même (Figure 4.22). **La Formation de Shiphead est donc très sensible aux variations de l'enfouissement.** Les scénarios 3 et 4 ont les TR les plus bas (environ 0,15) à 327,2 Ma par rapport aux scénarios 1 et 2 (autour de 0,6). Cette différence est due aux 1000 m de moins qu'il y a dans les scénarios 3 et 4 (Tableau 4.15). Les courbes d'évolution de TR des scénarios 2 - 4 et 1 - 3 ont les mêmes tendances, respectivement une forte augmentation et un plateau. Tout comme la Formation de Forillon, cette différence correspond aux 1000 m de Carbonifère de plus ajoutés dans les scénarios 2 et 4 (Tableau 4.15). La différence de profondeur des points choisis pour les formations de Forillon et de

Tableau 4.15: Détail des scénarios proposés dans le cadre de l'étude de la variation des taux d'érosion avec la reconstitution des événements pour l'ensemble du modèle 3D de la zone Bourque. La discordance 1 correspond à la discordance taconienne, la discordance 2 à la discordance salinique, la discordance 3 à la discordance acadienne et la discordance 4 à la discordance post-carbonifère.

Ordre	Système géologique	Groupe	Formation	Évènement	Âge toit (Ma)	Épaisseur minimum dans le logiciel Temis 3D	Épaisseur maximum dans le logiciel Temis 3D	Épaisseur minimum dans la littérature	Épaisseur maximum dans la littérature	Température de surface (°C)	Paléobathymétries (m)	TOC de départ (%)	Kérogène		Flux de chaleur (mW.m ⁻²)	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	
													HI	Type		Épaisseur érodée (m)	Épaisseur érodée (m)	Épaisseur érodée (m)	Épaisseur érodée (m)	
26				Surface	0					15										
25				Discordance 4	250					15						500 Carbonifère 1000 Battery Point 1200 York River 800 Indian-Cove, 400 Shiphead, 600 Forillon 800 Indian-Point	3000 Carbonifère	2000 Carbonifère	3000 Carbonifère	
24				Sédimentation	327,2			180	12000	20	0									
23	Carbonifère			Discordance 3	370					20						2000 Malbaie	2000 Malbaie 1000 Battery Point 1200 York River 800 Indian-Cove, 400 Shiphead, 600 Forillon 800 Indian-Point	1000 Malbaie 1000 Battery Point 1200 York River 800 Indian-Cove, 400 Shiphead, 600 Forillon 800 Indian-Point	1000 Malbaie 1000 Battery Point 1200 York River 800 Indian-Cove, 400 Shiphead, 600 Forillon 800 Indian-Point	
22			Malbaie	Sédimentation	391,8			600	?	20	0									
21		Grès de Gaspé	Battery Point	Sédimentation	397,5	793	1405	2120	3000	20										
20			York River	Sédimentation	402,5	113	1957	300	3500	20	5									
19	Dévonien tardif à médian		York Lake	Sédimentation	407	45	88		1300	20										
18				Indian Cove	Sédimentation	407,2	3	1240	140	850	20	100								
17		Calcaire supérieur de Gaspé	Shiphead	Sédimentation	408,4	98	610	163	515	20		1	469	II						
16			Forillon	Sédimentation	409,8	100	1570	275	582	20		1	469	II	50					
15			Indian Point	Sédimentation	411,2	117	1938	200	1000	10	100									
14			Roncelles	Sédimentation	414,4	42	1624	40	300	10										
13			West Point	Sédimentation	415	65	840	10	800	27	2									
12				Discordance 2	416					10						100 Gascon	100 Gascon	100 Gascon	100 Gascon	
11		Groupe des Chaleurs	Giffon Cove River	Sédimentation	416	110	110	10	60	10	100									
10			Gascon	Sédimentation	417,3	30	30	10	608	10										
9			Laforce	Sédimentation	422	543	543	15	260	27										
8			Sayabec	Sédimentation	424			10	600	27										
7			Burnt Jam Brook	Sédimentation	428,2	140	1440	20	600	10										
6			Val Brillant	Sédimentation	428,2			60	200	10										
5	Ordovicien tardif à Silurien tardif		Matapédia	White Head	Sédimentation	437,5	493	493	720	2400	10	150								
4				Discordance 1	450					5						4000 Flyschs ordoviciens	1000 Flyschs ordoviciens 2000m sédiments au nord	2000 Flyschs ordoviciens 2000m sédiments au nord	4000m sédiments au nord	
3		Supergroupe de Québec	Tourelle	Sédimentation	463,9			?	?	5	1000									
2			Rivière Ouelle	Sédimentation	468,5			700	10000	5	1000	2	500	II						
1	Cambrien à Ordovicien tardif		Romieu	Sédimentation	473,6			?	?	5	1000									

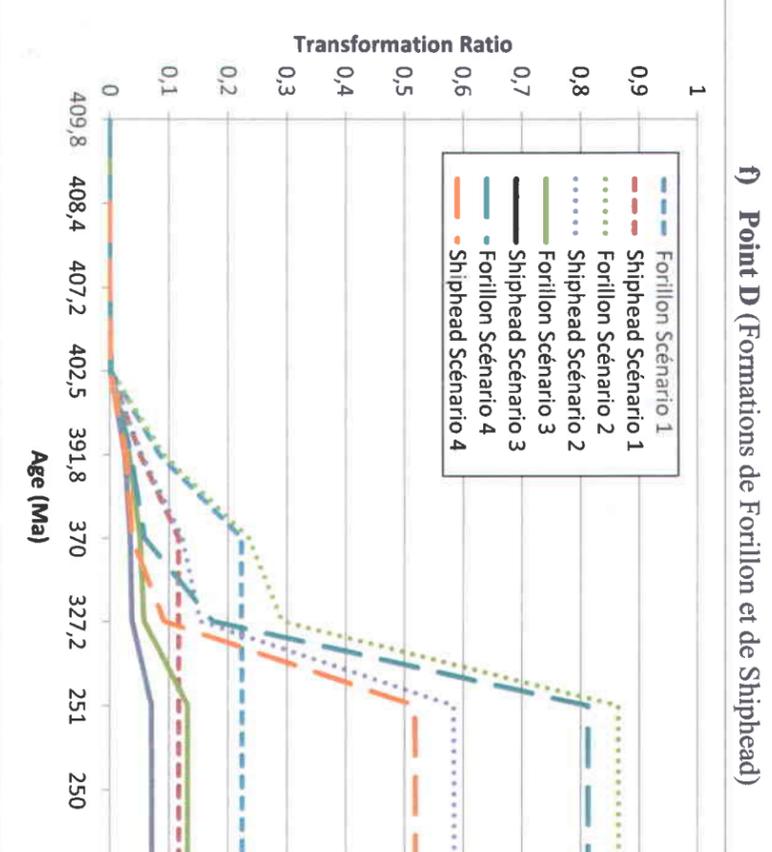
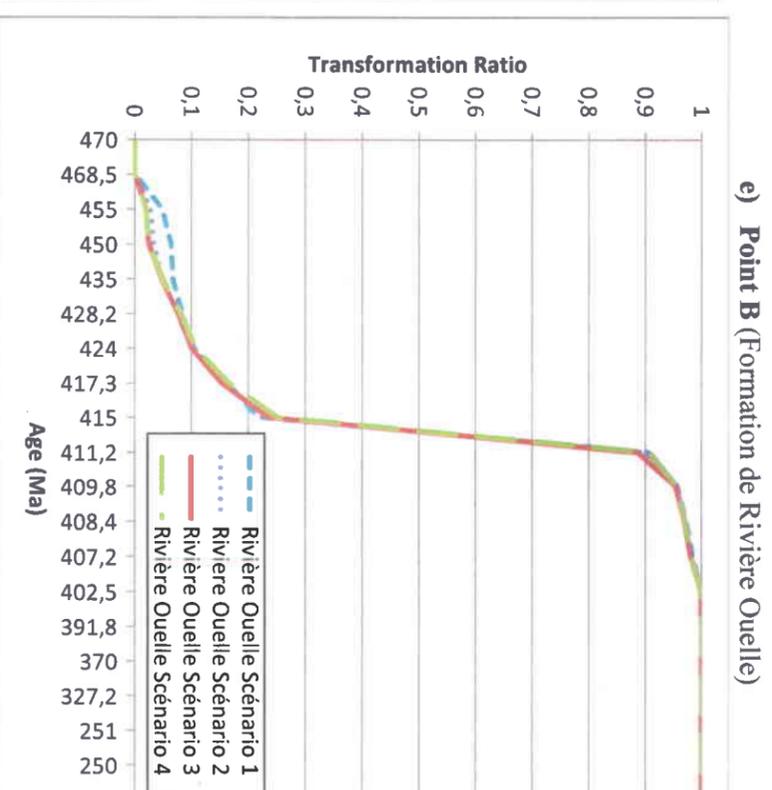
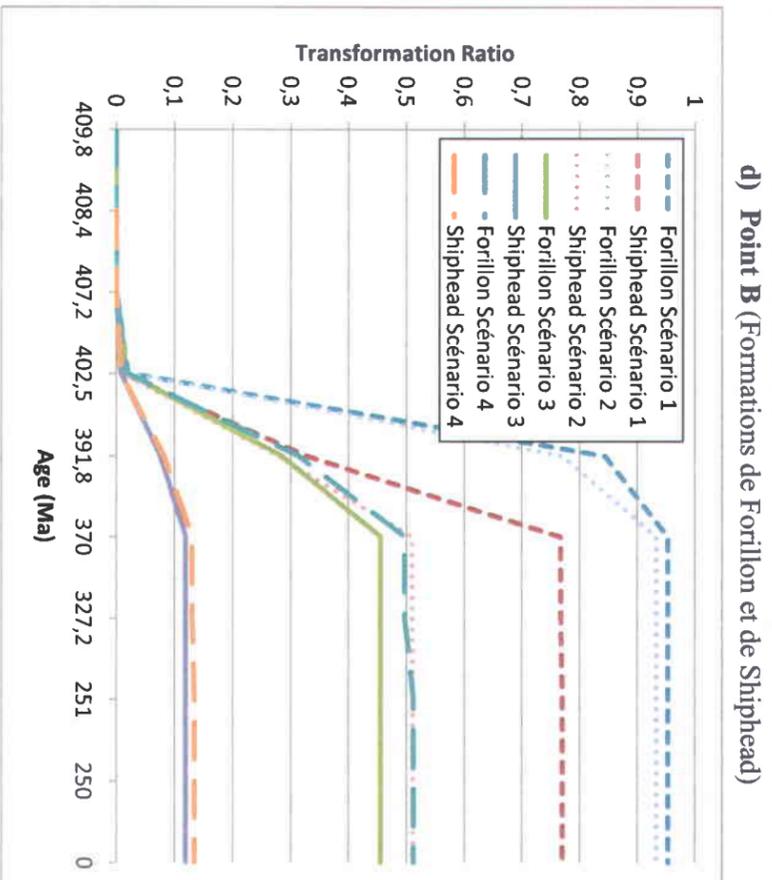
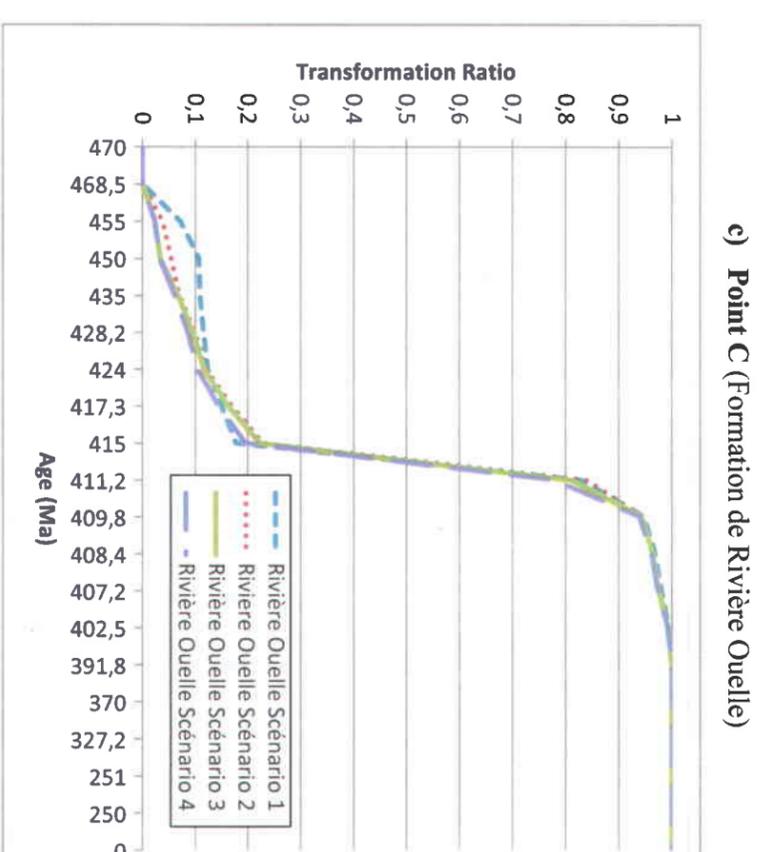
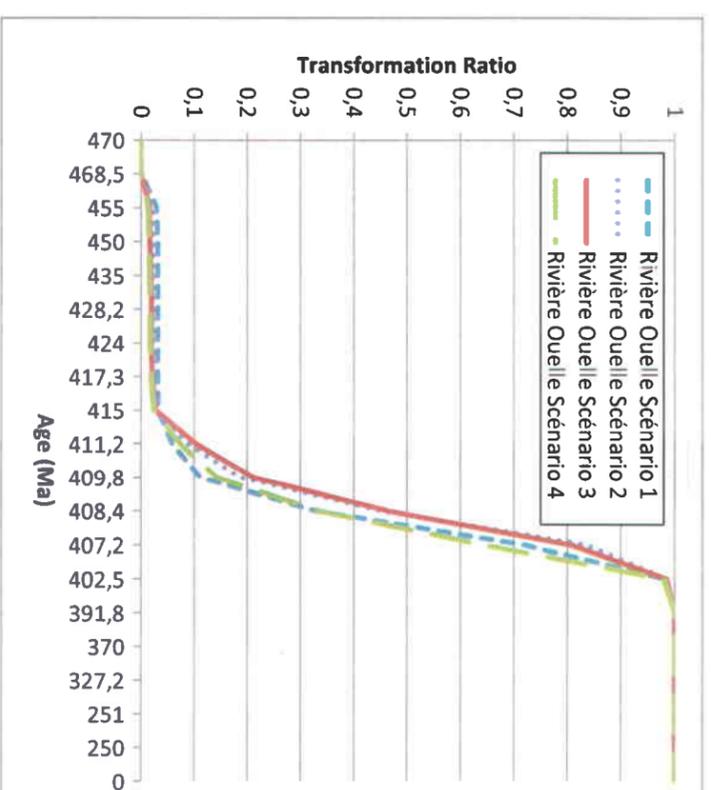
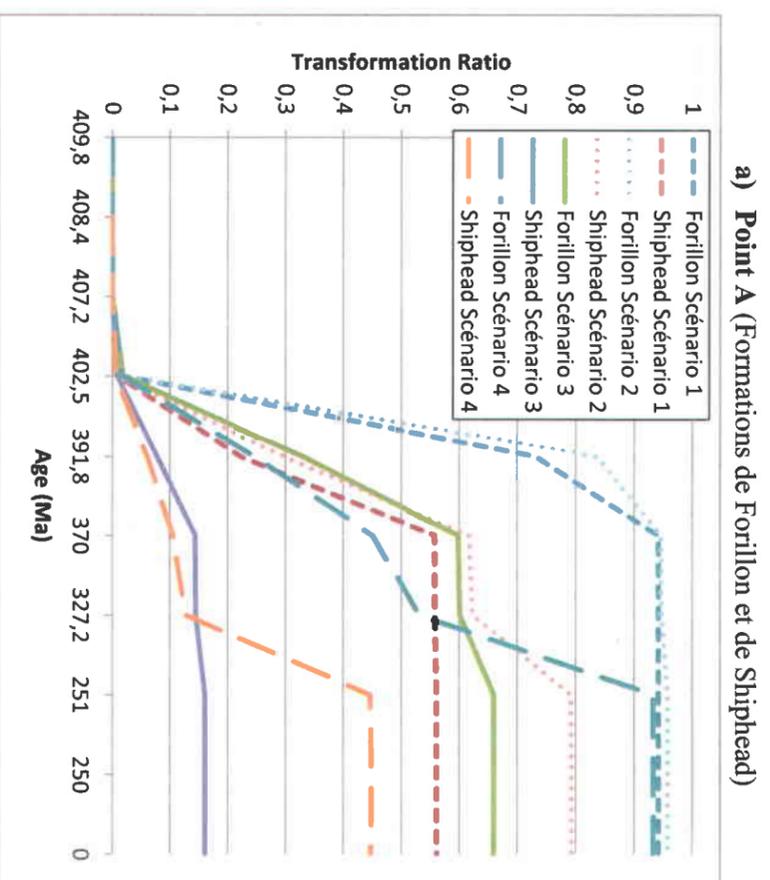


Figure 4.22: Résultats des taux de transformation (TR) en fonction du temps, de la roche mère choisie et des quatre premiers scénarios faisant varier les épaisseurs d'érosion. Les trois roches mères choisies sont les formations de Forillon et de Shiphead avec un kérogène de type II et un index d'hydrogène de 469 mg/gC et la Formation de Rivière Quelle avec un kérogène de type II mais un index d'hydrogène de 500 mg/gC.

Shiphead est de seulement 540,5 m. Malgré cela, les valeurs de TR sont très différentes. **En conclusion, le choix de la formation et l'histoire de l'enfouissement ont beaucoup d'influence sur la variation du TR.**

La Formation de Rivière Ouelle : toutes les courbes ont la même tendance (Figure 4.22, b): i) une augmentation du TR passant de 0 à environ 0,3 entre 455 et 415 Ma, ii) une forte augmentation du TR jusqu'à atteindre 0,98 entre 415 et 402,5 Ma, et iii) à 402,5 Ma, le TR passe à 1 au moment où l'épaisseur des strates au-dessus de la roche mère Rivière Ouelle atteint 5971 m (soit 2000 m de roches cambro-ordoviciennes + 917 m Indian Point + 810 m Forillon + 271 m Shiphead + 773 m Indian Cove + 1200 m York River/Lake).

- **Pour le point B (bloc Sud)** (Figure 4.22, d et e):

Les épaisseurs au niveau du point B correspondent aux données du puits Mississippi n°1 (C017 ; Figure 4.21) dans le bloc Ouest à côté de la FTL (Figure 4.5 et Figure 4.11). Le point B est situé le long de la ligne sismique 82-152. A la base de ce puits, il y a 191 m de Gascons, puis 117 m de West Point, 726 m d'Indian Point, 299 m de Forillon, 119 m de Shiphead et entre 375 m (partiellement érodée) et 800 m (épaisseur initiale) d'Indian Cove. L'épaisseur à l'âge actuel de la Formation de York River/Lake est complètement érodée. L'hypothèse de la variation de l'épaisseur de cette formation est de 1200 m au moment de sa déposition à 0 m à l'âge actuel.

La Formation de Forillon : les valeurs de TR des scénarios 1 et 2 sont semblables : à 391,8 Ma, il y a une différence de TR de 0,07 entre les deux scénarios, et une différence de 0,02 à 370 Ma. Pourtant à 391,8 Ma, l'épaisseur au-dessus de la Formation de Forillon est de 5568,5 m pour les scénarios 1 et 2 (Figure 4.21 ; point B). Cette différence s'explique par le temps de déposition des 2000 m de la Formation de Malbaie, comme pour le point A. Les courbes d'évolution de TR des scénarios 3 et 4 ont la même tendance : entre 407,2 et 402,5 Ma, le TR passe de 0 à 0,015 et à partir de 391,8 Ma, le TR passe à une valeur comprise entre 0,45 et 0,5. Par contre, le TR du scénario 4 passe de 0,49 à 0,51 à partir de 327,2 Ma, alors que la valeur du TR du scénario 3 reste à 0,45. Cette différence est due aux 1000 m de sédiments du Carbonifère déposés en plus dans le scénario 4 par rapport au scénario 3 (Figure 4.21 ; point B).

La Formation de Shiphead : les valeurs du TR du scénario 1 sont clairement supérieures aux autres valeurs de TR de la roche mère Shiphead (Figure 4.22, d). Dans le scénario 1, cette formation a été enfouie au minimum sous 3059,5 m de roches durant 141,8 Ma, avec un enfouissement maximal de 5059,5 m à 370 Ma. Ainsi le système n'a pas été refroidi par une érosion et la roche a continué à mûrir. Les valeurs de TR du scénario 2 diffèrent du scénario 1. Dans le scénario 2, à 391,8 Ma, il y a 3000 m de roches des formations de Battery Point et de Malbaie qui ont été déposées pour ensuite

être érodées rapidement 21,8 Ma plus tard. Le système a eu un enfouissement puis une érosion très rapide qui n'ont pas laissé le temps à la roche mère Shiphead de maturer.

Les valeurs de TR de la Formation de Forillon du scénario 4 et de la Formation de Shiphead du scénario 2 sont très proches. Leurs historiques d'enfouissement sont très similaires (Figure 4.21 ; point B) : les roches de la Formation de Shiphead du scénario 2 atteignent une profondeur de 5059,5 m à 391,8 Ma et les roches de la Formation de Forillon du scénario 4 atteignent une profondeur de 4468,5 m. De plus, les deux scénarios ont une hypothèse de dépôt puis d'érosion de 3000 m de roches au Carbonifère. **En conclusion, pour un même historique d'enfouissement, à partir d'environ 4468 m de profondeur, une différence de profondeur inférieure à 600 m entre deux roches mères avec un même type de kérogène n'influencent peu ou pas la maturation de la roche mère.**

La Formation de Rivière Ouelle : toutes les courbes de TR ont la même tendance entre elles (Figure 4.22, e): i) de 468,5 à 415 Ma, les valeurs du TR passent de 0 à 0,25, ii) de 415 à 411,2 Ma, le TR augmente jusqu'à atteindre la valeur de 0,9, puis iii) le TR est égal à 1 à 402,5 Ma c'est-à-dire au moment du dépôt de la Formation York River/Lake.

Pour la roche mère Rivière Ouelle, la période d'accélération de l'augmentation des valeurs du TR au niveau du point B (Figure 4.22, e) est différente de celles du point A (Figure 4.22, b). Au niveau du point B, le TR passe de 0,25 à 0,9 à partir de 415 Ma, alors qu'au niveau du point A, le TR passe de 0,25 à 0,9 à partir de 409,8 Ma. L'enfouissement de la roche mère Rivière Ouelle est plus rapide au niveau du puits Mississippi (point B) qu'au niveau du puits Galt (point A). Cela est dû au dépôt de plusieurs formations du Groupe de Chaleurs inférieur au-dessus des roches du Supergroupe de Québec au niveau du point B, ce qui n'est pas le cas pour le point A (Figure 4.21).

- **Pour le point C (bloc Ouest)** (Figure 4.22, c):

Les épaisseurs, au niveau du point C, correspondent aux données du puits Impérial Gaspé n°1 (C023) (Figure 4.5, 4.9 et 4.19) avec 547 m de Burnt Jam Brook, 59 m de Laforce, 403 m de Gascon, 330 m de Roncelles et 580 m d'Indian Point (Tableau 3.2). Les formations de Forillon et de Shiphead étant érodées à l'âge actuel, seule la roche mère Rivière Ouelle a été étudiée. De plus, comme la Formation d'Indian Point se trouve à la surface (au centre de l'anticlinal Holland-Mont Bald), l'épaisseur de cette formation va varier de 800 m au moment de sa déposition jusqu'à 580 m à l'âge actuel. L'épaisseur au moment de la déposition des formations de Forillon, de Shiphead, d'Indian Cove et de York River/Lake est respectivement de 800 m, de 600 m, de 400 m, de 800 m et de 1200 m. A l'âge actuel, toutes ces formations sont complètement érodées au niveau du point C.

La Formation de Rivière Ouelle : les courbes d'évolution du TR des blocs Sud et Ouest respectivement des points B (Figure 4.22, e) et C (Figure 4.22, c) montrent des

similitudes. Pour ces deux points, le scénario 1 se différencie des autres scénarios entre 485,5 et 424 Ma. La différence est due à l'hypothèse du scénario 1 avec le dépôt de 4000 m de flyschs ordoviciens sur l'ensemble de la zone Bourque. Ensuite les courbes de TR au niveau des points B et C sont quasi-verticales ce qui dénote un rapide enfouissement dû au dépôt de l'ensemble des roches siluro-dévonienues, contrairement au bloc Centre représenté par le point A (Figure 4.20, b). Il existe tout de même une différence entre les points B et C : à 411,2 Ma, le point B (Figure 4.20, e) atteint une valeur de TR de 0,9, alors que le point C (Figure 4.20, c) a une valeur de TR de 0,82. Cela s'explique par la différence de quantité de roches au dessus de la Formation Rivière Ouelle à cette âge entre les points B et C. Au niveau du point B, à 411,2 Ma, il y a 5555 m de roches au dessus de la Formation Rivière Ouelle : 1000 m de roches du Supergroupe de Québec + 1223 m de roches plissées (roches cambro-ordoviciennes situées dans le pli ; Figure 4.21) + 825 m Matapédia + 1631 m Burnt Jam Brook + 191 m Gascon + 117 m West Point + 726 m Indian Point. Au niveau du point C, à 411,2 Ma, il y a 5352 m de roches au dessus de la Formation Rivière Ouelle (Figure 4.21) : 1854 m de roches du Supergroupe de Québec + 1160 m Matapédia + 746 m Burnt Jam Brook + 59 m Laforce + 403 m Gascon + 330 m Roncelles + 800 m Indian Point.

En conclusion pour la Formation de Rivière Ouelle : quelque soit le scénario utilisé, la roche mère est supramature avant l'érosion acadienne. La déposition des roches du Carbonifère n'a aucune influence sur la roche mère Rivière Ouelle.

- **Pour le point D (bloc Nord)** (Figure 4.22, f):

Dans le bloc Nord de la zone Bourque, il n'y a aucun puits. Le point D a été choisi dans la zone montrant la série sédimentaire la plus complète, c'est-à-dire le long de la ligne sismique 82-152. La localisation du point D le long de la ligne sismique permet de contraindre les épaisseurs des formations (Figure 4.5, 4.9 et 4.19). Les épaisseurs le long de ce point sont les épaisseurs des formations de West Point (19 m), d'Indian Point (344 m), de Forillon (463 m), de Shiphead (258 m), d'Indian Cove (429 m), de York River/Lake (754 m) et de Battery Point (445 m) (Figure 2.26). Comme la Formation de Battery Point se retrouve à la surface, l'épaisseur moyenne de cette formation va varier de 1000 m lors du dépôt à 445 m à l'âge actuel. Le choix de garder la Formation de Romieu dans cette thèse a comme conséquence qu'il n'y a pas de roche mère Rivière Ouelle à la base du bloc Nord, il n'y a que la Formation de Romieu. Ainsi, la Formation de Rivière Ouelle n'a pas été étudiée le long de ce point.

La Formation de Forillon : au niveau du point D, les formations de York River/Lake et de Battery Point sont déjà présentes. L'hypothèse du taux de sédimentation concerne seulement les épaisseurs de la Formation de Malbaie et des roches du Carbonifère. Le scénario 2 présente les plus hautes valeurs de TR à l'âge actuel: scénario 1 - 0,23, scénario 2 - 0,87, scénario 3 - 0,13 et scénario 4 - 0,81 (Figure 4.22, f). Les hypothèses des épaisseurs déposées du scénario 2 sont pour les formations de Malbaie et de Battery

Point de 3000 m et pour le scénario 4 de 2000 m, puis un enfouissement par les roches au Carbonifère de 3000 m pour les deux scénarios (Tableau 4.15). C'est ce dernier enfouissement qui permet à la roche mère Forillon d'atteindre une valeur de TR supérieure à 0,8. La Formation de Forillon du scénario 1 reste enfouie sous 1000 m de la Formation de Battery Point durant 158,8 Ma, ce qui permet de stabiliser sa valeur de TR à 0,23 malgré les deux érosions, respectivement 2000 m d'érosion post-acadienne et 1500 m d'érosion post-carbonifère. Le scénario 3 a des valeurs de TR les plus faibles. L'hypothèse d'enfouissement choisie pour ce scénario (Tableau 4.15) ne dépasse jamais 4000 m d'enfouissement pour la roche mère Forillon (Figure 4.21). Lors de l'érosion post-acadienne a comme conséquence un refroidissement du système. De plus un enfouissement sous 2000 m de roches au Carbonifère s'avère ne pas être assez profond pour augmenter les valeurs du TR au dessus de 0,13.

La Formation de Shiphead : dans le bloc Nord au niveau du point D, les observations faites pour la Formation de Forillon s'applique également à la Formation de Shiphead.

En conclusion, l'épaisseur de sédimentation/érosion des roches du Carbonifère a la plus grande influence sur la maturation des roches mère siluro-dévonniennes dans le bloc Nord.

- **Comparaison des valeurs de TR de la roche mère Forillon sur l'ensemble des points**

La roche mère Forillon avec les hypothèses du scénario 1 est supramature au niveau des points A et B (Figure 4.22, a et d), lors du dépôt du Groupe des Grès de Gaspé supérieur. La roche mère Forillon reste immature dans le bloc Nord (point D ; Figure 4.22, f).

La roche mère Forillon avec les hypothèses du scénario 2 est également supramature dans les blocs Centre et Sud (points A et B ; Figure 4.22, a et d), lors du dépôt du Groupe des Grès de Gaspé supérieur. Par contre, au niveau du bloc Nord (Figure 4.22, f), contrairement au scénario 1, la roche mère Forillon est supramature à cause du dépôt des 3000 m de roches du Carbonifère.

La roche mère Forillon avec les hypothèses du scénario 3, dans les blocs Centre et Sud (points A et B ; Figure 4.22, a et d), est mature à partir du dépôt de la Formation de Malbaie et jusqu'à l'âge actuel, ce qui concorde avec les valeurs de vitrinite (Figure 4.13 et Tableau 4.10) dans le puits Sunny Bank, situé à 4 km à l'est du point A (Figure 4.11). Les valeurs des échantillons le long de ce puits montrent que la Formation de Forillon est dans la fenêtre à huile à l'âge actuel. Par contre, au niveau du point D (bloc Nord ; Figure 4.22, f), la roche mère Forillon reste immature avec l'hypothèse d'un enfouissement sous 2000 m de roches du Carbonifère, or dans le puits Gaspé Nord, la Formation de Forillon a des valeurs de vitrinite comprises entre $0,9 < R_0 < 1,1$ %, donc la roche mère est dans la fenêtre à huile.

La roche mère Forillon, avec les hypothèses du scénario 4, dans le bloc Sud (point B ; Figure 4.22, d), est mature à partir du dépôt du Groupe des Grès de Gaspé et jusqu'à l'actuel. Au niveau du point A (Figure 4.22, a), la roche mère est mature entre le dépôt du Groupe des Grès de Gaspé et des roches du Carbonifère. Par contre, elle devient supramature après être restée sous 3000 m de roches carbonifères jusqu'au Permien. Dans le bloc Nord (point D ; Figure 4.22, f), la roche mère est mature, ce qui correspond aux données de vitrinite des échantillons pris le long du puits Gaspé Nord.

- **Comparaison des valeurs de TR pour la roche mère Rivière Ouelle sur l'ensemble des points**

La maturation de la roche mère Rivière Ouelle ne dépend pas de la variation des épaisseurs sédimentées/érodées des formations se déposant après 400 Ma. En effet, le TR de Rivière Ouelle atteint toujours 1 avant le dépôt de la Formation de Malbaie (Figure 4.22, b, c et e). Pour la point A (bloc Centre ; Figure 4.22, b), la roche mère entre dans la fenêtre à huile à partir du dépôt du Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé et devient supramature après le dépôt de la Formation de York River. Pour les points B et C (blocs Sud et Ouest ; Figure 4.22, c et e), la roche mère Rivière Ouelle devient mature après la pulsation salinique et le dépôt de la Formation de West Point. La roche mère devient supramature à la fin du dépôt de l'ensemble du Groupe de Chaleurs.

4.6.3.4. Analyse de la variation des épaisseurs érodées sur les cartes de vitrinite simulées

La carte de réflectance de la vitrinite simulée à partir des hypothèses du scénario 1 (Figure 4.23, b) ne correspond pas à la carte de réflectance mesurée de la vitrinite faite à partir des échantillons de surface (carte de référence ; Figure 4.23, a). Il s'avère qu'une érosion des roches du Dévonien moyen à supérieur après le dépôt du Carbonifère provoque un enfouissement d'une trop longue durée et crée des valeurs de réflectance de la vitrinite trop élevées. Sur la carte de référence (Figure 4.23, a), l'ensemble des roches siluro-dévonienne sont dans la fenêtre de réflectance comprise entre 0,6 et 1,0 %. Ceci contraste avec la réflectance de la Formation d'Indian Point du scénario 1 (Figure 4.23, b) au centre de l'anticlinal d'Holland-Mont Bald comprise entre 3,0 et 4,0, ce qui est largement au-dessus de celle de la carte de référence. De plus, tout comme les tests effectués dans la partie 4.6.2, la Formation de Battery Point a une réflectance trop faible (Figure 4.23, b) par rapport aux échantillons de surface dans le bloc Nord (Figure 4.23, a).

Les valeurs de R_0 sur la carte simulée faite à partir des hypothèses du scénario 2 (Figure 4.23, c) sont proches des valeurs de R_0 de la carte de référence (Figure 4.23, a), sauf dans le cœur de l'anticlinal Holland-Mont Bald et au niveau du chevauchement Mississippi 2. Les valeurs de réflectance des roches en surface sont trop élevées avec l'hypothèse du scénario 2 (Figure 4.23, b) par rapport aux échantillons de surface (Figure 4.23, a). Dans le synclinal de Champou, la Formation de York River/Lake a une réflectance de

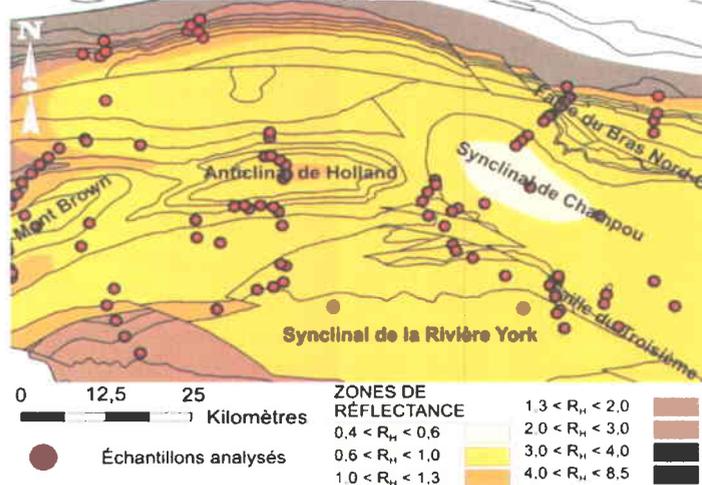
$0,4 < R_{0c} < 0,6$ %, la même valeur de réflectance que celle calculée à partir des échantillons de surface au même endroit. Pour les roches du Cambro-Ordovicien dans le bloc Nord, une partie des roches a une réflectance comprise entre 3,0 et 4,0 %, ce qui est au-dessus de la réflectance que l'on trouve dans les échantillons de surface (i.e. $2,0 < R_{0a} < 3,0$ %; Figure 4.23, a) et une autre partie des roches a une réflectance identique à celle répertoriée sur la carte de référence.

La carte de vitrinite (Figure 4.23, d) simulée à partir des hypothèses du scénario 3 ne correspond pas à la carte de référence (Figure 4.23, a). Au contraire des deux autres cartes de vitrinite (Figure 4.23, b et c), un enfouissement trop faible est la cause des valeurs de vitrinite trop faibles par rapport aux échantillons de surface. Les formations de York River/Lake et de Battery Point ont des valeurs de réflectance de la vitrinite comprises entre $0,4 < R_{0d} < 0,6$ % (Figure 4.23, d) alors que celles des échantillons de surface pour les mêmes formations sont comprises entre 0,6 et 1,0 % (Figure 4.23, a). Néanmoins, les valeurs de réflectance de la vitrinite pour les roches cambro-ordoviciennes correspondent à celles répertoriées sur la carte de référence (i.e. $2,0 < R_{0a} < 3,0$ %; Figure 4.23, a).

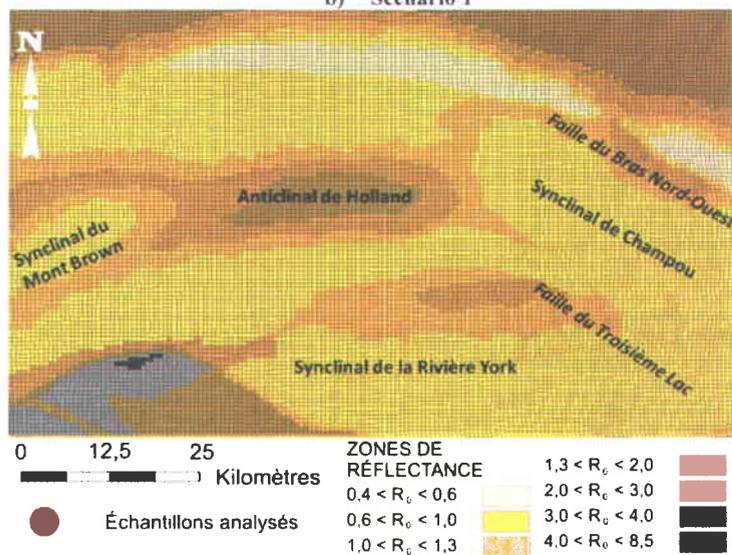
La carte de vitrinite résultant de la simulation du scénario 4 (Figure 4.23, e) est celle qui correspond le mieux aux résultats de réflectance de la vitrinite estimés à partir des échantillons de surface (Figure 4.23, a). On distingue parfaitement la zone de réflectance de la Formation de York River/Lake comprise entre 0,4 et 0,6 % dans le synclinal de Champou. On remarque également que la Formation d'Indian Point à l'intérieur de l'anticlinal de Holland-Mont Bald est dans la zone de réflectance de $1,0 < R_{0e} < 1,3$ %. La réflectance des roches du Cambro-Ordovicien dans le bloc Nord est bien comprise entre $2,0 < R_{0e} < 3,0$ %. Cependant, nous ne retrouvons pas la zonation due à l'auréole métamorphique liée à l'intrusion de roches granitiques et à la circulation de fluides hydrothermaux du gîte cuprifère de Murdochville du Dévonien tardif (Figure 4.23, a).

En conclusion, les hypothèses des épaisseurs de sédimentation/érosion du scénario 4 donne la meilleure comparaison avec les données de vitrinite.

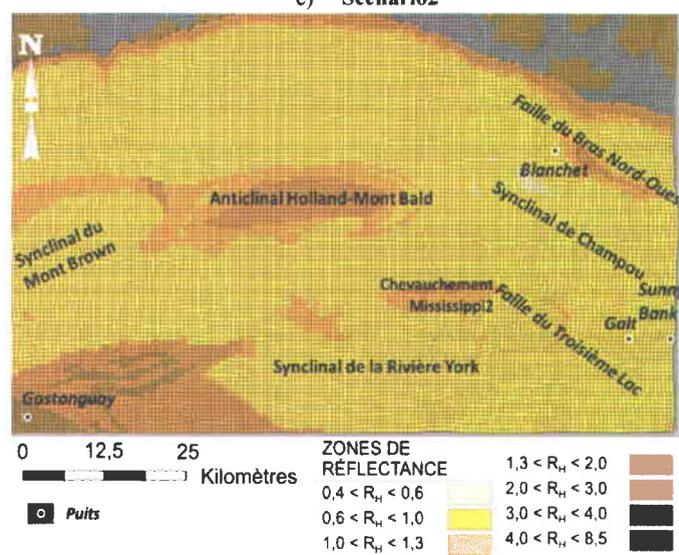
a) Carte de réflectance de la vitrinite faite à partir des échantillons de surface (carte de référence)



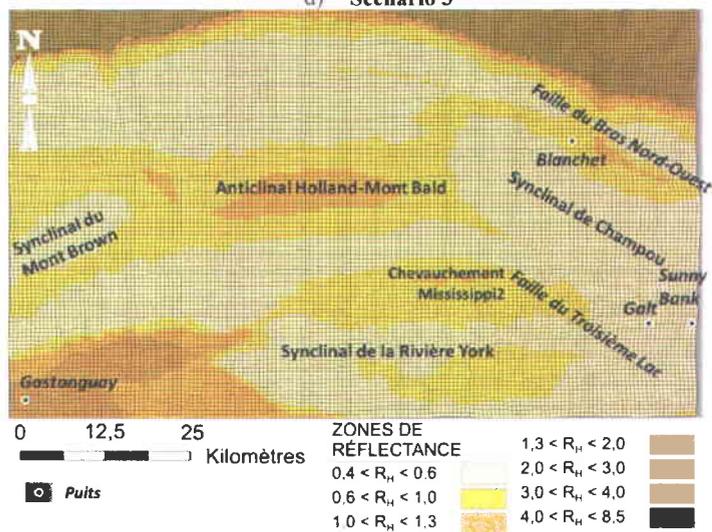
b) Scénario 1



c) Scénario 2



d) Scénario 3



e) Scénario 4

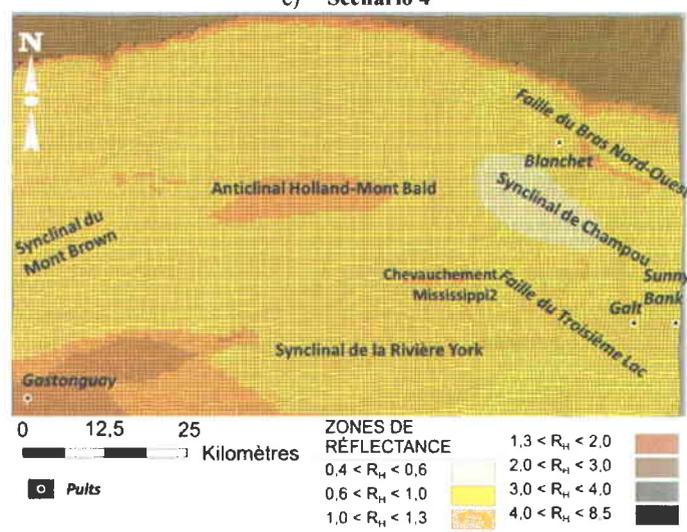


Figure 4.23 : Cartes de réflectance de la vitrinite provenant de la simulation avec le logiciel Temis 3D des scénarios 1, 2, 3 et 4 pour étudier l'influence de la variation des taux de sédimentation/érosion dans la zone Bourque.

4.6.2. SENSIBILITE DU TR ET DE LA VITRINITE A LA VARIATION DU FLUX DE CHALEUR

Dans la partie 4.6.1, l'analyse de l'influence des épaisseurs de sédimentation/érosion sur les valeurs de R_0 a permis de choisir une hypothèse d'épaisseur d'érosion. Dans une deuxième étape, l'analyse de l'influence du flux de chaleur sur les cartes de réflectance de la vitrinite à l'âge actuel est effectuée. La méthode (Figure 4.24) consiste à utiliser une seule hypothèse d'épaisseur d'érosion et de faire varier le flux de chaleur à la base des sédiments afin d'analyser la sensibilité du TR des trois roches mères (i.e. Rivière Ouelle, Forillon et Shiphead) et de la réflectance de la vitrinite.

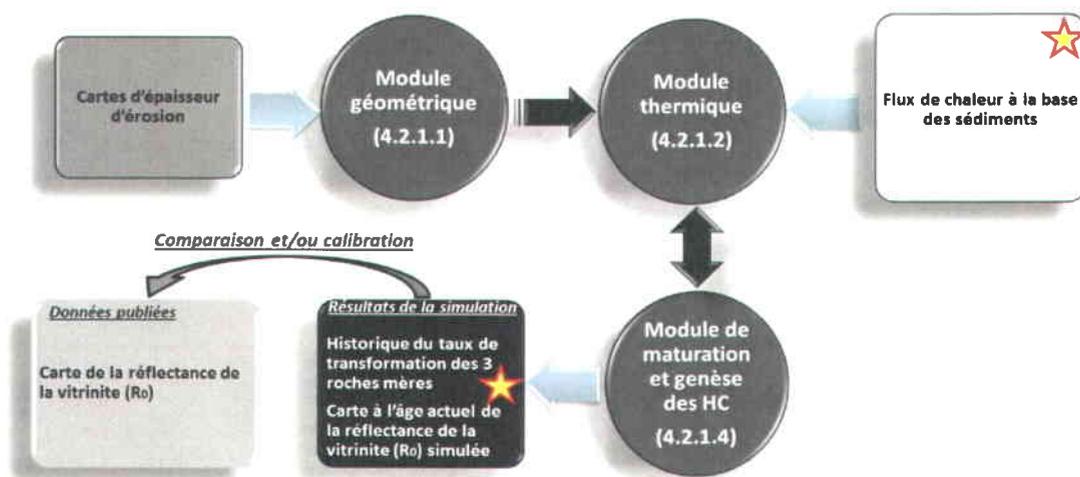


Figure 4.24 : Schéma représentant la méthode de travail pour la sensibilité du TR et de la R_0 à la variation du flux de chaleur avec une hypothèse d'épaisseur d'érosion correspondant aux hypothèses du scénario 4. La case blanche est la donnée d'entrée, la case grise foncée est la donnée d'entrée fixe, la case noire représente les données simulées, les ronds gris sont les modules utilisés dans le logiciel Temis 3D, la case grise claire est la donnée de calibration et les étoiles localisent les données qui vont varier.

4.6.4.1. Choix des scénarios pour la variation du flux de chaleur

Les épaisseurs de sédimentation/érosion viennent du scénario 4, récapitulées de la façon suivante : un enfouissement du Supergroupe de Québec sous 4000 m de sédiments déposés juste au nord à 450 Ma, puis érosion ; un enfouissement maximal avant les dépôts carbonifères avec 2000 m de sédiments de la dernière moitié du Groupe des Grès de Gaspé ; puis, un dépôt et une érosion de 3000 m de la formation datant du Carbonifère:

- **Scénario 4** : la référence : un flux de chaleur constant de 50 mW.m^{-2} ;
- **Scénario 5** : un flux de chaleur constant de 40 mW.m^{-2} ;
- **Scénario 6** : un flux de chaleur constant de 60 mW.m^{-2} ;
- **Scénario 7** : de 480 à 391,8Ma, un flux de chaleur constant de 50 mW.m^{-2} , de 391,8 à 250 Ma un flux de chaleur de 100 mW.m^{-2} localisé à l'ouest (Figure 4.25) et

partout ailleurs un flux de 50 mW.m^{-2} , et jusqu'à l'âge actuel un flux de chaleur constant de 50 mW.m^{-2} .

Pour le scénario 7, nous cherchons à caler le modèle en prenant en compte l'influence de l'intrusion de roches granitiques et la circulation de fluides hydrothermaux du gîte cuprifère de Murdochville du Dévonien tardif. Cette intrusion est visible à l'ouest de la carte (Figure 4.7; Figure 4.23, a) grâce aux données provenant des formations d'Indian Cove, de Forillon et d'Indian Point avec des valeurs de réflectance supérieures à 5%. Il aurait été préférable de pouvoir utiliser le flux de chaleur sur l'ensemble de la carte et de l'histoire du bassin avec juste localement l'utilisation du gradient géothermique, mais l'utilisation des deux paramètres en même temps n'est pas possible avec le logiciel Temis 3D.

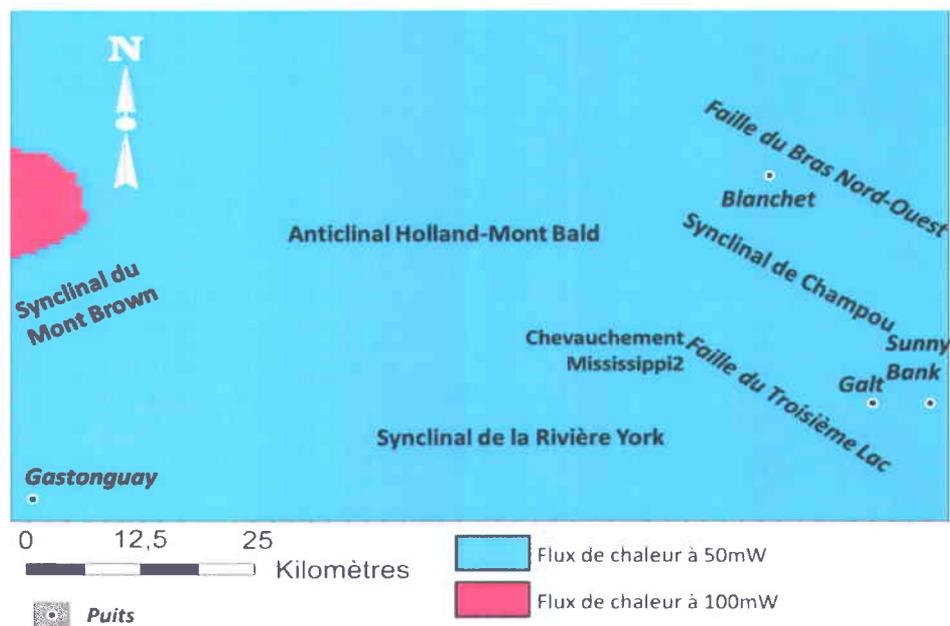


Figure 4.25: Carte de flux de chaleur dans le logiciel Temis 3D pour le scénario 4 entre 391.8 Ma et 250 Ma.

4.6.4.2. Analyse de l'impact des différents flux de chaleur sur l'évolution du TR

- Pour le point A dans le bloc Centre (Figure 4.26, a et b) :

Les formations de Forillon et de Shiphead (Figure 4.26, a): la Formation de Forillon des scénarios 4 et 7 a une valeur de TR à l'âge actuel identique de 0,94. La Formation de Shiphead des scénarios 4 et 7 a également une valeur identique de TR à l'âge actuel de 0,63. Le scénario 5 avec un flux de chaleur de 40 mW.m^{-2} (Tableau 4.16) a les valeurs de TR les plus faibles : TR_{Forillon} à l'âge actuel = 0,38 et TR_{Shiphead} à l'âge actuel = 0,11. Le scénario 6 avec un flux de chaleur de 60 mW.m^{-2} (Tableau 4.16) a les valeurs de TR les plus fortes : TR_{Forillon} à l'âge actuel = 0,98 et TR_{Shiphead} à l'âge actuel = 0,96. Les valeurs de TR des formations de Forillon et de Shiphead sont influencées par l'augmentation ou la diminution

du flux de chaleur à la base des sédiments. Il s'avère que le point A est un endroit proche de la base des sédiments : les formations d'Indian Point et de Roncelles sont en contact avec le Supergroupe de Québec dans le bloc Centre. Les roches mères siluro-dévonienne dans le bloc Centre, sont donc très sensibles à la variation du flux de chaleur à la base des sédiments.

La Formation de Rivière Ouelle : un changement de flux de chaleur à la base des sédiments a une grande influence sur les courbes d'évolution du TR de la roche mère Rivière Ouelle (Figure 4.26, b). Les scénarios 4 et 7 ont exactement les mêmes valeurs de TR. La roche mère Rivière Ouelle du scénario 6 avec un flux de chaleur de 60 mW.m^{-2} mûrit très rapidement dès 415 Ma. À partir de 411,2 Ma, la roche mère pour le scénario 6 atteint une valeur de TR de 0,9. Pour le scénario 5, la roche mère avec un flux de chaleur de 40 mW.m^{-2} mûrit plus tardivement, vers 407,2 Ma et est supramûre ($\text{TR}_{\text{RivièreOuelle}} = 0,9$) à 402,5 Ma.

- **Pour le point B (bloc Sud)** (Figure 4.26, d et e):

Les formations de Forillon et de Shiphead : pour le scénario 6, la valeur du TR à l'âge actuel de la Formation de Forillon est de 0,94. Pour les scénarios 4 et 7, cette formation a une valeur de TR de 0,5 et pour le scénario 5 une valeur faible de 0,08. La roche mère Shiphead a une valeur de TR à l'âge actuel de 0,59 pour le scénario 6, une valeur de 0,13 pour les scénarios 4 et 7 et une valeur très faible de 0,04 pour le scénario 5. En conclusion, les roches mères siluro-dévonienne ont les plus fortes valeurs de TR pour le scénario 6, et les plus faibles valeurs pour le scénario 5. **La maturation des roches mères Forillon et Shiphead au niveau du point B est sensible à la variation du flux de chaleur à la base des sédiments.**

La Formation de Rivière Ouelle : pour le scénario 6 (Figure 4.26, e), la roche mère a un $\text{TR}_{\text{RivièreOuelle}} = 0,2$ à 435 Ma et un $\text{TR}_{\text{RivièreOuelle}} = 0,9$ à 415 Ma. Pour les scénarios 4 et 7, la roche mère Rivière Ouelle ne dépasse pas une valeur de TR de 0,25 avant 415 Ma et 3,8 Ma plus tard, elle atteint une valeur de $\text{TR}_{\text{RivièreOuelle}} = 0,9$. Enfin, la courbe de TR du scénario 6 est identique mais décalée dans le temps à celle du scénario 5 : la roche mère du scénario 6 atteint une valeur de TR de 0,2 à 411,2 Ma et une valeur de TR de 0,8 à 407,2 Ma.

- **Pour le point C (bloc Ouest)** (Figure 4.26, c):

La Formation de Rivière Ouelle : l'évolution du TR pour cette roche mère est semblable à celle du point B. **En conclusion, la zone métamorphique de Murdochville n'influence pas la maturation de la roche mère Rivière Ouelle au niveau de l'anticlinal de Holland-Mont Bald.**

Tableau 4.16: Détail des scénarios proposés dans le cadre de l'étude de la variation des taux de flux de chaleur avec la reconstitution des événements pour l'ensemble du modèle 3D de la zone Bourque. La discordance 1 correspond à la discordance taconienne, la discordance 2 à la discordance salinique, la discordance 3 à la discordance acadienne et la discordance 4 à la discordance post-carbonifère.

Ordre	Système géologique	Groupe	Formation	Évènement	Âge toit (Ma)	Épaisseur minimum dans le logiciel Temis 3D	Épaisseur maximum dans le logiciel Temis 3D	Épaisseur minimum dans la littérature	Épaisseur maximum dans la littérature	Température de surface (°C)	Paléobathymétries (m)	TOC de départ (%)	Kérogène		Épaisseur érodée (m)	Scénario 4 Flux de chaleur (mW.m ⁻²)	Scénario 5 Flux de chaleur (mW.m ⁻²)	Scénario 6 Flux de chaleur (mW.m ⁻²)	Scénario 7 Flux de chaleur (mW.m ⁻²)		
													HI	Type							
26				Surface	0					15										50	
25				<i>Discordance 4</i>	250					15					3000 Carbonifère					100 à l'ouest et 50 sur le reste de la zone Bourque	
24				Sédimentation	327,2			180	12000	20	0										
23	Carbonifère			<i>Discordance 3</i>	370					20					1000 Malbaie 1000 Battery Point 1200 York River 800 Indian-Cove, 400 Shiphead, 600 Forillon 800 Indian-Point						
22		Grès de Gaspé	Malbaie	Sédimentation	391,8			600	?	20	0										
21			Battery Point	Sédimentation	397,5	793	1405	2120	3000	20											
20			York River	Sédimentation	402,5	113	1957	300	3500	20	5										
19	Dévonien tardif à médian		York Lake	Sédimentation	407	45	88		1300	20											
18		Calcaire supérieur de Gaspé	Indian Cove	Sédimentation	407,2	3	1240	140	850	20	100										
17			Shiphead	Sédimentation	408,4	98	610	163	515	20		1	469	II							
16			Forillon	Sédimentation	409,8	100	1570	275	582	20		1	469	II							
15		Groupe des Chaleurs	Indian Point	Sédimentation	411,2	117	1938	200	1000	10	100					50	40	60			
14			Roncelles	Sédimentation	414,4	42	1624	40	300	10											
13			West Point	Sédimentation	415	65	840	10	800	27	2										
12			<i>Discordance 2</i>		416						10				100 Gascon						
11	Silurien tardif à Dévonien médian		Giffon Cove River	Sédimentation	416	110	110	10	60	10	100										
10			Gascon	Sédimentation	417,3	30	30	10	608	10											
9			Laforce	Sédimentation	422	543	543	15	260	27											
8		Sayabec	Sédimentation	424			10	600	27												
7		Burnt Jam Brook	Sédimentation	428,2	140	1440	20	600	10												
6		Val Brillant	Sédimentation	428,2			60	200	10												
5	Ordovicien tardif à Silurien tardif	Matapédia	White Head	Sédimentation	437,5	493	493	720	2400	10	150										
4				<i>Discordance 1</i>	450					5					4000m de sédiments au nord						
3		Supergroupe de Québec	Tourelle	Sédimentation	463,9			?	?	5	1000										
2	Cambrien à Ordovicien tardif		Rivière Ouelle	Sédimentation	468,5			700	10000	5	1000	2	500	II							
1			Romicu	Sédimentation	473,6			?	?	5	1000										

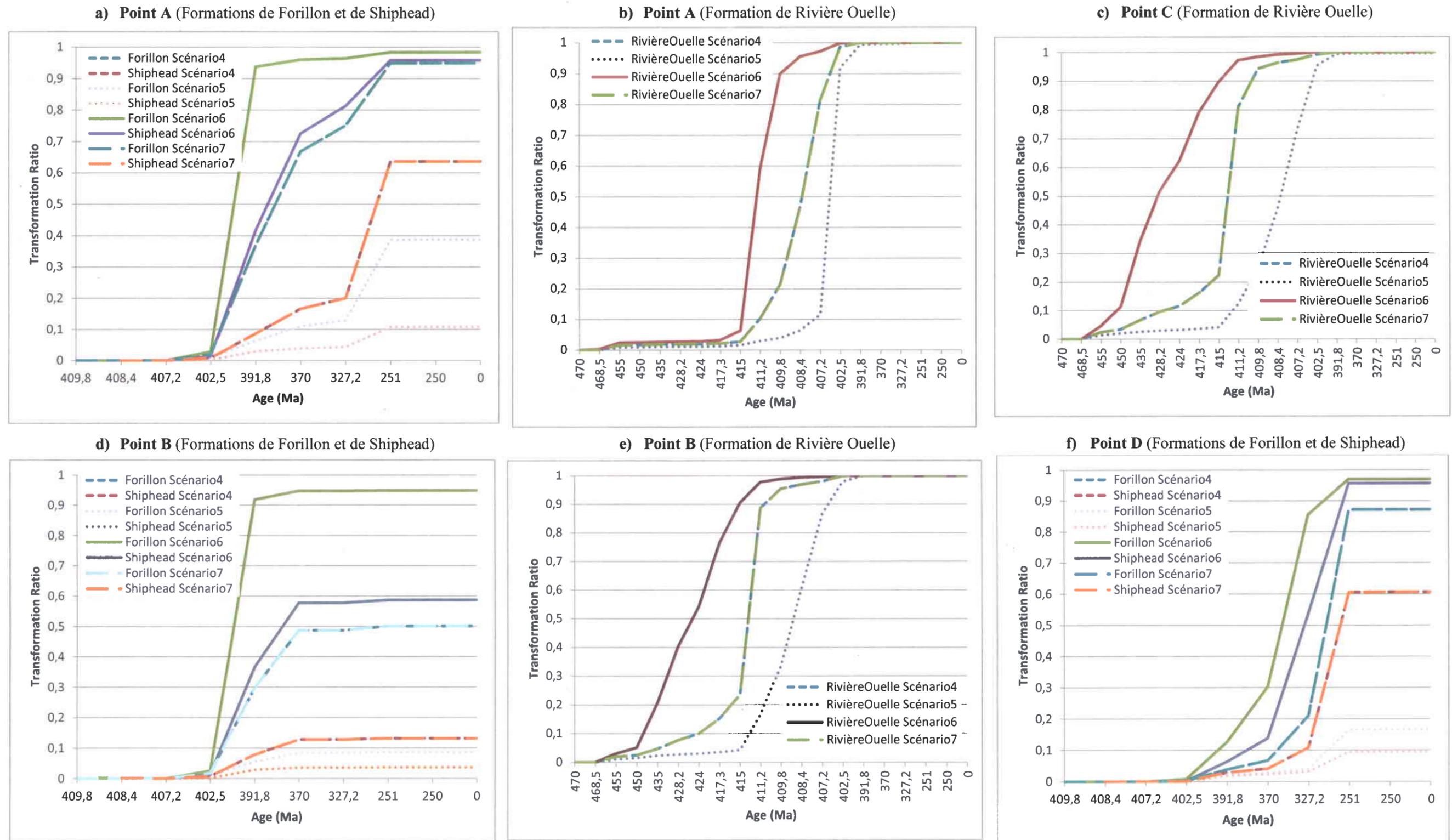


Figure 4.26: Résultats des taux de transformation (TR) en fonction du temps, de la roche mère choisie et des quatre scénarios faisant varier le taux de flux de chaleur. Les trois roches mères choisies sont les formations de Forillon et de Shiphead avec un kérogène de type 2 et un index d'hydrogène de 469 mg/gC et la Formation de Rivière Ouelle avec un kérogène de type 2 mais un index d'hydrogène de 500 mg/gC.

- **Pour le point D (bloc Nord)** (Figure 4.26, f):

Les formations de Forillon et de Shiphead : pour les scénarios 4 et 7, l'évolution des courbes de TR sont une nouvelle fois les mêmes (Figure 4.26, f). Pour les scénarios 4, 5 et 6, à partir de 370 Ma, pour les deux roches mères, les courbes d'évolution du TR sont très différentes. A l'âge actuel, la roche mère Forillon atteint une valeur de TR pour le scénario 6 de 0,96, pour le scénario 4 de 0,88 et pour le scénario 5 de 0,17. La différence de valeur de TR entre les scénarios 6 et 5 vient de la proximité de la base des sédiments, comme pour le point A dans le bloc Centre.

En conclusion, la maturation des roches mères situées dans les blocs Nord et Sud (Figure 4.26, a et f) est très sensible au flux de chaleur à la base des sédiments dû à la proximité de la base. Les changements locaux de flux de chaleur testés à l'extrême ouest (Figure 4.25), n'influencent pas les taux de transformation des points choisis (Figure 4.26, c et f).

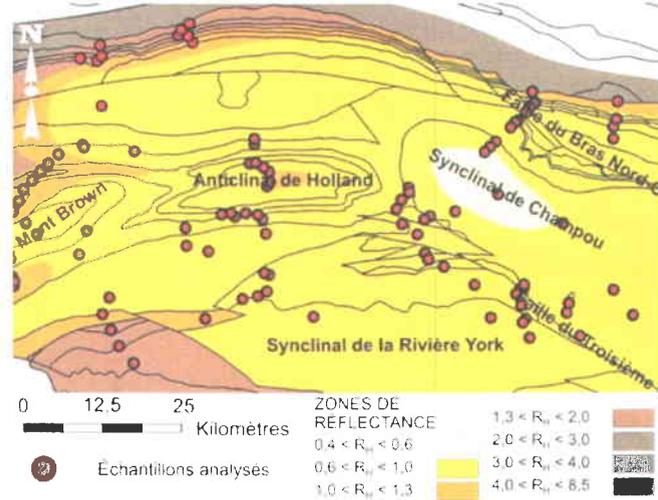
4.6.4.3. Analyse de la variation du flux de chaleur sur les cartes de réflectance de la vitrinite simulées

Lors des tests de variation des épaisseurs de sédimentation/érosion, la carte de vitrinite résultant de la simulation du scénario 4 (Figure 4.23, e) correspondait le mieux à la carte de réflectance de la vitrinite faite à partir des échantillons de surface (Figure 4.23, a).

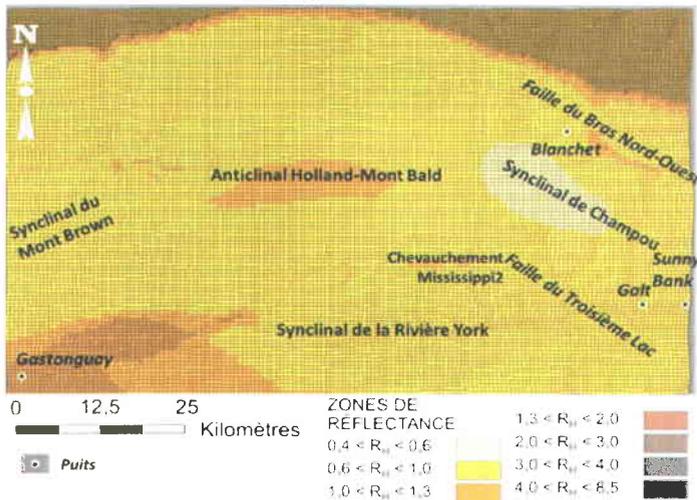
La carte de réflectance de la vitrinite simulée à partir des hypothèses du scénario 5 (Figure 4.27, c) ne correspond pas à la carte de référence (Figure 4.27, a). Les valeurs de réflectance de la vitrinite de la Formation de York River/Lake du scénario 5 sont trop faibles ($0,4 < R_{0c} < 0,6$ %) par rapport aux échantillons de surface ($0,6 < R_{0a} < 1,0$ %). La valeur de réflectance de la vitrinite pour les roches cambro-ordoviciennes dans le bloc Nord (compris entre $1,0 < R_{0c} < 1,3$ % sur la Figure 4.27, c) ne correspond pas à celle répertoriée sur la carte de référence (compris entre $2,0 < R_{0a} < 3,0$ % sur la Figure 4.27, a). Un flux de chaleur de 40 mW.m^{-2} n'est pas assez élevé pour le taux de sédimentation/érosion proposé dans le scénario 5.

La carte de réflectance de la vitrinite simulée à partir des hypothèses du scénario 6 (Figure 4.27, d) ne correspond pas avec les valeurs de réflectance de la vitrinite de la carte de référence (Figure 4.27, a). Les roches du Cambro-Ordovicien dans le bloc Nord ont une valeur de réflectance comprise entre 3,0 et 4,0 %, qui est supérieure à celle de la carte de référence ($2,0 < R_{0a} < 3,0$ % ; Figure 4.27, a). Il y a une zonation de la réflectance en fonction des contours stratigraphiques des formations de Shiphead et de Forillon ($1,0 < R_{0d} < 1,3$ %), à côté du puits Blanchet, au nord du synclinal du Mont Brown et dans le chevauchement de Mississippi 2. Les valeurs de réflectance de la carte (Figure 4.27, d)

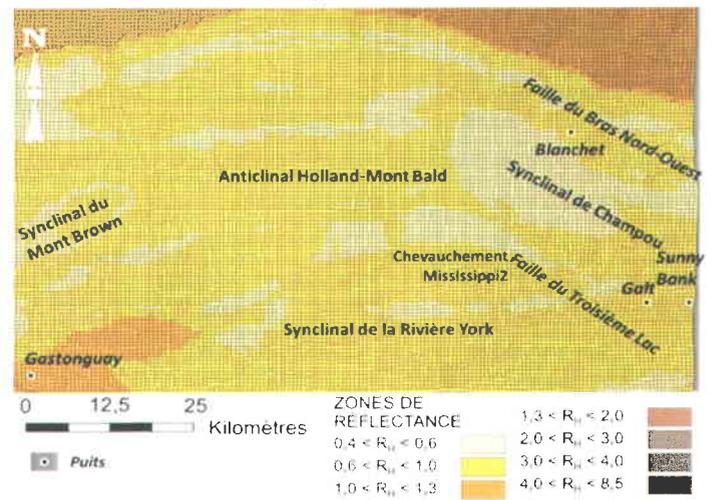
a) Carte de réflectance de la vitrine faite à partir des échantillons de surface.



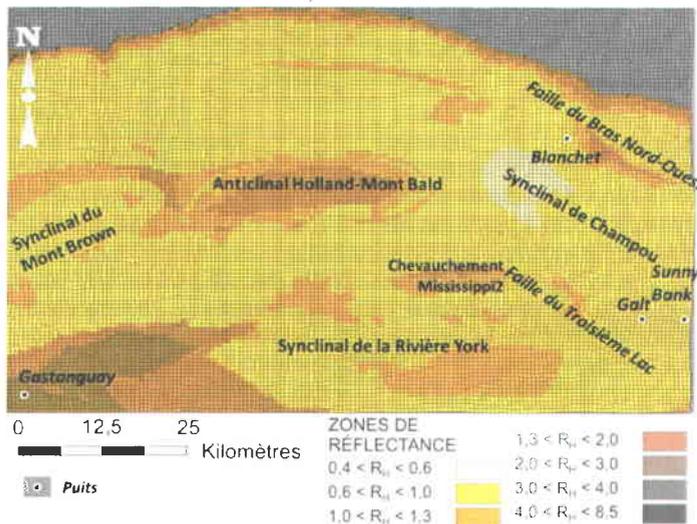
b) Scénario 4



c) Scénario 5



d) Scénario 6



e) Scénario 7

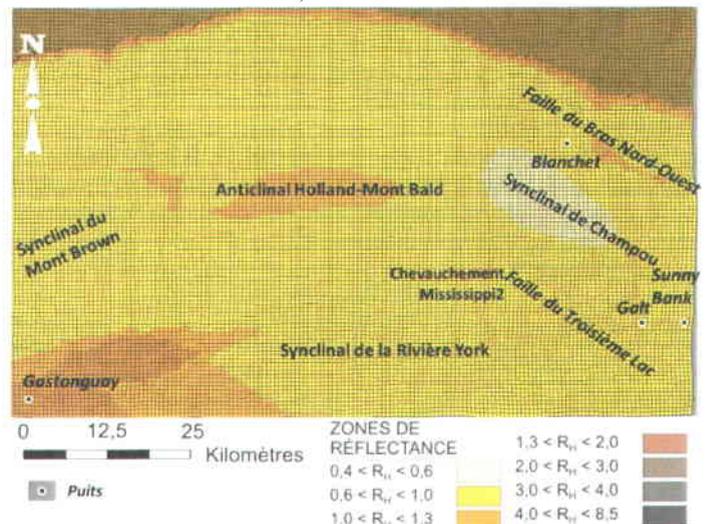


Figure 4.27: Cartes de réflectance de la vitrine provenant de la simulation avec le logiciel Temis 3D des scénarios 4, 5, 6 et 7 pour étudier l'influence de la variation du flux de chaleur dans la zone Bourque.

sont trop élevées par rapport à la carte de référence (Figure 4.27, a). Au contraire du scénario 5, le flux de chaleur à 60 mW.m^{-2} choisis pour le scénario 6 est trop élevé.

La carte de vitrinite simulée à partir des hypothèses du scénario 7 (Figure 4.27, e) est quasiment la même que celle du scénario 4 (Figure 4.27, b). Une légère différence de valeurs de réflectance ($1,0 < R_{0e} < 1,3 \%$; Figure 4.27, e ; $0,6 < R_{0b} < 1,0 \%$; Figure 4.27, b) entre le synclinal du Mont Brown et l'anticlinal de Holland-Mont Bald est visible et serait due à l'ajout d'un flux de chaleur local dans le scénario 7. **En conclusion, le scénario 4 est le meilleur scénario testé jusqu'à présent pour la zone Bourque. C'est ce scénario qui servira pour la simulation en saturation.**

4.6.3. COMPARAISON DU SCENARIO CALIBRE AVEC LA CARTE DE VITRINITE AVEC LES AUTRES DONNEES DE CALIBRATION

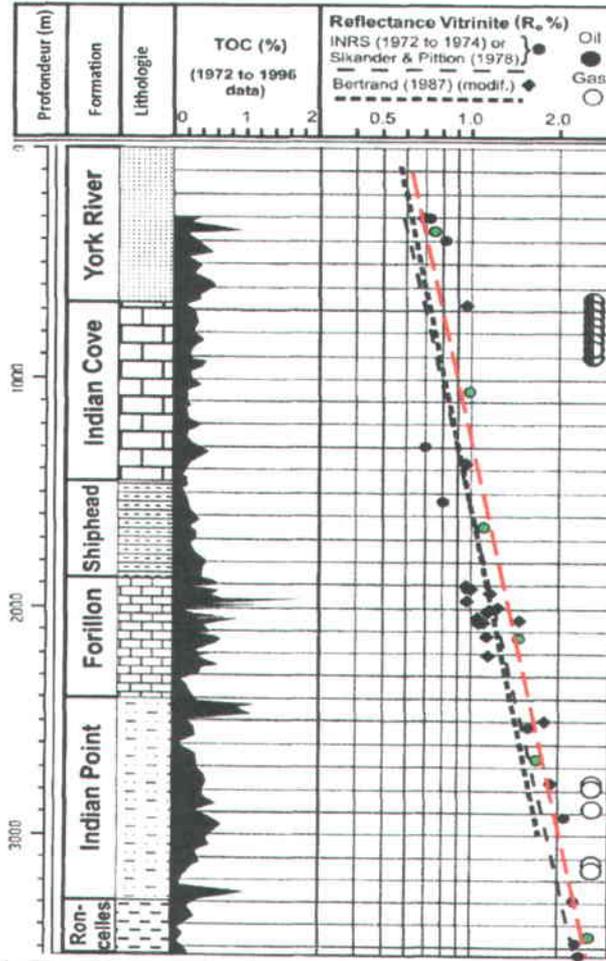
Les données de vitrinite en surface ont permis de calibrer les épaisseurs d'érosion et le flux de chaleur. Le scénario 4 (S_4) est celui pour lequel on obtient la meilleure correspondance entre la carte de R_0 simulée et celle provenant des échantillons de surface. Il existe d'autres types de données afin de vérifier l'exactitude du modèle: i) les données de vitrinite le long des puits qui ont déjà été utilisé mais pour calibrer d'autres hypothèses, ii) les traces de fission, et iii) les données de porosité à l'âge actuel.

4.6.5.1. Comparaison des données de réflectance de la vitrinite simulées du scénario 4 avec celles calculées le long des puits

Dans la zone Bourque, les puits Sunny Bank n°1 et Gaspé Sud n°1 ont servi à caler le flux thermique (partie 4.6.2). Le S_4 n'a pas les mêmes hypothèses d'épaisseur d'érosion que celles proposées par Bertrand et Malo (2001) et Roy (2008) qui ont servi à caler le modèle en thermique. Nous cherchons à savoir si les valeurs simulées de vitrinite du S_4 sont conformes à celles mesurées le long du puits. Le choix des épaisseurs de sédimentation/érosion et d'un flux de chaleur constant à 50 mW.m^{-2} à la base des sédiments permet d'obtenir des résultats de réflectance de la vitrinite (Figure 4.28) comparables à celles le long des puits Sunny Bank (Figure 4.28-a) et Gaspé Sud (Figure 4.28-b).

La comparaison des valeurs de R_0 du puits Gaspé Nord et celles extraites dans le bloc Nord à l'est du modèle 3D permet de savoir si les épaisseurs érodées choisis dans le S_4 durant la discordance taconienne (Tableau 4.13, discordance 1, sédiments au nord) permettent de retrouver dans le bloc Nord le même ordre de grandeur pour les valeurs de R_0 à l'âge actuel pour les roches ordoviciennes. La simulation du S_4 donne des valeurs de R_0 qui ne sont pas exactement pareilles (Figure 4.29, b) que celles mesurées le long du puits Gaspé Nord (Figure 4.29, a). Le point de comparaison n'est pas situé aux coordonnées exactes du puits Gaspé Nord, puisque ce dernier est localisé en dehors de la

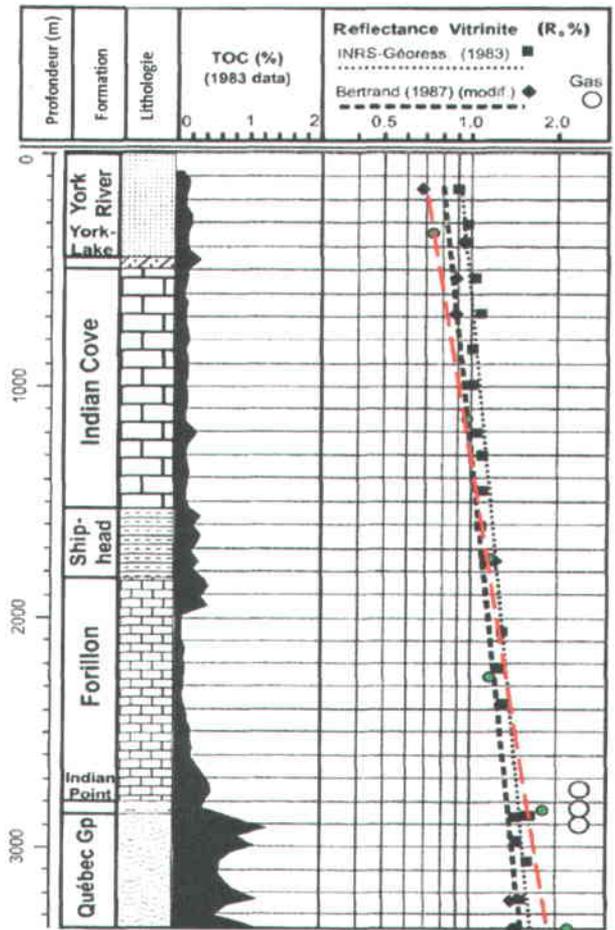
Puits Sunny Bank (C087)



a) Données de réflectance de la vitrinite obtenue lors de la simulation du scénario 4 au niveau du puits Sunny Bank n°1

Formations le long du puits Sunny Bank	Réflectance de la Vitrinite obtenue lors de la simulation du scénario 4	Profondeur à partir du sol (m)
York River/Lake	0,76	390
Indian Cove	1,00	1090
Shiphead	1,25	1631
Forillon	1,53	2127
Indian Point	1,76	2689
Ronnelles	2,28	3354

Puits Gaspé Sud (C093)

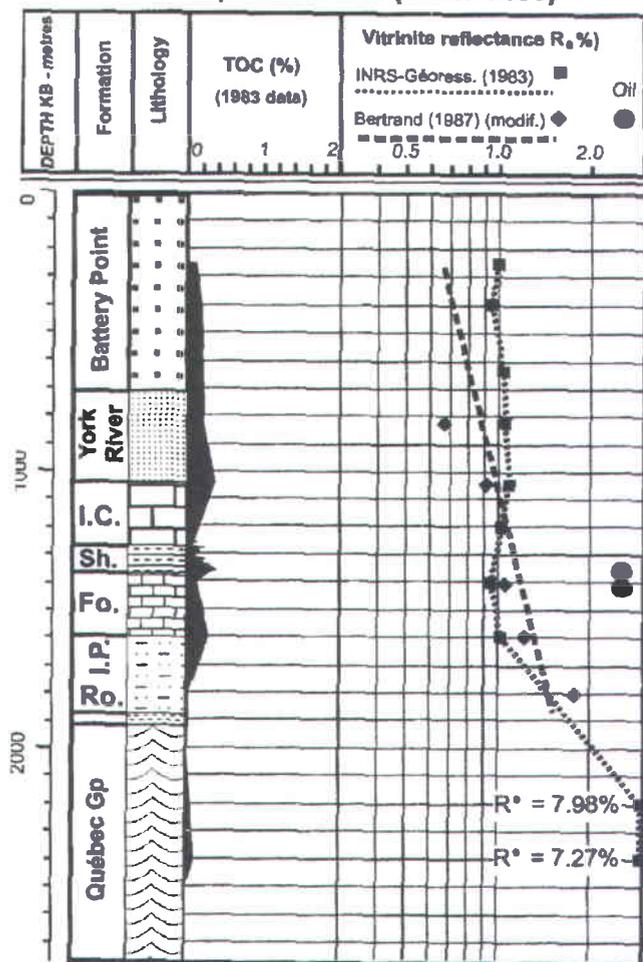


b) Données de réflectance de la vitrinite obtenue lors de la simulation du scénario 4 au niveau du puits Gaspé Sud n°1

Formations le long du puits Gaspé Sud	Réflectance de la Vitrinite obtenue lors de la simulation du scénario 4	Profondeur à partir du sol (m)
York River/Lake	0,74	415
Indian Cove	0,99	1168
Shiphead	1,25	1624
Forillon	1,55	2239
Indian Point	1,88	2875
Rivière Ouelle	2,27	3324

Figure 4.28 : Comparaison des données de réflectance de la vitrinite faites à partir des échantillons (Bertrand et Malo, 2001) ET à partir des données de sortie de la simulation du scénario 4 (ronds verts et courbe en pointillé rouge), le long des puits Sunny Bank n°1 et Gaspé Sud. Les données de la simulation faite avec le logiciel Temis3D sont en couleur (coordonnées i/j dans le modèle 3D des puits : Sunny Bank : 154/35 et Gaspé Sud : 164/28).

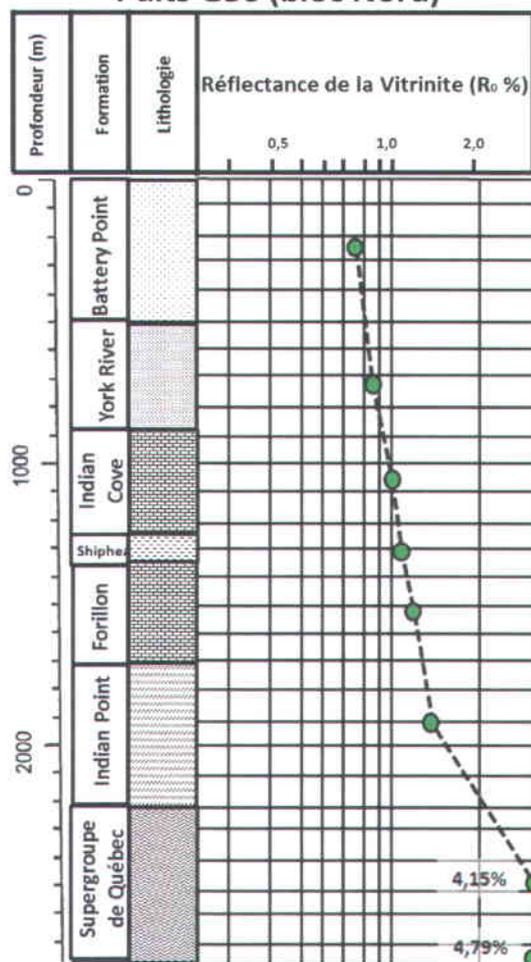
Gaspé Nord Well (1981FC099)



a) Données de réflectance de la vitrinite mesurées le long du puits Gaspé Nord par INRS Géosc. (1983)

Formations le long du puits Gaspé Nord	Réflectance de la Vitrinite mesurée le long du puits	Profondeur à partir du sol (m)
Battery Point	1,00	250
Battery Point	0,97	400
Battery Point	1,10	620
York River/Lake	1,10	710
Indian Cove	1,20	1030
Indian Cove	1,10	1200
Shiphead	-	-
Forillon	0,95	1400
Forillon	1,10	1600
-	-	-
Supergroupe de Qc	7,98	2200
Supergroupe de Qc	7,27	2400

Puits G36 (bloc Nord)



b) Données de réflectance de la vitrinite obtenue lors de la simulation du scénario 4 au niveau du point G33

Formations le long du puits G33 extrait	Réflectance de la Vitrinite obtenue lors de la simulation du scénario 4	Profondeur à partir du sol (m)
Battery Point	0,75	250
-	-	-
-	-	-
York River/Lake	0,86	732
Indian Cove	1,00	1070
-	-	-
Shiphead	1,13	1400
Forillon	1,29	1532
-	-	-
Indian Point	1,56	1905
Supergroupe de Qc	4,15	2483
Supergroupe de Qc	4,79	2737

Figure 4.29: Comparaison à gauche des données de réflectance de la vitrinite faites à partir des échantillons le long du puits Gaspé Nord (Bertrand et Malo, 2001) et à droite à partir des données de sortie de la simulation du scénario 4 (ronds verts), le long des puits de l'extraction 1D correspondant aux coordonnées de l'échantillons de la trace de fission G33 (coordonnées i/j dans le modèle 3D: 156/65, Figure 4.5).

Tableau 4.17 : Comparaison des températures des différentes formations obtenues lors de la simulation du scénario 4 avec le logiciel Temis 3D aux âges trouvées lors de l'étude des traces de fission de Malo *et al.* (2012) (Figure 4.5).

Coordonnées dans le bloc 3D		Numéro échantillon dans l'étude Malo <i>et al.</i> , 2012	Nom des formations	Données provenant de la simulation du scénario 4 avec le logiciel Temis3D				Données provenant de l'étude de Malo <i>et al.</i> , 2012
i	j			Age max	Température Age max	Age min	Température Age min	AFT Central Age
151	34	G43	York River	327,2	103	251	105	267 ± 28
155	46	G39	York River	327,2	101	251	103	267 ± 25
155	43	G07	York River	327,2	101	251	103	280 ± 30
156	74	G32	Indian Point	327,2	144	251	89	247 ± 27
156	65	G33	York River	327,2	106	251	108	262 ± 26
156	65	G36	Battery Point	327,2	99	251	101	274 ± 37

Tableau 4.18: Comparaison des données de porosité à l'âge actuel de la littérature et de celles provenant de la simulation du scénario 4.

Nom de la formation	Porosité actuelle D'après Lavoie <i>et al.</i> , 2009	Porosité diagraphie Hu et Lavoie, 2008	Porosité de la simulation du scénario 4 avec le logiciel Temis3D
White Head		1 < ϕ < 3% (puits Gastonguay)	$\phi = 6%$ (puits Gastonguay)
Val-Brillant	5 < ϕ < 10%	1 < ϕ < 3% (puits La Vérendy)	Il n'y a pas de ValBrillant dans le puits Gastonguay
Sayabec	$\phi \sim 25%$	1 < ϕ < 3% (puits La Vérendy)	Il n'y a pas de Sayabec dans le puits Gastonguay
West Point (assemblage tabulaire)	$\phi \sim 1,2%$		2 < ϕ < 4%
Forillon	$\phi \sim 2.33%$ (zone Galt)	1 < ϕ < 3% (puits Galt, Gaspé Nord)	4 < ϕ < 8%
Indian Cove	1 < ϕ < 3%	1 < ϕ < 2% (puits Sunny Bank, Blanchet, Gaspé Sud)	6 < ϕ < 10%
Grès de Gaspé (York River)	5 < ϕ < 15% (puits Haldimand)	> 5% (puits Galt)	8 < ϕ < 15%
Grès de Gaspé (Battery Point)	$\phi \sim 9,4%$	1 < ϕ < 5% (puits Gaspé Nord, Douglas)	8 < ϕ < 10%

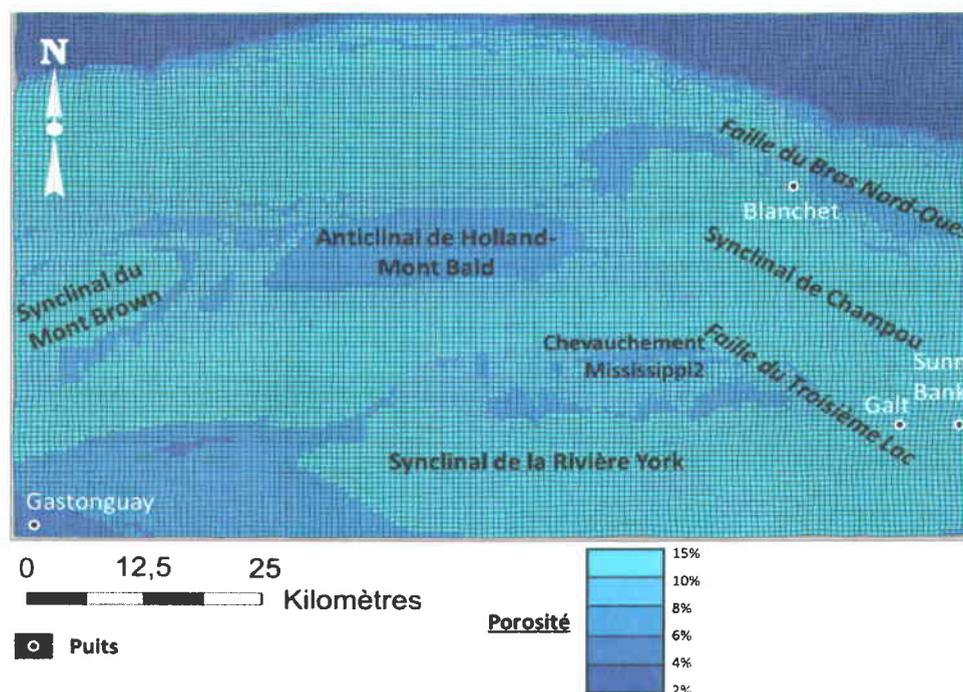


Figure 4.30: Carte de la porosité à l'actuel résultant de la simulation par le logiciel Temis 3D du scénario 4.

zone d'étude. Néanmoins, les valeurs de R_0 simulées présentent un saut de R_0 entre les roches du Supergroupe de Québec et celles de la Formation d'Indian Point, tout comme dans le puits Gaspé Nord. Nous estimons que les hypothèses du S_4 permettent de retrouver des valeurs de R_0 (Figure 4.29, b) qui se rapprochent de celles mesurées le long du puits Gaspé Nord (Figure 4.29, a).

4.6.5.2. Comparaison des températures simulées du scénario 4 avec les traces de fission

A partir d'une température inférieure à 100 °C, la présence de traces de fission permet de calculer l'âge de refroidissement de la roche et donc de calibrer l'enfouissement de la roche hôte. Le Tableau 4.17 indique les âges calculés à partir de la simulation du scénario 4 avec le logiciel Temis 3D et ceux calculés à partir des échantillons de surface prélevés lors de la campagne de terrain en 2009 (Malo *et al.*, 2012). Les hypothèses du scénario 4 sont un flux de chaleur de 50 mW.m⁻² et le dépôt de 3000 m de roches du Carbonifère. Ces hypothèses permettent d'avoir des températures d'environ 100 °C entre 327,2 et 251 Ma pour les formations d'Indian Point, de York River et de Battery Point. A 250 Ma, lors de la discordance 4 (l'érosion des 3000 m de Carbonifère ; Tableau 4.16, scénario 4), les températures de ces formations passent d'environ 100 °C à quelques degrés. Ce refroidissement est équivalent à celui subi par les roches échantillonnées qui a permis de garder l'enregistrement de l'âge de la dernière trace de fission.

4.6.5.3. Comparaison de la porosité à l'âge actuel simulée du scénario 4 et celle des échantillons de surface

La porosité est un des éléments importants pour la calibration d'un modèle car elle intervient dans le tout premier module du simulateur : le module géométrique. C'est la porosité qui est à la base du *Backstripping* avec la loi de variation de la porosité en fonction de la profondeur (Eq. 4.1). Il a été constaté en Gaspésie que la porosité des roches était extrêmement faible (Tableau 4.7). L'historique de porosité simulée à partir des données du S_4 présente des valeurs de porosité à l'actuel proches des données de porosité que l'on retrouve dans les échantillons de surface (Figure 4.30). Nous n'avons pas pu, malgré les différents tests d'enfouissement, caler exactement les porosités simulées et celles calculées sur les échantillons. Les valeurs ne sont pas conformes mais se rapprochent tout de même de ce que l'on peut trouver dans la littérature (Tableau 4.18).

En conclusion, la comparaison des données de porosité, de température et de réflectance de la vitrinite calculées à partir des échantillons et celles simulées avec les hypothèses du scénario 4 permet de dire que le meilleur scénario est le scénario 4.

4.6.4. SIMULATION EN SATURATION

Dans cette partie, le module d'expulsion et de migration des HC (Figure 4.31) est utilisé afin de déterminer l'historique de la saturation. Le logiciel Temis 3D prend en compte la chronologie de la génération et de l'expulsion des HC venant des roches mères et précise également quelles sont les roches susceptibles de servir de roches réservoirs. Avec la simulation de la maturation et genèse des HC, il est également possible d'obtenir l'historique de la génération des HC. Ces deux données vont permettre d'étudier en détail la génération des HC dans les trois roches mères et de savoir comment l'enfouissement et les érosions ont pu influencer la génération des HC (Figure 4.31). Ensuite, les roches réservoirs et les chemins de migration des HC sont précisés en prenant en compte deux nouveaux scénarios :

- Le scénario A (S_A) est un modèle où les failles sont perméables ;
- Le scénario B (S_B) est un modèle où les failles sont imperméables.

Dans le logiciel Temis3D, les failles sont représentées par une lithologie particulière. Pour S_A , la lithologie est 100% *Shale*, et pour S_B , 100% *Sandstone*. La donnée d'entrée qui va varier est la carte de distribution lithologique et porosité (Figure 4.31), ce qui aura comme conséquence de faire varier l'historique de la saturation en HC dans les roches.

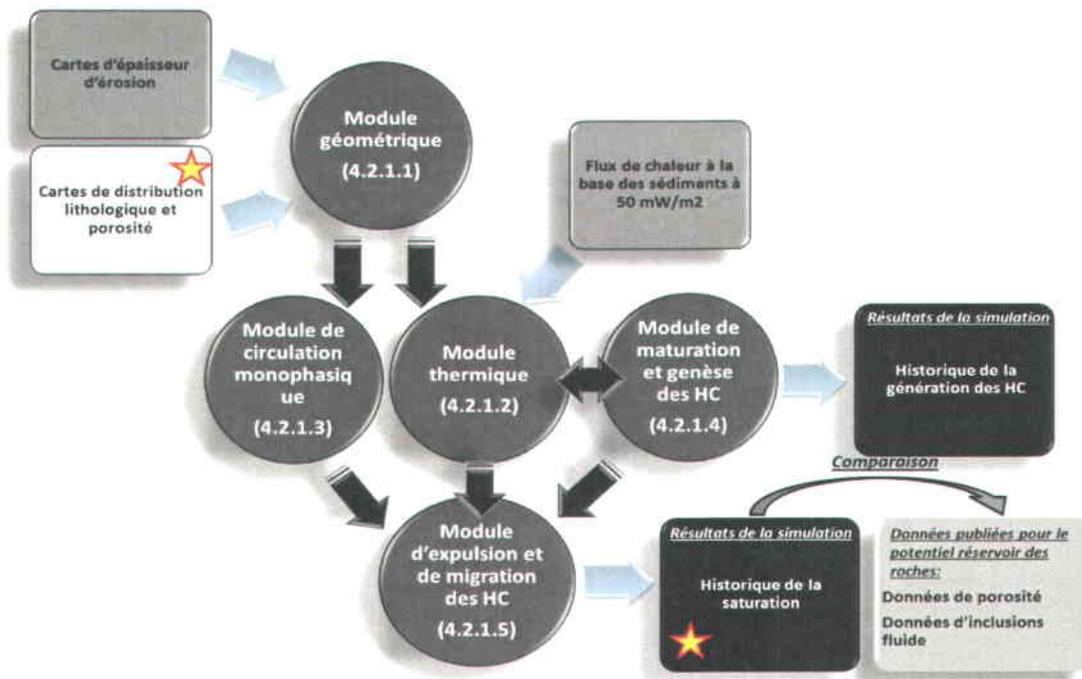


Figure 4.31: Schéma représentant la méthode de travail pour la simulation en saturation avec le module d'expulsion et de migration des HC avec les hypothèses d'épaisseur d'érosion et de flux de chaleur correspondant aux hypothèses du scénario 4. La case blanche est la donnée d'entrée, les cases grises foncées sont les données d'entrée fixes, les cases noires représentent les données simulées, les ronds gris sont les modules utilisés dans le logiciel Temis 3D, la case grise claire est la donnée de calibration et les étoiles localisent les données qui vont varier.

Génération des HC de la roche mère RIVIÈRE OUELLE au cours de l'histoire du bassin

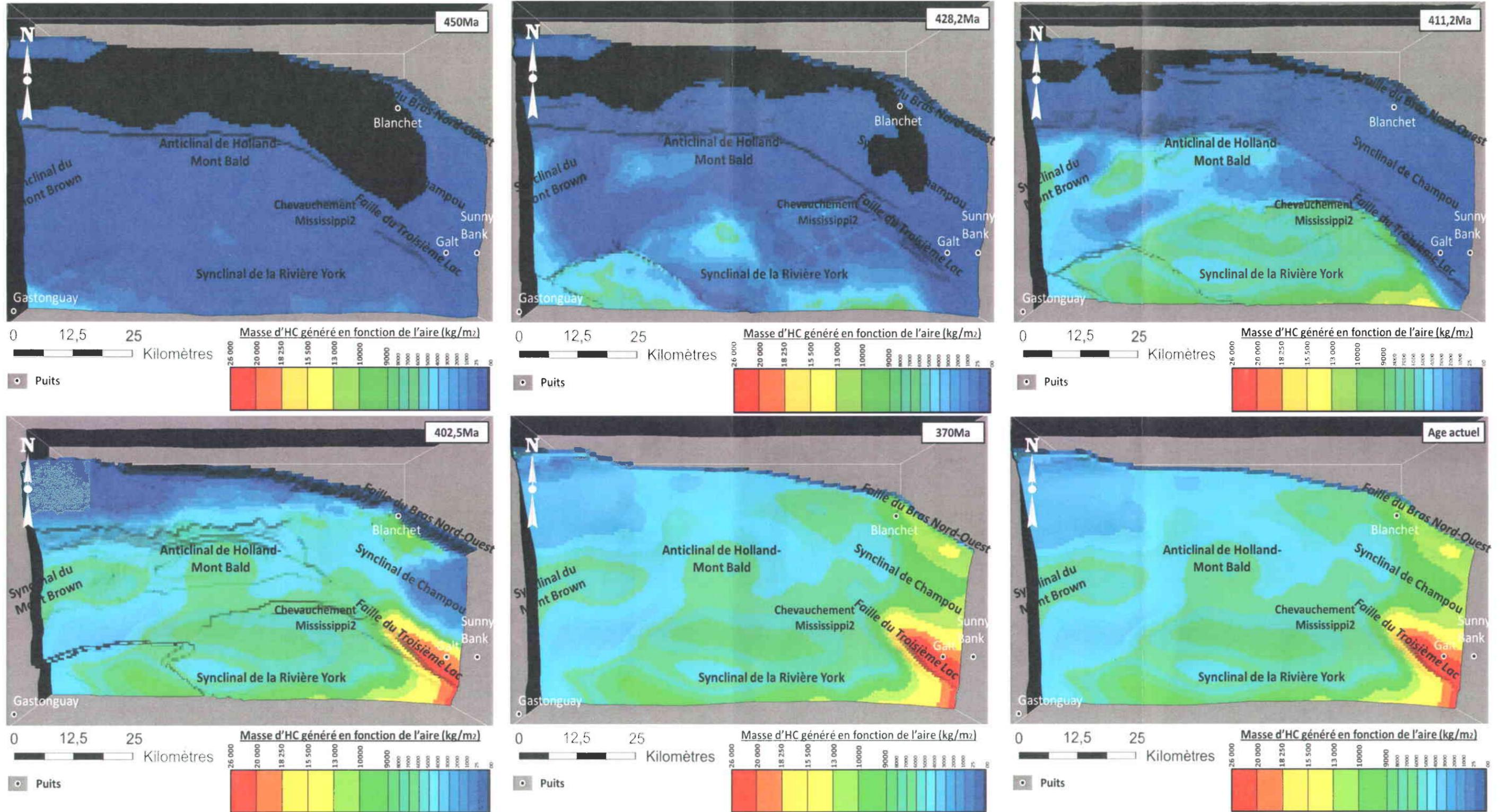


Figure 4.32: Génération des HC de la roche mère RIVIÈRE OUELLE au cours de l'histoire du bassin.

Génération des HC de la roche mère FORILLON au cours de l'histoire du bassin

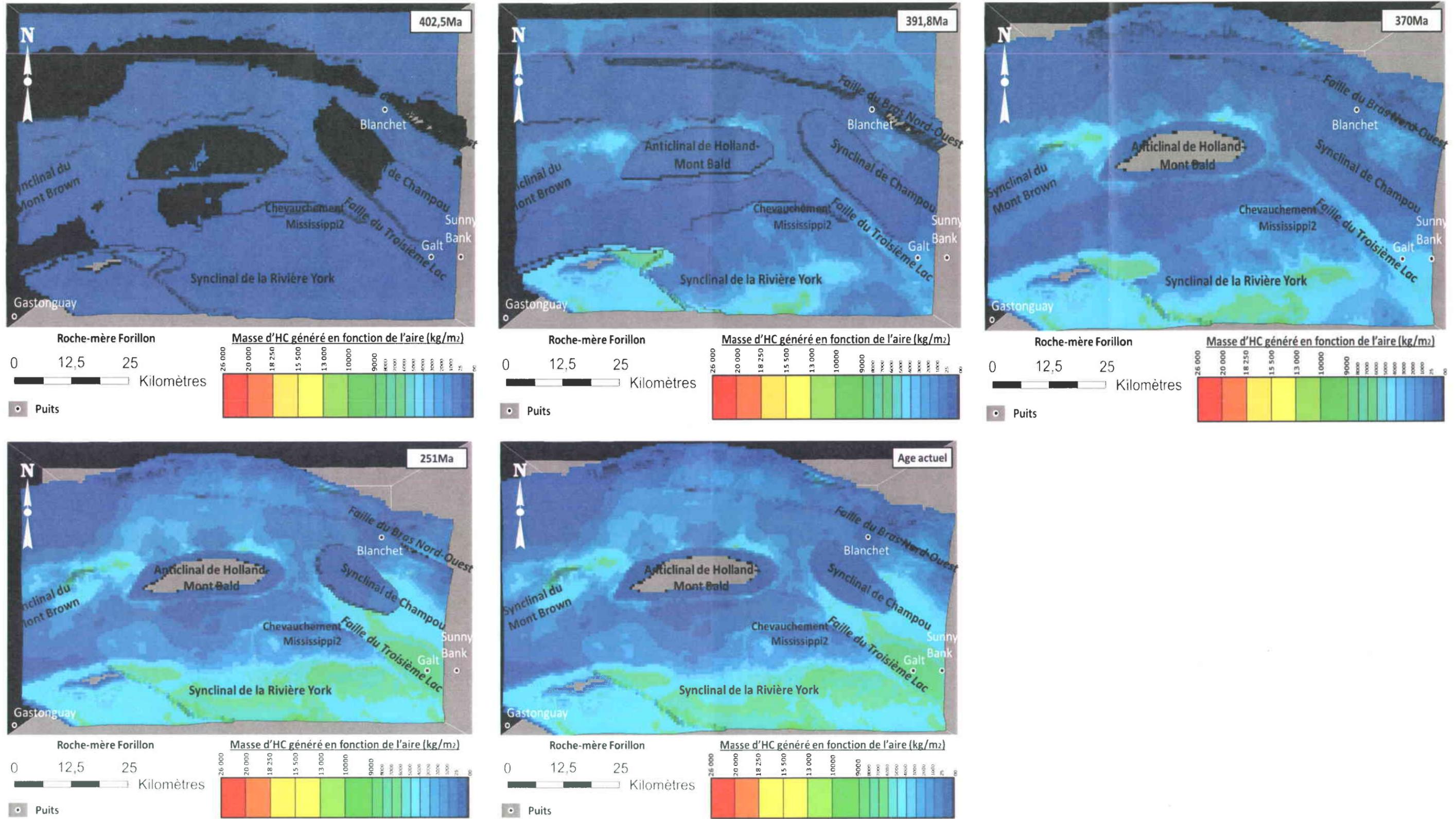


Figure 4.33: Génération des HC de la roche mère FORILLON au cours de l'histoire du bassin.

Génération des HC de la roche mère SHIPHEAD au cours de l'histoire du bassin

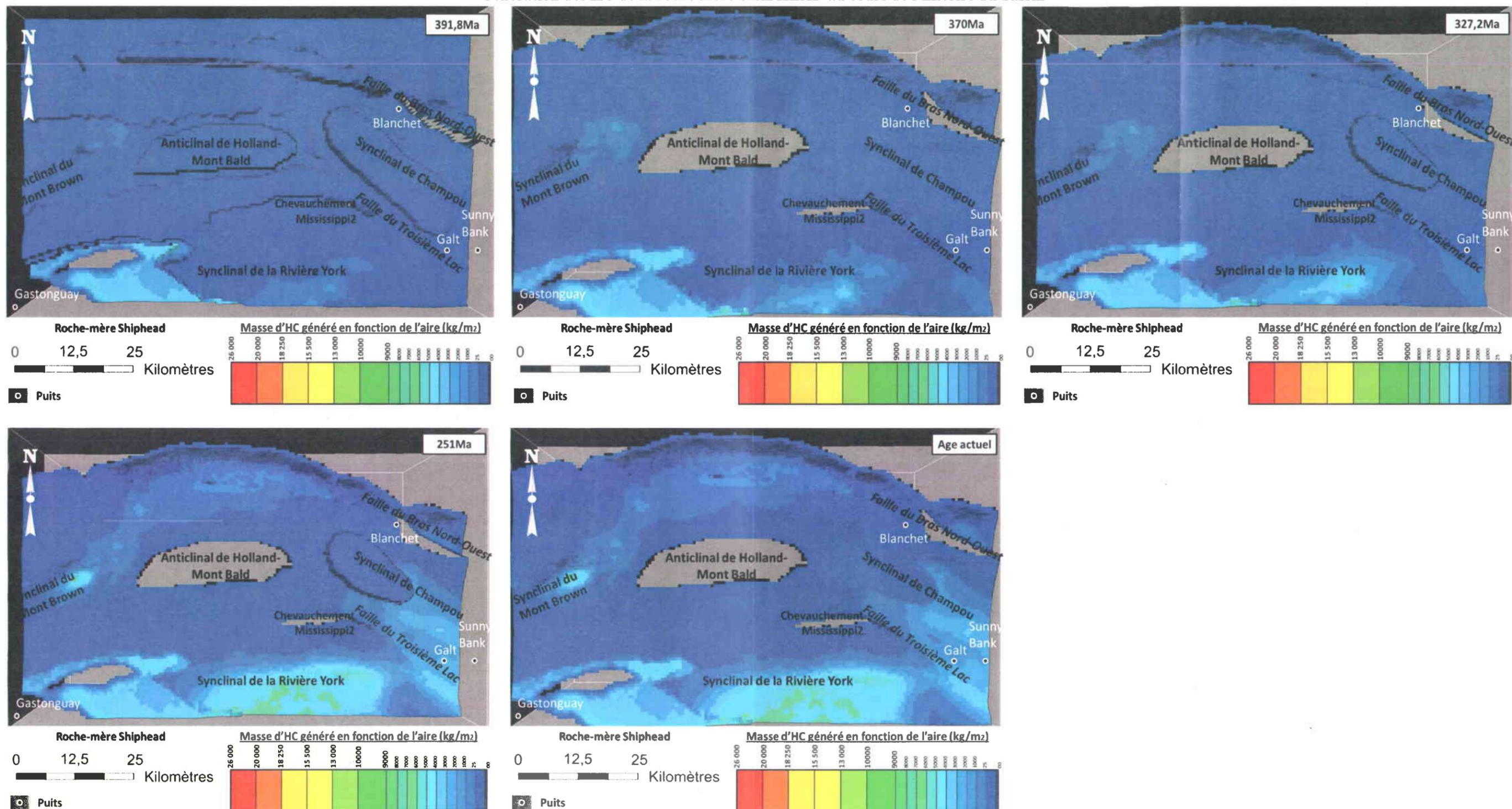


Figure 4.34: Génération des HC de la roche mère SHIPHEAD au cours de l'histoire du bassin.

4.6.5.4. La génération des hydrocarbures

D'après la simulation du scénario 4, la roche mère Rivière Ouelle (Figure 4.32) commence à générer de petites quantités d'HC dans les blocs Ouest et Sud à partir de 450 Ma et dans de plus grandes proportions dès 411,2 Ma dans ces mêmes blocs. La Formation de Rivière Ouelle ne génère des HC dans les blocs Nord et Centre qu'à partir de 402,5 Ma. La génération de l'ensemble des HC de la Formation de Rivière Ouelle est pré- ou syn-acadienne, comme l'indiquaient les valeurs du TR (Figure 4.26, b).

Pour la roche mère Forillon (Figure 4.33), la formation commence à générer des HC dans le bloc Sud-Ouest dès 402,5 Ma. La génération des HC se généralise sur toute la surface entre 391,8 et 370 Ma. On remarque également une deuxième période de génération d'HC lors de l'enfouissement au Carbonifère (370 Ma). Les quantités sont, par contre, plus faibles que celles de la Formation de Rivière Ouelle.

Pour la roche mère Shiphead (Figure 4.34), la formation commence à expulser en faible quantité dès 391,8 Ma au sud-ouest. Jusqu'à 327,2 Ma, seuls les blocs Sud et Ouest ont généré des HC. Tout comme la Formation de Forillon, il y a une deuxième génération d'HC lors de l'enfouissement maximal au Carbonifère, surtout localisé au niveau des blocs Centre et Sud, et légèrement dans le bloc Nord.

4.6.5.5. Scénario A : modèle avec failles perméables

Les résultats de la simulation avec des failles perméables (Figure 4.35) montrent que :

Dès 424 Ma, la Formation de Rivière Ouelle expulse des HC dans les blocs Sud et Ouest. Les roches du Groupe de Matapédia se remplissent rapidement en HC provenant de la roche mère Rivière Ouelle. La roche réservoir White Head n'est pas saturée. La saturation varie entre 0 et 10 %. Les HC migrent par contact avec les roches qui l'entourent.

A 411,2 Ma, le Groupe de Matapédia est de plus en plus saturé par les HC. Les valeurs de saturation varient de 4 à 20 % dans le sud du bloc Sud.

A 407,2 Ma, la migration des HC s'initialise le long de l'une des branches de la faille du Troisième Lac qui dans le cas du scénario A est perméable (Figure 4.35, 407,2 Ma, flèche jaune).

A 402,5 Ma, les failles servent de chemins de migration (Figure 4.35, 402,5 Ma, flèches jaunes) et au sud du bloc Centre, la Formation de Rivière Ouelle arrive à son maximum de génération d'HC (Figure 4.32) et de saturation d'HC (valeurs de saturation comprises entre 5 et 10 %).

A 391,8 Ma, les HC localisés dans les roches du Groupe de Matapédia continuent à prendre le chemin de migration donné par la faille du Troisième Lac (Figure 4.35, 391,8 Ma, flèches jaunes). A cette période, les roches de la Formation de York River/Lake viennent de se déposer.

Les roches mères Forillon et Shiphead ont commencé à générer leurs HC (Figure 4.33 et Figure 4.34, 391,8 Ma). La Formation d'Indian Cove se sature en HC avec des valeurs comprises entre 5 et 10 %. Par contre, la Formation de York River/Lake qui se trouve au-dessus des roches mères Forillon et Shiphead ne se sature pas. Il est possible que la Formation d'Indian Cove se sature en HC par contact avec les roches mères Forillon et Shiphead et que les failles perméables servent de drain aux HC jusqu'à la surface empêchant leur concentration dans la roche réservoir potentielle York River.

A 370 Ma (après l'érosion acadienne), les HC ne se situent plus dans les zones de failles. Une grande partie de ces derniers ont été expulsés durant l'enfouissement acadien.

A 251 Ma (enfouissement post-carbonifère), les deux roches mères Forillon et Shiphead génèrent une autre partie de leurs HC (Figure 4.33 et Figure 4.34, 251 Ma). Aucune faille n'a été répertoriée dans les roches du Carbonifère. Les HC ne pouvant s'échapper par ces chemins de migration commencent à saturer la Formation de York River/Lake avec des valeurs inférieures à 3 %.

Après l'érosion post-carbonifère, la Formation de York River/Lake se retrouve à la surface et perd une grande partie de ses HC (valeurs de saturation à 0 %). Les HC dans les autres formations ont continué à migrer vers le haut. Il y a moins d'HC dans les roches du Groupe de Matapédia ($5 < \text{saturation à } 251 \text{ Ma} < 10 \%$; $3 < \text{saturation à l'âge actuel} < 4 \%$). Il en reste tout de même dans le synclinal de la Rivière York et au niveau du chevauchement de Mississippi 2 ($5 < \text{saturation à l'âge actuel} < 10 \%$).

Les roches réservoirs à l'âge actuel avec le scénario B des failles perméables (Figure 4.36):

La surface représentant le toit de la Formation de White Head (Figure 4.36-a) montre une localisation des HC au niveau de l'anticlinal de Mississippi, de la faille d'Oatcake et au niveau du chevauchement de Mississippi 2.

La surface représentant les toits des formations de Saint-Léon et de Roncelles, mais également une partie de la Formation de West Point (Figure 4.36-b) présente plusieurs caractéristiques : i) les zones où se situe la Formation de West Point contient toujours des HC (dans la zone complexe de la FBNO, dans la terminaison de la FTL et au niveau de la Rivière Madeleine); ii) les rares traces d'HC dans la Formation de Roncelles se trouvent dans les anticlinaux de Mont Bald et de Holland-Mont Bald ; iii) la Formation de Saint-Léon contient également peu d'HC mais ces derniers se localisent principalement dans le sud-ouest du bloc Ouest dans la zone de chevauchement de la faille d'Oatcake.

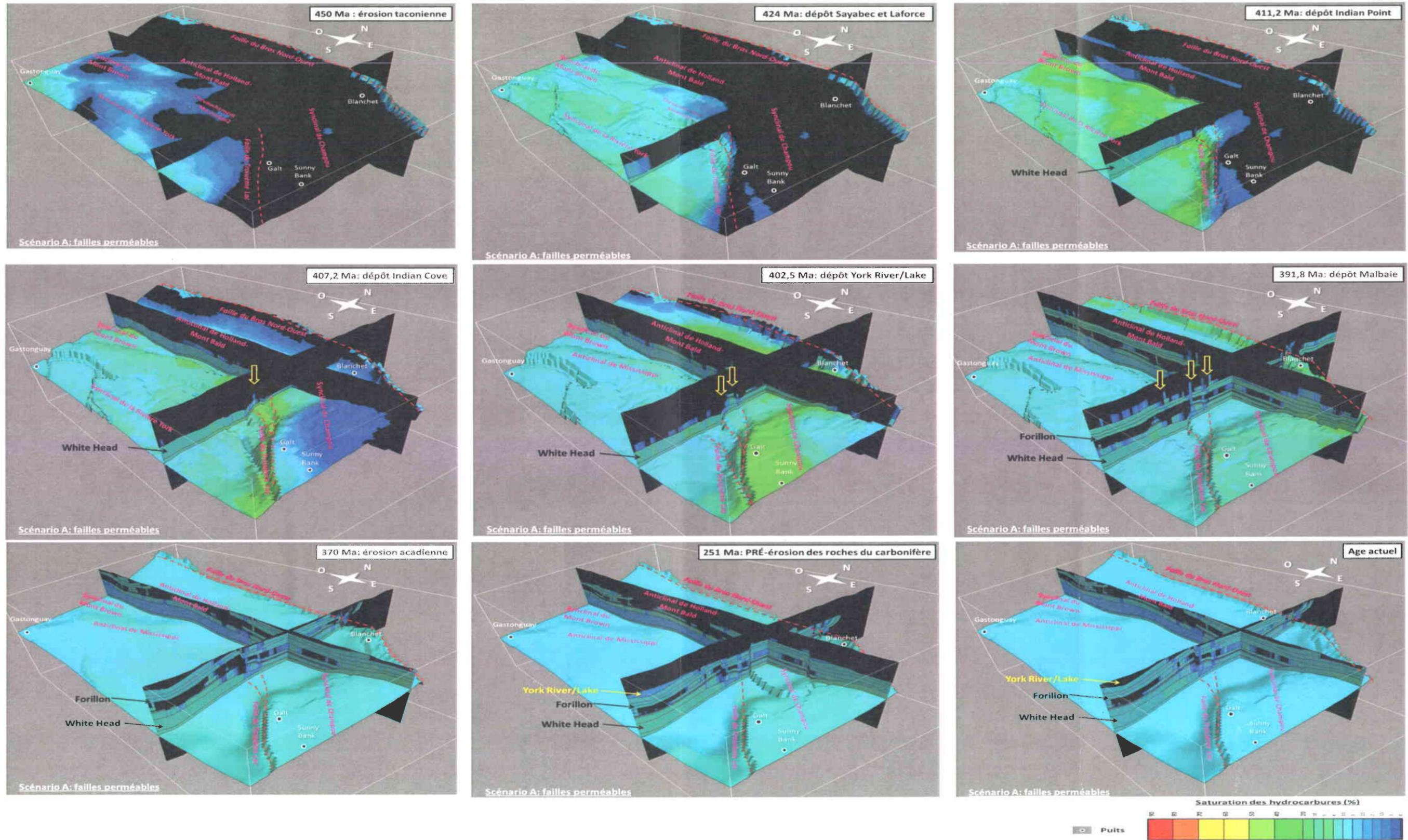
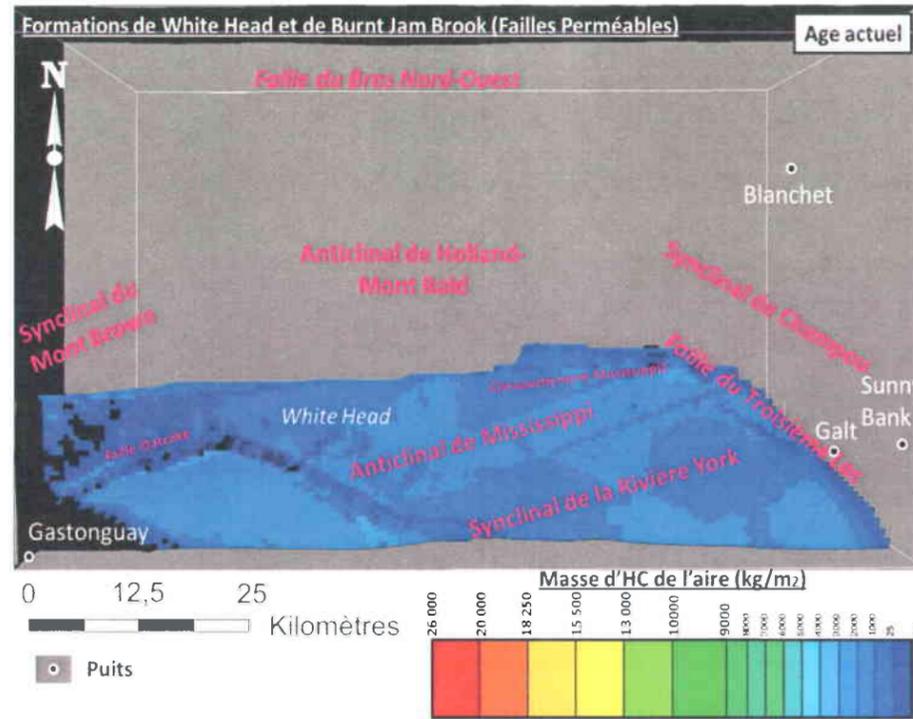
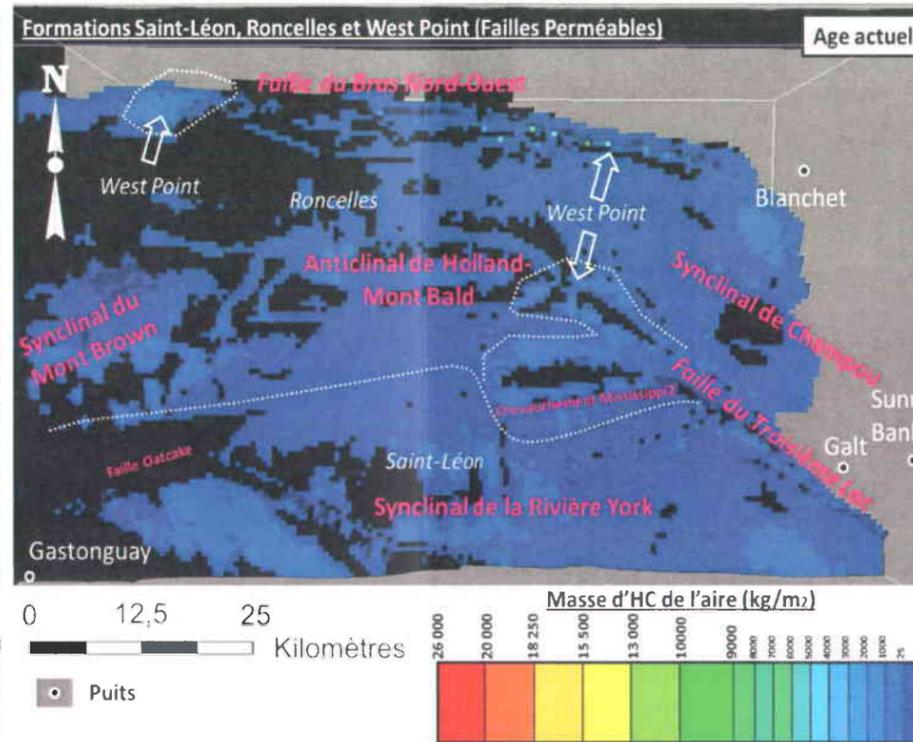


Figure 4.35: Visualisation du modèle 3D en coupes (i, j, k) montrant les résultats en saturation du scénario A avec des failles perméables avec les hypothèses du scénario 4 au cours du temps.

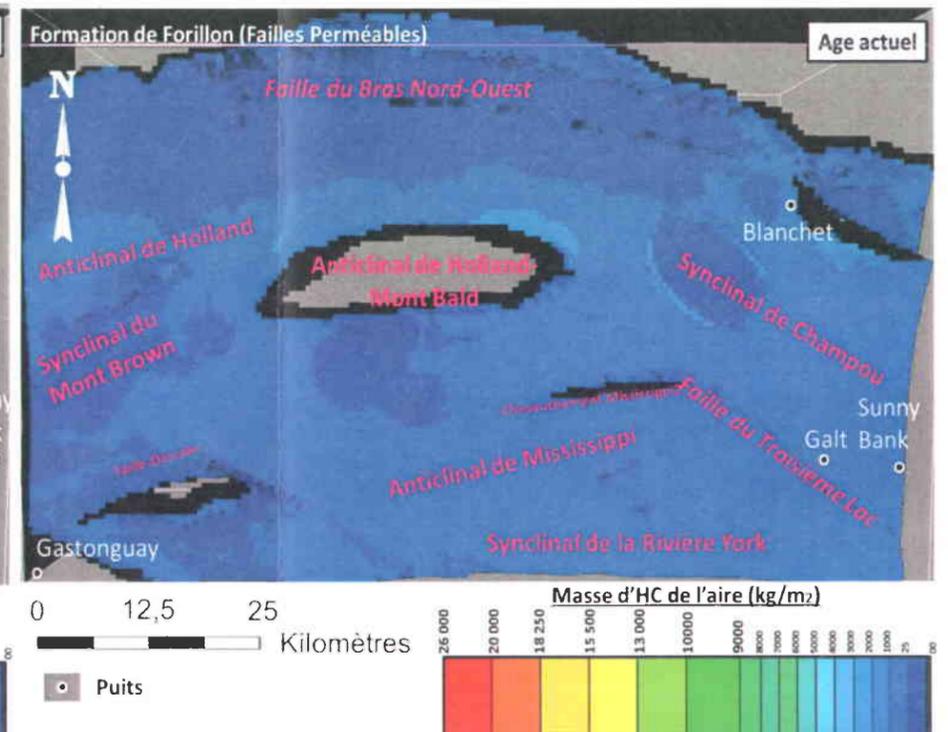
a) Formations de White Head



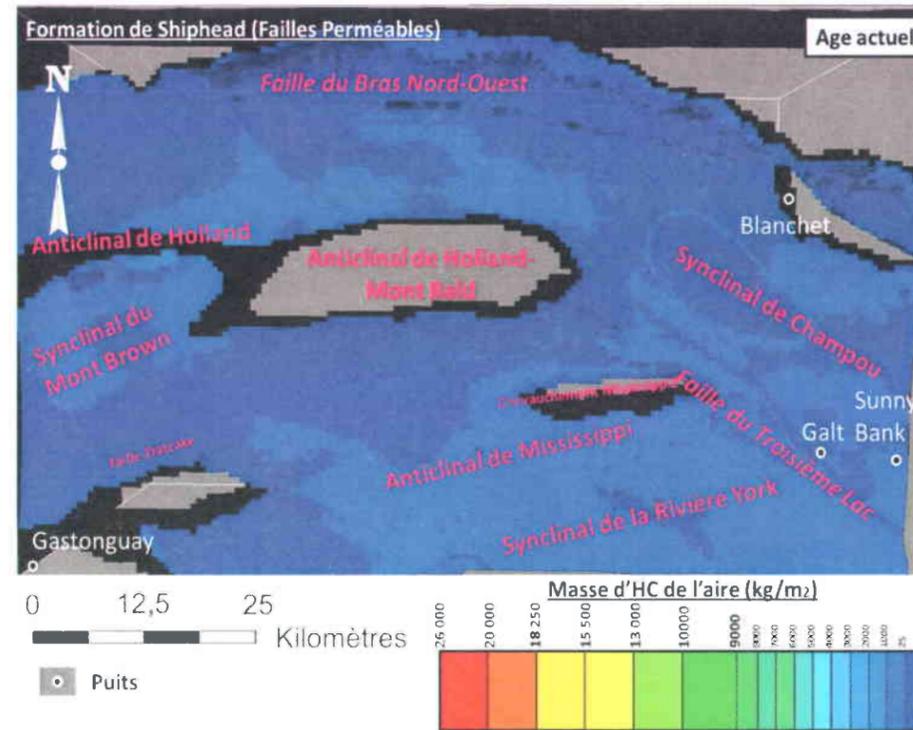
b) Formations de Saint-Léon, de Roncelles et West Point



c) Formation de Forillon



d) Formation de Shiphead



e) Formation d'Indian Cove

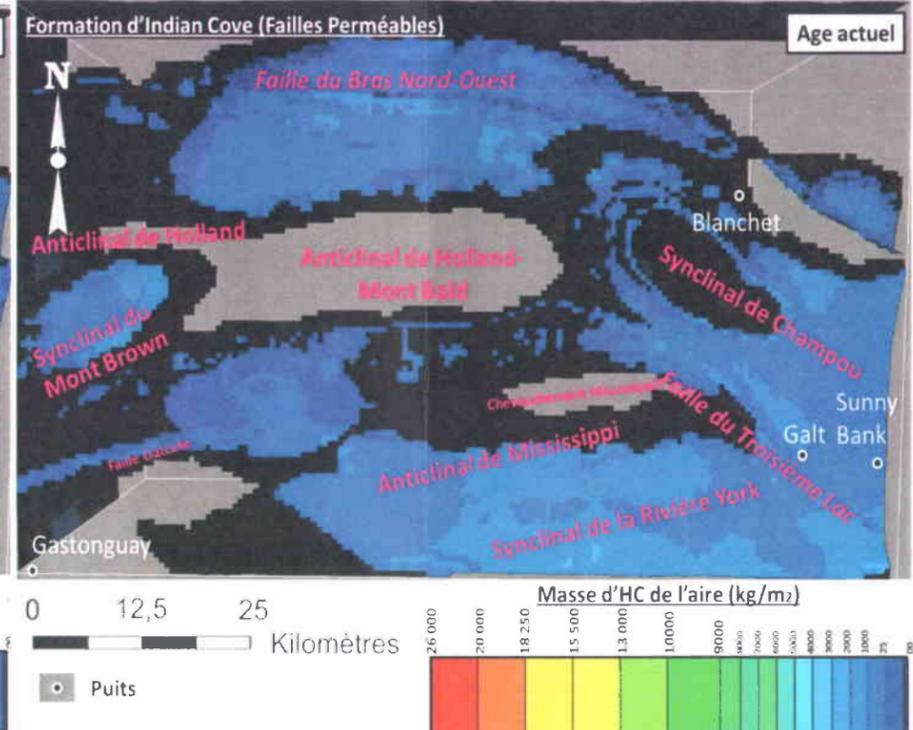


Figure 4.36: Visualisation à l'âge actuel du toit des formations ayant un potentiel réservoir d'après le scénario A (failles perméables) lors de la simulation en saturation du S_4 . A noter : la surface b contient trois formations, puisque ces formations se sont déposées durant la même époque.

La surface représentant la Formation de Forillon (Figure 4.36-c) indique que les HC n'ont pas de zone « réservoir » préférentielle à l'exception de l'anticlinal de Holland/Mont Bald et à côté du puits Blanchet où il y a des valeurs de masse d'HC comprises entre 1000 et 2000 kg/m². La partie en auréole qui entoure le synclinal de Champou est un artéfact de simulation. La zone entourant la FBNO est vide d'HC. L'hypothèse des failles perméables ne permet pas de piéger les HC dans cette espace.

La surface représentant la Formation de Shiphead (Figure 4.36-d) a les mêmes caractéristiques que la surface du toit de la Formation de Forillon. Il n'y a pas de zone réservoir préférentielle à l'exception de l'anticlinal de Holland à l'ouest où il y a des valeurs comprises entre 1000 et 2000 kg/m².

La surface représentant la Formation d'Indian Cove (Figure 4.36-e) est clairement plus saturée en HC que la Formation de Shiphead (Figure 4.35, âge actuel). Des masses d'HC comprises entre 2000 et 3000 kg/m² sont visibles dans la zone en chevauchement de la FBNO et dans le point haut de l'anticlinal de Mississippi. Le reste des réservoirs potentiels est à prendre avec précaution puisque toutes ces zones sont non-loin d'une zone d'érosion (par exemple : dans le flanc nord-est du synclinal du Mont Brown ou le flanc nord de l'anticlinal de Mississippi).

4.6.6.1. Scénario B : modèle avec failles imperméables

Les résultats de la simulation avec failles imperméables (Figure 4.37) montrent que :

Dès 424 Ma, la Formation de Rivière Ouelle se sature en HC au niveau du bloc Sud avec des valeurs comprises entre 5 et 10 %. Les roches de la Formation de White Head se remplissent un peu plus rapidement en HC, au niveau du synclinal de la Rivière York, que lors de la simulation avec les failles perméables.

A 411,2 Ma, la Formation de Rivière Ouelle se sature en HC au niveau de la zone de la faille du Troisième Lac avec des valeurs comprises entre 20 et 40 %.

A 407,2 Ma, une autre différence entre le scénario A et le scénario B est visible, les HC ne migrent pas le long des failles puisque ces dernières sont imperméables (Figure 4.37, 407,2 Ma, flèche jaune).

A 402,5 Ma, il y a une zone qui se remplit en HC (Figure 4.37, 402,5 Ma, flèches jaunes). Cette zone longe le bord d'une faille inverse imperméable. Ces zones correspondent aux failles imperméables. La Formation de Rivière Ouelle arrive à son maximum de génération d'HC (Figure 4.32, 402, Ma) et sature d'HC dans le sud du bloc Centre avec des valeurs comprises entre 20 et 40 %, tout comme lors de la simulation avec les failles perméables (Figure 4.35). Par contre la Formation de Forillon (qui commence sa première génération d'HC ; Figure 4.33) commence à se saturer en HC de façon plus prononcée que lors de l'hypothèse du scénario A.

A 391,8 Ma, les HC sont conservés dans les roches de la Formation de White Head. La présence des failles inverses imperméables avec un pendage d'environ 60 à 70° sert de piège pour les HC (Figure 4.37, 391,8Ma, cercles en pointillés blancs). Ces zones de saturation se situent dans la Formation de Forillon au niveau de l'anticlinal de Mississippi et du chevauchement de Mississippi 2 et dans la Formation de West Point au nord le long de la FBNO. De plus, contrairement au scénario A, la Formation de York River/Lake est un peu plus saturée en HC lors du dépôt de la Formation de Malbaie.

A 370 Ma (après l'érosion acadienne), les HC remontent à la surface en longeant les failles imperméables jusqu'à se retrouver piégé contre l'une d'elles (Figure 4.37, 370Ma, pointillés blancs). Malgré que la Formation de York River/Lake ait été saturée en HC lors de l'enfouissement acadien, l'érosion post-acadienne a provoqué l'expulsion des HC en dehors de cette formation.

A 251 Ma (enfouissement post-carbonifère), les deux roches mères Forillon et Shiphead génèrent une autre partie de leur HC (Figure 4.33 et Figure 4.34, 251 Ma). Une nouvelle fois, les HC saturent légèrement la Formation de York River/Lake avec des valeurs inférieures à 3 %. Les HC piégés le long des failles imperméables, continuent de l'être même lors de l'enfouissement carbonifère (Figure 4.37, 251 Ma, pointillées blancs).

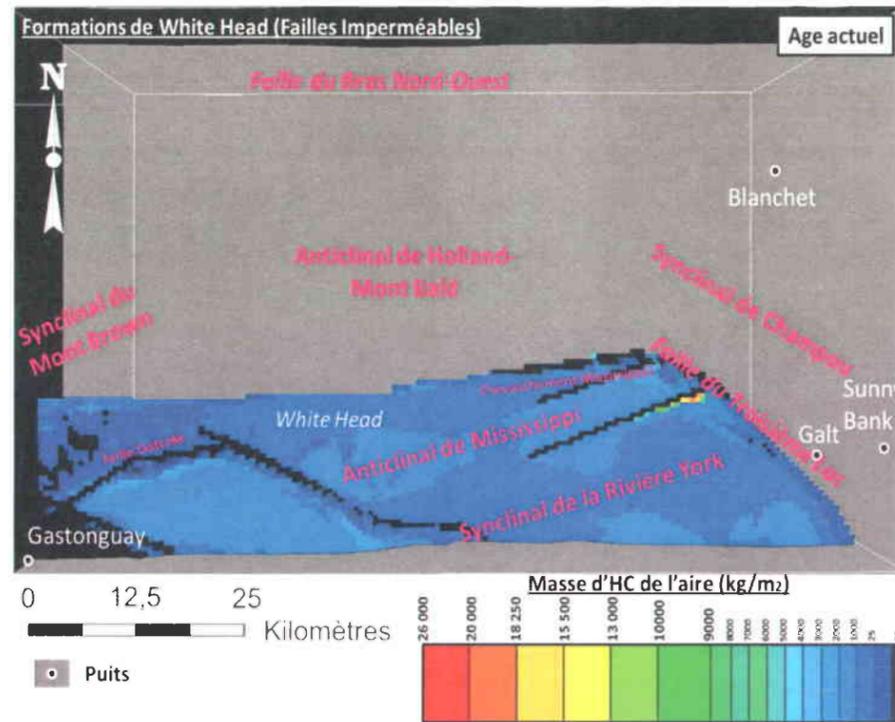
Après l'érosion post-carbonifère, à l'âge actuel, comme dans le scénario A : i) la Formation de York River/Lake se retrouve une nouvelle fois à la surface et perd une grande partie de ses HC, ii) les HC dans les autres formations ont continué à migrer vers le haut mais il reste encore des HC dans les roches de la Formation de White Head au niveau du synclinal de la Rivière York et du chevauchement de Mississippi 2. De même, sur les abords des failles imperméables, il y a toujours des zones saturées en HC avec des valeurs comprises entre 10 et 20 %.

Les roches réservoirs à l'âge actuel avec le scénario B des failles imperméables (Figure 4.38):

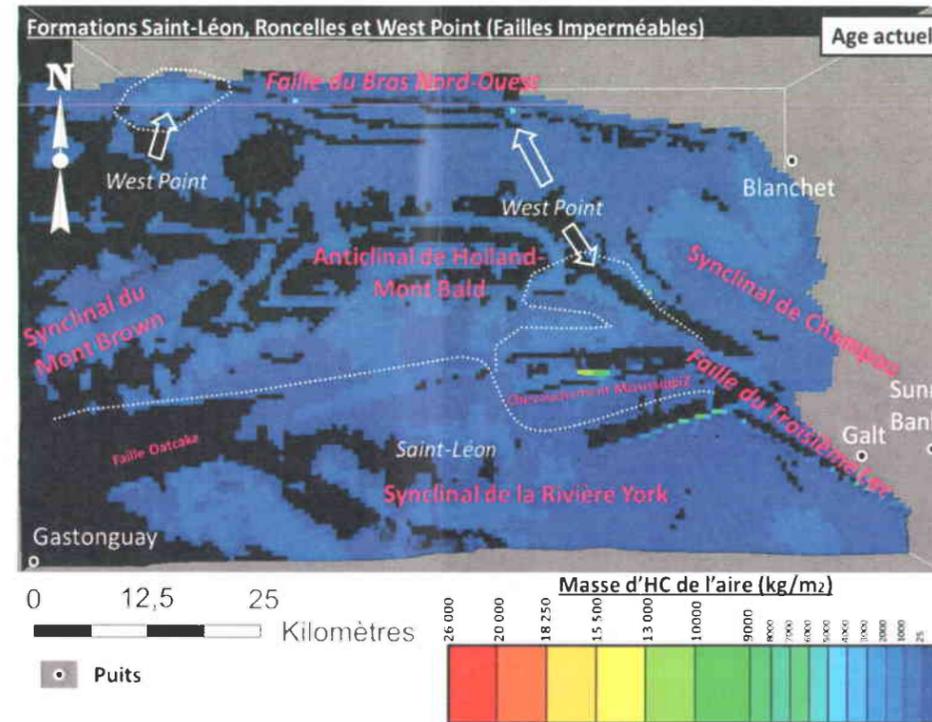
La surface représentant le toit de la Formation de White Head (Figure 4.38-a) montre une localisation des HC, contrairement au scénario A, dans tous les abords de la FTL avec des valeurs pouvant atteindre 20 000 kg/m². Ce chiffre correspond à la masse d'HC cumulée au niveau de la cellule. Ce n'est donc pas une masse d'HC qu'il serait possible de retrouver à l'âge actuel.

La surface représentant les toits des formations de Saint-Léon et de Roncelles, mais également une partie de la Formation de West Point (Figure 4.38-b) illustre que i) la Formation de Saint-Léon, comme dans le scénario A, contient peu d'HC et ces derniers se localisent principalement dans le sud-ouest du bloc Ouest dans la zone de chevauchement de la faille d'Oatcake. Par contre, la branche sud de la FTL sert de piège aux HC dans la Formation de Saint-Léon avec des valeurs comprises en 4 000 et 6 000 kg/m²; ii) les zones

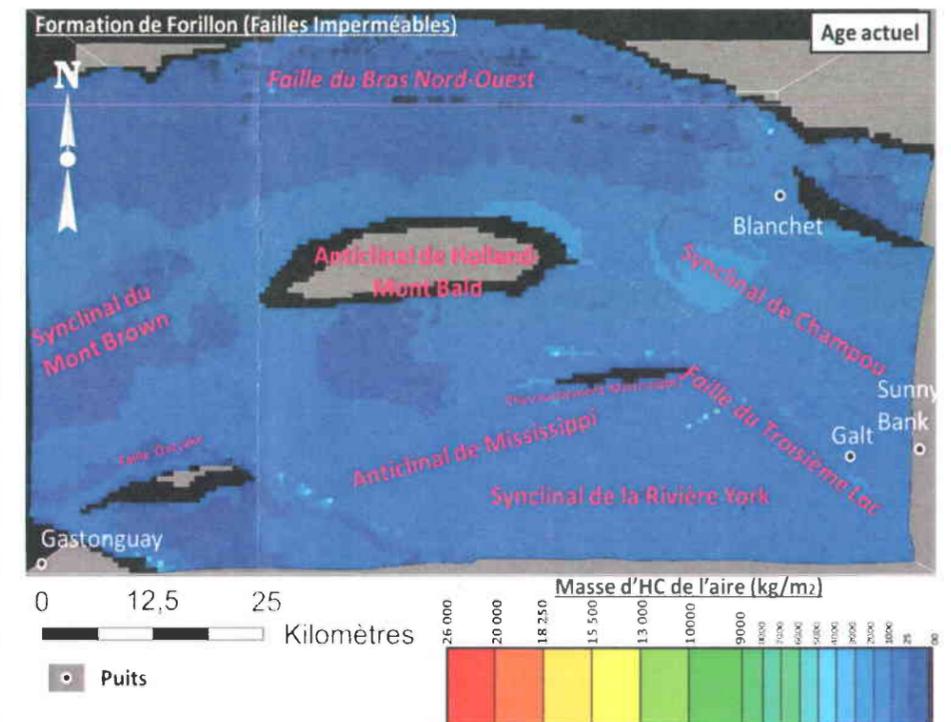
a) Formations de White Head et de Brunt Jam Brook



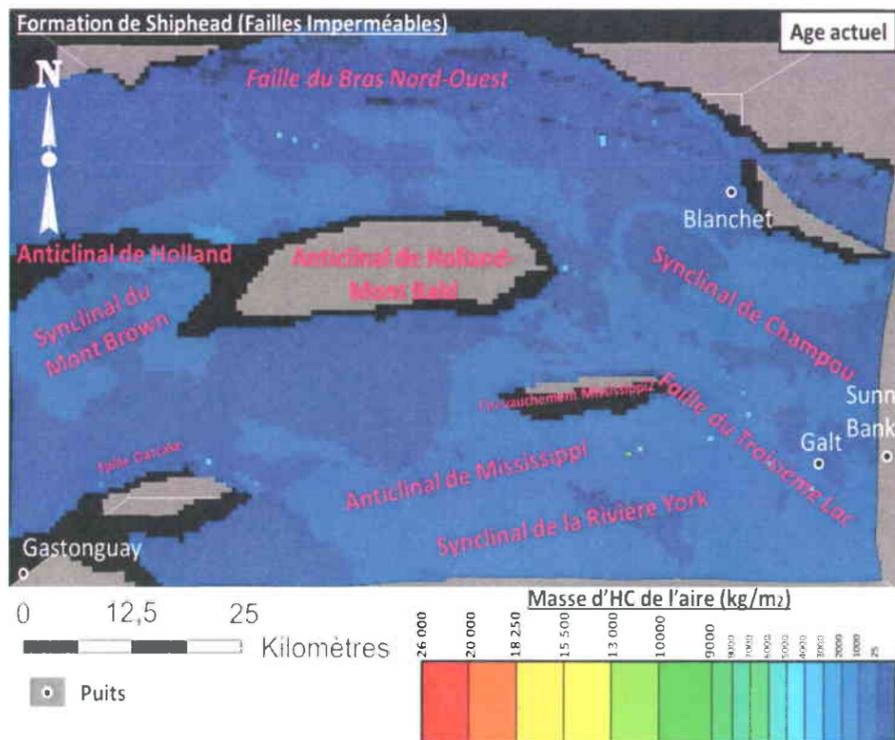
b) Formations de Saint-Léon, de Roncelles et de West Point



c) Formation de Forillon



d) Formation de Shiphead



e) Formation d'Indian Cove

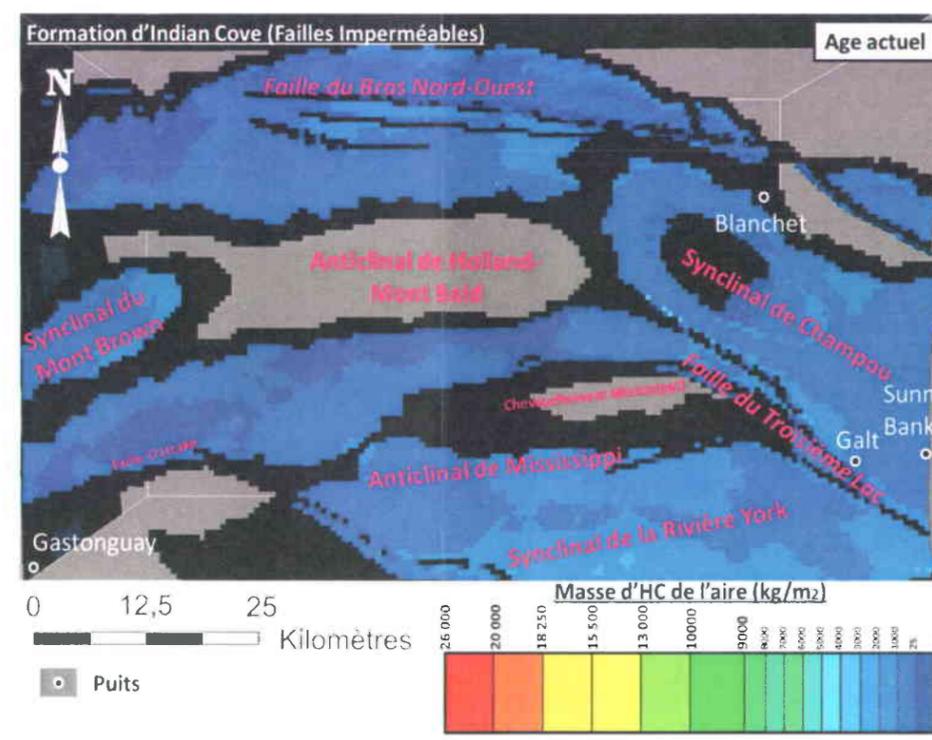


Figure 4.38: Visualisation à l'âge actuel du toit des formations ayant un potentiel réservoir d'après le scénario B (failles imperméables) lors de la simulation en saturation du S_0 . A noter : la surface b contient trois formations, puisque ces formations se sont déposées durant la même époque.

où se situe la Formation de West Point contient toujours des HC (dans la zone complexe de la FBNO, dans la terminaison de la FTL et au niveau de la Rivière Madeleine) mais cette fois, on constate une zone de saturation en HC élevé au niveau du chevauchement de Mississippi 2 ($9\ 000 < \text{masse d'HC de West Point à l'âge actuel} < 13\ 000\ \text{kg/m}^2$); iii) la Formation de Roncelles contient peu ou pas d'HC.

La surface représentant la Formation de Forillon (Figure 4.38-c) indique que les HC ont cette fois des zones « réservoir » préférentielles dans tous les abords de failles : faille du Bras Nord-Ouest, dans la terminaison en fleur de la faille du Troisième Lac, au niveau de l'anticlinal Holland-Mont Bald et le long de la faille de Mississippi (à côté de la faille d'Oatcake). La partie en auréole qui entoure le synclinal de Champou est un défaut de simulation.

La surface représentant la Formation de Shiphead (Figure 4.38-d) a, en moins grandes quantités que la Formation de Forillon, des zones réservoirs dans les abords de failles : faille du Bras Nord-Ouest et ses réseaux, dans la zone de faille du Troisième Lac et dans un coin de la faille d'Oatcake.

La surface représentant la Formation d'Indian Cove est comme dans le scénario A, clairement plus saturée en HC que la formation de Shiphead (Figure 4.37, âge actuel). Une nouvelle fois la Formation d'Indian Cove (Figure 4.38-e) a des réseaux de failles et une zone de chevauchement de la FBNO qui ont servi de réservoir aux HC. Le flanc nord de la faille du Troisième Lac (la partie qui recoupe le flanc sud du synclinal de Champou) est une zone réservoir préférentielle ($3\ 000 < \text{masse d'HC d'Indian Cove à l'âge actuel} < 5\ 000\ \text{kg/m}^2$).

4.6.6.2. Conclusion sur les deux simulations

La roche mère principale est celle de la Formation de Rivière Ouelle (Figure 4.32). Elle expulse la totalité de ses HC avant l'enfouissement maximal atteint lors de l'orogénèse acadienne. Les roches mères secondaires sont celles des formations de Forillon (Figure 4.33) et de Shiphead (Figure 4.34) qui expulsent deux fois : une partie lors de l'enfouissement maximal dévonien et l'autre partie lors de l'enfouissement maximal carbonifère.

Les roches réservoirs sont la Formation de White Head localisée dans le bloc Sud (Figure 4.36-a et Figure 4.38-a), la Formation de West Point dans les zones de failles (Figure 4.36-b et Figure 4.38-b), les formations de Forillon et de Shiphead que dans un environnement où les failles sont imperméables (Figure 4.38- c et d) et la Formation d'Indian Cove (Figure 4.36-e et Figure 4.38-e).

Plusieurs types de pièges ont été répertoriés à partir des simulations des scénarios A et B :

- a) des **pièges structuraux** au point haut des plis anticlinaux (i.e. anticlinal de Mississippi ; Figure 4.30, a et Figure 4.32, a) et au niveau des failles de décrochement qui découpe les plis en les compartimentant (i.e. le synclinal de Champou et la FTL au sud pour la Formation d'Indian Cove (Figure 4.32, e) ou encore les chevauchements liés à la composante inverse de la FBNO dans la Formation d'Indian Cove (Figure 4.30, e ; Figure 4.33, e)),
- b) un **piège stratigraphique** lié à la Formation de West Point incorporée dans les formations d'Indian Point et de Saint-Léon dans les points hauts des blocs faillés (avec les failles normales agissant comme chemin de migration pour le transport des HC (Figure 4.31, b) ou avec les failles servant de piège combiné (Figure 4.32, b)).

4.7.CHARTE DES EVENEMENTS ET DISCUSSION

En Gaspésie, la présence d'un système pétrolier a été vérifiée dans les puits et par les suintements de pétrole en surface. Cette présence, qu'elle soit abondante ou en traces infimes, témoigne d'une succession ordonnée de processus géologiques qui aboutit à une accumulation. La charte des événements (Figure 4.39) est un calendrier qui retrace une partie des aspects d'un système pétrolier : i) la roche mère ; ii) la roche réservoir ; iii) la roche couverture, mais aussi : vi) l'âge de la formation des pièges ; v) l'âge de la génération et de l'accumulation des HC. Le tout détermine le moment critique qui correspond à la période de génération/migration/accumulation. Cet instant est critique parce qu'il doit exister à cette période dans le bassin des pièges susceptibles de constituer un lieu d'accumulation. Si ce n'est pas le cas, il ne pourra y avoir formation de gisement. La charte des événements (Figure 4.39) a été créée à partir des hypothèses du scénario 4 (Tableau 4.15, Tableau 4.16) et des résultats de la simulation des scénarios A et B (Figure 4.32 à Figure 4.38).

Les simulations en saturation du scénario 4 ont permis de reconnaître la roche mère la plus importante : la Formation de Rivière Ouelle (Figure 4.32 et 4.33) et les deux roches mères secondaires : les formations de Forillon et de Shiphead (Figure 4.33, 4.28 et 4.33).

Les roches réservoirs déterminées à partir des simulations des scénarios A et B sont (Figure 4.39) les formations de White Head (Figure 4.36, a et Figure 4.38, a), de West Point (Figure 4.36, b et Figure 4.38, b), de Forillon (Figure 4.36, c et Figure 4.38, c), de Shiphead (Figure 4.36, d et Figure 4.38, d) et d'Indian Cove (Figure 4.36, e et Figure 4.38, e).

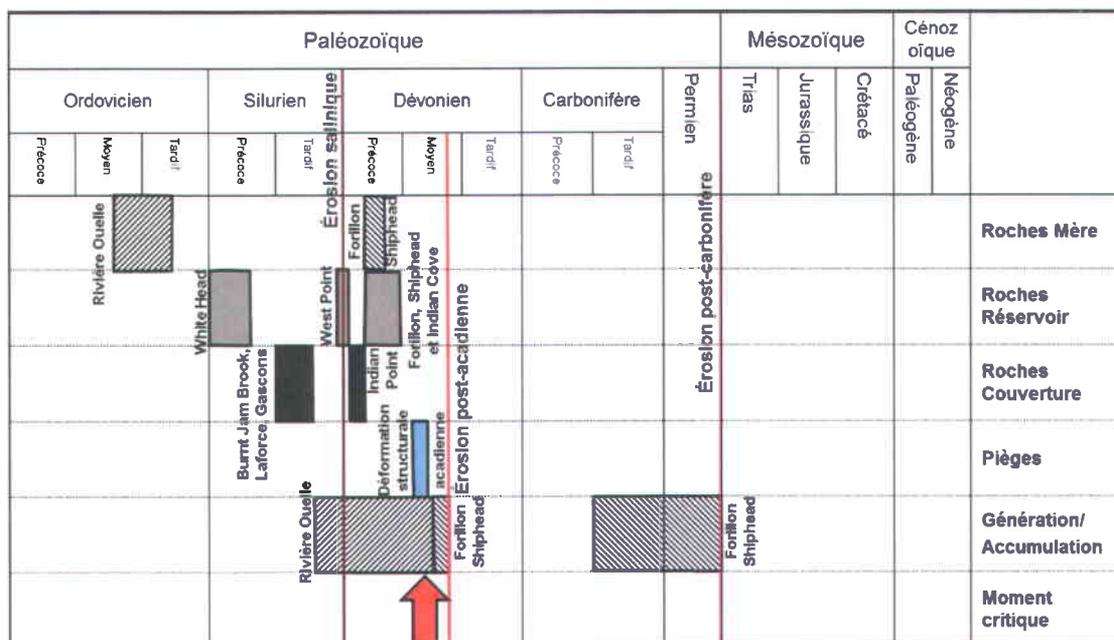


Figure 4.39: Charte des événements de la zone Bourque réalisée à partir des scénarios A et B (respectivement failles perméables et imperméables) de la simulation en saturation du scénario 4 avec le logiciel Temis 3D.

Les roches couvertures sont les formations de Burnt Jam Brook, de Laforce et de Gascons, mais aussi celles d'Indian Point (Figure 4.35 et Figure 4.37).

Enfin, les pièges sont (la période correspondante est indiquée dans la Figure 4.39) les anticlinaux créés lors de l'orogénèse acadienne (i.e. anticlinal de Mississippi ; Figure 4.36, a et e ; Figure 4.38, a et e) et les dispositifs d'étanchéité créés aux abords des failles complexes comme les failles du Bras Nord-Ouest (Figure 4.36, b) et du Troisième Lac, si et seulement si elles sont imperméables lors du moment critique (Figure 4.38) ou liées à un pli pour la Formation d'Indian Cove (Figure 4.38, e).

La simulation nous a également renseigné sur l'âge de la génération des HC (Figure 4.39), c'est-à-dire pour la Formation de Rivière Ouelle du Silurien tardif au Dévonien moyen (Figure 4.32), et pour les formations de Forillon (Figure 4.33) et de Shiphead (Figure 4.34) en deux temps : au Dévonien moyen et au Carbonifère.

4.7.1. COMPARAISON DE LA CHARTE DES ÉVÉNEMENTS AVEC D'AUTRES ÉTUDES

Bertrand et Malo (2001) et Roy (2008) ont modélisé en 1D respectivement le puits Sunny Bank et les puits Gaspé Sud et Sunny Bank, et concluent leurs modélisations 1D par une synthèse graphique (Figure 4.40). Bertrand et Malo (2001) prenaient en compte trois roches mères potentielles: les formations d'Indian Point, de Forillon et de Shiphead. Les études sur la maturation des roches mères ont permis à Roy (2008) d'enlever la Formation d'Indian Point comme roche mère et de proposer la Formation de Rivière

Ouelle comme nouvelle roche mère potentielle. Dans cette thèse, ce sont ces trois dernières formations qui ont servi de roches mères.

La synthèse de Bertrand et Malo (2001) et Roy (2008) est comparée aux données provenant des simulations en saturation présentées dans cette thèse. La principale différence provient des hypothèses d'enfouissement de départ (Figure 4.40). Les auteurs sont partis de scénarios minimisant l'enfouissement au Carbonifère. Or, de nouvelles études sur les traces de fission (Malo *et al.*, 2012) ont prouvé que les roches siluro-dévonienues étaient encore enfouies sous l'isotherme 100 °C à 274 Ma. Cette information a été prise en compte dans l'hypothèse du scénario 4 qui propose un enfouissement sous 3000 m de roches carbonifères permettant d'atteindre l'isotherme 100 °C pour les roches échantillonnées (Tableau 4.17).

Malgré cette différence d'hypothèse d'enfouissement, les épaisseurs de sédimentation/érosion choisies dans les modélisations 1D (Roy, 2008) et la modélisation 3D de cette thèse permettent un début d'expulsion avant la discordance salinique des HC de la roche mère Rivière Ouelle. Néanmoins, dans le premier cas, la génération de la roche mère Rivière Ouelle se cantonne au Dévonien moyen, alors que dans le cas de cette thèse, celle-ci commence à générer dans le sud de la zone Bourque dès la fin de l'Ordovicien tardif, pour se généraliser durant l'enfouissement maximal lors de l'orogénie acadienne. Dans sa synthèse, Roy (2008) ne prenait en compte que l'enfouissement maximal et non l'érosion post acadienne. Dans la Figure 4.40, la fin de la génération et de la migration des HC des roches mères correspond aux périodes d'érosion et non à l'enfouissement maximal.

Pour les roches mères Forillon et Shiphead, la génération et la migration des HC commencent juste avant l'enfouissement maximal acadien. Lors de ses simulations, Roy (2008) a proposé un scénario avec une érosion au Carbonifère de 500 mètres qui ne semble pas avoir d'influence sur la migration ou la génération des HC. Au contraire dans cette thèse, l'enfouissement au Carbonifère a un impact sur la génération des roches mères dévonienues puisqu'il permet une deuxième génération des HC provenant de ces dernières. Pour la Formation de Shiphead, les résultats de la simulation en 1D (Roy, 2008) montraient un niveau de saturation bas dans cette roche, ce qui pouvait suggérer qu'il n'y a pas eu de migration primaire. Au contraire, dans cette thèse, la Formation de Shiphead, même si son expulsion est moindre, expulse dans le sud de la zone Bourque dès le dépôt de la Formation Battery Point (397,5 Ma) et avec un enfouissement sous 3000 m de roches carbonifères, elle expulse une deuxième fois entre 327,2 et 250 Ma.

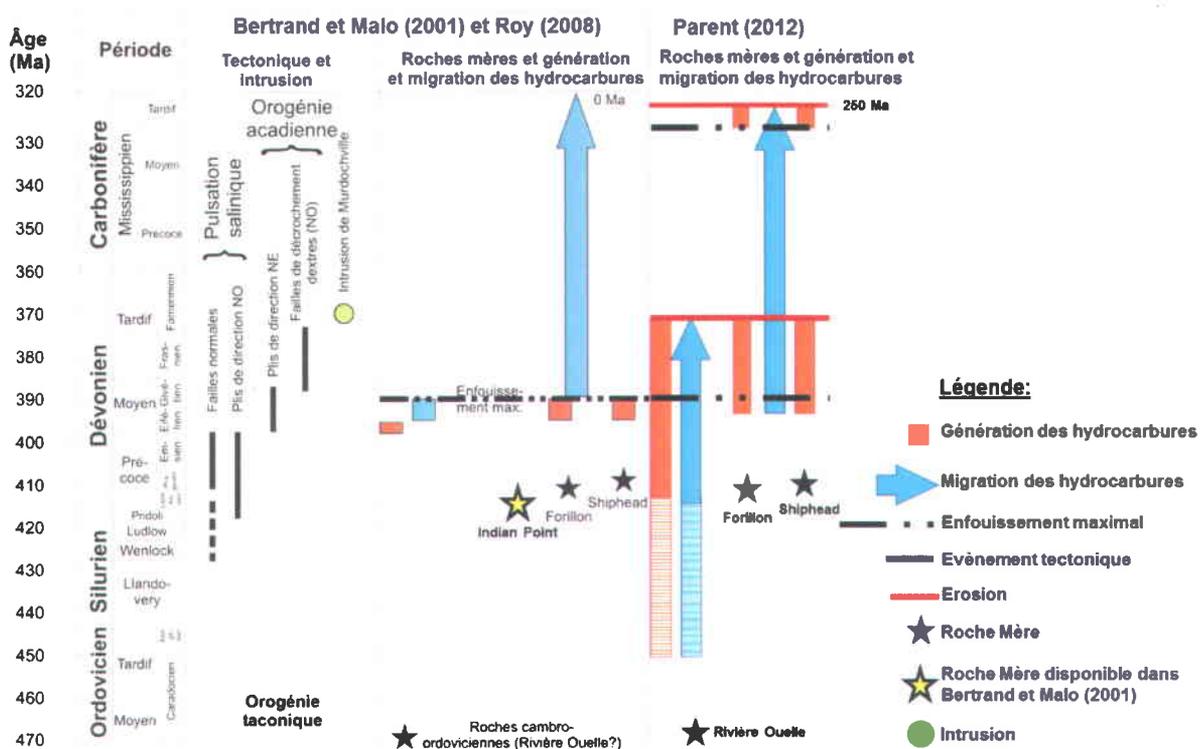


Figure 4.40 : Synthèse de la tectonique, des roches mères potentielles et de la génération et de la migration des hydrocarbures à gauche : pour les modélisations 1D du puits Gaspé Sud (Roy, 2008) et du puits Sunny Bank (Bertrand et Malo, 2001; Roy, 2008) à droite : pour la modélisation 3D de la zone Bourque à partir du scénario 4 (modifiée de Bertrand et Malo, 2001; Roy, 2008).

Lavoie *et al.* (2009) ont étudié tous les aspects du système pétrolier au nord-est de la Gaspésie. Cette étude présente l'ensemble des cibles d'exploration possibles appelées dans cette thèse CEP (Figure 4.41). Pour l'ensemble des CEPs, les auteurs ont pris en compte plusieurs paramètres.

Pour les roches mères : dans le nord-est de la Gaspésie, les deux roches mères ordoviciennes potentielles sont celles du Mélange de Ruisseau Isabelle de l'Ordovicien moyen et de la Formation de Rivière Ouelle de l'Ordovicien précoce. Le kérogène de ces deux roches mères est considéré de type I et II. Les roches mères dévoniennes potentielles sont les formations de Forillon, de Shiphead et d'Indian Cove, mais seules les formations de Forillon et d'Indian Cove ont été retenues par les auteurs. Le kérogène de ces deux roches mères est considéré de type II et III (Roy, 2008).

Pour la chronologie de la génération des HC : des études paragénetiques détaillées dans Lavoie *et al.* (2009) suggèrent que les roches mères ordoviciennes ont généré des HC au Silurien précoce ou au Silurien tardif et les modélisations thermiques 1D (Bertrand et Malo, 2001 ; Roy, 2008) montrent que les roches mères dévoniennes ont généré des HC durant le Dévonien précoce – tardif.

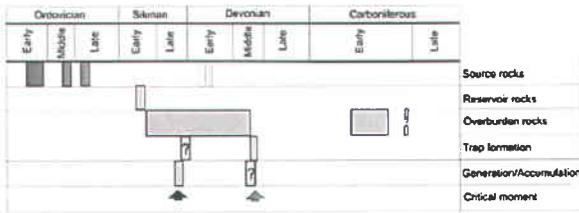
Pour la migration : des études pétrographiques détaillées dans Lavoie *et al.* (2009) suggèrent deux migrations. Une migration précoce provenant des roches mères ordoviciennes avant la discordance salinique de l'Ordovicien tardif au Silurien précoce qui a pour conséquence de remplir les roches réservoirs potentielles White Head, Sayabec et Val-Brillant (Lavoie et Morin, 2004). Une migration tardive provenant des roches mères dévoniennes ou de la deuxième migration des HC situés dans des réservoirs plus profonds est reconnue dans les unités tardi- ou post-siluriennes (Formation de West Point, groupes des Calcaires Supérieurs de Gaspé et des Grès de Gaspé).

Pour l'enfouissement maximal : l'enfouissement maximal est considéré antérieur à la discordance acadienne (Roy, 2008).

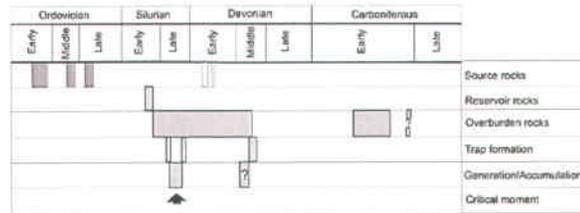
La liste des CEPs est détaillée ci-dessous et présentée sous forme de chartes des événements dans la Figure 4.41 :

- La CEP 1 prend en compte la roche mère Rivière Ouelle, la roche réservoir serait la Formation de Sayabec et un piège lié aux plis ouverts associés aux failles normales siluriennes ou de la transpression dévonnaie.
- La CEP 2 prend en compte la roche mère Rivière Ouelle, la roche réservoir est encore la Formation de Sayabec (puisque cette dernière présente une grande dissolution dans des cavités et des fractures), mais cette fois le piège serait lié à la discordance salinique (par la présence d'une transition de l'intervalle dolomitisée aux dépôts des carbonates)
- La CEP 3 est la même que la CEP 2 mais avec une roche réservoir correspondante à la Formation de West Point.
- La CEP 4 prend en compte la roche mère Rivière Ouelle, la roche réservoir constituée des pinacles du West Point (300 m d'épaisseur et 2 km de long) et un piège lié à la transition de la Formation de West Point entourée d'un faciès silicoclastique boueux (Indian Point) qui représente une couverture latérale et supérieure.
- La CEP 5 prend en compte trois roches mères (Rivière Ouelle, Forillon et Indian Cove). La roche mère Indian Cove ne s'applique pas à notre exemple puisqu'elle n'a pas été considérée dans cette thèse. Les roches réservoirs potentielles sont les formations de Forillon, de Shiphead et d'Indian Cove et les pièges sont les anticlinaux et/ou les zones fracturées le long des failles majeures (FBNO et FTL) et/ou des failles secondaires.
- La CEP 6 correspond à la CEP 5 mais les pièges sont dus aux changements de faciès (gros grains à boue deltaïque) de la Formation de York River et à la présence des failles majeures et secondaires.

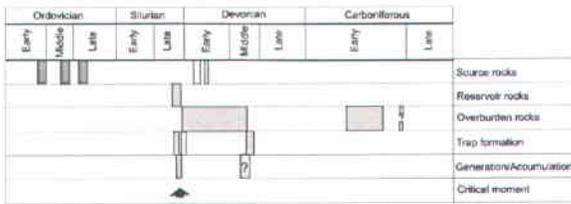
Cible d'Exploration Possible 1



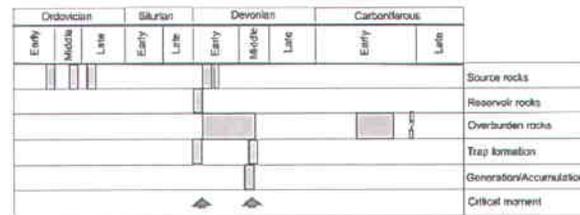
Cible d'Exploration Possible 2



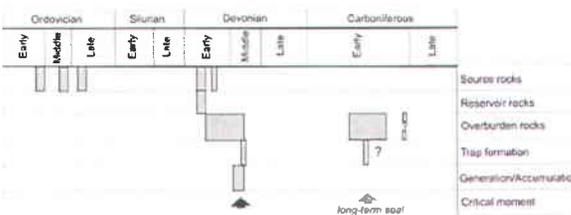
Cible d'Exploration Possible 3



Cible d'Exploration Possible 4



Cible d'Exploration Possible 5



Cible d'Exploration Possible 6

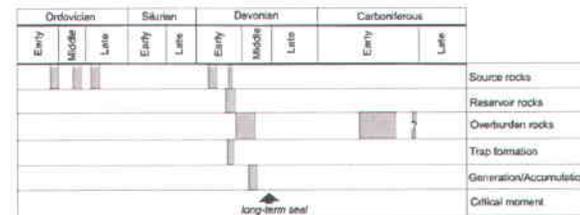


Figure 4.41: Chartes des événements créées à partir de l'ensemble des informations disponibles en Gaspésie et des cibles d'exploration possibles appelées CEP (Lavoie *et al.*, 2009).

La charte des événements présentée dans cette thèse et créée à partir des scénarios 4, A et B (Figure 4.39) est un mélange entre les CEPs 4 et 5 (Figure 4.41) de l'article de Lavoie *et al.* (2009). Pour ces deux CEPs (Figure 4.41, Cibles d'Exploration Possibles 4 et 5), des différences existent entre les CEPs proposés par Lavoie *et al.* (2009) et les hypothèses de départ de cette thèse.

Tout comme dans la Figure 4.40, la première différence provient des études sur les traces de fission (Malo *et al.*, 2012). Malgré cette différence d'hypothèse d'enfouissement, le début d'expulsion des HC de la roche mère Rivière Ouelle est considéré avoir eu lieu avant la discordance salinique (donc une première migration dans la Formation de White Head lors des premiers stades de l'enfouissement du bassin, tout comme Lavoie *et al.* (2009) le préconisaient). De plus, le maximum de maturation (soit un TR à 1 ; Figure 4.26, b, c et f, scénario 4) de la roche mère Rivière Ouelle ne s'est effectuée que lors de la déposition du Groupe des Grès de Gaspé permettant une deuxième migration qui a pour conséquence de saturer la Formation de West Point et les groupes des Calcaires

Supérieurs de Gaspé et des Grès de Gaspé (ce qui est également estimé par Lavoie *et al.*, 2009).

La deuxième différence est que la Formation de Shiphead a été privilégiée à la Formation d'Indian Cove. En effet, la Formation de Shiphead a prouvé son potentiel pétrolier dans le puits Gaspé Sud et nous disposons de son IH initial (Roy, 2008).

La troisième différence est que Lavoie *et al.* (2009) estiment une génération d'HC par la roche mère Rivière Ouelle durant le Silurien précoce alors que les simulations présentées dans cette thèse ne montrent une génération d'HC de cette roche mère qu'à partir du Silurien tardif (Figure 4.32, 411,2 Ma). Les auteurs estiment une génération d'HC par les roches mères dévoniennes au Dévonien précoce – tardif. Les simulations dans cette thèse montrent deux périodes de génération d'HC, au Dévonien tardif et au Carbonifère, sachant que le maximum de génération est atteint durant le Carbonifère (Figure 4.33, 251 Ma ; Figure 4.34, 251 Ma).

La quatrième différence entre les CEPs 4 et 5 et la charte des événements (Figure 4.39) est que dans notre cas, la Formation de White Head sert encore de roche réservoir alors que Lavoie *et al.* (2009) ne la considèrent pas comme telle dans les différents CEPs. Lavoie *et al.* (2009) évaluent cette formation comme une roche réservoir si cette dernière est fracturée (Kirkwood *et al.*, 2004). Or, lors des simulations en saturation fait dans cette thèse, aucune fracturation dans les formations n'a été effectuée. L'ensemble des modèles présenté dans cette thèse ne tient donc pas compte de la porosité secondaire (exemple : dolomitisation) qui aurait pu exister dans certaines formations. Ce qui signifie que la Formation de White Head peut être considérée comme une roche réservoir potentielle sans avoir été fracturée préalablement.

Les autres CEPs ne correspondent pas à la charte des événements de cette thèse pour plusieurs raisons.

Pour la zone Bourque, dans le cas de la CEP 1 (Figure 4.41), la Formation de Sayabec ne se trouve que dans le bloc Nord et aucune migration vers le bloc Nord n'a été répertoriée, la FBNO servant soit de zone de migration ou de barrage.

Lavoie *et al.* (2009) ont proposé dans les CEPs 2 et 3 un piège tectono-stratigraphique correspondant à la discordance salinique et qui est présent sur la majeure partie de la zone Bourque. Néanmoins, la localisation exacte en profondeur de cette discordance n'est pas connue actuellement. Etant donné qu'une telle limite horizontale dans le modèle pourrait avoir un gros impact, il a été décidé de ne pas la prendre en compte. Le potentiel réservoir des formations sous-discordance est donc minimisé dans cette thèse.

Le changement latéral de faciès concernant le Groupe des Grès de Gaspé n'a pas, non plus, été modélisé puisqu'il n'existe aucune donnée localisant ces lentilles grés-

conglomératiques et ces couches argilo-silteuses imperméables dans ces formations. Or d'après Lavoie *et al.* (2009 ; Figure 4.41, CEP 6), ces changements de faciès auraient pu constituer un type de piège stratigraphique.

Les zones de fracturation-dissolution-cimentation dans certaines formations n'ont pas été modélisées. D'après Lavoie *et al.* (2009), de telles zones auraient représenté un piège pour les HC, par exemple : les calcaires cassant de la Formation de Laforce, ou encore les calcaires à grains fins localement siliceux du Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé (Lavoie *et al.*, 2001) dont le champ de Galt est le parfait exemple d'un piège fracturé (localisation du puits Galt C100 : Figure 4.8).

4.7.2. DISCUSSION SUR LES LIMITES DE CETTE THESE

Le modèle proposé dans cette thèse n'est pas à utiliser sans prendre en compte plusieurs approximations qui ont été faites dans celle-ci.

Pour commencer, la véracité du modèle de vitesse utilisé pour les lignes sismiques profondeur n'a pu être confirmée avec les données de puits, puisque les puits C003, C017, C023 et C062 (Figure 2.13) datant respectivement de 1951, 1939, 1938 et 1897 ne possèdent aucune diagraphie. Ensuite, le sud-ouest de la zone Bourque (Figure 3.8) est dépourvu de lignes sismiques et de données de puits. Cette zone possède donc une grande incertitude quant à l'estimation des épaisseurs à l'âge actuel de toutes les formations ci trouvant.

Pour la restauration en coupe (Figure 3.11), comme expliqué dans le chapitre 2, l'anticlinal de Holland-Mont Bald est un bel exemple d'une déformation plicative de forte amplitude d'un mouvement de faille normale réactivée en faille inverse. Cependant la présence du pli de rampe (Figure 2.26) en dessous pourrait également être la cause de ce plissement dans le cadre d'un pli d'entraînement. Néanmoins, le logiciel Temis 3D utilise la méthode de *Backstripping* (Figure 4.2), ce qui empêche la modélisation de structure plissée profonde réactivée dans le temps. L'étude et l'impact de ce type de structure n'a donc pas été approfondie.

Pour la restauration surfacique avec le logiciel Gocad (Figure 3.20, Figure 3.21), le calcul de la paramétrisation par méthode *Constrained mapping* offre une solution plus acceptable pour un modèle géologique comportant des surfaces plissées et faillées comme la zone Bourque. D'après Aubiès-Trouilh (2009). Cette méthode de paramétrisation est directement liée aux conditions limites imposées au modèle. Il est donc important de bien contraindre le modèle pour obtenir le meilleur résultat possible. Afin de prendre en compte le mouvement le long des failles, il faut appliquer aux surfaces du modèle une propriété qui relie les points qui se situent de part et d'autre de la faille, c'est la propriété *VecLink*. Lorsque les caractéristiques d'une faille sont connues, soit la direction, le

pendage et la propriété *VecLink* permet d'effacer le rejet. Cependant, une faille qui se situe en bordure du modèle, ne pourra être complètement modélisée et les correspondances des points de part et d'autre de la faille ne seront pas connues. Ceci a entraîné une incertitude sur la position des FBNO et FTL et peut avoir faussé le résultat final de la restauration surfacique. Mais encore une fois, l'utilisation du logiciel Temis 3D ne permet pas une extension horizontale du modèle. Les effets dus à des failles décrochantes ne sont pas pris en compte par le logiciel Temis 3D. Dans tous les cas, selon Massot (2002), il y aura toujours des incertitudes liées au type de restauration des surfaces et au choix de l'utilisateur quant aux critères de qualité, à savoir préférer un modèle cohérent géométriquement ou cohérent d'un point de vue de la déformation. Cependant, la technique de restauration surfacique proposée dans cette thèse est plus robuste pour les cas de restauration simple avec un nombre de blocs restreint (Massot, 2002), ce qui la rend intéressante pour remettre à plat des plis-failles.

Enfin, les données de porosité en profondeur en Gaspésie sont très faibles (Tableau 4.19). Il n'est pas possible actuellement avec un logiciel de modélisation de bassin de calculer ce type de porosité (des recherches sont en cours à ce sujet à l'IFPEN). L'exagération de l'enfouissement pour atteindre d'aussi faible porosité entraîne un problème de calibration avec les données de réflectance de la vitrinite. Il a donc été décidé, après maintes tentatives, de laisser l'incertitude sur les données de porosité. En conclusion, **i)** il faut prendre en considération que le potentiel réservoir de certaines formations en profondeur peut être surestimé : comme par exemple la Formation de White Head. Mais cette dernière démontre une porosité secondaire par fracturation qui n'a pas été intégrée au modèle. Il se peut que l'incertitude due à la surestimation de la porosité ne soit pas si grande; et **ii)** un problème de surestimation de la porosité peut avoir aussi influencé les chemins de migration.

5. CHAPITRE 5 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de cette thèse était d'évaluer le potentiel pétrolier du nord-est de la Gaspésie. Cette thèse a permis la création d'une méthode de travail pour la modélisation de bassin en milieu complexe avec peu de données. Les lignes sismiques de la zone Bourque ont été interprétées et pour la première fois, une vérification de la cohérence de ces interprétations a été faite dans un environnement en 3D. Une première restauration en coupe de la partie nord-est de la zone *Gaspé folded belt* vient compléter le travail de Kirkwood (1993). Pour la première fois, un modèle structural surfacique 3D à l'âge actuel dans la zone nord-est gaspésienne a été fait avec la vérification de ce modèle par la restauration surfacique tout en testant la recevabilité des résultats (feuille de papier pliée). Enfin pour la première fois en Gaspésie, un modèle de bassin pétrolier en 3D a été construit, confirmant le fonctionnement du système pétrolier dans un contexte global en 3D grâce à l'évaluation pétrolière de la zone Bourque.

Cette thèse a été effectuée en plusieurs étapes permettant d'obtenir les résultats cités précédemment. **La première étape expliquée dans le chapitre 1**, était de définir une méthode de travail (Figure 1.6) et l'appliquer aux objectifs de cette thèse qui sont : i) d'interpréter les lignes sismiques, ii) de reconstituer la géométrie actuelle en 3D de la zone Bourque, iii) de restaurer la coupe faite à partir de l'interprétation de la ligne sismique 82-152 et les surfaces créées dans le logiciel gOcad lors de la reconstitution de la géométrie à l'âge actuel à leur état initial avant la déformation, iv) de comprendre et d'établir la cinématique des déformations taconienne, salinique et acadienne, v) de simuler l'évolution du bassin pour une évaluation du potentiel du système pétrolier. La zone d'étude choisie est la zone Bourque (Figure 1.4). Cette dernière a été séparée en 4 blocs : Nord, Centre, Sud et Ouest (Figure 2.4). Les blocs Nord, Centre et Sud sont limités par les deux failles majeures (Béland, 1980; Roksandic et Granger, 1981) : la faille du Bras Nord-Ouest (FBNO) et la faille du Troisième Lac (FTL). Dans la zone Bourque, il y a neuf lignes sismiques disponibles en format seg-y (Figure 2.3) et 9 puits (Figure 2.13) dont 4 le long des lignes sismiques.

La deuxième étape développée dans le chapitre 2, est l'interprétation des lignes sismiques en 2D. Les neuf lignes sismiques ont été préalablement retraitées et converties en profondeur avec le modèle de vitesse de Bêche (2008) (Eq. 2.1). Deux lignes ont été étudiées en détail dans cette thèse : les lignes 82-152 et 82-156. La ligne 82-152 traverse l'ensemble de la zone Bourque du nord-ouest au sud-est et permet de visualiser la surface des roches du Cambro-Ordovicien. La ligne 82-156 recoupe la ligne 82-152. La géométrie de cette surface correspond au toit de l'une des principales roches mères du bassin gaspésien, la roche mère ordovicienne qui pourrait correspondre à la Formation de

Rivière Ouelle (Lavoie *et al.*, 2009). L'étude de l'ensemble des lignes sismiques permet de répondre aux questions suivantes : **Quelle est la géométrie en profondeur des roches du bassin siluro-devonien? Quel est le prolongement des deux grandes failles majeures (FBNO et FTL) ? Quelle est la cinématique des failles et leurs relations avec les plis environnants?**

Les différences d'épaisseur, le long de la ligne sismique 82-152 (Figure 2.26), pour les formations de Forillon (Figure 2.26, $b' > b''$), d'Indian Point (Figure 2.26, $c > c'$), de Roncelles, de Gascons et de Laforce (Figure 2.26, $d > d'$) et de Burnt Jam Brook (Figure 2.26, $e > e'$) ont permis de déterminer que la FTL était active pendant la sédimentation, indiquant un jeu normal de la faille dès le milieu du Silurien. Les différences d'épaisseur nord/sud des formations d'Indian Point (Figure 2.26), de Forillon (Figure 2.26, $b < b'$) et de Shiphead (Figure 2.26, $a < a'$) permettent d'estimer que la FBNO avait un jeu normal lors de leur déposition au Praguien. La FBNO et la FTL reconnues comme des failles décrochantes compressives en surface montrent respectivement une structure en fleurs (Figure 2.27) et des duplex de transpression (Figures 2.26 et 2.28). Ce sont des failles majeures qui s'enracinent profondément dans les unités cambro-ordoviciennes sous le bassin siluro-dévonien. La cinématique en décrochement des FBNO et FTL de ces deux systèmes sont post-déposition. L'interprétation de la ligne sismique 82-152 met en évidence l'existence de failles chevauchantes qui partent d'une zone de décollement au sein des formations cambro-ordoviciennes (Figure 2.26, Pli de rampe). Cette observation soutient l'interprétation décrivant le style structural de l'orogénèse acadienne comme un style en ceinture de plis et de chevauchements (Kirkwood *et al.*, 2004).

Le profil sismique 82-156 (Figure 2.31) met en évidence le contact entre les formations du Cambro-Ordovicien et d'Indian Point/Roncelles à l'est du bloc Centre. Ceci est corroboré par les puits Blanchet n°1 (C096) et Gaspé Sud n°1 (C093) forés dans ce bloc (Hu et Lavoie, 2008) (Figure 2.13 ; Tableau 3.2). Les deux puits l'un localisé au niveau du Mont Serpentine et l'autre plus au sud de la FBNO, montrent la Formation d'Indian Point en contact avec les roches du Supergroupe de Québec, le premier à une profondeur de 1185 m et l'autre à 2860 m. L'étude des lignes sismiques a permis d'avoir une première estimation des épaisseurs en profondeur des formations.

La troisième étape, détaillée dans le chapitre 3, est la restauration en coupe, la création d'un modèle surfacique en 3 dimensions et la restauration surfacique. La restauration de la ligne sismique 82-152 interprétée a permis de valider notre interprétation et de calculer le taux de raccourcissement de la Formation de Forillon. La Formation de Forillon a été choisie comme niveau de référence pour sa nature compétente. Une formation compétente favorise une réaction homogène pendant un plissement par flexion et enregistre mieux la déformation précoce (Ramsay et Huber, 1987). Le calcul du raccourcissement en coupe de la Formation de Forillon est de 9 % (Figure 3.11 et

Tableau 3.3), ce qui se rapproche du raccourcissement tectonique total de la région qui est compris entre 5 et 20 % (Kirkwood, 1993). La restauration de cette ligne a également permis de créer une série de coupes paléogéométriques fournissant une hypothèse sur l'évolution de la zone Bourque et elle a permis aussi d'établir la chronologie des failles. Les points à retenir sont les suivants (voir Figure 2.14 et Figure 3.12): i) au Silurien précoce (Llandovérien tardif), la FBNO et la FTL étaient des failles normales lors du dépôt des formations de Burnt Jam Brook et de Val Brillant (Figure 3.12, 12) ; ii) à la fin du Silurien et au début du Dévonien, une phase régressive qui correspond à l'érosion salinique a érodé au nord les roches siluriennes sous la Formation de West Point jusqu'aux roches de la nappe de la Rivière Sainte-Anne (Figure 3.12, 10) ; iii) au Dévonien précoce (Emsien), aucun élément sur la coupe n'indique que les failles étaient actives (Figure 3.12, 4 à 6) ; iv) du Dévonien moyen jusqu'au Carbonifère précoce : c'est l'orogénèse acadienne (Figure 3.12, 3) et le jeu décrochant des deux principales failles (FBNO et FTL ; Figure 3.12, 2) qui est suivie par l'érosion acadienne; v) du Carbonifère précoce jusqu'au tout début du Permien : c'est le dépôt en discordance des roches du Carbonifère (Figure 3.12, 1); vi) à partir du Permien et jusqu'à l'âge actuel, s'est effectuée l'érosion des roches du Carbonifère et sûrement d'une partie des roches du Siluro-Dévonien (Figure 3.12, Actuel).

La restauration en coupe ne prend pas en compte les déformations transverses à cause du plongement 2D des coupes, qui impose l'hypothèse d'une déformation plane parallèle au plan de coupe. Or, il a été démontré que la FBNO et la FTL étaient des failles décrochantes. Pour compléter l'étude de la restauration en coupe, nous avons utilisé la restauration surfacique. Le taux de raccourcissement surfacique de la Formation de Forillon a été estimé à 3,8 % (Figure 3.21). Les résultats des deux méthodes de restauration ont démontré que la zone Bourque est très peu déformée et cela a justifié l'utilisation du simulateur de bassin Temis 3D qui utilise la méthode de restauration en *Backstripping*.

La reconstitution de la géométrie actuelle en 3D de la zone Bourque à partir des données géologiques de surface, des puits (et autres données géophysiques) et des profils sismiques a permis d'avoir un modèle surfacique (Figure 3.15). Ce modèle créé à l'aide du logiciel gOcad a servi de modèle structural en profondeur à l'âge actuel pour le logiciel Temis 3D. La reconstitution de la géométrie de la zone Bourque a permis d'améliorer le positionnement des horizons et des failles existantes et de répertorier de nouvelles failles (failles 1, 3A et 3B ; Figure 3.15, B). Dans le chapitre 2, le profil sismique 82-156 a mis en évidence le contact entre les formations du Cambro-Ordovicien et la Formation d'Indian Point dans le bloc Centre. L'interprétation dans son ensemble des lignes sismiques et les données de puits a permis la construction de la surface correspondant au toit des roches cambro-ordoviciennes (Figure 3.15, D).

La quatrième étape détaillée dans le chapitre 4, est l'application de la modélisation de bassin appliquée à la zone Bourque à l'aide du logiciel Temis 3D. Aucune modélisation en trois dimensions n'avait été faite auparavant dans le nord-est de la Gaspésie et peu de données thermiques et de taux de sédimentation étaient disponibles. Pour quantifier les épaisseurs de sédimentation/érosion, un protocole en quatre étapes a été défini:

- **Tester les hypothèses d'épaisseurs d'érosion et de gradient géothermique publiées pour les puits Sunny Bank et Gaspé Sud (Bertrand et Malo, 2001 et Roy, 2008)**, sur l'ensemble du bloc 3D de la zone Bourque

Le calage des données de réflectance de la vitrinite dans les puits Sunny Bank n°1 avec l'hypothèse de sédimentation/érosion proposée par Bertrand et Malo (2001 ; Tableau 4.9) donne de très bons résultats pour : i) un gradient géothermique moyen de 27 °C/km avec le modèle de Baker et Pawlewicz (Bertrand et Malo, 2001 ; Figure 4.10, Gradient géothermique B) ; ii) un gradient géothermique variant de 24 à 21 °C/km modélisé avec le logiciel Temis 1D (Roy, 2008 ; Figure 4.10, Gradient géothermique A) et iii) un flux de chaleur moyen de 50 mW.m⁻² km modélisé avec le logiciel Temis 3D (Figure 4.10, Test 2).

Le calage des données de réflectance de la vitrinite dans le puits Gaspé Sud n°1 avec l'hypothèse de sédimentation/érosion proposée par Roy (2008 ; Tableau 4.12), peut se faire de différentes façons en utilisant: i) le logiciel Temis 1D avec le modèle de Roy (2008) qui fait varier le gradient géothermique de 25 à 16 °C/km puis à 20 °C/km (Figure 4.12, gradient géothermique A) et ii) le logiciel Temis 3D avec un flux de chaleur de 37 mW.m⁻² (Figure 4.12, Test 7).

Les cartes de réflectance de la vitrinite simulées avec le logiciel Temis 3D provenant des tests dont les hypothèses permettaient de caler les données de vitrinite le long des puits Sunny Bank et Gaspé Sud sont extraites et comparées à la carte de réflectance de la vitrinite faite à partir des échantillons de surface. Les cartes de réflectance de la vitrinite simulée résultant des hypothèses du test 2 pour le puits Sunny Bank (Figure 4.14, a) et du test 7 pour le puits Gaspé Sud (Figure 4.14, b) ne sont pas comparables à la carte faite à partir des échantillons de surface (Figure 4.14, c). Cela démontre que même si le calage local des données de vitrinite est correct le long des puits, il n'est pas garant d'une épaisseur de sédimentation/érosion et d'un flux de chaleur ou d'un gradient géothermique applicable sur l'ensemble de la zone Bourque. Les différents tests ont permis de confirmer que des flux de chaleur moyens sont parfaitement acceptables pour les modélisations (Figure 4.10, comparaison des données de R₀ des tests 4, 5 et 7 pour le puits Sunny Bank; Figure 4.12, comparaison des données de R₀ des tests 4 et 5 pour le puits Gaspé Sud). De même, il a été observé que les gradients géothermiques effectués en

1D ne sont pas applicables pour ce modèle 3D (Figures 4.10 et 4.12, comparaison des Gradient géothermique A avec les Tests 1). Ils doivent être réévalués à la hausse.

- **Faire varier les épaisseurs d'érosion et le flux de chaleur pour créer le meilleur scénario**

La carte de réflectance de la vitrinite simulée a été comparée à celle interpolée à partir des échantillons de surface en faisant varier l'enfouissement. De plus, pour comprendre l'impact du taux de sédimentation/érosion sur les roches mères, le taux de transformation (TR) a été étudié afin de savoir **comment l'enfouissement et les érosions ont pu influencer la génération des hydrocarbures et leur expulsion des roches mères.**

Les conclusions sur le **taux de transformation (TR) des trois roches mères pour une variation des épaisseurs d'érosion** sont les suivantes :

- a) le TR des roches mères Forillon et Shiphead varie (Figure 4.18, a, d et f) en fonction de i) la quantité des dépôts imposée pour l'orogénèse acadienne et la discordance carbonifère et ii) du temps de ces dépôts. La maturation du kérogène dans les roches siluro-dévonniennes est très sensible aux choix de l'enfouissement ;
- b) les valeurs de TR de la roche mère Rivière Ouelle varient en fonction du bloc où la roche se situe et non pas de la quantité d'érosion imposée lors des discordances acadienne ou carbonifère (Figure 4.18, b, c et e). Le kérogène de la roche mère Rivière Ouelle est sensible à l'orogénèse taconienne et à la pulsation salinique ;
- c) pour un Kérogène de Type II, un IH initial de 469 mg/gC et une différence de profondeur d'environ 500 m entre les points choisis pour représenter les roches mères Forillon et Shiphead, les valeurs de TR de ces deux roches sont très différentes (Figure 4.18, a, d et f, comparaison courbes Forillon et Shiphead). La construction du modèle 3D doit être très précise pour les formations se trouvant proche de la surface ;
- d) pour une même hypothèse d'enfouissement, à partir d'une profondeur de 4468 m, les différences de profondeur inférieures à 600 m entre deux roches mères avec un même type de kérogène n'influence peu ou pas la maturation du kérogène (Figure 4.18, d ; Shiphead scénario 2 et Forillon scénario 4) ;
- e) dans le bloc Nord, la variation de l'épaisseur de sédimentation/érosion des roches du Carbonifère est le paramètre qui influence le plus la maturation des HC dans les roches mères siluro-dévonniennes.

Les conclusions sur le **taux de transformation des trois roches mères pour une variation du flux de chaleur** sont les suivantes :

- a) la variation d'un flux de chaleur dans le temps n'a pas d'impact (Figure 4.22, a, d et f, comparaison des scénarios 4 et 7), tout comme lors des tests faits à partir des

hypothèses proposées dans la littérature (Bertrand et Malo, 2001 et Roy, 2008) pour les puits Sunny Bank et Gaspé Sud ;

- b) lors des simulations, dans le modèle 3D, la proximité de la base des sédiments par rapport à la roche mère s'est avérée importante (Figure 4.22, a à f, comparaison des scénarios 4, 5 et 6). En effet, le kérogène de la roche mère Rivière Ouelle ne mûrit pas aux mêmes moments en fonction des flux de chaleur choisis (Figure 4.22, b, c et e, comparaison scénarios 4, 5 et 6) ;
- c) il existe également de grandes différences dans les moments de maturation entre les blocs Centre, Sud et Nord pour les kérogènes des roches mères siluro-dévonienne (Figure 4.22, a, d et f), à cause de leur proximité avec les roches du Supergroupe de Québec.

- **Choisir le scénario qui satisfait le mieux les données de calibration**

Après l'étude des TR, les cartes simulées de réflectance de la vitrinite des différents scénarios ont été comparées à la carte provenant de l'extrapolation des échantillons de surface (Figures 4.19 et 4.23). Nous avons donc pu répondre à la question : **quand l'enfouissement maximal a-t-il eu lieu ?** Le scénario (Figure 4.19) avec un flux de chaleur moyen de 50 mW.m^{-2} et une érosion locale au nord des roches cambro-ordoviciennes de 4000 m à la fin de l'orogénèse taconienne, une érosion salinique de 100 m de la Formation de Gascons, une érosion jusqu'à 3200 m (au maximum) du Groupe des Grès de Gaspé après l'orogénèse acadienne et un enfouissement/érosion de 3000m de roches carbonifères, est celui qui permet la meilleure comparaison avec les données de réflectance de la vitrinite.

Pour ce scénario, les données simulées ont été comparées à d'autres données de calibration. Les résultats simulés de réflectance de la vitrinite sont comparables à ceux provenant des échantillons le long des puits Sunny Bank (Figure 4.24, a) et Gaspé Sud (Figure 4.24, b). La comparaison du puits Gaspé Nord et d'un puits extrait dans le bloc Nord (4.27) a permis de répondre à la question : **comment des roches mères ordoviciennes ont-elles pu évoluer avec l'enfouissement tectonique (taconien) et sédimentaire (séquence siluro-dévonienne) et avoir encore des valeurs de réflectance de la vitrinite aussi basses?** Les hypothèses d'enfouissement du scénario 4 dans le bloc Nord qui prenaient en compte le principe de restauration de Suppe (1985) qui consiste à remettre à plat toute surface déposée permettent de retrouver le saut de vitrinite entre la Formation d'Indian Point et du Supergroupe de Québec.

Les données calculées de température des formations localisées au niveau des coordonnées des échantillons étudiés pour les traces de fission correspondent aux valeurs calculées dans Malo *et al.* (2012). L'hypothèse de ce scénario est un enfouissement de 3000 m de roches au Carbonifère et engendrent des températures au-dessus de

l'isotherme 100 °C vers 274±37 Ma pour les formations ciblées, donc équivalentes aux températures calculées à partir des échantillons de ces mêmes formations (Tableau 4.15).

Enfin, les données de porosité simulée à l'actuel sont comparables avec celles calculées à partir des échantillons de surface dans la zone Bourque. La plupart des données de porosité simulées concordent sauf celles des formations en profondeur qui sont au-dessus de celles échantillonnées sur le terrain (Tableau 4.16 ; Figure 4.25).

- **Faire la simulation en saturation et créer la charte des évènements**

Le module d'expulsion et de migration des HC du logiciel Temis 3D (Figure 4.3, 4.2.1.5) a été utilisé afin d'effectuer une simulation en saturation. Le logiciel Temis 3D simule la génération et l'expulsion des HC et précise également quelles sont les roches susceptibles de servir de roches réservoirs et les roches couvertures. Deux hypothèses ont été testées pour déterminer les pièges potentiels et les chemins de migrations : l'un avec des failles perméables (scénario A) et l'autre avec des failles imperméables (scénario B).

La **roche mère principale** est la Formation de Rivière Ouelle (Figure 4.26) et les **roches mères secondaires** sont les formations de Forillon (Figure 4.27) et de Shiphead (Figure 4.28). Les **roches réservoirs** observées lors des simulations sont les formations de White Head (Figure 4.30, a ; Figure 4.32, a), de West Point située dans les zones de failles (Figure 4.30, b ; Figure 4.32, b), de Forillon et de Shiphead dans un environnement où les failles sont imperméables (Figure 4.32, c et d) et d'Indian Cove (Figure 4.30, e ; Figure 4.32, e).

Grâce à la simulation en saturation et à la création de la charte des évènements, nous pouvons répondre à la question suivante : **comment et quand s'est fait la migration des hydrocarbures en fonction de la structure?** En fonction du type de failles simulées (perméables ou imperméables) les chemins de migration diffèrent (Figures 4.29 et 4.31). En effet, dès lors que les failles sont perméables, les HC utilisent les failles comme chemins pour migrer vers la surface (Figure 4.29, 407,2 Ma ; 402,5Ma et 391,8Ma), faisant perdre par la même occasion la plupart des HC vers la surface du bassin. Si les failles sont imperméables, les HC vont migrer de proche en proche avec les formations environnantes (Figure 4.31, 391,8Ma), butant contre les failles qui servent alors de barrière étanche (Figure 4.31, 370Ma ; 251Ma et Age actuel). Les HC en migrant vers la surface passent dans les roches réservoirs et sont préservés. La présence des failles imperméables permet au bassin, dans le cas du scénario B, de garder une partie de son potentiel pétrolier.

Dans la zone Bourque, il existe plusieurs types de pièges. Les **pièges structuraux** sont situés i) au point haut des plis anticlinaux (i.e. anticlinal de Mississippi ; Figure 4.30, a et Figure 4.32, a), ii) au niveau des failles de décrochement qui découpent les plis en les

compartimentant (i.e. le synclinal de Champou et la FTL au sud pour la Formation d'Indian Cove (Figure 4.32, e), et iii) au niveau des chevauchements liés à la composante inverse de la FBNO dans la Formation d'Indian Cove (Figure 4.30, e ; Figure 4.33, e)). **Le piège stratigraphique** est répertorié dans la zone Bourque. Ce piège est lié à la Formation de West Point incorporée dans les formations d'Indian Point et de Saint-Léon dans les points hauts des blocs faillés (avec les failles normales agissant comme chemin de migration pour le transport des HC (Figure 4.31, b) ou avec les failles servant de piège combiné (Figure 4.32, b)).

Une charte des événements a été créée à partir des résultats de la simulation des scénarios 4, A et B (Figure 4.33). Cette charte est comparée aux travaux de Bertrand et Malo (2001) et Roy (2008) et à celles de Lavoie *et al.* (2009) qui rapporte tous les aspects du système pétrolier au nord-est de la Gaspésie grâce à la création d'un ensemble de cibles d'exploration possibles appelées CEPs. La charte des événements présentée dans cette thèse (Figure 4.33) est un mélange entre les CEPs 4 et 5 de Lavoie *et al.* (2009) (Figure 4.34). Le CEP 4 prend en compte la roche mère Rivière Ouelle, la roche réservoir West Point et un piège lié à la transition de la Formation de West Point entourée de la Formation d'Indian Point (Figure 4.34, CEP 4). Le CEP 5 prend en compte trois roches mères (Rivière Ouelle, Forillon et Indian Cove). Les roches réservoirs potentiel sont les formations de Forillon, de Shiphead et d'Indian Cove et les pièges sont les anticlinaux ou les zones fracturées le long des failles majeures (FBNO et FTL) ou des failles secondaires (Figure 4.34, CEP 5).

Des différences, voir des absences ont été constatées si on compare la charte des événements créée à partir des hypothèses du scénario 4 et celles présentées dans la publication de Lavoie *et al.* (2009). Pour commencer, la Formation de White Head, dans notre cas, sert de roche réservoir sans avoir subi de changement lithologique alors que dans Lavoie *et al.* (2009), elle n'est considérée comme roche réservoir que si elle a subi de la fracturation (Kirkwood *et al.*, 2001).

Un autre exemple concerne les changements latéraux de faciès se trouvant dans le Groupe des Grès de Gaspé qui n'ont pas été modélisés puisqu'il n'existe aucune donnée localisant dans la zone Bourque les lentilles grésio-conglomératiques et les couches argilo-silteuses imperméables dans ces formations. Or d'après Lavoie *et al.* (2009), ces changements de faciès auraient pu constituer un type de piège stratigraphique (Lavoie *et al.*, 2009, CEP 6).

Les zones de fracturation-dissolution-cimentation dans certaines formations n'ont pas été modélisées. D'après Lavoie *et al.* (2009), de telles zones auraient représentées un piège pour les HC, par exemple, les calcaires cassant de la Formation de Laforce, ou encore les calcaires à grains fins localement siliceux du Groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspé

(Lavoie *et al.*, 2001) dont le champ de Galt est le parfait exemple d'un piège fracturé (localisation du puits Galt C100 : Figure 4.8).

Le piège sous-discordance salinique est le un piège tectono-stratigraphique le plus susceptible de se retrouver dans le nord-est de la Gaspésie. En effet, la discordance salinique est présente sur la majeure partie de la zone Bourque (Lavoie *et al.*, 2009), avec des formations sous-jacentes comme le duo Val-Brillant (roche réservoir) et le Sayabec (piège stratigraphique dû à la dissolution) présenté dans le CEP 1 ou le duo Sayabec - La Vieille (roches réservoirs) et la discordance salinique (piège stratigraphique) présenté dans le CEP 2.

Dans la compréhension du champ pétrolier du nord-est de la Gaspésie, il reste des domaines à explorer.

En premier lieu, il faudrait faire des analyses systématiques des traces de fission sur une plus vaste région du bassin, afin de s'assurer de l'exactitude des hypothèses d'enfouissement du scénario 4.

L'étude et la cartographie des zones grés-conglomératiques et les couches argilo-silteuses dans le Groupe des Grès de Gaspé pourraient aussi être réalisées afin de pouvoir localiser ces zones dans la stratigraphie au sein du modèle 3D. Il serait alors possible de déterminer, lors de nouvelles simulations, le potentiel réservoir du Groupe des Grès de Gaspé qui a été prouvé grâce au puits Haldimand (localisation Figure 2.9; www.petroliagaz.com).

Une nouvelle modélisation 3D pourrait être effectuée en tenant compte des changements lithologiques au cours du temps afin d'intégrer les phénomènes de fracturation-dissolution-cimentation dans certaines formations et ainsi déterminer leur potentiel réservoir en prenant en compte de la porosité secondaire. Cette nouvelle modélisation pourrait également prendre en compte l'ensemble des fractures qui ont été répertoriées par Pinet *et al.* (2008 ; Figure 2.4) à partir des données magnétiques de la Gaspésie.

D'autres modélisations 3D, pour tout le bassin de la Gaspésie, seraient nécessaires pour avoir une vue d'ensemble du système et éviter les effets de bordures. Il est possible d'interpréter la ligne sismique 2001-MRN-16 qui se trouve juste au sud de la zone Bourque et qui a été préalablement migrée en profondeur par Bêche (2008). Le potentiel réservoir de la Formation de White Head a été mis en valeur avec les simulations de cette thèse. Or cette formation affleure au niveau du rétrochevauchement situé dans l'anticlinal de la Rivière Saint-Jean (Kirkwood *et al.*, 2004). En agrandissant la zone d'étude et en intégrant la ligne 2001-MRN-16, il serait alors possible d'étudier les mouvements des fluides à l'intérieur des roches du Groupe de Matapédia situées dans cet anticlinal et

d'utiliser les nombreuses études d'inclusions fluides qui ont été échantillonnées à cet endroit (Chi *et al.*, 2000 ; Kirkwood *et al.*, 2001).

Finalement, d'autres études sur les inclusions fluides seraient utiles pour connaître, corriger et corréler les patrons de migration des HC d'après les simulations et l'historique de la porosité des roches.

Durant l'été 2012, la compagnie Pétrolia a foré un puits d'exploration (Figure 2.6 , puits possible) dans la partie nord de la zone Bourque (<http://bourque.petroliagaz.com/>). Des analyses pétrophysiques, de porosité, de perméabilité et de la matière organique qui seront effectuées durant l'année 2013 permettront de vérifier l'exactitude du modèle 3D mais également d'affiner les résultats en complétant les données d'entrée avec les valeurs des nouvelles analyses. Il serait également possible d'utiliser les futures études sur la matière organique pour vérifier l'hypothèse d'enfouissement à l'endroit où le puits a été foré et de calibrer le modèle avec les données de réflectance de la vitrinite, tout comme cela a été fait dans cette thèse avec les puits Sunny Bank et Gaspé Sud.

6. REFERENCES

- Alcock, F.J. 1935. Géologie de la région de la Baie des Chaleurs. Commission géologique du Canada, Mémoire 183, 165 pages.
- Amyot, G. 1984. Lithostratigraphie de sous-surface de l'est de la Gaspésie. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, ET83-11, 75 pages.
- Asselin, E., Achab, A. et Soufiane, A. 2004. Biostratigraphic significance of lower Paleozoic microfaunas from eastern Canada. *Canadian Journal of Earth Science*, vol. 41, p. 489-505.
- Aubiès-Trouilh, A. 2009. Exploitation et mise à disposition de nouvelles techniques de modélisation géologique 3D afin d'apprécier la géométrie des plis-failles. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 177 pages.
- Audibert, M. 1991. Déformation discontinue et rotation de blocs, méthodes numériques de restauration : Application à Gallilée. Thèse de Doctorat, Université Rennes 1.
- Baker, C.E. et Pawlewicz, M.J. 1986. «The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter». Dans: *Paleogeothermics*, Christiansen, F.G. (ed.), Grølands Geologiske Undersøgelse Bulletin, vol. 158, p. 32-39.
- Barker, C.E. 2000. A paleolatitude approach to assessing surface temperature history for use in burial heating models. *International Journal of Coal Geology*, vol. 43, p. 121-135.
- Baudin, F., Tribouvillard, N. et Trichet, J. 2007. Géologie de la matière organique. Société géologique de France, Vuibert (ed.), 263 pages. ISBN : 978-2-7117-5396-3
- Bêche, M. 2008. Architecture structural de la ceinture de Gaspé (Canada): Imagerie sismique intégrée et application à l'évaluation pétrolière. Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise - Université Laval, 230 pages.
- Béland, J. 1958. Région d'Oak Bay. Ministère des Mines du Québec, RP-375, 12 pages.
- Béland, J. 1980. Faille du Bassin Nord-Ouest et faille du Troisième Lac dans la partie est de la Gaspésie. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Rapport intérimaire DP-740, 20 pages.
- Berger, J. et Ramsay, E. 1993. Étude structurale et pétrologique de la région du mont de la Serpentine. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, MB 93-22.

- Bertrand, R. 1987. Maturation thermique et potentiel pétrolière des séries post-taconiennes du nord-est de la Gaspésie et de l'île d'Anticosti. Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel, Suisse, 647 pages.
- Bertrand, R. 1996. Organic matter petrography and reflectance data from the Forillon Formation source rock in the Gulf Sunny Bank well, Gaspé Peninsula. Rapport Shell Canada, 31 pages.
- Bertrand, R., Chagnon, A., Duchesne, Y., Lavoie, D., Malo, M. et Savard, M. 2003. Tectonic-sedimentologic-diagenetic evolution of the Saint-Flavien gas reservoir at the structural front of the Québec Appalachians. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 51, n°1.
- Bertrand, R. et Idiz, E. 1997. Source rocks potential of Gaspé folded belt and the surrounding platform successions, Quebec. CSPG-SEPM 1997 Joint Convention, June 1st-6th Calgary, Alberta, Canada, Program with Abstracts, p. 139.
- Bertrand, R. et Malo, M. 2001. Source rocks analysis, thermal maturation and hydrocarbon generation histories in the Paleozoic rocks of the Gaspé Belt basin, Canada. *Bulletin of the Canadian Society of Petroleum Geologists*, vol. 49, p. 238-261.
- Bertrand, R. et Malo, M. 2004. Maturation thermique basée sur la réflectance de la matière organique de quelques échantillons du sud de la Gaspésie. Rapport confidentiel pour Hydro-Québec, Pétrole et Gaz, INRS-ETE, Rapport de recherche 731, 15 pages.
- Bertrand, R. et Malo, M. 2007. Thermal maturation analyses and evaluation of hydrocarbon source rock of Petrolia-Haldimand n°1 well successions. Rapport confidentiel, 23 pages.
- Biju-Duval, B. 1999. Géologie sédimentaire: Bassins, environnements de dépôts, formation du pétrole. Technip (ed.), 735 pages. ISBN : 978-2-7108-0760-5
- Biron, S. 1974. Géologie de la région des Méchins. Ministère des Richesses naturelles du Québec, DP-299, 15 pages.
- Blackwell, D.D. et Richards, M. 2004. Calibration of the AAPG Geothermal Survey of North America BHT Data Base, AAPG Annual Meeting, Dallas, TX, Poster session, paper 87616, <http://smu.edu/geothermal/2004namap/2004namap.htm>.
- Bond, G.C., Nickelson, P.A. et Kominz, M.A. 1984. Breakup of a supercontinent between 625 Ma and 555 Ma: New evidence and implications for continental histories. *Earth and Planetary Sciences Letters*, vol. 70, p. 325-345.
- Bourgeois, O., Cobbold, P.R., Rouby, D. et Thomas, J.C. 1997. Least square restoration in plan view of tertiary thrust sheets in the tadjik depression. *Journal of Geophysical Research*, n°102, p. 27553-27573.

- Bourque, P.A. 1972. Le complexe carbonaté de Lefrançois (Membre de la Formation de Saint-Léon) dans sa région-type. Ministère des Ressources naturelles, Québec, Rapport GM 27886, 46 pages.
- Bourque, P.A. 1977. Silurian and basal Devonian of northeastern Gaspé Peninsula: Québec. Ministry of Natural Resources, Special Paper ES-29, 323 pages.
- Bourque, P.A. 2001. Sea-level, synsedimentary tectonics, and reefs: implications for hydrocarbon exploration in the Silurian-lowermost Devonian Gaspé Belt, Québec Appalachians. *Bulletin of the Canadian Petroleum Geology*, vol. 49, p. 217-237.
- Bourque, P.A., Amyot, G., Desrochers, A., Gignac, H., Gosselin, C., Lachambre, G. et Laliberté, J.Y. 1986. Silurian and Lower Devonian reef and carbonate complexes of the Gaspé Basin, Québec - A summary. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 34, p. 452-489.
- Bourque, P.A., Brisebois, D. et Malo, M. 1995. Gaspé Belt. Dans: Chapter 4, *Geology of the Appalachian/Caledonian Orogen in Canada and Greenland*, Harold Williams (co-ord.). Geological Survey of Canada, *Geology of Canada*, n°6 (aussi Geological Society of America, *The Geology of North America*, vol. F-1), p. 316-351.
- Bourque, P.A., Gosselin, C., Kirkwood, D., Malo, M. et St-julien, P. 1993. Le Silurien du segment appalachien Gaspésie-Matapédia-Témiscouata: stratigraphie, géologie structurale et paléogéographie. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, MB93-25, 115 pages + 23 cartes et figures.
- Bourque, P.A. et Lachambre, G. 1980. Stratigraphie du Silurien et du Dévonien basal du Sud de la Gaspésie. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Étude spéciale ES-30, 123 pages + 5 cartes.
- Bourque, P.A., Malo, M. et Kirkwood, D. 2000. Paleogeography and tectono-sedimentary history at margin of Laurentia during Silurian-Earliest Devonian time: the Gaspé Belt, Québec. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 112, p. 4-20.
- Bourque, P.A., Malo, M. et Kirkwood, D. 2001. Stratigraphy, tectono-sedimentary and paleogeography of the post-Taconian - pre-Carboniferous Gaspé Belt: an Overview. *Bulletin of the Canadian Society of Petroleum Geologists*, vol. 49, p. 186-201.
- Brisebois, D. 1981. Géologie de la région de Gaspé. Ministère des Richesses naturelles du Québec. DPV-824, 19 pages.
- Brisebois, D., Lachambre, G. et Piché, G. 1991. Péninsule de la Gaspésie : carte géologique. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, DV-91-21.

- Brisebois, D., Morin, C., 2004, Stratigraphie du Synclinorium de connecticut Valley-Gaspé de l'Ouest de la Gaspésie. Ministère des Ressources Naturelles, Québec, ET 2003-01, 28 pages, 1 carte.
- Brisebois, D. et Nadeau, J. 2003. Géologie de la Gaspésie et du Bas St-Laurent (1:250000map). Ministère des Ressources Naturelles de la Faune et des Parcs, Québec, DV 2003-08.
- Camiré, G. 1995. Development of inverted metamorphic gradient in the internal domain of the Taconian belt, Gaspé Peninsula. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 32, p. 37-51.
- Cant, D.J. et Walker, R.G. 1976. Development of a braided-fluvial facies model for the Devonian Battery Point Sandstone, Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 13, p. 102-119.
- Castonguay, S., Wilson, R.A., Brisebois, D., Desrochers, A. et Malo, M. 2005. Compilation géologique, Anticosti-Gaspé-Campelton, Les ponts géologiques de l'est du Canada, - Transect 4, Québec – Nouveau-Brunswick. Commission géologique du Canada, Dossier public 4383, échelle 1/125000.
- Chamberlin, T.T. 1910 The Appalachian folds of central Pennsylvania. *Journal of Structural Geology*, vol. 18, p. 228-251.
- Chi, G., Lavoie, D. et Bertrand, R. 2000. Regional-scale variation of characteristics of hydrocarbon fluid inclusions and thermal conditions along the Paleozoic Laurentian continental margin in eastern Quebec, Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 48, n°3, p. 193-211.
- Christie-Blick, N. et Biddle, K.T. 1985. Deformation and basin formation along strike-slip fault. Dans: *Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation*. Christie-Blick, N. et Biddle, K.T. (ed.), Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, publication special n°37, p. 1-34.
- Dahlstrom, C.D.A. 1969. Balanced cross-sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 6, p. 743-757.
- Dansereau, P. 1989. Sédimentologie et diagenèse de la brèche calcaire de Neigette, Silurien supérieur du bassin de Gaspésie. Thèse de Master, Université Laval, Québec.
- Davidson, M.E. et Braile, W. 1999. Vibroseis recording techniques and data reduction from the Jemez tomography experiment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 89, p. 1352-1365.

- De Broucker, G. 1987. Stratigraphie, pétrographie et structure de la boutonnière de Maquereau-Mictaw (Région de Port-Daniel, Gaspésie). Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MM 86-03, 160 pages.
- Denison, J.M. et Woodward, H.P. 1963. Palinspastic maps of central Appalachians. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 47, p. 666-680.
- Doligez, B., Bessis, F., Burrus, J., Ungerer, P. et Chenet, P.Y. 1986. Integrated numerical simulation of sedimentation, heat transfer, hydrocarbon formation and fluid migration in a sedimentary basin: the thermis model. Thermal modelling in sedimentary basins, proceedings of the 1st IFP research conference on exploration, Carcans.
- Doligez, B., Beucher, H., Geffroy, F. et Eschard, R. 1999. Integrated reservoir characterization: improvement in heterogeneities stochastic modelling by integration of additional external constraints. Dans: Schatzinger et Jordan (ed.). Reservoir Characterization-Recent Advances, American Association of Petroleum Geologists Memoir. vol. 71, p. 333-342.
- Dow, W.G. 1977. Kerogen studies and geological interpretations. Journal of Geochemical Exploration, vol. 7, p. 79-99.
- Doyon, M. et Berger, J. 1997. Distribution et contrôles structuraux des roches magmatiques siluro-dévonienues de la Gaspésie. Ministère des Ressources naturelles du Québec, ET97-01, 31 pages.
- Drury, M., Jessop, A.M. et Lewis, T.J. 1987. The thermal nature of the Canadian Appalachian crust. Tectonophysics, vol. 133, p. 1-14.
- Ducharme, D. 1979. Pétrographie du flysch de l'Ordovicien supérieur et du Silurien inférieur - Anticlinorium d'Aroostook-Percé, Gaspésie, Québec. Thèse de Master, Université de Montréal, Montréal.
- Elliott, D. 1983. The construction of balanced cross-sections. Journal of Structural Geology, vol. 5, n°2, p. 101-101.
- Espitalié, J., Deroo, G. et Marquis, F. 1985. La pyrolyse rock-eval et ses applications, deuxième partie. Revue de l'Institut Français du Pétrole, vol. 40, n°6, p. 755-784.
- Espitalié, J., Madec, M. et Tissot, B. 1980. Role of mineral matrix in kerogen pyrolysis : Influence on petroleum generation and migration. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 64, p. 59-66.
- Etchecopar, 1974. Simulation par ordinateur de la déformation progressive d'un agrégat polycristallin. Thèse de Doctorat, Université de Nantes.

- Faure, S., Tremblay, A. et Malo, M. 2004. Reconstruction of Taconian and Acadian paleostress regimes in the Quebec and northern New Brunswick Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 41, p. 619–634.
- Freund, R. 1974. Kinematics of transform and transcurrent faults. *Tectonophysics*, vol. 21, p. 93-134.
- Globensky, Y., Béland, J., Bourque, P.-A., Bourque, Y., Brisebois, D., Charbonneau J.M., Cousineau P.A., Lespérance, P.J., Letarte, M., Malo, M., Riva, J., Rondot, J., St-Julien, P. et Petryk, A. 1993. *Lexique stratigraphique Canadien – Région des Appalaches, Basses-Terres du Saint-Laurent et des Îles de la Madeleine*. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, DV 91-23, 327 pages.
- Grundman, G., Behar, F., Malo, M., Baudin, F. et Lorant, F. 2012. Evaluation of hydrocarbon potential of the Paleozoic (Cambrian–Devonian) source rocks of the Gaspé Peninsula, Québec, Canada: Geochemical characterization, expulsion efficiency, and erosion scenario. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 96, n°4, p. 729–751.
- Guérillot, D., Rudkiewicz, J.L., Ravenne, C., Renard, G. et Galli, A. 1989. An integrated model for computer aided reservoir description: from outcrop study to fluid flow simulations. *Proceedings of the 5th European Symposium on Improved Oil recovery*, Budapest.
- Héroux, Y., Bertrand, R. et Chagnon, A. 1997. Évaluation du potentiel roche-mère et fenêtre à huile en exploration pétrolière, avec exemple au Québec. *Congrès annuel de l'APGGQ, Programme et Actes du congrès, Session 2A – L'exploration pétrolière: nouvelles approches, nouveaux espoirs*.
- Héroux, Y., Chagnon, A. et Savard, M. 1996. Organic matter and clay anomalies associated with base-metal sulfide deposits. Dans: Giordano, T.H. (ed.), *Organics and ore deposits*. *Ore Geology Reviews*, Elsevier (ed.), Amsterdam, International, vol. 11, p. 157-173.
- Hesse, R. et Dalton, E. 1995. Turbidite channel/overbank deposition in a Lower Devonian orogenic shale basin, Fortin Group of Gaspé Peninsula, Northern Appalachians, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, vol. B65, p. 44-60.
- Hossack, J.R. 1979. The use of balanced cross-section in calculation of orogenic contraction: a review. *Journal of Geological Society of London*, vol. 136, p. 705-711.
- Hossack, J.R. 1983. A cross-section through the Scandinavian Caledonides constructed with the aid of branch-line maps, *Original Research Article*. *Journal of Structural Geology*, vol. 5, Issue 2, p. 103-111

- Hu, K. et Lavoie, D. 2008. Porosity and permeability evaluation and geological interpretations from core data and geophysical well logs for 18 wells in the Paleozoic successions of Eastern Canada and implications for hydrocarbon exploration. Geological Survey of Canada, Open File 5485, 1 CD-ROM.
- Huc, A.Y. 2003. Le pétrole des profondeurs océaniques. *Pour la Science*, n°307, p. 44-52.
- Hunt, J. M. 1995. Petroleum geochemistry and geology. Seconde édition. New York - W. H. Freeman and Company, 743 pages.
- Hunt, J.M., Lewan, M.D. et Hennet, R.J.C. 1991. Modeling oil generation with time-temperature index graphs based on the Arrhenius equation. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 75, p. 795-807.
- INRS-Géoressources, 1983. Évolution thermique de l'extrémité orientale de la péninsule de Gaspé en relation avec les déformations tectoniques. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, DP 83-03, 96 pages.
- INRS-Pétrole, 1972. Étude géochimique de la série siluro-dévonienne des sondages Sunny-Bank n°1 (48°51'26'' - 64°40'40'') York n°1 (48°43'47'' - 64°38'31'') : région de Gaspésie. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, GM-27748.
- INRS-Pétrole, 1974. Étude des microfaciès, évaluation optique de la matière organique des formations ordoviciennes à dévoniennes de la région de la Baie des Chaleurs. Rapport Soquip, 62 pages.
- International Commission on Stratigraphy. 2004. par: Gradstein F. M., Ogg J. G. et Smith A. G. 2004. A Geologic Time Scale, Cambridge University Press, Cambridge 2004.
- International Commission on Stratigraphy. 2009 : www.stratigraphy.org
- Islam, S., Hesse, R. et Chagnon, A. 1982. Zonation of diagenesis and low-grade metamorphism in Cambro-Ordovician flysch of Gaspé Peninsula, Québec Appalachians. *Canadian Mineralogist*, vol. 20, p. 155-167.
- Jones, I.W. 1936. Région de la partie supérieure de la Rivière York, péninsule de Gaspé. Ministère des Mines du Québec, Rapport annuel 1935, partie D, 26 pages.
- Kerr, H.G., White, N. et Brun, J.P. 1993. An automatic method for determining 3-dimensional normal fault geometries. *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, n°17, p. 837-857.
- Kirkwood, D. 1986. Géologie structurale de la région de Percé, Gaspésie. Thèse de Master (non publié), Université de Montréal, 121 pages.

- Kirkwood, D. 1993. Étude qualitative et quantitative de la déformation acadienne du bassin siluro-dévonien de la péninsule gaspésienne, Appalaches du nord. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 178 pages.
- Kirkwood, D. 1999. A palinspastic restoration of a post-taconian successor basin deformed within a transpressive setting, northern Appalachians. *Tectonics*, vol. 18, p. 1027-1040.
- Kirkwood, D., Lavoie, M. et Marcil, J.C. 2004. Structural style and hydrocarbon potential in the Acadian foreland fold and thrust belt, Gaspé Appalachians, Canada. Dans: *Deformation, fluid flow and reservoir appraisal in foreland fold and thrust belts*, Swennen, R., Roure F. et Granath, J.W. (ed.). American Association of Petroleum Geologists Hedberg Series, n°1, p. 412-430.
- Kirkwood, D. et Malo, M. 1993. Across strike geometry of the Grand Pabos fault zone: evidence for Devonian dextral transpression in the Québec Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 30, p. 1363-1373.
- Kirkwood, D., Malo, M., St-Julien, P. et Therrien, P. 1995. Vertical and fold-axis parallel extension within a slate belt in a transpressive setting, Northern Appalachians. *Journal of Structural Geology*, vol. 17, p. 329-343.
- Kirkwood, D. et St-Julien, P. 1987. Analyse structural du Siluro-Dévonien dans la vallée de la Matapédia. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 87-33, 17 pages.
- Kirkwood, D., Savard, M.M. et Chi, G. 2001. Microstructural analysis and geochemical vein characterization of the Salinic event and Acadian Orogeny: evaluation of the hydrocarbon potential in eastern Gaspé. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 49, p. 262-282.
- Lachambre, G. 1987. Le Silurien et le Dévonien basal du nord de la Gaspésie. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, ET 84-06, 81pages.
- Lachambre, G. et Brisebois, D. 1990. Géologie de la Gaspésie — New Carlisle. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, Cartes n° 2151, n° 2152, n° 2181. DV 91-22. DV 91-02. DV 91-07.
- Lachenbruch, A.H. 1970. Crustal temperature and heat production: Implications of the linear heat flow relation. *Journal of Geophysical Research*, vol. 75, p. 3291-3300.
- Landing, E., Benus, A.P. et Whitney, P.R. 1992. Early and early Middle Ordovician continental slope deposition: shale cycle and sandstones in the New York Promontory and Québec Reentrant region. *New York State Museum Bulletin*, n° 474.
- Lavergne, M. 1986. Méthodes sismiques, Technip (ed.), Paris, 207 pages.

- Lavoie, D. 1988. *Sédimentologie et diagenèse du niveau Sayabec-Laforce-LaVieille du Bassin de Gaspésie-Matapédia-Témiscouata*. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec.
- Lavoie, D. 1992a. Lower Devonian facies in Forillon Peninsula, Eastern Gaspé, Québec Appalachians: A storm-influenced, carbonate outer shelf. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 40, p. 303-320.
- Lavoie, D. 1992b. Carbonate sedimentation in extensional tectonic regime: The Lower Devonian Upper Gaspé Limestones, Québec Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 29, p. 118-128.
- Lavoie, D. 2008, Appalachian Foreland Basin of Canada. Dans: Hsü K.J. (ed.), *Sedimentary Basins of the World*, vol. 5, *The Sedimentary Basins of the United States and Canada*, Andrew D. Miall. The Netherlands. Elsevier (ed.), p. 65-103. ISBN: 978-0-444-50425-8
- Lavoie, D. 2009. Porosity-Perméability measurements for selected Paleozoic samples in Québec. Geological Survey of Canada, Open File 6084, 21 pages.
- Lavoie, D. et Asselin, E. 2004, A new stratigraphic framework for the Gaspé Belt in southern Quebec: implications for the pre-Acadian Appalachians of eastern Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 41, p. 507-525.
- Lavoie, D. et Bourque, P.A. 1993. Marine, burial and meteoric diagenesis of Early Silurian carbonate ramps, Québec Appalachians, Canada. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 63, p. 233-247.
- Lavoie, D. et Bourque, P.A. 2001. The history of hydrocarbon exploration in the Silurian-Devonian Gaspé Belt: 100 years of modest success. *Bulletin of the Canadian Petroleum Geology*, vol. 49, p. 180-185.
- Lavoie, D., Bourque, P.A. et Héroux, Y. 1992. Early Silurian carbonate platform in the Appalachian orogenic belt: the Sayabec-La Vieille Formation of the Gaspé-Matapédia Basin, Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 29, p. 704-719.
- Lavoie, D. et Chi, G. 2001. The Lower Silurian Sayabec Formation in northern Gaspé: carbonate diagenesis and reservoir potential. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 49, p. 282-298.
- Lavoie, D. et Chi, G. 2006. Hydrothermal dolomitization in the Lower Silurian La Vieille Formation in northern New Brunswick: geological context and significance for hydrocarbon exploration. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 54, p. 308-395.

- Lavoie, D., Chi, G. et Fowler, M. 2001. The Lower Devonian Upper Gaspé Limestones in eastern Gaspé: carbonate diagenesis and reservoir potential. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 49, p. 346-365.
- Lavoie, D. et Morin, C. 2004. Hydrothermal dolomitization in the Lower Silurian Sayabec Formation in Northern Gaspé – Matapédia: Constraint on timing of porosity and regional significance for hydrocarbon reservoirs. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 52, p. 256-269.
- Lavoie, D., Pinet, N., Dietrich, J., Hannigan, P., Castonguay, S., Hamblin, A.P., et Giles, P. 2009. Petroleum resource assessment, Paleozoic successions of the St. Lawrence Platform and Appalachians of eastern Canada. Geological Survey of Canada, Open File 6174, 273 pages.
- Lavoie, D., Tassé, N. et Asselin, E. 1990. Lithostratigraphic framework of the Upper Gaspé Limestones (Early Devonian) in eastern Gaspé basin, Québec. Dans: *Current Research, Part B*, Geological Survey of Canada, Paper 90-1B, p. 17-27.
- Lecours, M. 2000. Modélisation des incertitudes concernant la géométrie des failles. Impact sur les études volumétriques des réservoirs pétroliers. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 287 pages.
- Lefebvre, Y. 1982. Le carbone organique dans les séquences sédimentaires du Llandovérien de la Gaspésie et du nord-est du Nouveau Brunswick. Thèse de Master, Université Laval, Québec, 34 pages.
- Lepage, F., Moretti, I. et Guiton, M. 2004. 3-d restoration : Geometry and Geomechanics. Dans: *24th Gocad Meeting Proceedings*.
- Lespérance, P.J. 1980. Calcaires Supérieurs de Gaspé. Les aires-types et le prolongement vers l'ouest. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, DPV-595, 92 pages.
- Lespérance, P.J. et Bourque, P.A. 1970. Silurian and basal Devonian stratigraphy of northeastern Gaspé Peninsula, Québec. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 54, n°10, p. 1868-1886.
- Logan, W.E. 1846. Rapport de progrès pour l'année 1844. Commission géologique du Canada.
- Logan, W.E. 1863. Rapport de progrès depuis son commencement jusqu'à 1863. Commission géologique du Canada, n°514, 983 pages.
- Lynch, G. et Arsenault, O. 1997. Stratigraphy and deformation of the Humber Zone in Gaspésie Québec. Dans: *Current Research 1997-D*, Geological Survey of Canada, p. 1-8.

- Mallet, J.L. 2001. *Geomodeling*. Oxford University Press, 666 pages.
- Malo, M. 1986. *Stratigraphie et structure de l'anticlinorium d'Aroostook-Percé en Gaspésie, Québec*. Thèse de Doctorat, Université de Montréal.
- Malo, M. 1988. Stratigraphy of the Aroostook-Percé anticlinorium in the Gaspé Peninsula, Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 25, p. 893-908.
- Malo, M. 2001. The Late Silurian-Early Devonian tectono-sedimentary history of the Gaspé Belt in the Gaspé Peninsula : from a transtensional Salinic basin to an Acadian foreland basin. *Bulletin of the Canadian Society of Petroleum Geologists*, vol. 49, p. 202-216.
- Malo, M. et Béland, J. 1989. Acadian strike-slip tectonics in the Gaspé region, Québec Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 26, p. 1764-1777.
- Malo, M. et Bourque, P.A. 1993. Timing of the deformation events from Late Ordovician to Mid-Devonian in the Gaspé Peninsula. Dans: Roy, D. et Skehan, S.J. (ed.), *The Acadian Orogeny: Recent Studies in New England, Maritime Canada, and the Autochthonous Foreland*. Geological Society of America, Special Paper 275, p. 101-122.
- Malo, M. et Kirkwood, D. 1995. Faulting and progressive strain history of the Gaspé Peninsula in post-Taconian time: A review. Dans: Hibbard, J.P., van Staal C.R. et Cawood P.A (ed.). *Current Perspectives in the Appalachian- Caledonian Orogen*. Geological Association of Canada, Special vol. 41, p. 267-282.
- Malo, M., Roden-Tice, M.K., Pinet, N., Grundman, G. et Parent. A. 2012. New fission-track data in the northeastern Gaspé Belt: Implications for burial history of Ordovician and Devonian source rocks in the Gaspé Peninsula. Congrès annuel conjoint AGC/GAC-AMC/MAC, St. John's, Terre-Neuve, 26-29 mai 2012, Recueil des Résumés, vol. 35.
- Malo, M., Ruffet, G., Pincivy, A. et Tremblay, A. 2008. A 40AR/39Ar study of oceanic and continental deformation processes during an oblique collision: Taconian orogeny in the Quebec reentrant of the Canadian Appalachians. *Tectonics*, vol. 27, n°4.
- Marle, C. 1972. Les écoulements polyphasiques en milieux poreux. Cours de production, tome IV, Technip (ed.), 330 pages.
- Massot, J. 2002. *Implémentation de méthodes de restauration équilibrée*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France.
- McGerrigle, H.W. 1950. *La géologie de l'Est de Gaspé*. Ministère des Mines du Québec, RG 35.
- Mitchum, R.M. Jr., Vail, P.R. et Sangree, J.B. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level; Part 6, Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in

- depositional sequences. American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, p. 117-133.
- Mitra, S. et Namson, J. 1989. Equal-area balancing. American Journal of Science, vol. 289, p. 563-599.
- Ménard, G. 1988. Méthodologies générales de construction des coupes équilibrées. Gratier, J.-P (ed.).
- Moretti, I., Lepage F. et Guiton, M. 2006. Kine3D : a New 3D Restoration Method Based on a Mixed Approach Linking Geometry. Oil Gas Science and Technology, Revue de l'Institut Français du Pétrole, vol. 61(2), p. 277-289.
- Morin, C. et Laliberté, J.Y. 2002. The unexpected Silurian-Devonian structural style in western Gaspé – New insight for promising hydrocarbon plays. Canadian Society of Petroleum Geology, Jubilee Meeting, Calgary 2002, abstract volume, p. 240.
- Muron, P. 2005. Méthodes numériques 3-D de restauration des structures géologiques faillées. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France.
- Muron, P., Tertois, A.L., Mallet, J. L. et Hovadik, J. 2005. An efficient and extendible interpolation framework base on the matrix formulation of the discrete smooth interpolation. In 25th Gocad Meeting Proceedings.
- Pelet R. 1985. Évaluation quantitative des produits formés lors de l'évolution géochimique de la matière organiques : Revue de l'Institut Français du Pétrole, vol. 40, n°5, p. 551-562.
- Perrier, R. et Quiblier, J. 1974. Thickness changes in sedimentary layers during compaction history; methods for quantitative evolution. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 58(3), p. 507-520.
- Pinet, N., Keating, P., Brouillette, P., Dion, D.J. et Lavoie, D. 2006a, Production of a residual gravity anomaly map for Gaspésie (northern Appalachian Mountains), Quebec, by a graphical method: Geological Survey of Canada, Current Research, 8 pages.
- Pinet, N., Keating, P., Lavoie, D. et Brouillette, P. 2006b. New insights on the extent of Late Proterozoic to Cambrian rifting magmatism in the Québec Appalachians from gravity data. Geological Association of Canada-Mineral Association of Canada Joint meeting, Abstracts, p. 119-120.
- Pinet, N., Keating, P, Lavoie, D. et Brouillette, P. 2010. Forward potential-field modeling of the Appalachian orogen in the Gaspe peninsula (Québec, Canada): Implication for the extent of rift magmatism and the geometry of the Taconian orogenic wedge, American Journal of Science, vol. 310, Issue 2, p. 89-110.

- Pinet, N., Lavoie, D., Brouillette, P., Dion, D.J., Keating, P., Brisebois, D., Malo, M. et Castonguay, S. 2005. Gravity and aeromagnetic atlas of the Gaspé Peninsula. Geological Survey of Canada, Open File 5020, 68 pages.
- Pinet, N., Lavoie, D., Keating, P. et Brouillette, P. 2008. Gaspé belt subsurface geometry in the northern Québec Appalachians as revealed by an integrated geophysical and geological study: 1 – Potential field mapping. *Tectonophysics*, vol. 460, p. 34-54
- Pinet, N. et Tremblay, A. 1995. Tectonic evolution of the Québec-Maine Appalachians : From oceanic spreading to obduction and collision in the northern Appalachian. *American Journal of Science*, vol. 295, p. 173-200.
- Ramsay, J.G. et Huber, M.I. 1987. *Techniques of Modern Structural Geology : Folds and Fractures*, tome 2. Academic Press, London, p. 308-700, ISBN 0125769229.
- Rheault, M. 1986. Région de Murdochville, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, ET 85-06, 24 pages.
- Riva, J. et Malo, M. 1988. Age and correlation of the Honorat Group, southern Gaspé Peninsula. *Canadian Journal Earth Sciences*, vol. 25, p. 1618-1628.
- Roksandic, M.M. et Granger, B. 1981. Structural styles of Anticosti Island, Gaspé Passage, and eastern Gaspé Peninsula inferred from reflection seismic data. Dans: Field meeting, Anticosti-Gaspé, 1981. vol. II: Stratigraphy and paleontology: IUGS Subcommittee on Silurian Stratigraphy and Ordovician-Silurian Boundary Working Group. Lespérance P.J. (ed.). Département de géologie, Université de Montréal, p. 211-221.
- Rouby, D. 1994. Restauration en carte des domaines faillés en extension, méthode et applications. Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, Rennes, France,
- Rouby, D. et Cobbold, P.R. 1996. Kinematic analysis of a growth fault system in the Niger Delta from restoration in map-view, *Marine and Petroleum Geology*, vol. 13, n°5, p. 565-580.
- Roy, S. 2004. « Diagenèse et potentiel en hydrocarbures des successions paléozoïques de la région du Lac Matapédia, Québec ». Thèse de Master, Québec, INRS Eau, terre et environnement, 147 pages.
- Roy, S. 2008. Maturation thermique et potentiel pétrolière de la Ceinture de Gaspé, Gaspésie, Québec, Canada. Thèse de Doctorat, Université du Québec : INRS Eau, Terre et Environnement, 330 pages.
- Rust, B.R. 1976. Stratigraphic relationships of the Malbaie Formation (Devonian), Gaspé, Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 13, p. 1556-1559.

- Rust, B.R. 1981. Alluvial deposits and tectonic style - Devonian and Carboniferous successions in Eastern Gaspé. Dans: Miall, A.D., (ed.), *Sedimentology and tectonics in alluvial basins: Geological Association of Canada, Special Paper 23*, p. 49-76.
- Sacks, P.E., Malo, M, Terzcienski, Jr., W.E., Pincivy, A. et Gosselin, P. 2004. Taconian and Acadian transpression between the internal Humber zone and the Gaspé Belt in the Gaspé Peninsula: tectonic history of the Shickshock Sud fault zone. *Canadian Journal of Earth Sciences*.
- St-Julien, P. et Bourque, P.A. 1990. Rapport d'évaluation géologique et géophysique de la région de Malbaie-Fortin-York, Gaspésie (Permis 842, 843 et 844). Pédro Québec, Rapport interne, 46 pages.
- Samson, P. 1996. Equilibrage de structures géologiques dans le cadre du projet Gocad. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France.
- Sanford, B.V. 1993, St. Lawrence platform-geology, Dans: Scott, D. F. et Aitken, J. D. (ed.), *Sedimentary cover of the Craton in Canada*, Geological Survey of Canada, Geology of Canada. Chapter 11, vol. 5, p. 723-786.
- Saucier, D., Kirkwood, D., Jardin, A. et Bêche, M. 2006. Evolution of the taconian belt (Gaspé peninsula Appalachians): New geometrical constraints from an integrated geophysical study. International Lithosphere Program Task Force on Sedimentary Basin, Québec, 2006.
- Schlische, R.W. 1995. Geometry and origin of fault-related folds in extensional settings. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 79, n°11, p. 1661-1678.
- Schneider, F. et Wolf, S. 2000. Quantitative HC potential evaluation using 3D basin modelling: application to Franklin structure, Central Graben, North Sea, UK. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 17, n°7, p. 841-856.
- Schneider, F., Wolf, S., Faille, I. et Pot, D. 2000. A 3D basin model for hydrocarbon potential evaluation: application to Congo offshore. *Oil & Gas Science and Technology – Revue IFP*, vol. 55, n°1, p. 3-13.
- Schultz-Ela, D.D. 1988. Application of three-dimensional finite-element method to strain field analysis. *Journal of Structural Geology*, vol. 10, n°3, p. 263-272.
- Schultz-Ela, D.D. 1992. Restoration of cross-sections to constrain deformation processes of extensional terranes. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 9, n°4, p. 372-388.
- Scotese, C. R. et McKerrow, W.S. 1990, Revised world maps and introduction, in C. R. Scotese and W. S. McKerrow, eds., *Paleozoic paleogeography and biogeography: Geological Society (London). Mémoire 12*, p. 1-21.

- Shell Canada, 2001. Shell Canada – Encal Energy Anticosti Island exploration, 1997-2000. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec, direction des hydrocarbures, Rapport 2000TD456-01, 32 pages, 47 figures.
- Skidmore, W.B. 1965. Région de Gastonguay-Mourier. Ministère des Richesses Naturelles du Québec, RG 105, 87 pages.
- Slivitzky, A., St-Julien, P. et Lachambre, G. 1991. Synthèse géologique du Cambro-Ordovician du nord de la Gaspésie. Ministère de l'Energie et des Ressources, Québec, ET88-14, 61 pages.
- Souche, L. 2005. Méthodes numériques pour la représentation des failles et des structures géologiques faillées. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France.
- St-Julien, P., Hubert, C., Skidmore, W.B. et Béland, J. 1972. Appalachian structure and stratigraphy in Québec. XXIV International Geological Congress, Montréal, Excursion A56-C56.
- Suppe, J. 1985. Principles of structural geology Prentice Hall, New Jersey. 537 pages.
- Thériault, R. et Laliberté, J.Y. 2006. Perspectives et concepts d'exploration en hydrocarbures au Québec : Un horizon de découvertes! Ministère des ressources naturelles et de la Faune, Québec. Présentation Québec Exploration Novembre 2006.
- Tissot, B.P. et Espitalié, J. 1975. L'évolution thermique de la matière organique des sédiments : Applications d'une simulation mathématique. Revue de l'Institut Français du Pétrole, vol. 30, p. 743-777.
- Tissot, B.P. et Welte, D.H. 1984. Petroleum formation and occurrence. Springer-Verlag, Berlin, 699 pages.
- Turcotte, D.L. et Schubert, G. 1982. Geodynamics: Application of Continuum Physics to Geological Problems, John Wiley, New York, 450 pages.
- Turcotte, D.L. et Schubert, G. 2002. Geodynamics. Wiley, 2nd edition.
- Tremblay, A., Malo, M. et St-Julien, P. 1995. Dunnage Zone - Québec-Canadian Appalachians Region. Dans: Chapter 3, Geology of the Appalachian/Caledonian Orogen in Canada and Greenland, Harold Williams (co-ord.). Geological Survey of Canada, Geology of Canada, n°6 (aussi Geological Society of America, The Geology of North America, vol. F-1), p. 179-197.
- Ungerer, P., Bessis, F., Chenet, P.Y., Durand, B., Nogaret, E., Chiarelli, A., Oudin, J.L. et Perrin, J.F. 1984. «Geological and geochemical models in oil exploration : principles

- and practical examples». Dans: *Petroleum Geochemistry and Basin Evaluation*, Demaison, G. (ed.), American Association of Petroleum Geologists Memoir 35, p. 53-77.
- Ungerer, P., Burrus, J., Doligez, B., Chénet, P.Y. et Bessis, F. 1990. Basin Evaluation by Integrated Two-Dimensional Modeling of Heat Transfer, Fluid Flow, Hydrocarbon Generation, and Migration. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 74, n°3, p. 309-335.
- Ungerer, P., Burrus, J., Doligez, B., Chénet, P.Y. et Bessis, F. 1991. Évaluation des bassins par modélisation intégrée en deux dimensions des transferts thermiques, de l'écoulement des fluides, de la genèse et de la migration des hydrocarbures. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, vol. 46, n°1, p. 3-39.
- van de Poll, H.W. 1995. « Bassins isolés ». Dans: *Géologie de l'orogène appalachien-calédonien au Canada et au Groenland*, chap. 5, rév. par H. Williams, Commission géologique du Canada, *Géologie du Canada*, n°6, p. 502-508.
- van Staal, C.R. 2005. The Northern Appalachians. Dans: Selley, R.C., Robin, L., Cocks, M., and Plimer, I.R., *Encyclopedia of Geology*, Elsevier (ed.), Oxford, vol. 4, p. 81-91.
- van Staal, C.R. 2007. Pre-Carboniferous tectonic evolution and metallogeny of the Canadian Appalachians. Dans: Goodfellow, W.D. (ed.), *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication n°5, p. 793-818.
- Walker, R.G. et Cant, D.J. 1979. Facies model 3. Sandy fluvial system. Dans: R.G. Walker (ed.), *Facies Models*. Geoscience Canada Reprint Series 1, p. 23-31.
- Webby, B.D., Cooper, R.A., Bergström, S.M. et Paris, F. 2004. Stratigraphic framework and time slices. The Great Ordovician Biodiversification Event. Dans: Webby, B. D., Paris, F., Droser, M. L. et Percival, I. G. (ed.), p. 41-47.
- Wendebourg, J. et Düppenbecker, S.J. 2003. Application of compositional basin modeling to GOR and API prediction in the North Sea. *Multidimensional basin modeling/American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 7, p. 137-154.
- Williams, H. 1979. Appalachian orogen in Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 16, p. 782-807.
- Williams, H. 1995. Introduction. Dans: Chapter 1, *Geology of the Appalachian/Caledonian Orogen in Canada and Greenland*, Harold Williams (co-ord.). Geological Survey of Canada, *Geology of Canada*, n°6 (aussi Geological Society of America, *The Geology of North America*, vol. F-1), p. 3-19.

Wilson, J.T. 1966. Did the Atlantic close and then reopen?, *Nature*, vol. 211, p. 676–681.

Woodcock, N.H. et Fischer, M. 1986. Stricke-slip duplexes. *Journal of Structural Geology*, vol. 8, n°7, p. 725-735.

Zen, E-an. 1983. Exotic terranes in the New-england Appalachians limits, candidates, and ages: a speculative essay. Dans: *Contributions to the Tectonics and Geophysics of Mountain Chains*, Hatcher Jr. R.D., Williams H. et Zietz I. (ed.). Geological Society of America Memoir 158, p. 55-8.

Sites internet:

<http://bourque.petroliagaz.com/>

www.petroliagaz.com (Communication aux publics 2007 et 2008 et Rapport annuel 2010)

www.mrn.gouv.qc.ca/publications/energie/exploration/Permis_gaspesie.pdf

www.geobase.ca

www.scotese.com/climate.htm

www.stratigraphy.org

