UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
GUILLAUME LÉGARÉ-COUTURE

HYDROSTRATIGRAPHIE ET MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D DU SUD-OUEST DE LA MAURICIE

SEPTEMBRE 2013

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier personnellement mon directeur de recherche, Stéphane Campeau (UQTR), pour la confiance et le support qu'il m'a accordé tout au long de ma maîtrise. Je me considère très privilégié d'avoir obtenu cette position au sein de ton équipe des eaux souterraines, avec laquelle ce fut d'ailleurs un honneur de travailler. Merci encore pour cette formidable opportunité.

Je remercie également mon co-directeur, Michel Parent de la Commission géologique du Canada, pour son implication dans tous les aspects du projet et spécialement pour les travaux sur le terrain. Nos discussions sur la géologie et les processus de mise en place ont su faire évoluer notre modèle, et le tester du même coup en soulevant toujours de nouvelles questions!

Un remerciement spécial va à Yves Leblanc (UQTR), membre de mon comité d'évaluation, mais surtout coéquipier de travail et mentor en hydrogéologie. Le fait d'avoir partagé ton expertise avec moi et de m'avoir épaulé tout au long de ma maîtrise m'a permis d'ajouter des cordes à mon arc.

J'en profite pour remercier Denis Leroux (UQTR), également membre de mon comité d'évaluation. Alors que le projet des eaux souterraines n'était qu'à son stade embryonnaire, tu as su bien m'orienter pour la prise en charge du volet géomatique. Merci d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

La réalisation de ce mémoire de maîtrise n'aurait pas été possible sans le financement accordé par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP) pour le projet de caractérisation des eaux souterraines du sud-ouest de la Mauricie, réalisé dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Ce projet a également bénéficié de l'appui financier de la Conférence régionale des élus de la Mauricie (CRÉ), de la MRC

de Maskinongé, ainsi que de la ville de Trois-Rivières. Nous remercions également toutes les municipalités du territoire et plusieurs organismes privés d'avoir partagé leurs rapports et leurs données qui se sont avérées essentielles au développement du modèle géologique.

Je me dois de remercier Pierre-André Bordeleau (UQTR), pour nos discussions sur la géomatique. Merci à Francis Clément et à Précillia Descoteaux pour la supervision de certains forages ainsi que pour les analyses granulométriques. Merci à Denis Gratton, Julie Ruiz et Ali Assani (UQTR), collaborateurs internes ayant contribué à l'avancement de nos travaux sur diverses problématiques.

Je tiens à souligner la contribution de l'équipe d'André Pugin (Commission géologique du Canada) pour la réalisation des levés sismiques de type *Minivibe*, leur traitement et l'interprétation préliminaire. Je désire également remercier les professeurs Sophie Côté et Éric Dubois (CÉGEP de Thetford mines) pour le prêt des équipements de géophysique et pour leurs précieux conseils quant à leur utilisation. Merci à Brian Bélisle (UQAM), Philippe Davignon (Cégep de Thetford mines) et Fannie Fortier-Fradette (U. Laval) pour la réalisation des travaux de géophysique. Merci à Lise Lamarche (INRS-ÉTÉ) de m'avoir initié au logiciel gOcad. Merci à Harold Vigneault et Marc-André Carrier (INRS-ÉTÉ), ainsi qu'à Miroslav Nastev (CGC) pour leurs précieux conseils en début de projet. Merci à Claude Hébert pour sa collaboration au niveau de la compilation géologique du roc, et à François Hardy (Génivar) pour son travail d'uniformisation de la cartographie des formations superficielles. L'équipe de M. Jean Roy est également remerciée pour avoir accepté de tester une nouvelle méthode d'investigation géophysique par résonance magnétique. Merci à René Lefebvre pour le prêt de la foreuse CPT, et à Jean-Marc Ballard et Xavier Mallet pour la réalisation de ces forages.

Finalement, un merci tout spécial à mes collègues et amis Thomas, Raphaëlle, Vernhar et Karine, pour tous les bons moments passés à vos côtés.

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'une étude hydrogéologique régionale, un modèle géologique 3D du sud-ouest de la Mauricie a été construit dans le but d'obtenir une représentation détaillée de l'architecture stratigraphique des dépôts meubles. Les objectifs du projet de recherche étaient de définir la séquence hydrostratigraphique locale, la géométrie et l'étendue des formations géologiques enfouies, ainsi que de déterminer leur rôle hydrogéologique dans l'écoulement régional. Le modèle est basé sur des descriptions géologiques provenant de diverses bases de données de forages, et appuyé par de nouveaux travaux terrain réalisés dans le cadre de l'étude. Le modèle résultant représente la topographie régionale du roc ainsi que l'architecture stratigraphique de six unités géologiques sus-jacentes. Des nouvelles formations aquifères à nappe captive ont été identifiées principalement dans des unités fluvioglaciaires mises en place dans des fonds de vallées, puis recouvertes par des sédiments marins, tandis que des aquifères à nappe libre ont été identifiés principalement dans des unités deltaïques mis en place à l'embouchure des axes d'écoulement des eaux de fonte glaciaire, le plus important étant le paléodelta de la rivière Saint-Maurice.

L'aquifère sableux supérieur a été modélisé avec un niveau de détail sans précédent, et est estimé à un volume de 4,7 milliards de m^3, 31 % de ce volume étant contenu sous le niveau de l'eau observé. Des formations inexploitées à grand potentiel aquifère sont identifiées dans le secteur nord de la Ville de Trois-Rivières et de Shawinigan-Sud. Le modèle s'avère être un outil indispensable pour l'estimation des réserves d'eau souterraine, la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines ainsi que pour l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe.

Mots-clés : aquifères, hydrogéologie, modélisation géologique 3D, Quaternaire.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... **ii**

RÉSUMÉ ..... **iv**

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX ..... **viii**

CHAPITRE I
INTRODUCTION **1**

1.1 Contexte 1

1.2 Problématique 2

1.2.1 Hydrogéologie du sud-ouest de la Mauricie 2

1.2.2 Modélisation géologique et hydrostratigraphie 4

1.3 Objectifs 8

1.4 Structure du mémoire 8

CHAPITRE II
SECTEUR À L'ÉTUDE **10**

2.1 Physiographie et hydrographie 12

2.2 Géologie du substratum rocheux 13

2.2.1 Basses-Terres du Saint-Laurent 13

2.2.2 Grenville 14

2.2.3 Aspects hydrogéologiques 15

2.3 Géologie du Quaternaire 16

2.3.1 Formations superficielles 16

2.3.2 Stratigraphie régionale 19

CHAPITRE III
MÉTHODOLOGIE **26**

3.1 Travaux sur le terrain 26

3.1.1 Uniformisation de la cartographie des dépôts de surface 28

3.1.2 Sismique réfraction 29

3.1.3 Résistivité électrique 30

3.1.4 Sismique-réflexion haute-résolution 32

3.1.5 Forages 33
3.2 Travaux de laboratoire 39
3.2.1 Analyses granulométriques 39
3.2.2 Analyse de tomodensitométrie axiale 40
3.2.3 Datations radiocarbone 41
3.3 Modélisation 3D 41
3.3.1 Compilation des données 41
3.3.2 Uniformisation 44
3.3.3 Cotes de fiabilité 46
3.3.4 Création des surfaces 47
3.3.5 Validation 48

CHAPITRE IV
CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES DU SUD-OUEST DE LA MAURICIE 56

4.1 Plaine argileuse 56
4.2 Piedmont 63
4.3 Paléodelta 77
4.3.1 Secteur Ouest (Pointe-du-Lac & Trois-Rivières-Ouest) 78
4.3.2 Secteur Est (Trois-Rivières & Cap-de-la-Madeleine) 86
4.4 Bouclier Laurentien 93

CHAPITRE V
GÉOLOGIE 3D ET HYDROSTRATIGRAPHIE DU SUD-OUEST DE LA MAURICIE 98

5.1 Roc 98
5.2 Quaternaire 99
5.2.1 Dépôts du Quaternaire ancien 99
5.2.2 Séquence glaciaire wisconsinienne 100
5.2.3 Séquence fluvioglaciaire 101
5.2.4 Séquence marine 102
5.2.5 Séquence Saint-Narcisse 102
5.2.6 Sables supérieurs 103

CHAPITRE VI
DISCUSSION ET CONCLUSION 112

6.1 Synthèse stratigraphique régionale 112

6.2 Fiabilité du modèle, incertitudes et développements futurs 116

6.3 Conclusion 117

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 120

ANNEXE A
CARTE DE LA GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX DU SUD-OUEST DE LA MAURICIE 125

ANNEXE B
RÉSULTATS : SISMIQUE RÉFRACTION 126

ANNEXE C
RÉSULTATS : RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE 131

ANNEXE D
SONDAGES CPT 137

ANNEXE E
GRILLE D'ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ DES FORAGES (PACES, 2009) 149

ANNEXE F
COUPES GÉOLOGIQUES INTERPRÉTÉES DE SISMIQUE RÉFLEXION HAUTE RÉSOLUTION : VERSIONS COMPLÈTES 151

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure		Page
2.1	Localisation du secteur à l'étude	11
2.2	Géologie des formations superficielles du sud-ouest de la Mauricie	18
2.3	Séquence stratigraphique composite des Basses-Terres du Saint-Laurent (Modifié de Occhietti *et al.* 1996)	20
2.4	Extension septentrionale maximale de l'invasion de la Mer de Champlain et localisation du complexe morainique de Saint-Narcisse (Occhietti, 2007)	23
3.1	Localisation des travaux sur le terrain	27
3.2	Système de sismique réfraction	30
3.3	Système de résistivité électrique GRX-832 de GDD Instruments	31
3.4	Dispositif de Wenner	31
3.5	Système de sismique réflexion haute-résolution de type *Minivibe*	33
3.6	Système de sondage CPT	34
3.7	Système de forage Rotosonic	36
3.8	Scan des échantillons carottés du forage Rotosonic	40
3.9	Code des lithofaciès (Parent *et al.*, 2003)	46
3.10	Schéma conceptuel de modélisation des contacts stratigraphiques	48
3.11	Schéma conceptuel de l'intégration des cotes de fiabilité dans la modélisation	49
3.12	Schéma conceptuel de l'ajustement avec le MNE	51
3.13	Schéma conceptuel d'ajustement en utilisant les épaisseurs minimum rencontrées	52
3.14	Schéma conceptuel d'un affleurement rocheux non-représenté en forage	53

3.15 Étapes de la méthode d'intégration des dépôts de surface dans le modèle 3D 54

3.16 Schéma conceptuel illustrant l'effet d'escalier créé par la méthode, avant ajustement 55

3.17 Schéma conceptuel illustrant l'ajustement du buffer logarithmique 55

4.1 Modèle conceptuel des quatre contextes hydrogéologiques retrouvés sur le territoire (Leblanc *et al.* 2010) 56

4.2 Contexte de la plaine argileuse 57

4.3 Coupe géologique interprétée – Lignes *Minivibe* 7, 8 et 9 – 2010 59

4.4 Rapport de forage- FE-07-11 – Saint-Sévère 60

4.5 Rapport de forage- FE-08-11 – Saint-Léon 61

4.6 Rapport de forage- FE-10-11 – Saint-Justin 62

4.7 Contexte du piedmont 63

4.8 Localisation des travaux de terrain – Secteur Sainte-Angèle-de-Prémont 64

4.9 Rapport de forage- FE-09-11 – Sainte-Angèle-de-Prémont 66

4.10 Localisation des travaux terrain – Secteur Charrette 67

4.11 Faciès du complexe morainique de Saint-Narcisse 68

4.12 Coupe géologique interprétée – Ligne *Minivibe* 1 – 2011 70

4.13 Rapport de forage- FE-05-11 – Charrette 71

4.14 Localisation des travaux terrain – Secteur Mont-Carmel 72

4.15 Rapport de forage- FE-01-11 – Notre-Dame-du-Mont-Carmel 74

4.16 Coupe géologique interprétée – Ligne *Minivibe* 2 – 2011 75

4.17 Rapport de forage- FE-03-11 – Notre-Dame-du-Mont-Carmel 76

4.18 Localisation des travaux terrain – Secteur Trois-Rivières, Cap-de-la-Madeleine & Saint-Louis-de-France 78

4.19 Coupe géologique interprétée – Ligne *Minivibe* 5 – 2010 81

4.20 Coupe géologique interprétée – Lignes *Minivibe* 4 et 3 – 2010 82

4.21	Coupe géologique interprétée – Ligne *Minivibe* 3 – 2011	83
4.22	Rapport de forage- FE-16-11 – Trois-Rivières (Trois-Rivières)	85
4.23	Modèle hydrogéologique conceptuel de l'aquifère du Cap-de-la-Madeleine (Leblanc *et al.* 2010)	86
4.24	Coupe géologique interprétée – Ligne *Minivibe* 4 – 2011	88
4.25	Rapport de forage- FE-02-11 – Trois-Rivières (Sainte-Marthe-du-Cap)	91
4.26	Rapport de forage- FE-11-11 – Trois-Rivières	92
4.27	Localisation des travaux de terrain – Secteur Saint-Alexis-des-Monts	94
4.28	Modèle hydrogéologique conceptuel de l'aquifère de Saint-Alexis-des-Monts (Leblanc *et al.* 2010)	94
4.29	Localisation des travaux terrain – Secteur Saint-Élie-de-Caxton	95
4.30	Rapport de forage- FE-04-11 – Saint-Élie-de-Caxton	97
5.1	Élévation du socle rocheux	105
5.2	Répartition et épaisseur des sédiments du Quaternaire ancien	106
5.3	Répartition et épaisseur du till de Gentilly	107
5.4	Répartition et épaisseur des sédiments fluvioglaciaires	108
5.5	Répartition et épaisseur des sédiments fins de la Mer de Champlain	109
5.6	Répartition et épaisseur de la Moraine de Saint-Narcisse	110
5.7	Répartition et épaisseur des sables supérieurs	111
6.1	Distribution de l'épaisseur des sédiments en fonction de la surface totale couverte	115

Tableau **Page**

2.1	Superficie de la portion des bassins versants incluse dans le territoire à l'étude	12
3.1	Source des données intégrées à la base de données	43

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Contexte

Une alimentation en eau adéquate a toujours été à la base du développement de toute civilisation, cette ressource étant essentielle tant au point de vue de l'alimentation et de l'agriculture qu'au niveau sanitaire. Au Québec, plus de 20 % de la population dépend de l'eau souterraine (MDDEP, 2008), une solution d'approvisionnement attrayante en raison de son abondance, de sa qualité, de sa proximité et de son accessibilité économique, surtout en région. Malgré l'importance de cette ressource, les connaissances sur les grands aquifères régionaux du Québec demeurent fragmentaires. Dans le but de poursuivre les objectifs établis en 2002 par l'adoption de la Politique nationale de l'eau du Québec, le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) mit de l'avant en 2008 le Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec (PACES). Celui-ci vise à dresser un portrait des ressources en eau souterraine, tant au niveau de la qualité de la ressource que de sa quantité.

C'est dans le cadre de ce programme du MDDEP que l'Université du Québec à Trois-Rivières a développé un projet de caractérisation des eaux souterraines du sud-ouest de la Mauricie, en collaboration avec divers partenaires du milieu. Les 20 municipalités du territoire à l'étude s'approvisionnent, en totalité ou en partie, à partir des eaux souterraines. Au total, 46 % de la population du territoire visé est approvisionnée à partir des eaux souterraines, soit plus de 100 000 habitants.

La présente étude fait partie intégrante du projet de caractérisation hydrogéologique du sud-ouest de la Mauricie et vise à construire un modèle géologique tridimensionnel cohérent des dépôts de surface du territoire.

1.2 Problématique

1.2.1 Hydrogéologie du sud-ouest de la Mauricie

Les formes du paysage actuel des Basses-Terres du Saint-Laurent consistent en un remodelé du dernier cycle glaciaire, un système sédimentaire où l'inlandsis Laurentien et ses eaux de fonte ont érodé la roche en place, remanié les sédiments pris en charge, puis redéposé le matériel détritique. L'ère glaciaire fut suivie par l'invasion marine de la Mer de Champlain et ses systèmes sédimentaires littoraux, deltaïques et d'eau profonde, et puis finalement par les dynamiques continentales non glaciaires avec la vidange des lacs proglaciaires, la sédimentation fluviale, l'activité éolienne et la formation des tourbières. On retrouve dans la région du sud-ouest de la Mauricie des vestiges complexes de ces systèmes sédimentaires, des unités glaciaires Illinoiennes jusqu'aux dunes éoliennes récentes. Puisque l'infiltration, l'écoulement et l'emmagasinement de l'eau souterraine en milieu granulaire sont fortement contrôlés par les caractéristiques physiques de ces formations géologiques (changements de milieux, hétérogénéités, discontinuités, etc.), un modèle tridimensionnel de la géologie en place est nécessaire pour mieux comprendre ces phénomènes.

Le sud-ouest de la Mauricie est ainsi abondamment pourvu d'aquifères constitués de matériaux granulaires superficiels, tels les paléodeltas des rivières Saint-Maurice et Yamachiche, la Moraine de Saint-Narcisse et les hautes terrasses sablonneuses remaniées par le littoral de la Mer de Champlain. Ces aquifères sont partiellement connus via les études hydrogéologiques réalisées dans le cadre de projets de captage locaux (aqueducs municipaux, embouteillage commercial, pisciculture et autres études d'impacts de projets privés sur les eaux souterraines), mais ces études demeurent locales et fragmentaires.

Une première cartographie régionale de la ressource en eau souterraine en Mauricie fut réalisée en 1983 (McCormack, 1983). Cet auteur recensa plusieurs sites dans le secteur entre Grandes-Piles et le fleuve Saint-Laurent présentant des vallées

enfouies remplies d'unités sablo-graveleuses aquifères. Le potentiel hydrogéologique de ces aquifères confinés n'a cependant jamais été évalué.

Une compilation des ouvrages de captage (puits de production, puits privés et ouvrages abandonnés) fut également effectuée par McCormack. L'auteur conclut que les dépôts de surface de la rive nord présentent un bon potentiel aquifère, alors que le potentiel en milieu fracturé est moindre. Denis (1974) note également que la région de Saint-Gabriel-de-Brandon et du lac Maskinongé possède un faible potentiel aquifère dans le roc, alors que les aquifères granulaires des dépôts fluvio-glaciaires, des sables deltaïques ainsi que des hautes terrasses sont des formations beaucoup plus intéressantes.

En ce qui concerne le socle rocheux, le potentiel aquifère en milieu fracturé de la région fut brièvement revisité par Hébert dans le cadre du projet de caractérisation hydrogéologique régional du sud-ouest de la Mauricie (Leblanc *et al.*, 2010). Celui-ci note que la formation des Basses-Terres du Saint-Laurent expose des roches très peu déformées. Les roches précambriennes du Bouclier Canadien ont subi davantage de déformations, datant de l'orogénie grenvillienne. Contrairement aux failles de chevauchement, ces failles normales peuvent former de vastes réseaux interconnectés qui pourraient emmagasiner de grandes quantités d'eau. La plupart de ces failles sont aujourd'hui soudées, mais certaines ont été remplies de roches calcosilicatées ou de marbre. Ces zones de brèches tectoniques forment des milieux plus poreux dotés d'un potentiel aquifère notable. Cependant, très peu de ces structures ont été mises en évidence jusqu'à aujourd'hui; les seules formations observables de ce genre ont été identifiées le long de la faille de la rivière Saint-Maurice. De plus, un patron de diaclases se serait formé lors du refroidissement de la masse magmatique dans les roches plutoniques comme la Monzonite de Saint-Didace. Ce système de diaclases constituerait un réseau susceptible de former des réservoirs contenant des volumes d'eau appréciables.

Les prélèvements d'eau souterraine les plus importants en Mauricie sont toutefois effectués dans les aquifères granulaires, les aquifères fracturés n'étant exploités que par des puits privés de faible capacité. Puisque l'écoulement et l'emmagasinement de l'eau souterraine en milieu granulaire sont fortement contrôlés par les caractéristiques physiques de ces formations géologiques (changements de milieux, hétérogénéités, discontinuités, etc.), un modèle géologique tridimensionnel exhaustif s'avère donc un outil intéressant dans une caractérisation hydrogéologique régionale.

1.2.2 Modélisation géologique et hydrostratigraphie

Les modèles géologiques tridimensionnels (3D) connaissent une popularité grandissante dans le monde de la géologie, de l'hydrogéologie et du secteur minier. Ils permettent de visualiser des objets géologiques dans un environnement digital à trois dimensions et de comprendre plus facilement les relations entre ceux-ci dans la réalité. Les modèles permettent également d'assigner différentes propriétés aux objets dans l'espace (conductivité hydraulique, porosité, etc.) et sont ainsi utiles lors de la modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine (hydrogéologie). Il s'agit d'un outil essentiel lors d'une étude hydrogéologique sur un secteur telle la rive nord du fleuve Saint-Laurent puisque les sédiments quaternaires en place contrôlent largement la recharge et les conditions de confinement de l'aquifère régional rocheux. Toutefois, la complexité stratigraphique des bassins quaternaires et la présence de formes géomorphologiques à géométrie irrégulière rendent délicats les calculs d'interpolation et d'extrapolation des données géologiques.

Plusieurs méthodes de modélisation géologique ont été employées lors d'études de caractérisation hydrogéologique régionales. Des systèmes d'information géographiques (SIG) non spécialisés (MapInfo, Surfer, ArcGIS, Grass) peuvent être utilisés pour construire des modèles géologiques tridimensionnels régionaux à l'aide de leurs outils d'interpolation/extrapolation respectifs. Leur utilisation est toutefois limitée à la création de surfaces (2D) qui doivent, par la suite, être superposées afin de créer les modèles 3D.

Les logiciels de modélisation géologique permettent la création de surfaces, la création d'objets géologiques ainsi que l'attribution de propriétés spécifiques à des éléments finis. Il s'agit d'une particularité intéressante puisque le modèle géologique créé peut servir à modéliser d'autres phénomènes qui dépendent directement des caractéristiques du sous-sol. Les logiciels les plus couramment utilisés sont souvent associés au domaine minier (*Datamine, Vulcan, gOcad*) puisqu'ils permettent de représenter avec une bonne précision les formations géologiques finies ainsi que d'autres structures comme des failles ou des linéaments. La Commission géologique du Canada (CGC) et l'Institut National de la Recherche Scientifique – Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE) utilisent *gOcad* pour leurs projets d'hydrogéologie régionale depuis 2003.

Bajc et Newton ont modélisé un système quaternaire complexe aquifère/aquitard de 19 couches dans la région de Waterloo en Ontario (Bajc et Newton, 2006). L'élévation de chaque couche matricielle produite fut interpolée à partir des données stratigraphiques des forages tout en appliquant des règles topologiques strictes dans le but d'éviter tout chevauchement (overlapping). L'interpolation est faite par un calcul de distance carrée inverse isotropique. Une valeur d'élévation est attribuée à chaque cellule pour chacune des 19 couches; si une cellule possède une valeur réelle provenant d'une observation locale (forage), la valeur interpolée est abandonnée. Une fois affiché dans un environnement 3D (*Datamine*), l'espace entre les surfaces modelées est rempli par des cellules modèles pour créer des blocs tridimensionnels. Les auteurs décrivent eux-mêmes cette technique comme très itérative dans un sens où les problèmes sont identifiés puis résolus pendant l'étape de la modélisation puisqu'il est difficile de les anticiper au préalable.

Une amélioration à cette méthode manuelle fut apportée par Tremblay *et al.* lors d'une étude hydrogéologique régionale du bassin versant de la rivière Châteauguay (Tremblay *et al.*, 2010). Leur technique met l'accent sur l'estimation de l'épaisseur des unités stratigraphiques plutôt que celle des contacts entre les unités. Ils estimèrent l'épaisseur totale de la séquence glaciaire en calculant la différence entre l'élévation du modèle numérique de terrain (MNT) et l'élévation du socle rocheux avant de calculer

l'épaisseur relative des différentes unités l'une par rapport à l'autre. Les méthodes manuelles telles que la *relative computation method* obligent cependant la conversion des données 2D continues (coupes géologiques historiques, données hydrogéophysiques, etc.) ou 3D en données 1D ponctuelles puisque l'information est intégrée sur une grille matricielle. De plus, les méthodes de modélisation basées sur la création de surfaces par interpolation ne permettent pas la création d'objets 3D intrinsèques ne se pliant pas à la géométrie et aux propriétés d'une couche régulière.

Ross *et al.* (2005) basèrent quant à eux leur modélisation sur des coupes 2D (cross sections), ce qui leur permet entre autres d'intégrer directement des données multidimensionnelles dans leur base de données. Cette technique vient également pallier au problème omniprésent, dans des bassins quaternaires, d'unités non connectées affichant des faciès pourtant similaires. En imposant à la modélisation des coupes définitives traversant le territoire à l'étude, celles-ci rendent la modélisation plus « intelligente ».

La modélisation de couches individuelles d'un modèle géologique 3D peut s'avérer une étape longue et fastidieuse, peu importe la méthode utilisée. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur la question de l'automatisation de cette tâche à l'aide d'algorithmes mathématiques, notamment avec des algorithmes « shape-based », utilisés entre autres en médecine ultrasonique pour reconstituer la forme d'organes (Treece *et al.*, 1999). Courrioux *et al.*(2001) allèrent plus loin en proposant un nouvel algorithme applicable à la géologie en gérant l'espace entre les unités géologiques avec des cellules de Voronoï. Le processus de construction développé est entièrement automatisé à l'exception d'une première discrétisation qui s'avère essentielle et d'un adoucissement final pour améliorer le rendu visuel.

En 2008, fut proposée la plus récente technique algorithmique qui utilise le *Support vector machine (SVM)*, un outil très populaire dans le domaine de l'analyse d'image et de la reconnaissance de forme (Smirnoff *et al.*, 2008). Ils obtiennent des résultats suggérant que le SVM peut reconstruire automatiquement un modèle

géologique multicouche à condition d'avoir un échantillon d'entraînement adéquat où toutes les classes sont bien représentées. Leur technique présente de multiples avantages en permettant de créer un modèle rapidement à l'aide de points épars qui ne sont pas nécessairement intégrés à des coupes. Il en résulte un modèle complexe conçu avec un minimum de prétraitement. Par contre, le procédé se veut très statistique et ne permet pas l'ajout ou l'édition d'objets géologiques particuliers.

Dans le cas du sud-ouest de la Mauricie, une méthode de construction basée sur la géostatistique dans un environnement SIG (*ESRI*) a été utilisée. Les méthodes de modélisation automatisées ne permettent pas la création de surfaces réalistes sur un territoire où on retrouve une grande diversité et variabilité des contextes géologiques. Dans la même optique, la modélisation géologique basée sur des coupes parait intéressante, mais la grande superficie du territoire à l'étude devient un obstacle à cette méthode; un trop grand nombre de coupes fiables sur différents axes seraient nécessaires pour bien représenter la variabilité géométrique de chaque unité. De plus, certains aquifères situés dans le piedmont sont très locaux, et leur géométrie et interconnectivité pourrait être mal représentée par des coupes en 2D. Le mode particulier de mise en place de certaines structures géomorphologiques (fluvioglaciaire et Moraine de Saint-Narcisse, par exemple) complique également le problème de la modélisation basée sur des coupes. Ces méthodes n'offrent pas la flexibilité d'une méthode géostatistique « manuelle », où l'on peut facilement introduire localement des données d'ajustement dans le but de mieux représenter des structures interprétées en forage ou en géophysique et ainsi intégrer la vision de l'expert en géologie dans le modèle. L'option de l'utilisation d'un logiciel spécialisé en modélisation géologique (*gOcad*) a été contemplée, mais les coûts supplémentaires, l'investissement en temps requis pour la familiarisation avec le logiciel ainsi qu'une diminution de l'interopérabilité avec le reste des données produites dans le cadre du projet nous ont ramenés vers l'environnement du SIG standard.

1.3 Objectifs

L'objectif principal de cette étude consiste à créer un modèle tridimensionnel des formations géologiques granulaires présentes sur le territoire. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Acquérir et compiler les données géologiques disponibles du territoire à l'étude
- Effectuer des travaux de terrain dans les secteurs peu connus
- Intégrer l'information géologique et hydrogéologique dans une base de données géoréférencée
- Définir les différents contextes hydrogéologiques de la région
- Modéliser la stratigraphie quaternaire du territoire à l'étude

La réalisation de ces objectifs nécessite dans un premier temps de compiler, trier, puis d'organiser les données stratigraphiques en provenance de sources variées (rapports de consultants, puits municipaux, forages pétroliers, etc.). Des travaux de terrain (forages et levés géophysiques, relevés géologiques) ont été réalisés dans les secteurs où une compréhension approfondie était requise. Toutes ces informations ont été intégrées dans une base de données associée à un système d'information géographique (SIG). Les contextes hydrogéologiques présents sur le territoire ont été définis, puis un modèle stratigraphique cohérent du sud-ouest de la Mauricie a été créé. Le résultat correspond à une réinterprétation simplifiée de la géologie quaternaire de la région à l'étude en tenant compte du rôle hydrogéologique des différentes formations.

1.4 Structure du mémoire

À l'intérieur de ce mémoire, le premier chapitre offre un bref survol du contexte dans lequel se déroule le projet de recherche et propose des objectifs de travail. Le deuxième chapitre présente un portrait physique du territoire à l'étude en faisant la

description de la géomorphologie du territoire, de la géologie du substrat rocheux régional, de la géologie des sédiments quaternaires et de la géochronologie glaciaire.

Le chapitre III est quant à lui dédié à la méthodologie appliquée dans le cadre de la réalisation de ce mémoire dans la réalisation des travaux de terrain, des travaux en laboratoire et des travaux de modélisation 3D et la méthode de validation employée.

Le quatrième chapitre présente les résultats de cette étude par contexte hydrogéologique, soit la plaine argileuse, le piedmont, le paléodelta de la rivière St-Maurice et le bouclier Laurentien. Les résultats des travaux de terrains y sont intégrés de manière à faire le pont entre la géologie du Quaternaire et l'hydrogéologie en exposant les caractéristiques hydrauliques des formations et leur rôle général dans l'écoulement souterrain.

Le chapitre V présente les résultats de la modélisation 3D, notamment en ce qui a trait à l'étendue des formations, leur distribution spatiale, leur volume approximatif, ainsi que l'erreur associée à ces estimations.

Le chapitre VI se veut une synthèse de la stratigraphie régionale, une discussion sur la validité et l'utilité du modèle produit, et une conclusion générale au sujet du travail accompli.

CHAPITRE II

SECTEUR À L'ÉTUDE

Le territoire à l'étude est situé dans le sud-ouest de la Mauricie et couvre une superficie de 3350 km^2 (Figure 2.1). Il inclut la MRC de Maskinongé, les villes de Trois-Rivières et de Shawinigan ainsi que la municipalité de Notre-Dame-du-Mont-Carmel (MRC des Chenaux). La population du territoire visé se chiffre à 223 482 habitants pour une densité d'environ 67 habitants par kilomètre carré. Ce territoire fut sélectionné notamment en raison de l'intérêt manifesté par la MRC de Maskinongé et la Ville de Trois-Rivières en ce qui concerne les eaux souterraines, mais aussi en raison de la forte proportion de la population locale desservie par des eaux souterraines tirées d'aquifères granulaires. Il est également à noter que le territoire à l'étude inclut trois bassins jugés prioritaires par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs.

Le territoire à l'étude fait partie de deux régions physiographiques, soit les Laurentides méridionales, qui couvrent la partie sud-est du Bouclier canadien, et les Basses-Terres du Saint-Laurent, qui reposent sur une plate-forme de roches sédimentaires recouverte par des dépôts meubles quaternaires.

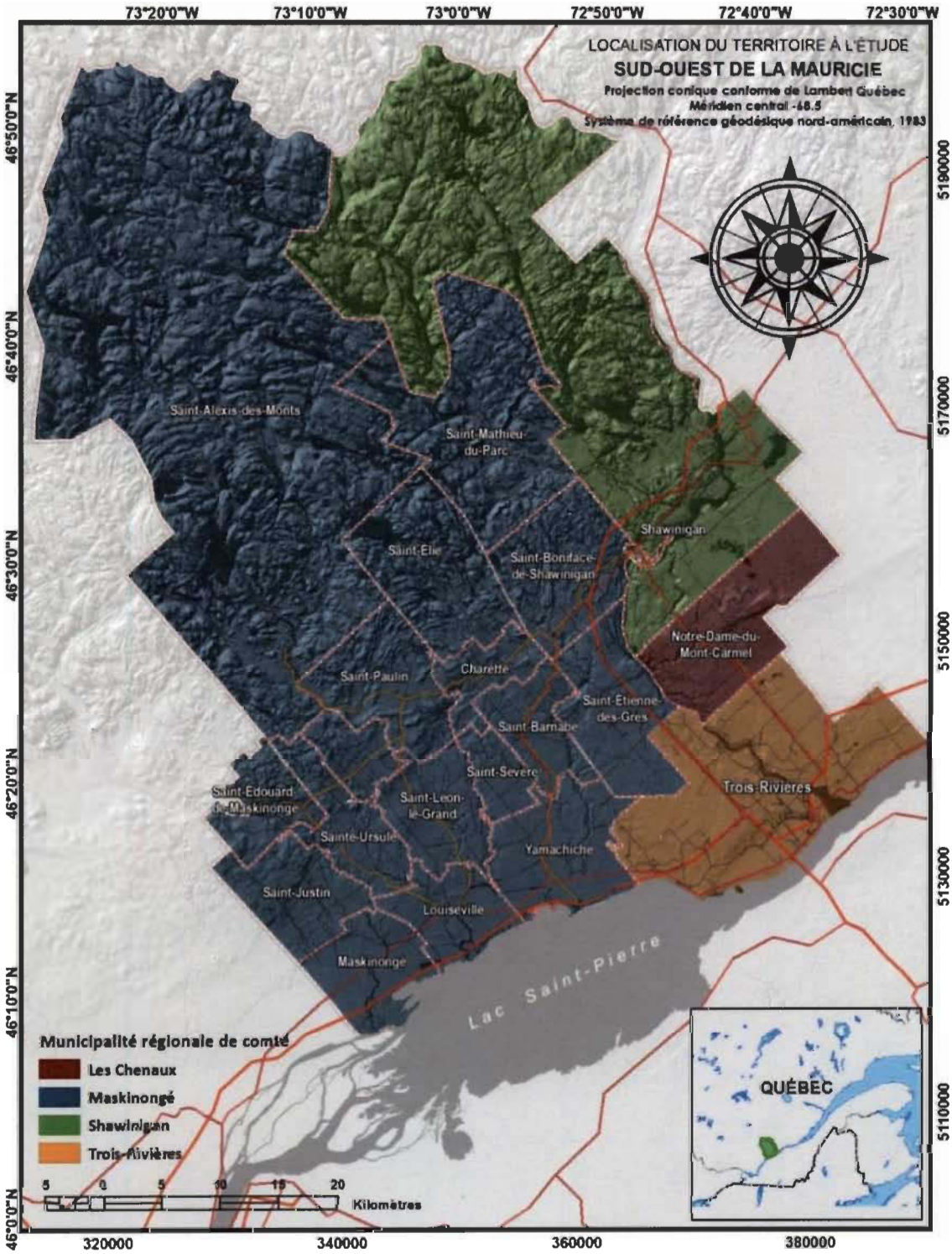


Figure 2.1 Localisation du secteur à l'étude.

2.1 Physiographie et hydrographie

La plaine argileuse des Basses-Terres du Saint-Laurent, où le relief est relativement plat, occupe environ 25 % de la superficie du territoire. À l'approche de la limite entre les Basses-Terres-du-Saint-Laurent et le Bouclier Canadien, le terrain devient plus accidenté et s'élève d'une trentaine de mètres. Au-delà de cette limite, l'altitude augmente lentement pour atteindre un sommet à environ 560 mètres dans le nord de la municipalité de Saint-Alexis-des-Monts. Cette portion du territoire est caractérisée par des collines arrondies recoupées de vallées étroites occupées par le réseau hydrographique. Celui-ci est constitué de neuf principaux cours d'eau, tous tributaires du fleuve Saint-Laurent, incluant la totalité des bassins versants de la rivière du Loup, des rivières Yamachiche (Petite et Grande), du ruisseau Saint-Charles, de la rivière du Bois-Blanc et de la rivière aux Glaises et une partie des bassins versants de la rivière Maskinongé et de la rivière Saint-Maurice et de la rivière Champlain. Le Tableau 2.1 présente la superficie de la portion des bassins versants incluse dans le territoire à l'étude.

Tableau 2.1
Superficie de la portion des bassins versants incluse dans le territoire à l'étude

Bassin	Aire de drainage (km^2)	Pourcentage du territoire
Rivière Saint-Maurice	1513	42,6
Rivière du Loup	1212	34,1
Rivière Yamachiche	264	7,4
Rivière Maskinongé	171	4,8
Rivière Champlain	131	3,7
Petite Rivière Yamachiche	109	3,1
Ruisseau Saint-Charles	68	1,9
Rivière du Bois-Blanc	50	1,4
Rivière aux Glaises	34	1,0

2.2 Géologie du substratum rocheux

Une compilation géologique du socle rocheux a été réalisée dans le cadre du projet de caractérisation des eaux souterraines du sud-ouest de la Mauricie (Hébert, 2010). Elle fut essentiellement réalisée à partir des données des travaux de Clark et Globensky (Clark et Globensky, 1976) sur le feuillet 31I07, Globensky (Globensky, 1987) pour les feuillets, 31I02, 31I03, 31I06 et 31I07, et Nadeau et Brouillette (1995) pour le feuillet 31I. Une carte de la géologie du socle rocheux réalisée dans le cadre du projet de caractérisation hydrogéologique du sud-ouest de la Mauricie est disponible en Annexe A.

Le socle rocheux de la région à l'étude est composé de roches appartenant à deux provinces géologiques distinctes; la plateforme sédimentaire d'âge Paléozoïque des Basses-Terres du Saint-Laurent au sud, et le socle cristallin d'âge Précambrien de la province géologique du Grenville au nord. En général, le socle rocheux affleure dans le secteur nord du territoire (bien qu'il soit souvent recouvert d'une mince couche de till), tandis qu'il est recouvert par une forte épaisseur de dépôts meubles dans le secteur sud.

2.2.1 Basses-Terres du Saint-Laurent

Les roches sédimentaires des Basses-Terres sont principalement constituées de grès, calcaires et shales d'âge Ordovicien (450 millions d'années) déposés en milieu marin. Certaines des formations géologiques renferment d'importantes concentrations de gaz naturel et on y a décelé des suintements de pétrole (Globensky, 1987). En suivant un axe perpendiculaire au fleuve Saint-Laurent, les roches sont plus jeunes au sud et de plus en plus vieilles en montant vers le bouclier Laurentien. Mis à part une petite écaille de dolomie appartenant à la Formation de Beauharnois du Groupe de Beekmantown, située dans le secteur des Chutes-de-Sainte-Ursule sur la rivière Maskinongé, les principales unités en contact avec les roches de la province de Grenville au nord appartiennent au Groupe de Black River.

Le Groupe de Black River est représenté, à l'est de la rivière Saint-Maurice, par la formation de Leray. Celle-ci est composée de calcaire plus ou moins gréseux déposé en milieu peu profond de type lagon. Les fossiles y sont abondants. À l'époque où ces sédiments se sont déposés, une mer recouvrait les vallées de l'Outaouais, du Saint-Laurent et du lac Champlain. Vers l'ouest, au même niveau stratigraphique que les formations précédentes, se trouve la Formation de La Gabelle de part et d'autre de la rivière Saint-Maurice. Cette formation est constituée de grès, ce qui démontre aussi que le niveau de la mer y était très peu profond.

Le Groupe de Trenton, dont les sédiments se sont déposés en eau moyennement profonde sur une plate-forme océanique, se retrouve dans la partie centrale des Basses-Terres du Saint-Laurent. À la base se trouve la Formation de Fontaine qui constitue une mince unité de calcaire cristallin. La Formation de Deschambault jouxte la précédente. Elle est composée de calcaire cristallin à fossiles, dont principalement des crinoïdes. Au-dessus se trouve la formation de Neuville qui comprend deux membres, Saint-Casimir, composé de calcaire cristallin micritique et nodulaire, et Grondines, composé de calcaire argileux et de shale.

Dans la partie sud des Basses-Terres du Saint-Laurent, le Groupe d'Utica surmonte celui de Trenton et renferme un shale typique d'une sédimentation en eau profonde, qui correspond probablement à un approfondissement du bassin de sédimentation. Ce shale plus ou moins calcareux renferme une quantité appréciable de gaz naturel.

Finalement, en bordure et sous le lac Saint-Pierre, le Groupe de Lorraine qui comprend la Formation de Nicolet, est recoupé. Cette formation est composée de shale gris et de grès qui se seraient déposés près d'un littoral ou dans un milieu deltaïque.

2.2.2 Grenville

La Province de Grenville correspond à la collision de deux continents qui a engendré la formation d'une chaîne de montagnes de type Himalayenne. Aujourd'hui, en

raison des multiples phases d'érosion qui ont prévalu depuis, les roches du socle qui sont observées représentent la racine de cette chaîne de montagnes. En effet, on observe dans les roches plutoniques des minéraux qui se sont formées sous des conditions de température et de pression équivalentes à une profondeur d'environ 20 à 25 kilomètres. Les roches grenvilliennes ont été subdivisées en trois domaines structuraux (Nadeau *et al.*, 2006). Le Domaine de Portneuf-Mauricie se situe à l'est et renferme les roches les plus vieilles, tandis que celui de Mékinac-Taureau occupe le centre et le nord. Ces deux domaines appartiennent à la ceinture allochtone polycyclique (Rivers *et al.*, 1989), car elles ont été transportées et elles ont été soumises à plusieurs cycles orogéniques. Le Terrane de Morin, plus jeune, se trouve à l'ouest et au sud de la région et appartient à la ceinture allochtone monocyclique. Il s'agit de roches transportées et ayant subi un seul cycle orogénique soit, l'orogénie grenvillienne.

2.2.3 Aspects hydrogéologiques

Actuellement, les réseaux de fissures du socle rocheux sont exploités seulement à petit débit pour des fins d'alimentation à de résidences isolées à l'aide de puits individuels.

Les failles normales les plus proéminentes du Bouclier affichent généralement un patron orienté NE-SO ou NNO-SSE. Elles sont associées à la formation du Graben du Saint-Laurent, une période d'extension au cours de laquelle la vallée du Saint-Laurent s'est formée lors de l'effondrement de sa partie interne (Hébert, 2010). À la même époque se formaient les grabens du Saguenay et d'Ottawa-Bonnechère, le long de la rivière des Outaouais. Contrairement aux failles de chevauchement, ces failles normales peuvent former des réseaux interconnectés qui pourraient emmagasiner de grandes quantités d'eau. Dans les roches plutoniques comme la Monzonite de Saint-Didace, un patron de diaclases se serait formé lors du refroidissement de la masse magmatique. Ce système de diaclases constituerait un réseau souterrain susceptible de former des réservoirs renfermant des volumes d'eau appréciables.

Vu l'épaisseur importante des dépôts meubles dans la région à l'étude, les prélèvements d'eau souterraine dans les zones les plus densément peuplées se font surtout dans les dépôts meubles (Leblanc *et al.*, 2010).

2.3 Géologie du Quaternaire

2.3.1 Formations superficielles

L'étude de la géomorphologie et des formations superficielles de la région du sud-ouest de la Mauricie a connu des avancées depuis les trente dernières années. Les travaux de Denis (1974) ont permis d'obtenir une première cartographie de la géologie du Quaternaire du secteur de Saint-Gabriel-de-Brandon, couvrant une partie du secteur ouest du territoire à l'étude. Les efforts de cartographie des dépôts de surface de la Commission géologique du Canada (CGC) ont permis de couvrir les secteurs de Shawinigan (Bolduc, 1999a) et de Trois-Rivières (Bolduc, 1999b), et d'exposer l'extension septentrionale des argiles et silts de la Mer de Champlain pour une première fois dans la région. Suivirent les travaux de cartographie des formations superficielles du secteur nord du Lac Saint-Pierre de Lamarche (2005) qui portèrent une attention particulière à l'évolution sédimentologique des rives du lac fluvial ainsi qu'aux variations récentes du niveau de base du fleuve Saint-Laurent. Ces travaux permirent de décrire les fluctuations complexes du niveau du fleuve dans un passé récent (moins de 8 000 ans). Avant le début du projet de caractérisation hydrogéologique du sud-ouest de la Mauricie, les formations superficielles du secteur nord-ouest du territoire n'avaient jamais été cartographiées autrement que par des inventaires forestiers. Les travaux de Hardy (Leblanc *et al.*, 2010) dans le cadre de ce projet ont permis de compléter la cartographie des formations superficielles et d'uniformiser la cartographie de l'ensemble du territoire.

La répartition spatiale des dépôts meubles est très hétérogène (Figure 2.2). En général, le socle rocheux (Rn) affleure dans le secteur nord du territoire à l'étude. Il est par endroits recouvert par un mince placage de till d'ablation en couverture discontinue

(Tm) et parfois remanié (Tr) (Bolduc, 1999a). À ces latitudes, seules les vallées des rivières Maskinongé, du Loup, Yamachiche et Saint-Maurice présentent des faciès plus complexes de sédiments silo-argileux et d'alluvions récentes (At) remaniées par les glissements de terrain (Mg) ou par des évènements chaotiques (Denis, 1974).

À l'interface entre le Bouclier Précambrien et la plateforme sédimentaire des Basses-Terres se trouve la formation morainique de Saint-Narcisse, qui traverse le territoire de manière discontinue sur un axe presque parallèle à celui du fleuve. Ces sédiments mis en place au front du glacier lors d'une réavancée sont constitués de sable et graviers mêlés à un till (GxT), et peuvent atteindre plus de 50 mètres d'épaisseur (Parent et Occhietti, 1988; Bolduc, 1999b; Occhietti, 2007). Des sédiments fluvioglaciaires (Go) et juxta glaciaires (Gx) se trouvent en marge de la moraine, bien que les dépôts situés sous la limite marine sont souvent remaniés par l'action des vagues et des courants de submersion et d'exondation (Bolduc, 1999b).

Le retrait progressif du glacier entraîna une invasion marine (épisode de la Mer de Champlain) qui mit en place des sédiments littoraux (Mb) ainsi que des sédiments silteux d'eau profonde (Ma). Ce système créa une bande de plusieurs kilomètres de largeur d'immenses plaines fertiles parallèlement au fleuve Saint-Laurent. Des deltas marins (Md) furent également mis en place à l'embouchure des vallées.

Le secteur Est du territoire à l'étude se caractérise plutôt par un modelé deltaïque récent, avec les alluvions sableuses de la rivière Saint-Maurice (Ap) ainsi que des terrasses fluviales récentes (At) représentant les niveaux anciens du Proto-Saint-Laurent (Lamarche, 2005). L'épaisseur des dépôts de terrasses diminue avec l'altitude, témoignant du changement de régime du Proto-Saint-Laurent, passant d'un système d'accumulation à un d'érosion. Les sables d'exondation de milieu lacustre du lac à Lampsilis (Lb et Ld), l'étendue d'eau qui remplace la Mer de Champlain vers 9,5 ka BP, sont observables jusqu'à une altitude d'environ 65 mètres (Parent *et al.*, 1985). L'activité éolienne qui suivit la fin de la glaciation ne fut pas négligeable; l'absence de

végétation suite au retrait de l'inlandsis a permis la formation de dunes (E) par les vents adiabatiques, en général suivant un axe sud-ouest (Lamarche, 2005).

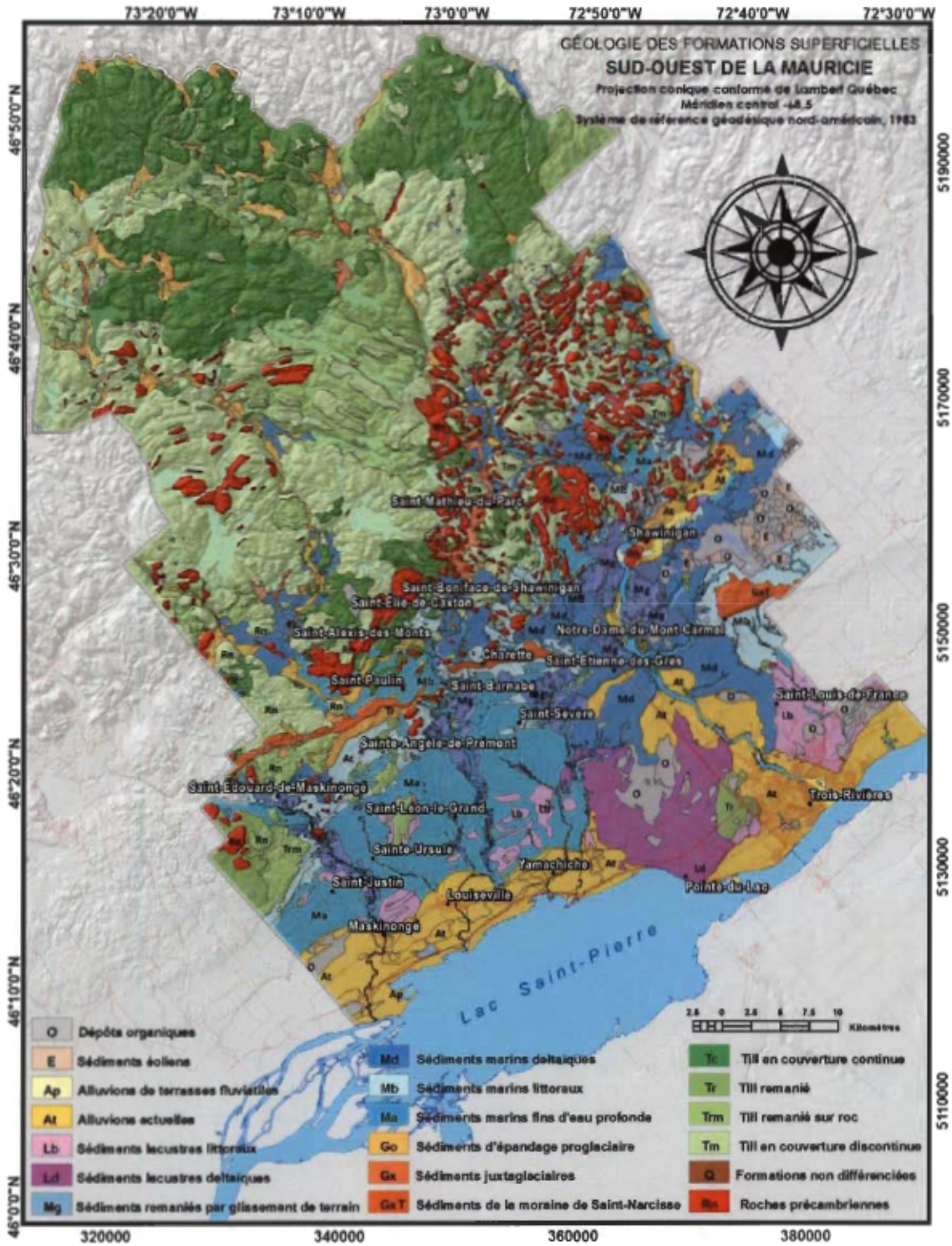


Figure 2.2 Géologie des formations superficielles du sud-ouest de la Mauricie.

On note également la présence de tourbières à dépôts organiques (O) sur de grandes superficies dans le secteur nord de Trois-Rivières ainsi que dans le secteur de Shawinigan, au sud de la rivière Saint-Maurice. Elles occupent des dépressions tapissées de matériaux peu perméables, creusées par l'action glaciaire ou d'anciens chenaux des cours d'eau actuels, qui furent ensuite scellées par des silts et argiles lacustres et marines.

2.3.2 Stratigraphie régionale

La stratigraphie de la région a été exposée à plusieurs endroits. La Moraine de Saint-Narcisse et ses faciès glaciaire et fluvioglaciaire fut premièrement décrite par Denis (Denis, 1974) dans le secteur de Saint-Gabriel. Le long des berges de la rivière Saint-Maurice, Occhietti (1980) mit en évidence une unité sablonneuse d'épaisseur considérable, les sables des Vieilles Forges, une unité de sédimentation complexe antérieure à la dernière glaciation. L'auteur développa une coupe conceptuelle composite à l'aide de trois autres coupes importantes retrouvées sur le secteur; le secteur de la Gabelle (marin deltaïque), la coupe de Yamachiche (glacio-marin) et la coupe de Bournival (glaciaire). Occhietti s'attarde également à la Moraine de Saint-Narcisse en revisitant les secteurs de Charette, Mont-Carmel et Shawinigan (Occhietti, 2007), tous décrits d'un point de vue géomorphologique plusieurs années plus tôt par Gadd et Karrow (1959). La séquence composite modifiée d'Occhietti *et al.* (1996) résume la stratigraphie régionale (Figure 2.3)

2.3.2.1 Séquence glaciaire

Dans la partie sud du territoire, la plateforme sédimentaire du Saint-Laurent est recouverte d'une épaisse couche de sédiments meubles pouvant atteindre plus de 150 mètres d'épaisseur (Leblanc *et al.*, 2010). La série stratigraphique la plus complète a été observée le long de la rivière Saint-Maurice par Occhietti en 1980. Il note que la série de Trois-Rivières, une séquence régionale composite bâtie à l'aide de 4 coupes identifiées sur le territoire, semble couvrir intégralement le Stade du Wisconsinien.

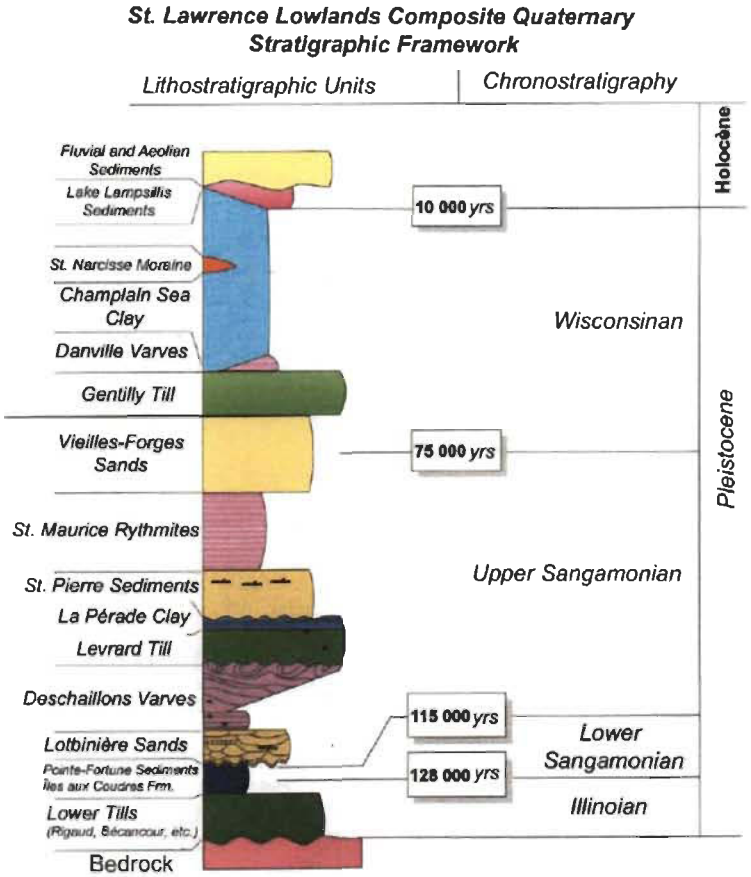


Figure 2.3 Séquence stratigraphique composite des Basses-Terres du Saint-Laurent (Modifié de Occhietti *et al.* 1996).

La séquence glaciaire est caractérisée par la présence du socle rocheux d'origine sédimentaire à la base, recouvert par un faciès fluviatile complexe à lithozones multiples (Ferland et Occhietti, 1990) dominées par une matrice silteuse mêlée à des lits de sable massif moyen (Occhietti, 1982). Cette unité est corrélée avec les sédiments de Saint-Pierre (Gadd et Karrow, 1959), une unité datant de l'épisode interglaciaire du Sangamonien supérieur, observable de façon discontinue sur un axe de 400 kilomètres en bordure du lit actuel du fleuve Saint-Laurent (Ferland et Occhietti, 1990). Des indices tels la nature de la lithologie et la forme des structures sédimentaires des lits de sable suggèrent un important transport fluviatile dans les chenaux d'un système ancien comparable à celui du Saint-Laurent actuel (Gadd, 1971).

L'unité sus-jacente, contenant des varves de neuf mètres d'épaisseur, a été initialement corrélée aux Varves de Deschaillons (Karrow *et al.*, 1975; Occhietti, 1982).

Suite à une datation, cette unité de rythmites postérieures aux sédiments de Saint-Pierre a été nommée Rythmites du Saint-Maurice puisqu'elle correspond à un épisode lacustre plus jeune que celui des Varves de Deschaillons (Besré et Occhietti, 1990). Ces dépôts stratifiés montrent une sédimentation contrastée à deux saisons avec une augmentation de l'épaisseur des lits d'été et d'hiver synchrone. Les lits passent de quelques millimètres d'épaisseur à la base de l'unité à plus de 20 centimètres au contact supérieur, témoignant de l'augmentation de la quantité de matériel pris en charge en amont. Les apports en eau seraient d'origine double, soit des apports distaux provenant de la désintégration du glacier continental, mais également des apports de bassins versants en régime nival (Clet et Occhietti, 1996). Ces lamines de sable proviennent d'un épisode sédimentaire lacustre d'eau profonde, où du matériel s'est déposé dans un réservoir appelé le Lac de La Vérendrye pendant au moins 1000 ans (Besré et Occhietti, 1990).

Les Rythmites du Saint-Maurice sont surmontées dans la stratigraphie régionale par les sables des Vieilles Forges, un milieu à triple lithozone (lacustre, deltaïque puis proglaciaire) de sables silteux stratifiés. La lithozone inférieure est composée de lits de sable silteux disposés dans une forme conforme aux rythmites sous-jacentes, et est donc corrélée à un épisode lacustre (Clet et Occhietti, 1996). Au-dessus se retrouve un faciès sableux d'épandage deltaïque, surplombé par un horizon comportant des chenaux de sédimentation avec des lits de sable grossier et de gravier, très caractéristique d'un faciès proglaciaire.

L'unité géologique surmontant les Sables des Vieilles Forges est le Till de Gentilly, bien que la limite entre les deux formations est souvent indistincte (Occhietti, 1980). Le Till de Gentilly se présente comme un till franc à matrice sableuse avec de petits cailloux, du matériel détritique arraché aux formations sédimentaires des Basses-Terres du Saint-Laurent et du Bouclier précambrien. Les variations compositionnelles de ce till reflètent les différentes variations de l'apport sédimentologique tout au long du stade glaciaire (60 000 BP ou plus tard) jusqu'à la fin de la déglaciation (11 500 BP). Seule la base du till, massive et dépourvue de cailloux, témoigne de l'incorporation de sédiments plus homogènes à la base du glacier. Les tills

post-Saint-Pierre sont généralement associés directement au till de Gentilly, (Gadd, 1971) mais cette unité demeure tout de même relativement méconnue (Clet et Occhietti, 1996).

2.3.2.2 Moraine de Saint-Narcisse

Le complexe de Saint-Narcisse est une zone d'accumulation de matériel détritique arraché et pris en charge par le glacier continental qui forme une bande de largeur variable de 750 kilomètres de longueur suivant la marge méridionale des Laurentides (Occhietti, 2007). Il s'agit d'une moraine frontale mise en place lors d'une réavancée du front glaciaire au cours de l'épisode de la Mer de Champlain t dont l'âge se situe entre 10 700 et 10 500 BP (12,7-12,4 ka cal). La limite d'avancée de l'inlandsis Wisconsinien vers le SE-SSE a comme caractéristique d'être localisée le long du contact structural entre le Bouclier canadien Précambrien et la plateforme sédimentaire du Saint-Laurent (Figure 2.4), ce qui pourrait être expliqué par la présence d'un réseau de fractures parallèles au front glaciaire (Occhietti, 1980). D'un point de vue géomorphologique, la moraine frontale est caractérisée par des bourrelets morainiques formant des deltas fluvioglaciaires perchés fortement remaniés ainsi que des zones d'épandage glaciomarines enfouies (Occhietti, 1980).

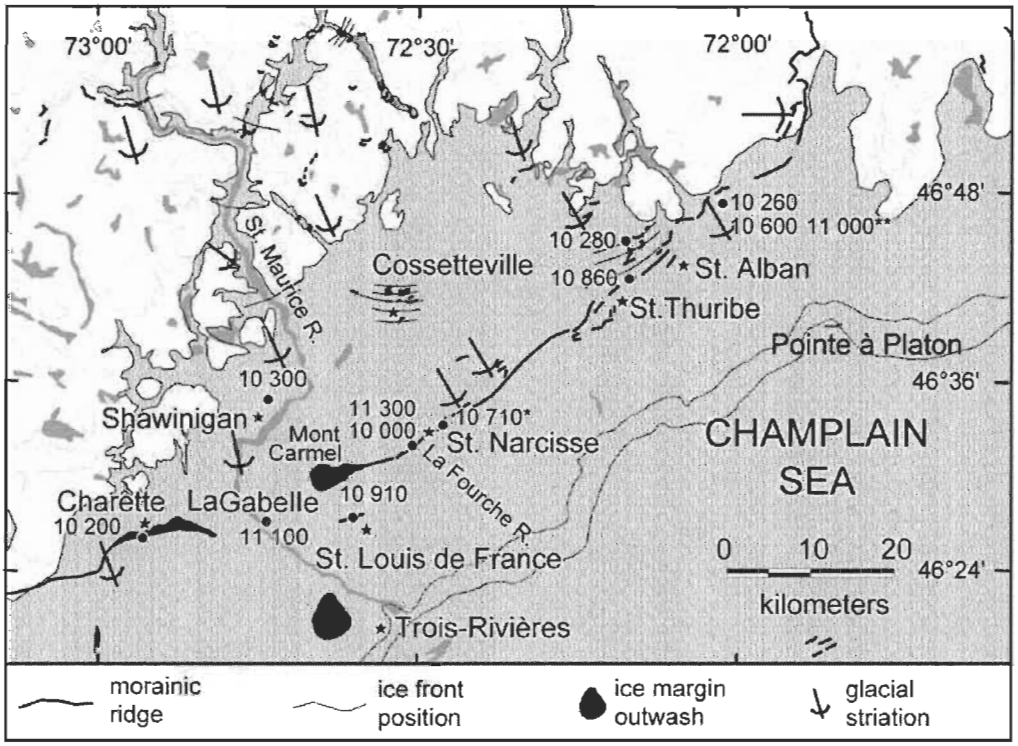


Figure 2.4 Extension septentrionale maximale de l'invasion de la Mer de Champlain et localisation du complexe morainique de Saint-Narcisse (Occhietti, 2007).

La moraine est construite sur des sédiments fluvioglaciaires et marins (Denis, 1974; Occhietti, 1980). Denis (1974) propose une première description lithostratigraphique de la moraine et de ses différents faciès après avoir réalisé des forages sur la formation dans la région de Saint-Gabriel, 10 kilomètres à l'ouest des limites de la région à l'étude ici. Ces forages exposent une couche d'argile massive de plus de 50 mètres d'épaisseur reposant directement sur le roc. La série est suivie par une couche de gravier de 3 mètres, surmontée par une couche de diamicton parfois blocailleux d'environ 15 mètres d'épaisseur, recouverte au sommet d'une mince couche de gravier.

Les sédiments terminaux de la moraine montrent des signes de remaniement intense, soit par des eaux de fonte et le ruissellement de bassin ou par les eaux marines provenant de l'invasion de la Mer de Champlain. Une coupe trouvée dans le secteur de Saint-Gabriel expose un till sableux grisâtre à structure écaillée, un dépôt caractéristique

du complexe de Saint-Narcisse indiquant un mode d'écoulement glaciaire en compression où la glace se désintègre verticalement (Occhietti, 1980).

La classification hydrostratigraphique de la Moraine de Saint-Narcisse est difficile, puisqu'on y retrouve des matériaux de granulométrie variable et de propriétés physiques diamétralement opposés. À l'échelle régionale, la structure est toutefois considérée comme un aquifère puisque la plupart des municipalités occupant la plaine située au nord du lac Saint-Pierre soutirent leur eau potable de cette formation ou de ses environs immédiats.

2.3.2.3 Évènements sédimentaires post glaciaires

Une phase sédimentaire non glaciaire d'environ 12 000 ans suivit le retrait progressif de l'Inlandsis Wisconsinien. La masse du glacier enfonçant considérablement le continent, le territoire fut envahi par les eaux salées de la Mer de Champlain jusqu'à des altitudes équivalant à 200 mètres au-dessus du niveau actuel de la mer (Occhietti, 1982). Cet épisode marin profond ayant duré de 2000 et 2700 ans (13 ka^{14}CBP- 10,5ka^{14}C BP) permit la déposition des particules les plus fines fournies par le glacier et est à l'origine des argiles marines fossilifères que l'on retrouve sur le territoire.

Le relèvement isostatique étant directement fonction du retrait du front glaciaire, la fonte de l'inlandsis laurentien évacua progressivement les eaux marines qui avaient envahi la plaine du Saint-Laurent ainsi que les sorties de vallées des principales rivières. Le Lac à Lampsilis succéda à cette invasion marine en établissant un milieu de sédimentation de plan d'eau lacustre profond, et ce durant une période où le glacier reculait de plusieurs centaines de mètres par année. Cette transition marine-lacustre est établie à environ 9,8 ka^{14}C BP (Richard et Occhietti, 2004). La limite exacte entre les deux milieux sédimentaires est cependant difficile à évaluer puisque leurs caractéristiques sédimentologiques sont identiques, bien que la faune soit variable. Trois niveaux distincts du Lac à Lampsilis ont été identifiés jusqu'à maintenant, bien

que leur âge soit toujours contesté. Les âges généralement retenus dans la littérature sont ceux établis par Parent *et al.* (1985) obtenus à partir de la courbe d'émersion : le niveau de Rigaud, 60 mètres (9,8 ka ^{14}C BP); Montréal, 31 m (8,8 ka ^{14}C BP); Saint-Barthélemy, 20 m (8 ka ^{14}C BP).

Lorsque l'apport en eau de fonte diminua, après la formation de la terrasse de Saint-Barthélemy, le lac Lampsilis laissa progressivement sa place au Proto-Saint-Laurent ainsi qu'aux ancêtres des rivières Maskinongé, du Loup et Saint-Maurice. Cet épisode lacustre majeur recouvra une partie étendue du territoire de sables deltaïques, et est également marqué par une activité éolienne accrue en raison de l'absence initiale de végétation, comme en témoignent les nombreuses dunes présentes au sud de la Moraine de Saint-Narcisse. Le paléo-delta de la rivière Saint-Maurice et les remaniements fluviatiles subséquents constituent un aquifère régional exploité pour l'alimentation en eau potable de plusieurs municipalités, dont la Ville de Trois-Rivières. Les zones moins bien drainées sont occupées par des tourbières.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

La problématique de la modélisation géologique 3D de la présente étude est abordée ici de la manière suivante. Premièrement, la cartographie des dépôts de surface a été révisée et complétée lorsque nécessaire. Les coupes historiques ont été revisitées, permettant la construction de colonnes stratigraphiques de référence reflétant bien les réalités géologiques du sud-ouest de la Mauricie. La compilation des données de forages existants a permis d'évaluer de façon préliminaire l'étendue et la géométrie des unités géologiques identifiées sur le territoire. Diverses campagnes de travaux sur le terrain ont été réalisées dans le cadre du projet de caractérisation hydrogéologique du sud-ouest de la Mauricie entre l'été 2010 et l'hiver 2012, incluant des relevés quaternaires, des relevés géophysiques ainsi que des forages, tous réalisés dans le but de mieux définir les contacts géologiques et les caractéristiques physiques des unités. Des analyses granulométriques ont été effectuées sur les échantillons prélevés lors des forages dans le but de mieux identifier les faciès hydrostratigraphiques et de les corréler entre eux. Des datations au radiocarbone ont été effectuées dans le but de mieux reconstruire les paléo-environnements.

3.1 Travaux sur le terrain

Diverses investigations géologiques ont été réalisées sur le territoire afin de préciser la séquence lithostratigraphique des différents contextes hydrogéologiques du sud-ouest de la Mauricie. La localisation des relevés sur le terrain, des travaux de géophysique ainsi que des forages réalisés est présentée à la Figure 3.1.

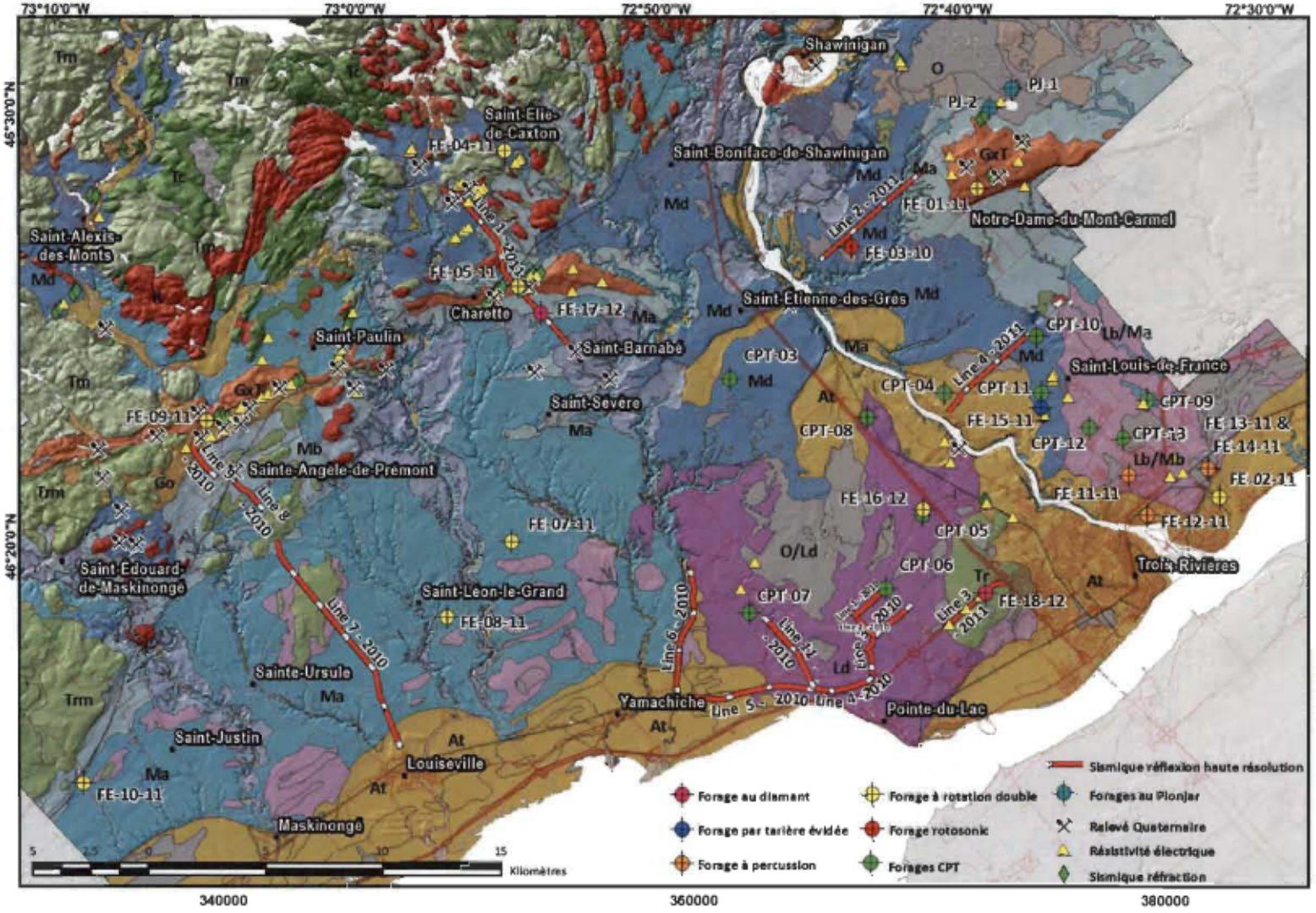


Figure 3.1 Localisation des travaux sur le terrain.

En général, les forages et la géophysique ont été réalisés dans les secteurs où la densité de forages existants était faible. Dans le secteur du paléodelta (Trois-Rivières et Cap-de-la-Madeleine), des forages au piézocône (voir 3.1.5.1) ont été effectués dans le but d'obtenir un profilage granulométrique de l'aquifère supérieur. Les tracés de sismique réflexion haute-résolution ont été relevés dans le but de mieux documenter les transitions entre les différents contextes du territoire.

3.1.1 Uniformisation de la cartographie des dépôts de surface

Au cours du mois de mai 2010, des relevés terrain de géologie du Quaternaire ont été effectués sur l'ensemble du territoire et, plus spécifiquement, à la jonction des zones cartographiées par le passé par des auteurs différents. En effet, une portion significative du territoire à l'étude a été cartographié par le passé par divers auteurs (Denis, 1971; Lamarche, 2005), à l'exception des portions nord et nord-ouest qui n'ont pas bénéficié d'un programme cartographique spécifiquement appliqué à la géologie du Quaternaire.

Quatre jours de relevés sur le terrain ont été effectués, suivi d'une photo-interprétation des photographies aériennes à l'échelle du 1 : 40 000 couvrant le secteur. Les photographies aériennes interprétées ont par la suite été orthorectifiées, assemblées en une mosaïque et vectorisées. La légende des unités des formations superficielles de la Commission géologique du Canada (Parent *et al.*, 2009) a été utilisée pour l'identification des unités meubles du secteur à l'étude. Ce travail a été effectué en collaboration avec François Hardy (Génivar).

Dans le but d'obtenir un document cartographique cohérent de la zone d'étude, un travail d'uniformisation a ensuite été effectué. Les documents cartographiques disponibles ont été réalisés à des époques différentes et les cadres géologiques ont grandement évolué au cours des vingt dernières années. Ainsi, la cartographie de Denis (1971) a d'abord été actualisée aux normes cartographiques récentes et classifiée à nouveau selon la nouvelle légende de la CGC. Les limites cartographiques ont ensuite été uniformisées en effectuant une réinterprétation des secteurs mitoyens des documents

cartographiques existant ainsi que les secteurs communs entre ces derniers et la cartographie nouvellement complétée de l'ouest et nord-ouest du territoire à l'étude.

Une modification aux unités *Tr* et *Trm* a été apportée dans le cadre du présent projet. Les unités *Tr* et *Trm* correspondent aux secteurs de till remanié et de till mince remanié. Les secteurs localisés sur le Bouclier Canadien sont la plupart du temps recouverts d'une mince couche de sédiments qui ne parvient pas à drainer les eaux de fonte. L'érosion qui s'y produit est variable et peut entraîner un léger remaniement jusqu'à l'érosion complète du substrat meuble et entailler le substrat rocheux dans certains cas. Dans le nord-ouest de la zone d'étude, plusieurs axes de drainage d'eau de fonte sous-glaciaire ont affecté la couverture de till déjà en place en le remaniant.

3.1.2 Sismique réfraction

Entre mai et août 2010, 50 relevés de sismique réfraction ont été réalisés sur le territoire afin de préciser la séquence lithostratigraphique des contextes hydrogéologiques types identifiés (Figure 3.1). Les relevés ont été effectués par Brian Bélisle (étudiant au BAC À l'UQAM), Fanny Fortier-Fradette (finissante, CÉGEP de Thetford-Mines) et Philippe Davignon (finissant, CÉGEP de Thetford-Mines), sous la supervision de Yves Leblanc de l'UQTR.

Les travaux ont été réalisés à l'aide d'un marteau mécanique PEG-40 provenant de *The RT Clark Compagnies inc.* alimenté par une batterie marine à décharge profonde et monté sur une remorque de transport (Figure 3.2), équipement loué au CÉGEP de Thetford-Mines. Les relevés ont été effectués en déployant un réseau de 24 géophones espacés de dix mètres dans le sol et reliés au sismographe récepteur, puis en envoyant une onde sismique dans le sol à l'aide du marteau mécanique. De façon générale, une onde de choc était envoyée à chaque extrémité du dispositif de géophones, permettant ainsi d'obtenir deux sondages espacés de 240 m à chaque dispositif de géophones installé.



Figure 3.2 Système de sismique réfraction.

L'interprétation des sismogrammes obtenus à chaque sondage a permis de déterminer la vitesse de propagation des ondes dans chacun des milieux géologiques traversés, ainsi que l'épaisseur de chacun de ces milieux géologiques. Par la suite, un type de matériau a été attribué à chacun des milieux recoupés en fonction des vitesses théoriques de propagation des ondes. Les interprétations ont ensuite été validées à l'aide de données existantes de forages situés dans un rayon de l'ordre de 500 m des relevés effectués.

3.1.3 Résistivité électrique

Entre mai et août 2010, 75 sondages électriques ont été réalisés sur le territoire afin de préciser la séquence lithostratigraphique des contextes hydrogéologiques types (Figure 3.1). Les travaux ont été réalisés avec un transmetteur TX-II alimenté par génératrice de 2 000 W de *GDD* Instrument (Figure 3.3). La réception du courant a été enregistrée par un récepteur PP GRX-832 à 8 branchements, également de *GDD*

Instrument. Les relevés ont été effectués à l'aide de quatre électrodes implantées dans le sol et reliées à l'appareil récepteur utilisé pour la mesure de la résistance électrique. Les électrodes étaient configurées en mode opératoire de Wenner (Figure 3.4), habituellement recommandé pour les investigations ciblant des structures horizontales.



Figure 3.3 Système de résistivité électrique GRX-832 de GDD Instruments.

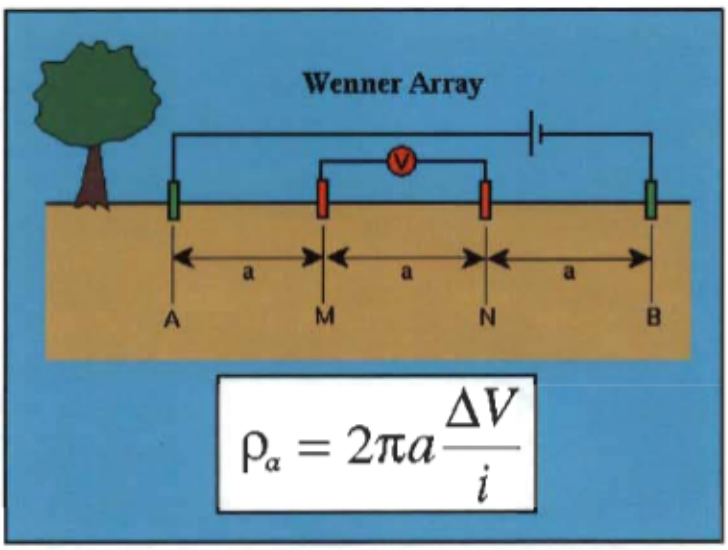


Figure 3.4 Dispositif de Wenner.

Dans cette configuration, les électrodes d'injection se situent de chaque côté du point de mesure. Afin d'obtenir un profilage vertical de la résistivité électrique, une succession de mesures sont effectuées en augmentant à chaque fois la longueur du dispositif, de façon à augmenter graduellement la profondeur d'investigation du courant électrique. Chaque valeur de résistivité apparente est affectée à une pseudo profondeur relative. L'interprétation des données a été effectuée de façon préliminaire dans un chiffrier Excel en positionnant les contacts aux points d'inflexion des courbes de résistivité en fonction de la profondeur, tandis que le type de matériau a été déterminé en fonction des résistivités théoriques des sols. Les interprétations ont ensuite été validées à l'aide de données existantes de forages situés dans un rayon de l'ordre de 500 m des relevés effectués.

3.1.4 Sismique-réflexion haute-résolution

Un total de 63 km linéaires de sismique-réflexion haute-résolution a été réalisé en collaboration avec la Commission géologique du Canada en automne 2010 et 2011. Ces levés ont été effectués dans la plaine argileuse entre Louiseville et Saint-Angèle de Prémont, dans le secteur ouest du paléo-delta du Saint-Maurice, près de Pointe-du-Lac, sur l'affleurement de till dans le secteur de Trois-Rivières, et également dans l'axe de la Moraine de Saint-Narcisse à Charette. Les tracés des relevés sont localisés sur la Figure 3.1.

Les levés ont été réalisés à l'aide d'un dispositif de géophones à trois composantes fixes sur des luges espacées de 1,5 mètre appelé *Landstreamer* et reliées à un véhicule vibreur tout-terrain (*Minivibe II from Industrial Vehicles International Inc.*) pour générer le signal vibratoire dans une séquence de fréquences allant de 20 Hz à 240 Hz (Figure 3.5). La distance d'espacement des points de tirs était fixée à 4,5 m, mesurée par GPS dans le camion-tracteur.



Figure 3.5 Système de sismique réflexion haute-résolution de type *Minivibe*.

La technique de sismique-réflexion consiste à mesurer le temps requis par une vibration (énergie acoustique) pour traverser le matériel sous la surface et être réfléchie pour remonter ensuite, où le signal est capté par des géophones. L'énergie est reflétée ou réfractée à la transition entre deux médias, où il y a un changement d'impédance acoustique associé à la densité du matériel et à la vélocité sismique. Les contrastes acoustiques correspondent généralement à des limites géologiques, illustrés par la portion reflétée de l'onde sismique. Une description complète de la méthode de fonctionnement est disponible dans Pugin *et al.*

3.1.5 Forages

3.1.5.1 Forages au piézocône

Un total de 11 sondages au piézocône (cone penetrometer testing ou CPT) ont été réalisés à l'automne 2010 en collaboration avec l'INRS-ÉTÉ (Figure 3.1). Le système est constitué d'une foreuse Geotech 605D, avec plateforme sur chenille et emploie une technique par enfoncement à vitesse constante en poussant les trains de tige à travers le sol (Figure 3.6). Des senseurs incorporés à la tête du train de tige (cône) permettent de dresser un profil vertical de pression interstitielle, de friction, de résistance en pointe, de conductivité électrique, permettant de dresser un profil stratigraphique détaillé. Des mesures de teneur en eau, de résistivité électrique, de résistance à la pointe et de friction sont relevées en continu, permettant d'interpréter en temps réel un profil

granulométrique vertical. Des profondeurs de 20 à 30 m peuvent être atteintes dans les dépôts meubles pour les sondages par enfoncement. Le forage résultant permet également l'installation de puits d'observation et subséquemment la réalisation de mesures de niveaux d'eau et d'essais de perméabilité.



Figure 3.6 Système de sondage CPT.

Les secteurs sélectionnés pour y effectuer ce type de forage sont principalement situés sur le paléo-delta de la rivière Saint-Maurice. La petite envergure de la foreuse ainsi que l'absence de rejets facilite grandement l'exploration géologique en secteur urbain.

3.1.5.2 Forages en rotopercussion

Deux forages RPSS (*Rotopercussion sound system*) ou Roto-percussion ont aussi été effectués de façon complémentaire aux essais de pénétration au cône dans les terrains denses ou graveleux non accessibles autrement (CPT-01 et CPT-10). Ces travaux ont également permis l'installation de puits d'observation et la réalisation de mesures de niveaux d'eau et d'essais de perméabilité.

Le système utilisé est à la base le même que pour les forages CPT, seulement la tête de forage est différente. Un marteau pneumatique et un système à air comprimé lui permettent de sonder par roto-percussion. Le système de trains de tige permet de faire des sondages jusqu'à 40 m de profondeur.

3.1.5.3 Forage Rotosonic

Un puits d'essai a été foré et aménagé avec la méthode Rotosonic. Ce forage a été réalisé du 13 au 16 décembre 2010 dans la municipalité de Notre-Dame-du-Mont-Carmel (Figure 3.1) par l'entrepreneur *Boart Longyear*, en sous-traitance pour la Commission géologique du Canada. Le travail a été effectué à l'aide d'une foreuse *Boart Longyear BL 3000* sur chenilles (Figure 3.7).

La méthode rotosonic emploie une vibration à fréquence élevée couplée à la rotation des sections de tubage afin d'enfoncer celles-ci dans le sol et dans le socle rocheux. Le diamètre nominal des tubages enfoncés est de 125 mm. La récupération des échantillons de sol était faite à l'aide d'un carottier de 100 mm de diamètre et d'une longueur de six mètres, enfoncé également par vibration à l'intérieur du tubage extérieur. Cette méthode de forage permet un échantillonnage en continu tout en conservant la structure des sédiments. Une fois remontés en surface, les échantillons étaient récupérés en continu et enrobés au fur et à mesure dans un sac de polyéthylène en sections de 1,5 m de longueur. Une fois refermés et identifiés, les sacs étaient remisés dans une boite de bois munie d'un couvercle.



Figure 3.7 Système de forage Rotosonic.

Une fois le forage complété à une profondeur de 70 m, une section de tubage plein en PVC d'un diamètre de 100 mm, enrobé de bentonite en granules, a été aménagée entre 70 m et 53,3 m de profondeur et de 50,3 m de profondeur à la surface. Une section crépinée de trois mètres de longueur et enrobée de sable filtre calibré de grade 1 a été aménagée entre 53,3 m et 50,3 m. Le puits a été complété en surface à l'aide d'un tubage protecteur de PVC d'un diamètre nominal de 150 mm et d'une longueur totale de 2,5 m, muni d'un couvercle cadenassé.

Tous les échantillons récupérés lors de la réalisation du forage ont été livrés au laboratoire du Centre Géoscientifique de Québec où les carottes ont été balayées par un scanner tomodensitométrique (voir 3.2.2 : Analyse de tomodensitométrie axiale) et sous-échantillonnées.

3.1.5.4 Forages à double rotation

Le forage à rotation double à air comprimé se caractérise par un train de tiges surmonté d'un trépan qui fore à l'intérieur d'un tubage d'acier. La rotation et l'enfoncement simultané du train de tiges et du tubage d'acier procurent la double rotation et permettent la récupération d'échantillons non contaminés. L'air comprimé injecté dans le train de tiges fait remonter les sédiments dans l'espace annulaire entre le train de tiges et le tubage d'acier jusqu'à un cyclone qui permet d'évacuer la pression d'air vers le haut, tandis que l'échantillon s'écoule vers le bas où il est récupéré. Tout au long du forage, l'air comprimé et l'eau servent de fluide de forage.

Au total, neuf forages de type rotation double furent réalisés (Figure 3.1). Les puits FE-01-11, FE-02-11, FE-04-11, FE-10-11 et FE-16-12 ont été dotés de crépines de PVC de 50 mm. Le puits FE-09-11 a plutôt été conçu avec une crépine d'acier de 1 mm, tandis que le FE-05-11 et FE-07-11 l'ont été avec une crépine d'acier de 75 mm. L'échantillonnage des sédiments rencontrés a été effectué en continu, par intervalles de 1,5 m. L'entreprise *Groupe Puitbec Inc.* a réalisé ces forages en sous-traitance pour l'UQTR.

3.1.5.5 Forage à percussion

Le forage à percussion s'effectue pour sa part par battage du tubage. À l'aide d'un système de câbles, le tubage est enfoncé mécaniquement par battage. Une fois la partie du forage effectuée, on insère un tube à clapet qui permet de récupérer le matériel foré et le remonter à la surface afin de procéder à l'échantillonnage. Au total, quatre forages de type percussion furent réalisés (Figure 3.1). Une crépine de PVC de 50 mm fut installée dans chacun des puits. L'échantillonnage des sédiments rencontrés a été effectué à des intervalles de 1,5 m. Ces forages ont été effectués par la Ville de Trois-Rivières dans le cadre d'un projet de recherche en eau.

3.1.5.6 Forage au diamant avec carottage des sols

Le forage au diamant avec carottage des sols se caractérise par un tube d'acier muni d'une couronne de diamant à l'intérieur duquel les tiges de forage sont insérées. Le fluide de forage utilisé est la boue qui consiste en un mélange d'eau et de bentonite. La boue est utilisée afin d'éviter l'envahissement du tubage par les sédiments sous l'effet de la pression hydrostatique. Un carottier est utilisé afin de récupérer les sédiments. Deux forages au diamant furent réalisés (Figure 3.1). L'échantillonnage des sédiments rencontrés a été effectué en continu. Une fois remontés en surface, les échantillons étaient récupérés, puis remisés dans une boite de bois munie d'un couvercle en sections de 1,5 m de longueur. Les boites étaient ensuite enrobées dans une pellicule de polyéthylène. Aucune crépine n'a été installée dans ces deux puits, réalisés par l'entrepreneur *Forages Comeau Inc.*, en sous-traitance pour la Commission géologique du Canada

3.1.5.7 Forage à tarière évidée

Le forage à tarière évidée utilise une tarière enfoncée par rotation jusqu'à la profondeur désirée. Les échantillons de sol sont récupérés par segments de 60 cm en enfonçant par battage un échantillonneur de type cuillère fendue. Les avantages de ce type de forage sont l'utilisation d'aucun fluide de forage, la rapidité ainsi que la préservation des structures de sol aux fins d'observations. Un seul forage de type tarière évidée fut réalisé (Figure 3.1). L'échantillonnage des sédiments rencontrés a été effectué à des intervalles de 0,6 m. Une crépine de PVC de 50 mm fut installée dans le puits. Ce forage a été effectué par la Ville de Trois-Rivières dans le cadre d'un projet de recherche en eau.

3.1.5.8 Forages Pionjär

Dans le but de mieux caractériser le contact entre les sédiments organiques et les sables sous-jacents dans la tourbière du Lac-à-la-Tortue, quatre forages doubles au

pionjär ont été réalisés au printemps 2012. Ils ont été réalisés par l'équipe de l'UQTR avec de l'équipement de forage emprunté à l'UQAM.

3.2 Travaux de laboratoire

3.2.1 Analyses granulométriques

Les analyses granulométriques furent réalisées par voie de tamisage et au laser. Les échantillons grossiers (>2 mm) furent analysés par voie de tamisage. Un échantillon sur deux fut analysé, en plus des deux premiers échantillons au sommet et à la base des forages ainsi que dans les zones de transition observées sur le terrain. Une partie des échantillons (environ 300 g selon la quantité disponible) fut dans un premier temps séchée à 105 °C pendant 24 heures. L'échantillon fut ensuite tamisé pendant 15 minutes dans une colonne de tamis préalablement pesés. Le poids initial des tamis fut soustrait du poids final pour ainsi déterminer le poids et la proportion de chaque classe de sédiments. Les résultats furent utilisés pour générer une courbe granulométrique de laquelle les diamètres passants (Dx) furent calculés afin de pouvoir déterminer la conductivité hydraulique de chaque échantillon. Au total, plus de 230 échantillons furent soumis à des analyses granulométriques par voie de tamisage.

Les échantillons contenant des particules inférieures à 2 mm furent traités à l'aide du granulomètre à diffraction laser (*Analysette 22 MicroTec Plus* de *Fritsch*) du laboratoire du Centre de Recherche sur les Interactions bassins Versants - Écosystèmes aquatiques (RIVE) de l'UQTR. L'échantillon est inséré dans un bassin d'eau où les ultrasons procèdent à la dispersion des sédiments. Il est ensuite transféré dans une unité de mesure où la distribution ainsi que diverses statistiques (moyenne, médiane, mode, surface spécifique, etc.) sont déterminées. Un duplicata fut réalisé pour chaque échantillon afin de s'assurer de la représentativité des résultats. Les courbes granulométriques ont été créées à partir des diamètres passants. Au total, plus de 550 analyses furent réalisées au granulomètre laser.

Il est à noter que pour l'ensemble des forages, la description fut réalisée en fonction de la classification Unified system classification soil USCS (ASTM, 2003) ainsi que dans le Système canadien de classification des sols SCCS (1998).

3.2.2 Analyse de tomodensitométrie axiale

Les carottes de sédiments recueillies en continu lors du forage rotosonic effectué dans le secteur de Notre-Dame-du-Mont-Carmel ont été scannées dans un *SOMATOM Volume Sensation* de *Siemens* au Laboratoire de simulation physique (LMSQ) de l'INRS-ÉTÉ sous la supervision de Bernard Long au printemps 2011 (Figure 3.8).



Figure 3.8 Scan des échantillons carottés du forage Rotosonic.

La scanographie, ou tomodensitométrie axiale, est une technique d'imagerie non destructive par rayon X qui permet la reconstruction d'un corps en 3D. Lors de sa rotation complète de 360° autour de l'échantillon, le scanner (tube RX et détecteurs) produit 64 images ou coupes, qui correspondent à des traversées des rayons X au travers le corps à l'étude dans différentes directions. Les images résultantes sont une représentation de l'absorption de l'énergie des rayons dans le matériel, qui varient en fonction de la densité de celui-ci. Les détails de fonctionnement sont disponibles dans un

document maison disponible à l'INRS-ÉTÉ (Long, 2011). Ces scans ont permis la reconstruction complète de la colonne stratigraphique dans un environnement 3D.

3.2.3 Datations radiocarbone

Durant la campagne de travaux terrain, deux échantillons de bois ayant été trouvés en forage (Forages FE-02 et FE-16) ont été datés au radiocarbone. Des coquilles retrouvées dans le forage (FE-17) et dans une sablière à Charette ont également été datées. Les analyses ont été effectuées par le laboratoire *Beta Analytic*.

3.3 Modélisation 3D

3.3.1 Compilation des données

Une des limites les plus contraignantes à la création d'un modèle géologique 3D reste toujours l'accès à de l'information géologique de qualité. Lors d'études hydrogéologiques régionales, cette information correspond souvent à des éléments ponctuels intégrés à différentes bases de données ayant leurs caractéristiques propres et leurs erreurs (Ross *et al.*, 2001). De plus, ces données ont toutes été acquises avec des objectifs et des contextes différents, créant une problématique au niveau de la forme prise par l'information et l'absence de standards descriptifs entre les différents fournisseurs de données (Ross *et al.*, 2001). On doit ajouter à ces éléments ponctuels des éléments multidimensionnels acquis lors de travaux géophysiques ou de campagnes de caractérisation réalisés dans le cadre de l'étude hydrogéologique régionale. Ces données peuvent correspondre à des profils verticaux de pression interstitielle ou de conductivité électrique (1D) et à des profils verticaux de sismique ou de résistivité (2D). L'assemblage de ces données permet la création de modèles volumiques (3D).

En raison des spécificités de chaque projet et de leurs contextes variables, aucun standard national n'existe en ce qui a trait à l'organisation de l'information. La création d'un dépôt central contenant toute l'information stratigraphique et géologique, commun

à toute l'équipe de recherche, est toutefois généralement conseillée (Frind *et al.*, 2002; Ross *et al.*, 2005). Elle permet de sauver du temps, d'éliminer la redondance de l'information et ainsi de réduire considérablement les risques d'erreurs. Cette approche est commune à la plupart des études hydrogéologiques régionales ayant eu lieu dans la dernière décennie au Québec (Fagnan *et al.*, 2001; Nastev *et al.*, 2004; COBARIC-UPA, 2008). On doit néanmoins s'assurer que la base de données est en mesure de fournir des sorties (*outputs*) vers d'autres logiciels sans avoir besoin d'effectuer de conversion majeure entre les deux formats.

Il est généralement conseillé dans la littérature d'intégrer les données de forages et les données hydrogéophysiques directement dans un système d'information géographique (SIG) dès le début du projet. L'intégration des données dans un logiciel sans spatialisation de l'information rend plus difficile pour le géoscientifique l'anticipation du comportement d'environnements complexes en 3D puisque la continuité et la connectivité des structures géologiques sont plus difficiles à interpréter (Bélanger, 2010). L'évolution de la modélisation au cours des dernières années a ouvert les perspectives du domaine de l'hydrogéologie, et une multitude d'applications requièrent maintenant un cadre tridimensionnel contenant toute l'information géologique disponible pour un secteur (Frind *et al.*, 2002).

Dans le cadre du projet de caractérisation des eaux souterraines du sud-ouest de la Mauricie, en cours depuis 2009, des données hydrogéologiques ont été compilées à partir des sources d'information suivantes : Rapports d'études hydrogéologiques municipales ou privées préparées par des firmes de consultants (EH); Rapports publics publiés par le Service des eaux souterraines du ministère de l'Environnement (GOUV); Banque de données du ministère des Transports du Québec (MTQ); Système d'information hydrogéologique (SIH) du ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP); Base de données privées (BDP); Bases de données municipales (BDM). Les données stratigraphiques pertinentes du Système d'Information Géoscientifique, Pétrolier Et Gazier (SIGPEG) du Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) ont également été colligées.

Chacune des municipalités du territoire à l'étude fut visitée dans le but d'obtenir les études hydrogéologiques existantes. Les bases de données de Trois-Rivières, de Shawinigan et de la Régie d'Aqueduc de Grand-Pré furent intégrées à la nôtre. Plus d'une centaine d'études hydrogéologiques ont été colligées sur le territoire à l'étude, la plupart étant des études de recherche en eau commandées par les municipalités ou des études de vulnérabilité aux activités industrielles et agricoles (Leblanc *et al.*, 2010). Les informations stratigraphiques et piézométriques tirées de ces études sont pertinentes d'un point de vue hydrogéologique, et permettent d'établir des liens géométriques et hydrostratigraphiques entre les unités géologiques recensées. Le Tableau 3.1 fait état du nombre d'entrées provenant de chaque source dans la base de données.

Tableau 3.1
Source des données intégrées à la base de données

Source	Nombre d'entrées
Rapports d'études hydrogéologiques municipales ou privées préparées par des firmes de consultants (EH)	1112
Rapports publics publiés par le Service des Eaux Souterraines du ministère de l'Environnement (GOUV)	245
Banque de données du ministère des transports du Québec (MTQ)	2034
Système d'Information Hydrogéologique (SIH) du ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec (MDDEP)	2311
Bases de données privées (BDP)	243
Base de données municipales (BDM)	312
Système d'Information Géoscientifique, Pétrolier Et Gazier (SIGPEG)	164

Les observations stratigraphiques et hydrogéologiques ponctuelles ont été stockées dans une base de données en format Excel. Les données vectorielles reposent quant à

elles dans une geodatabase ESRI de type serveur, accessible à tous les membres de l'équipe de recherche.

Un total de 6856 entrées (puits, piézomètres et autres forages) ont été saisies dans la base de données. Les informations recueillies incluent les coordonnées géographiques, la description des ouvrages laissés en place (puits et piézomètres), les résultats d'interprétation des propriétés hydrogéologiques, les niveaux statiques et dynamiques et le débit d'essai correspondant, mesurés lors du relevé, la séquence stratigraphique et la qualité physico-chimique des échantillons d'eau recueillis lors du relevé. La quantité d'information disponible pour chaque entrée est variable ; les observations provenant de rapports sont généralement plus détaillées que les entrées du SIH, par exemple.

La compilation des données hydrogéologiques a permis de répertorier 5386 entrées contenant une séquence stratigraphique pour laquelle il existe des coordonnées de localisation et une élévation de référence. Parmi ces entrées, 2185 atteignent le socle rocheux alors que 3201 recoupent uniquement une séquence constituée de dépôts meubles. Le nombre de lithofaciès décrits dans les forages varie de 1 à 14.

Au total, 2109 entrées comportent des informations sur le niveau d'eau pour lesquelles il existe des coordonnées de localisation et une élévation de référence. Ces mesures sont toutefois ponctuelles et la méthode de mesure n'est pas toujours définie. Aussi, il est possible que les mesures du niveau statique et du niveau dynamique fournies dans la base de données du SIH n'aient pas été prises à l'aide d'un instrument adéquat en s'assurant que le niveau d'eau était bien stabilisé.

3.3.2 Uniformisation

Une base de données contenant de l'information géologique précise et l'intégrant à une échelle régionale peut devenir très lourde. Comme mentionné précédemment, les données stratigraphiques tirées des différentes sources ont toutes été, à la base, acquises avec différents objectifs, et la forme de l'information stratigraphique change donc

significativement entre les bases de données. Les entrées des bases de données doivent être interprétées et révisées avant de pouvoir être utilisées comme intrants pour la modélisation géologique.

Le ministère du Développement durable, de l'Environnement de la faune et des Parcs (MDDEFP) utilise, pour le système d'information hydrogéologique (SIH), une codification basée sur la composition des matériaux rencontrés. Les puisatiers n'ont généralement pas les connaissances suffisantes pour aller au-delà d'une estimation granulométrique visuelle, sans compter que les forages de puisatiers sont généralement destructifs et que la structure sédimentaire n'est pas conservée lors de l'extraction. De plus, la codification simple utilisée ne fait pas de distinction hydrogéologique.

Le Centre Géoscientifique de Québec (CGQ) a mis au point un système abrégé de classification des formations superficielles faisant facilement le pont entre une codification basée sur les matériaux (*SIH*) et une autre basée sur les lithofaciès (Parent *et al.*, 2003). Il comporte 7 grandes catégories pouvant toutes être subdivisées en sous-classe selon la granulométrie du matériau rencontré (Figure 3.9). Il est à noter que la première lettre du code abrégé correspond toujours à celle du lithofaciès, ce qui permet d'établir un lien très facilement entre les deux codifications. En ce qui a trait aux données n'ayant initialement qu'une codification de type matériaux, elles peuvent être converties en code abrégé facilement.

Cette codification permet également d'attribuer une valeur de conductivité aux unités stratigraphiques et ainsi de regrouper les formes géologiques ayant des propriétés hydrauliques similaires, ce qui permet de mieux cerner leurs rôles respectifs dans la dynamique de l'écoulement souterrain. Cette codification a été utilisée pour regrouper les séquences stratigraphiques retrouvées dans la compilation en unités hydrostratigraphiques simplifiées.

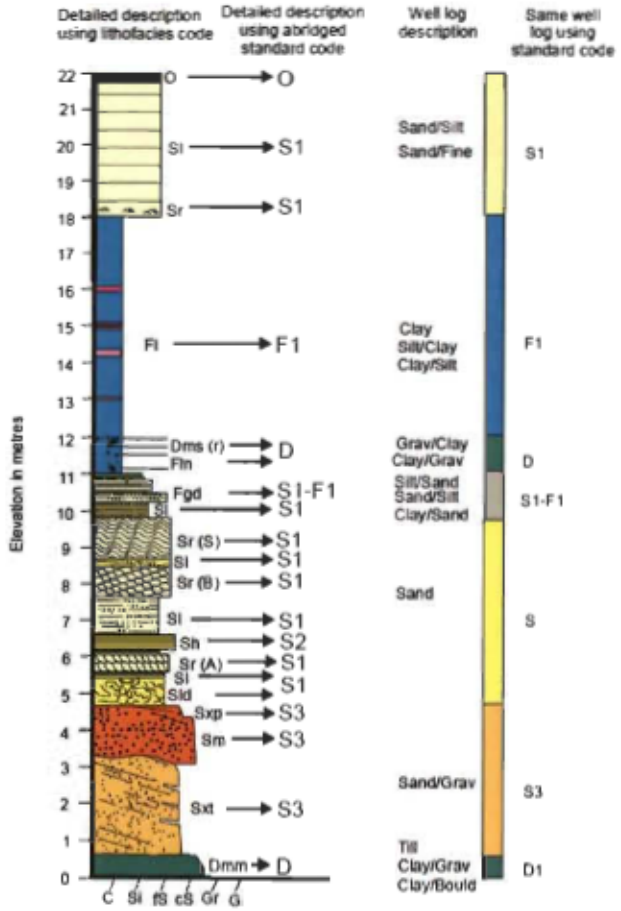


Figure 3.9 Code des lithofaciès (Parent *et al.*, 2003).

3.3.3 Cotes de fiabilité

Dans le cadre du PACES, des protocoles de validation des données de forages ont été rédigés par les équipes de recherches du Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES). Ils visent à attribuer des cotes de fiabilité à chaque entrée de la base de données en fonction de la qualité et de la provenance des informations y étant attachées (Ross *et al.*, 2001, 2005; GRIES, 2009). Le Système d'information hydrogéologique (SIH), par exemple, s'avère une source d'information volumineuse étant donné le nombre de forages qu'il contient ainsi que leur extension géographique. Cette base de données présente cependant des limitations importantes. Tout comme la base de données des puisatiers de l'Ontario, la localisation des puits listés dans le *SIH* est rarement arpentée, mais plutôt tirée d'un dessin technique ou d'un croquis avant

d'être convertie en coordonnées géographiques, ce qui se solde par une erreur de localisation inhérente très variable d'un puits à l'autre (Russell *et al.*, 1998). Les versions numérisées d'anciens forages fournies par les municipalités dans le cadre des projets PACES contiennent souvent de l'information géologique intéressante, mais le même problème de localisation se pose puisqu'il faut souvent localiser manuellement les éléments cartographiés. L'erreur cumulative devient importante lorsqu'on considère l'erreur initiale du plan technique, le géoréférencement ainsi que l'erreur du modèle numérique d'élévation pour extraire l'altitude.

Cette évaluation de la qualité des données permet de sélectionner les forages les plus pertinents lors de différentes modélisations ainsi que d'évaluer l'erreur inhérente qui suivra dans le produit. Une grille complète des cotes de fiabilité, de leur description et des critères d'association est disponible en Annexe E.

3.3.4 Création des surfaces

Dans la présente étude, l'approche adoptée pour la modélisation géologique est celle du système d'information géographique standard (environnement *ESRI*), et ce, afin de simplifier le travail en équipe et améliorer l'interopérabilité des produits.

La modélisation géologique consiste en la création d'une surface reliant les forages entre eux selon l'élévation des contacts stratigraphiques (Figure 3.10). Le cokrigeage a été sélectionné comme méthode d'estimation géostatistique puisqu'il tient compte de la covariance spatiale et qu'il permet de donner un poids différent aux observations en fonction de leur fiabilité.

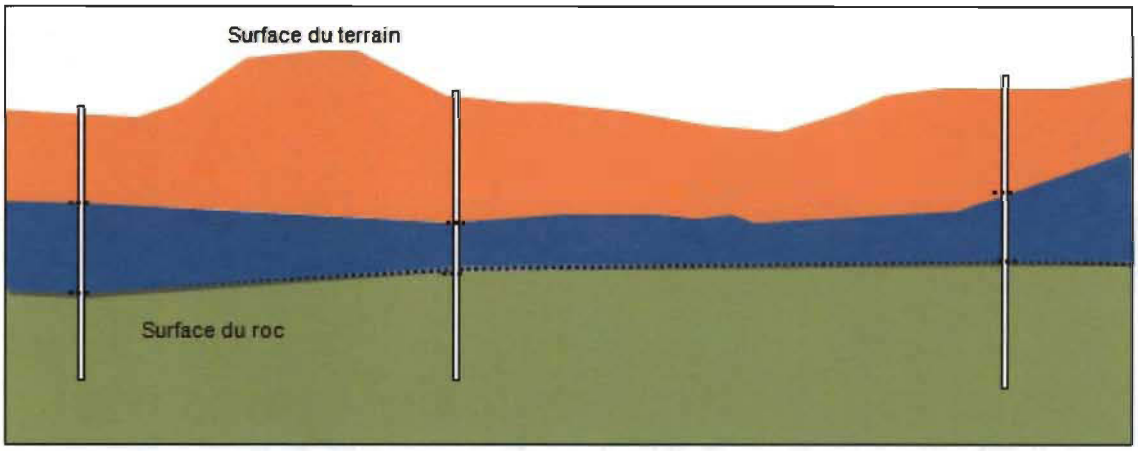


Figure 3.10 Schéma conceptuel de modélisation des contacts stratigraphiques.

La modélisation de la surface du terrain du secteur à l'étude est assurée par un modèle numérique d'élévation (MNE) corrigé hydrologiquement. Le MNE est utilisé pour déterminer l'altitude de toutes les localisations XY incluses dans la base de données dans le but d'éviter les irrégularités provenant de variations dans la méthode d'acquisition de la donnée (ex. : arpentage, GPS, MNE, etc.).

3.3.5 Validation

3.3.5.1 Validation statistique

La validation statistique du modèle estimé est une étape cruciale dans la construction d'un modèle géologique 3D. Les données sont premièrement explorées de manière préliminaire (analyse spatiale, distribution et magnitude) dans le but d'identifier les données douteuses qui n'auraient pas été filtrées par la validation par cotes de fiabilité (ex. : valeurs extrêmes impossibles). Seules les données de forages sont utilisées ici.

Un variogramme théorique est défini pour chacun des contextes hydrogéologiques en fonction d'un variogramme expérimental. Les variogrammes modélisés sont de type directionnel (0°, 45°, 90° et 135°). Un krigeage ordinaire préliminaire avec validation croisée sur l'ensemble des forages est effectué et les résidus sont analysés. Le jugement

professionnel est utilisé pour identifier les anomalies douteuses modélisées (ex. : effet « *bull's eye* ») et pour exclure ou corriger les données problématiques.

Un deuxième cokrigeage ordinaire est ensuite réalisé en séparant les données en fonction de leur fiabilité, la variable primaire étant fiable et secondaire moins fiable. Dans le schéma conceptuel présenté à la Figure 3.11, par exemple, FS1 représente un forage fiable alors que FS3 correspond à un forage moins fiable. Les deux forages comportent de l'information sur les contacts entre le sable et l'argile, puis l'argile et le roc, mais ils sont divergents. Étant donné la faible distance séparant les deux observations, les contacts du forage fiable FS1 sont respectés. Si le nombre de données fiables est insuffisant pour modéliser le variogramme de la variable primaire, le variogramme des données secondaires est utilisé. Une validation croisée est ensuite effectuée pour optimiser le variogramme et les paramètres d'interpolation. La validation croisée est basée sur la différence entre la valeur mesurée (Z) et l'estimation de cette valeur (Z^*) par le cokrigeage.

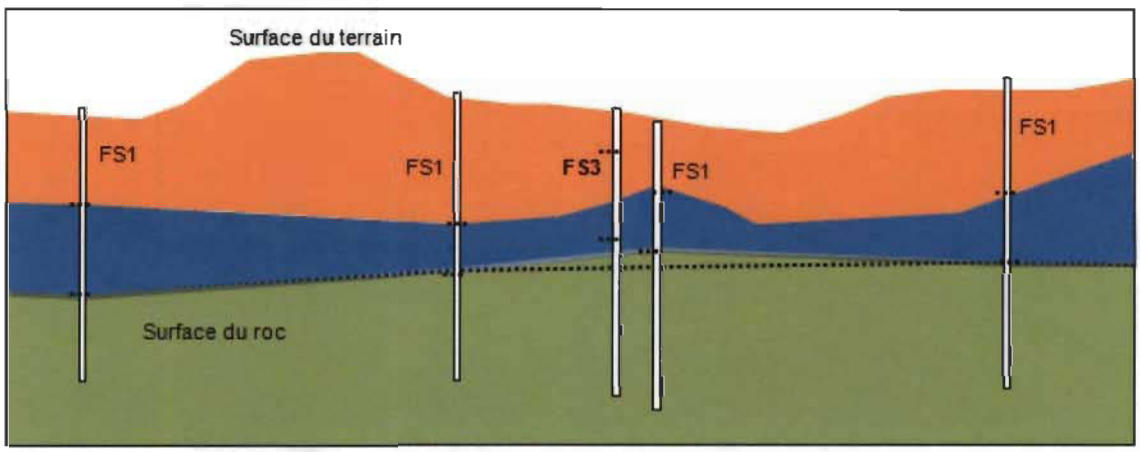


Figure 3.11 Schéma conceptuel de l'intégration des cotes de fiabilité dans la modélisation.

C'est après cette validation croisée que les données supplémentaires, telles les données ponctuelles des affleurements rocheux, sont intégrées. Ces informations sont ensuite classées comme fiables ou moins fiables. La validation croisée est réutilisée ici pour mesurer l'effet de l'ajout de ces informations. Une attention particulière est portée

à leur densité, en faisant au besoin une présélection ou en adaptant le voisinage de l'estimation. Pour obtenir une représentation plus réaliste des contextes moins bien représentés statistiquement, des points de contrôle sont ajoutés notamment dans les secteurs caractérisés par un manque d'information. Cette opération se rapproche plus de la modélisation que de l'estimation et elle peut entraîner un biais statistique de l'estimation. Une interpolation finale est ensuite réalisée avec une grille de 100 m par 100 m.

3.3.5.2 Validation géologique

La validation de la modélisation géologique ne se limite cependant pas à la géostatistique. Le modèle créé est également validé à partir de coupes géologiques générées partout au travers le territoire. Des coupes ont été générées à partir du logiciel *Hydro GeoAnalyst* et ont permis d'identifier les secteurs problématiques nécessitant des ajustements manuels. Cette technique vient également pallier au problème omniprésent, dans des bassins quaternaires tels que celui du territoire à l'étude, d'unités non connectées affichant des faciès pourtant similaires. En imposant à la modélisation des coupes définitives traversant le territoire à l'étude, celles-ci rendent la modélisation plus « intelligente » (Ross *et al.*, 2005).

Une validation supplémentaire doit être entreprise afin de vérifier si les couches générées par modélisation sont bien contenues dans le volume entre la surface du roc et la surface du sol. Pour ce faire, les grilles modélisées sont soumises à un traitement par calcul de grille suivant des conditions précises. Si la grille modélisée est inférieure au roc, les valeurs de l'élévation du roc au même endroit y sont assignées. Dans le même ordre d'idée, si la grille modélisée est localement plus élevée que le modèle numérique d'élévation, elle sera modifiée et remplacée par les mêmes valeurs que le modèle numérique d'élévation. Les conditions sont énoncées de la manière suivante dans *Raster Calculator* en syntaxe Python;

$$Con((Raster1) \leq (Roc), (Raster1) = (Roc), else\ (Raster1))$$

$$Con((Raster1) \geq (DEM), (Raster1) = (DEM), else\ (Raster1))$$

où Raster1 est la couche modélisée, Roc correspond à la surface du roc modélisée et DEM correspond au modèle numérique d'élévation. La Figure 3.12 présente un exemple où le modèle numérique d'élévation montre une vallée importante qui n'est pas recoupée par des forages. Les couches du modèle sont interpolées sans tenir compte de la réalité du terrain en surface et ont donc besoin d'être ajustées.

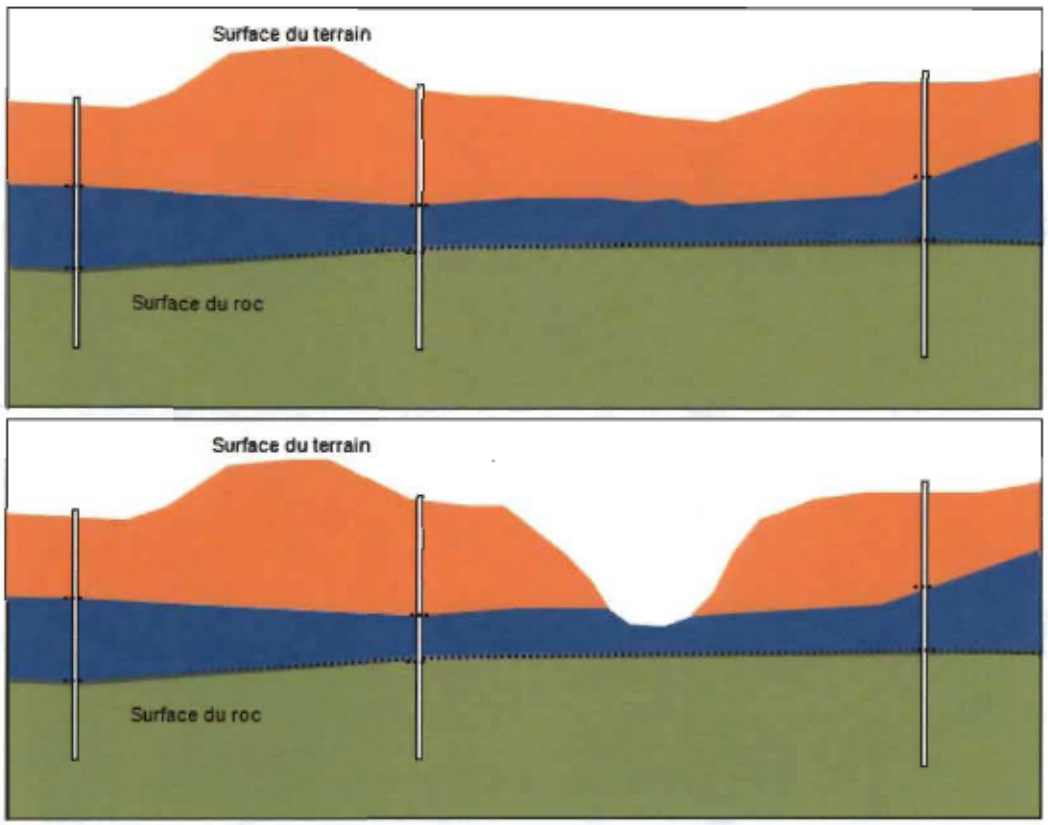


Figure 3.12 Schéma conceptuel de l'ajustement avec le MNE.

Un dernier ajustement est nécessaire, spécifiquement pour calculer l'élévation de la surface du socle rocheux. La surface créée par cokrigeage représente bien l'élévation du roc qui a été rencontrée par forage sur le territoire à l'étude. Cette surface ne prend cependant pas en compte l'épaisseur des dépôts rencontrés par les 3201 forages qui traversent des unités, mais sans atteindre le roc. En effet, certains forages n'atteignant pas le socle rocheux rencontrent tout de même des épaisseurs considérables de dépôts meubles.

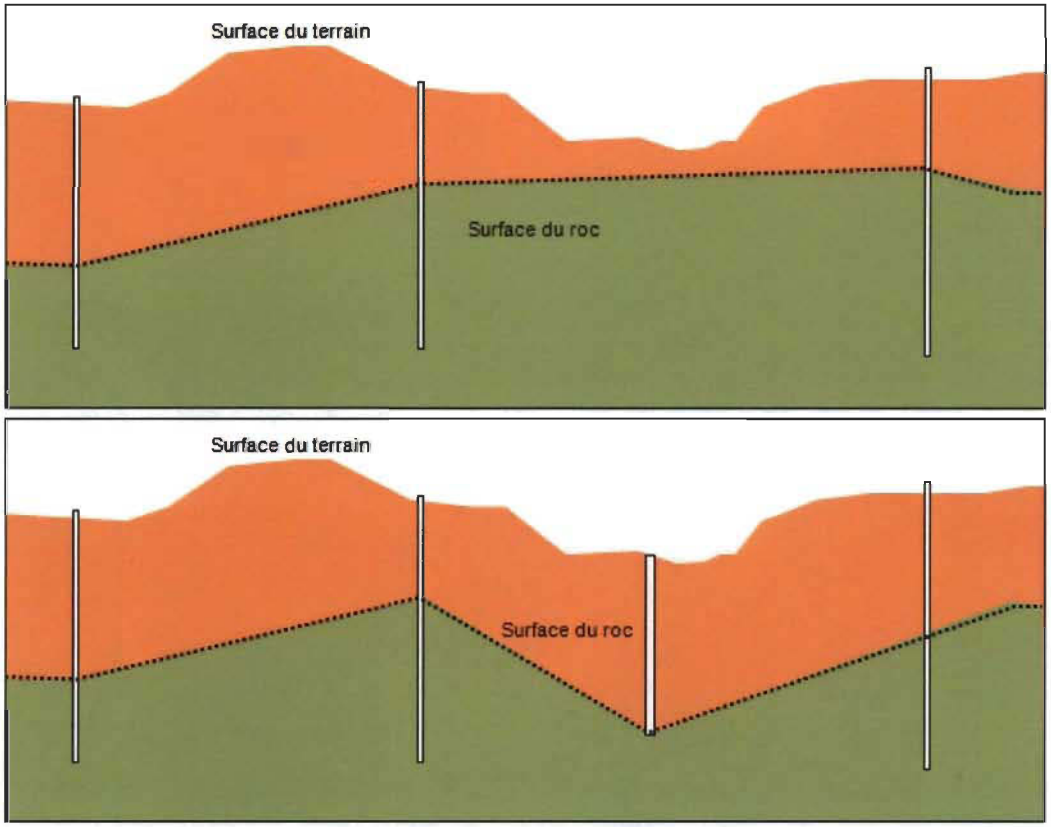


Figure 3.13 Schéma conceptuel d'ajustement en utilisant les épaisseurs minimum rencontrées.

La Figure 3.13 illustre l'importance d'intégrer l'épaisseur totale des dépôts meubles dans la validation de l'élévation du roc. Une vallée d'une largeur considérable sépare deux forages dotés d'élévation au roc. Entre eux, le roc est estimé de manière linéaire puisqu'aucune autre donnée n'est disponible. En rajoutant les forages n'atteignant pas le roc, on remarque un forage situé dans la vallée qui rencontre une séquence importante de dépôt meuble sans atteindre le roc. Il donne une information importante sur la « profondeur minimum » du roc; bien que celui-ci n'ait pas été rencontré, on sait que son élévation est localement plus basse que prédit par les forages atteignant le roc.

Pour que la modélisation de l'élévation du roc prenne en compte cette réalité, l'élévation de cette « profondeur minimum » est estimée par cokrigeage de la même manière que l'élévation du roc proprement dite. Une opération de calcul de raster avec

une condition est ensuite utilisée pour imposer au roc une élévation plus basse lorsque nécessaire :

$$Con((Roc) \geq (Rocmin), (Roc) = (Rocmin), else\ (Roc))$$

où *Roc* correspond à l'élévation du roc modélisée, et *Rocmin* correspond à l'élévation de la base de la séquence des dépôts meubles rencontrés.

3.3.5.3 Arrimage avec la cartographie des dépôts de surface

La cartographie des dépôts de surface (Denis 1971; Bolduc 1999b; Bolduc 1999a; Lamarche 2005) apporte une information très importante au modèle géologique puisqu'elle indique où les couches affleurent en surface. Par contre, on ne retrouve pas de forage sur chaque zone ou polygone d'affleurement; un nombre considérable de forages seraient nécessaires sur chaque affleurement afin de bien le représenter dans l'espace. L'inclusion de données ponctuelles d'ajustement aurait une influence sur le poids statistique des véritables forages et est donc à proscrire. La Figure 3.14 illustre un exemple où un affleurement rocheux bien délimité est présent en surface, mais qu'aucun forage ne recoupe.

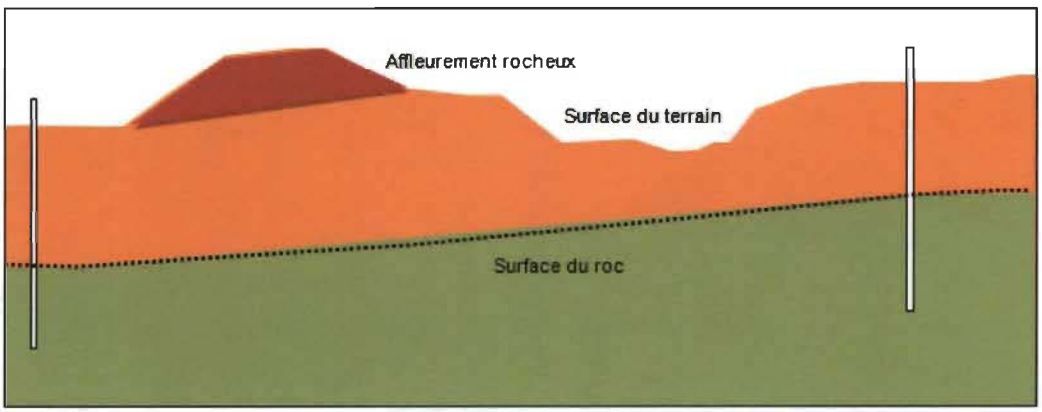


Figure 3.14 Schéma conceptuel d'un affleurement rocheux non-représenté en forage.

Une méthode développée dans le cadre du projet permet de tenir compte de l'information présente dans la cartographie des dépôts de surface pour la modélisation géologique 3D (Figure 3.15). Premièrement, les polygones d'affleurements correspondant à la couche modélisée (par exemple, les affleurements du roc) sont sélectionnés et exportés dans un autre shapefile. Les valeurs du modèle numérique d'élévation sont ensuite extraites en utilisant comme masque les polygones des affleurements du roc.

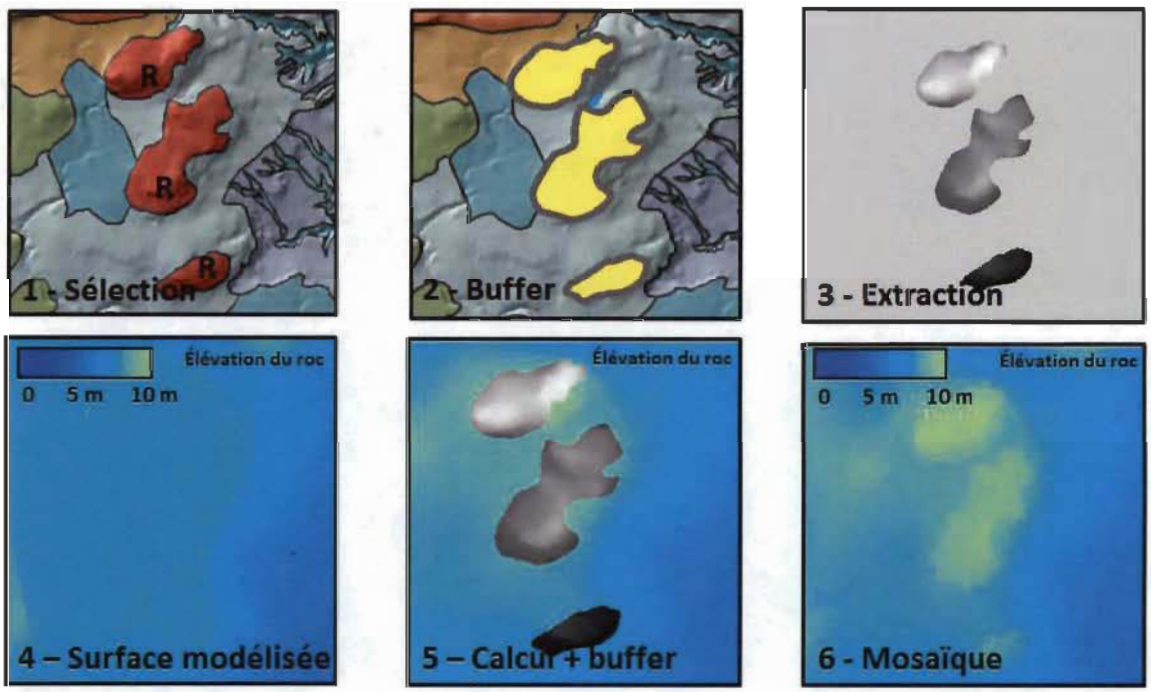


Figure 3.15 Étapes de la méthode d'intégration des dépôts de surface dans le modèle 3D.

Le remplacement des valeurs de la grille estimée par les valeurs du modèle numérique d'élévation assure l'affleurement de cette surface par rapport aux autres. Toutefois, un effet d'escalier considérable est créé en bordure de la zone affleurant et est associé à la différence entre les deux grilles (Figure 3.16). L'adoucissement de cet effet ainsi que la représentation des contacts plongeant sous une autre couche sont assurés par une zone tampon autour des polygones des dépôts de surface. Une fonction logarithmique est utilisée pour représenter la transition entre les deux grilles. Un exemple de résultat final est illustré à la Figure 3.17.

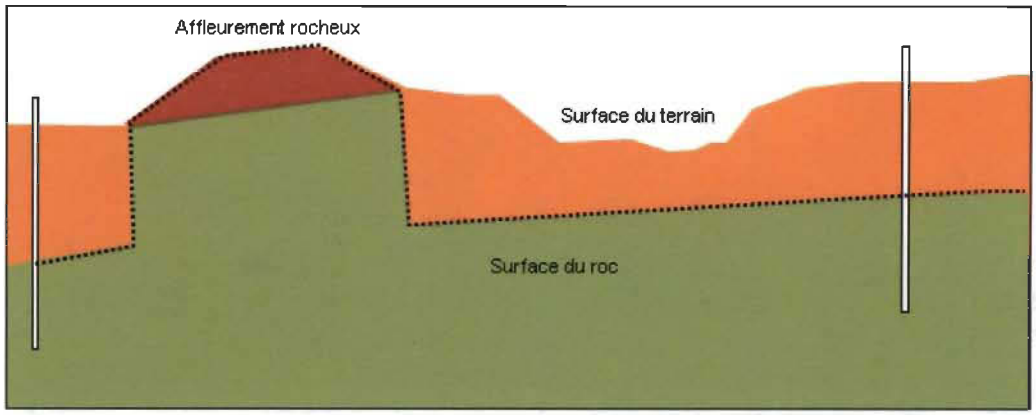


Figure 3.16 Schéma conceptuel illustrant l'effet d'escalier créé par la méthode, avant ajustement.

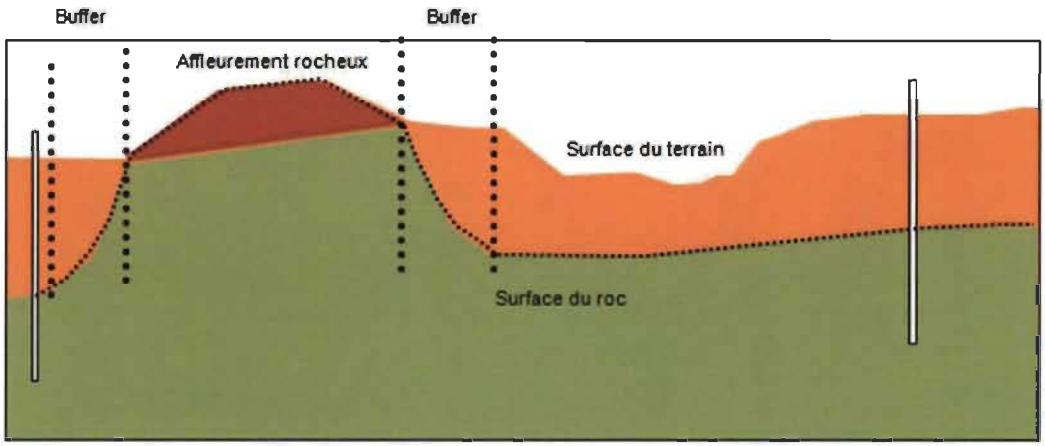


Figure 3.17 Schéma conceptuel illustrant l'ajustement du buffer logarithmique.

Les surfaces finales sont ainsi basées sur une validation objective (validation croisée entre les mesures et les résultats interpolés) et une validation professionnelle (jugement professionnel relatif au contexte hydrogéologique local).

En ce qui concerne les calculs de volumes, ils sont réalisés par soustractions de grilles. Dans le cas d'un modèle simple à deux couches, par exemple (sable sur argile), le volume du sable est obtenu en soustrayant l'élévation du contact supérieur du sable au contact supérieur de l'argile. La grille résultante représente l'épaisseur de la couche de sable pour chaque cellule du modèle.

CHAPITRE IV

CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES DU SUD-OUEST DE LA MAURICIE

Les résultats sont ici présentés selon les contextes hydrogéologiques du sud-ouest de la Mauricie. Les quatre contextes retrouvés sur le secteur à l'étude ont été déterminés à partir de leurs caractéristiques physiographiques, géologiques et hydrogéologiques similaires (Figure 4.1) :

- La plaine argileuse des Basses-Terres
- Le piedmont laurentien
- Le paléodelta du Saint-Maurice
- Le bouclier laurentien

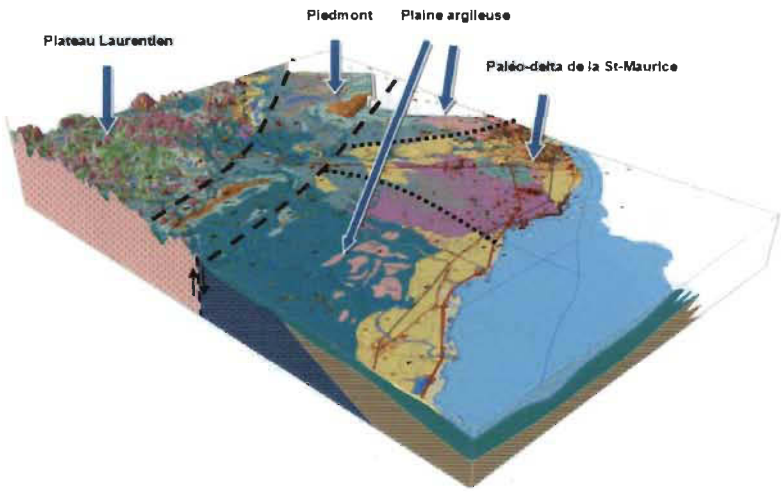


Figure 4.1 Modèle conceptuel des quatre contextes hydrogéologiques retrouvés sur le territoire (Leblanc *et al.* 2010).

4.1 Plaine argileuse

La plaine argileuse des Basses-Terres du Saint-Laurent est caractérisée par une topographie relativement plane étalée sur des niveaux de terrasses (Figure 4.2). On y

retrouve plusieurs nappes d'eau salée et d'eau gazéifiée scellées sous les argiles marines de la Mer de Champlain, et certaines de ces sources sont même exploitées commercialement. Le potentiel aquifère de la plaine argileuse est faible en général. Les municipalités situées dans cette zone comptent sur le réseau de la Régie d'Aqueduc de Grand Pré pour leur approvisionnement. Les puits de cette régie exploitent plusieurs aquifères situés aux abords du piedmont.

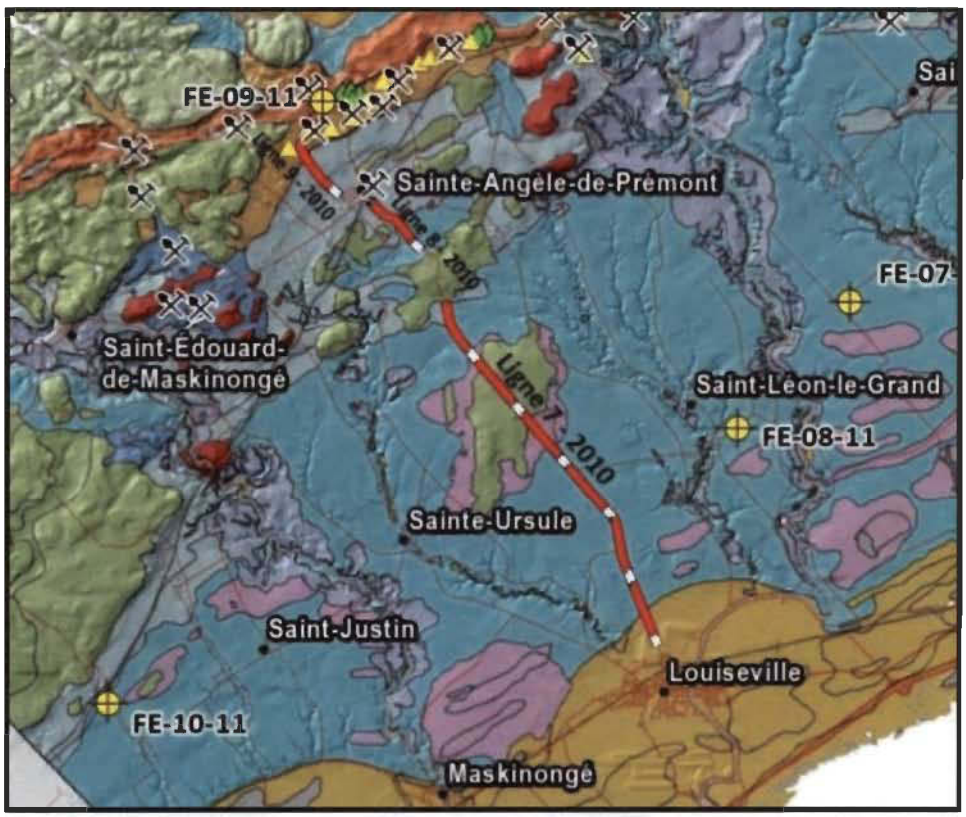


Figure 4.2 Contexte de la plaine argileuse.

Les lignes de *Minivibe* L7-2010, L8-2010 et L9-2010 traversent du sud-est au nord-ouest la plaine argileuse séparant Louiseville de Sainte-Angèle-de-Prémont, en passant par Saint-Léon-le-Grand. Le profil tiré de cette investigation est présenté à la Figure 4.3 et est représentatif du contexte de la plaine argileuse. À partir de Louiseville, les dépôts meubles sont principalement constitués de dépôts silteux et argileux dont l'épaisseur passe de 60 m au début de la ligne à 70 m au kilomètre 1,5 avant de graduellement réduire d'épaisseur entre 1,5 km et 6,0 km. Un biseau de till enfoui sous l'argile est interprété entre les kilomètres 3,5 et 5,5. Ce till devient un mince placage

remanié sur un renflement du socle rocheux interprété entre les kilomètres 6 et 8,5. Par la suite, le socle rocheux plonge brusquement pour révéler une dépression enfouie de deux kilomètres de largeur et de 80 mètres de profondeur. Cette dépression serait comblée à la base par environ 20 mètres de gravier et de sable, scellés jusqu'en surface par des sédiments fins. Cette formation pourrait potentiellement renfermer des quantités appréciables d'eau. Elle se situe directement dans l'axe de la faille de Saint-Cuthbert, la limite géologique entre le roc précambrien du Bouclier et les roches sédimentaires des Basses-Terres. Il est donc possible que des contextes similaires puissent être retrouvés sur toute l'extension de la faille. Le terrain s'élève ensuite par paliers successifs de l'ordre de 15 mètres, tandis que le profil du socle rocheux sous-jacent devient très irrégulier, avec une épaisseur totale des dépôts meubles variant de 20 à 100 mètres.

Le forage FE-07-11 (Figure 4.4) fut réalisé dans la municipalité de Saint-Sévère. D'une profondeur totale de 62,18 mètres, le socle rocheux calcareux d'âge Paléozoïque (confirmé par une forte réaction à l'acide) a été rencontré à 60,96 mètres. Le grand étalement granulométrique caractéristique du Till de Gentilly est présent sur 1 mètre à la base. Le restant de la séquence est attribué à l'épisode de Champlain et est composé de silts et d'argiles dans des proportions de 60 % et 40 % respectivement.

Le forage FE-08-11 (Figure 4.5), à Saint-Léon-le-Grand, rencontre le calcaire en place à 78,30 mètres de profondeur. La stratigraphie est à l'image du forage FE-07-11, le till étant plaqué sur le roc pour une épaisseur d'environ 2 mètres. L'évènement de Champlain est représenté par une séquence de 76,5 mètres de particules fines, des faciès en tout point semblables à ceux du forage FE-07-11.

Le forage FE-10-11 (Figure 4.6) fut réalisé dans la municipalité de St-Justin, dans la portion ouest de la plaine argileuse, où la plaine devient moins large et où le socle rocheux affleure plus souvent. La profondeur totale du forage est de 28,04 mètres, la roche en place calcareuse se situant à 26,21 mètres. La colonne de dépôts marins est plus proximale que dans le secteur de Sainte-Ursule ou Saint-Léon-le-Grand.

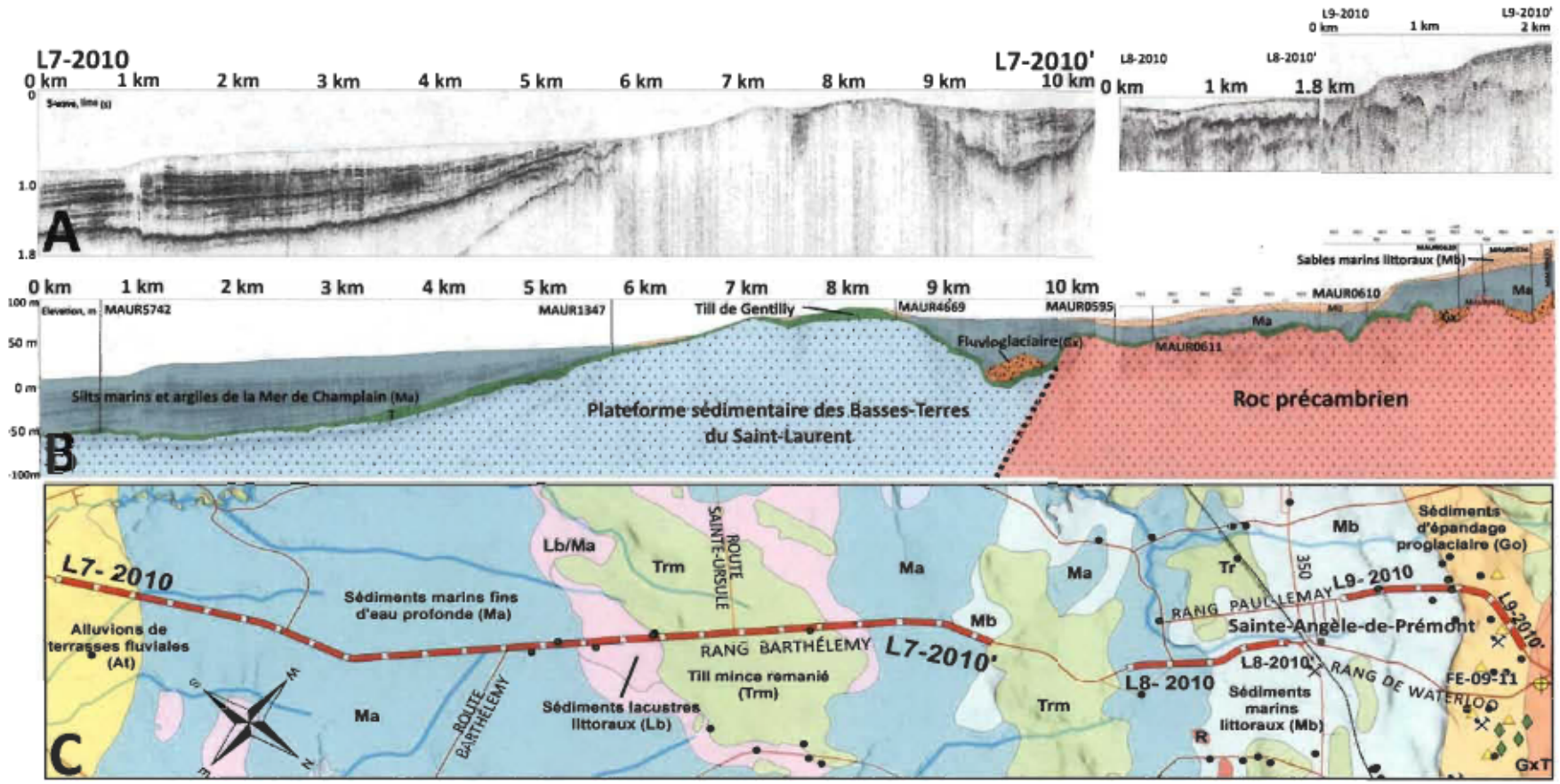


Figure 4.3 **Coupe géologique interprétée – Lignes *Minivibe* 7, 8 et 9 – 2010**

A : Onde sismique, en secondes, **B :** Interprétation des résultats, élévation en mètres, **C :** Carte de localisation et formations superficielles (voir Figure 3.1 pour la légende des travaux sur le terrain).

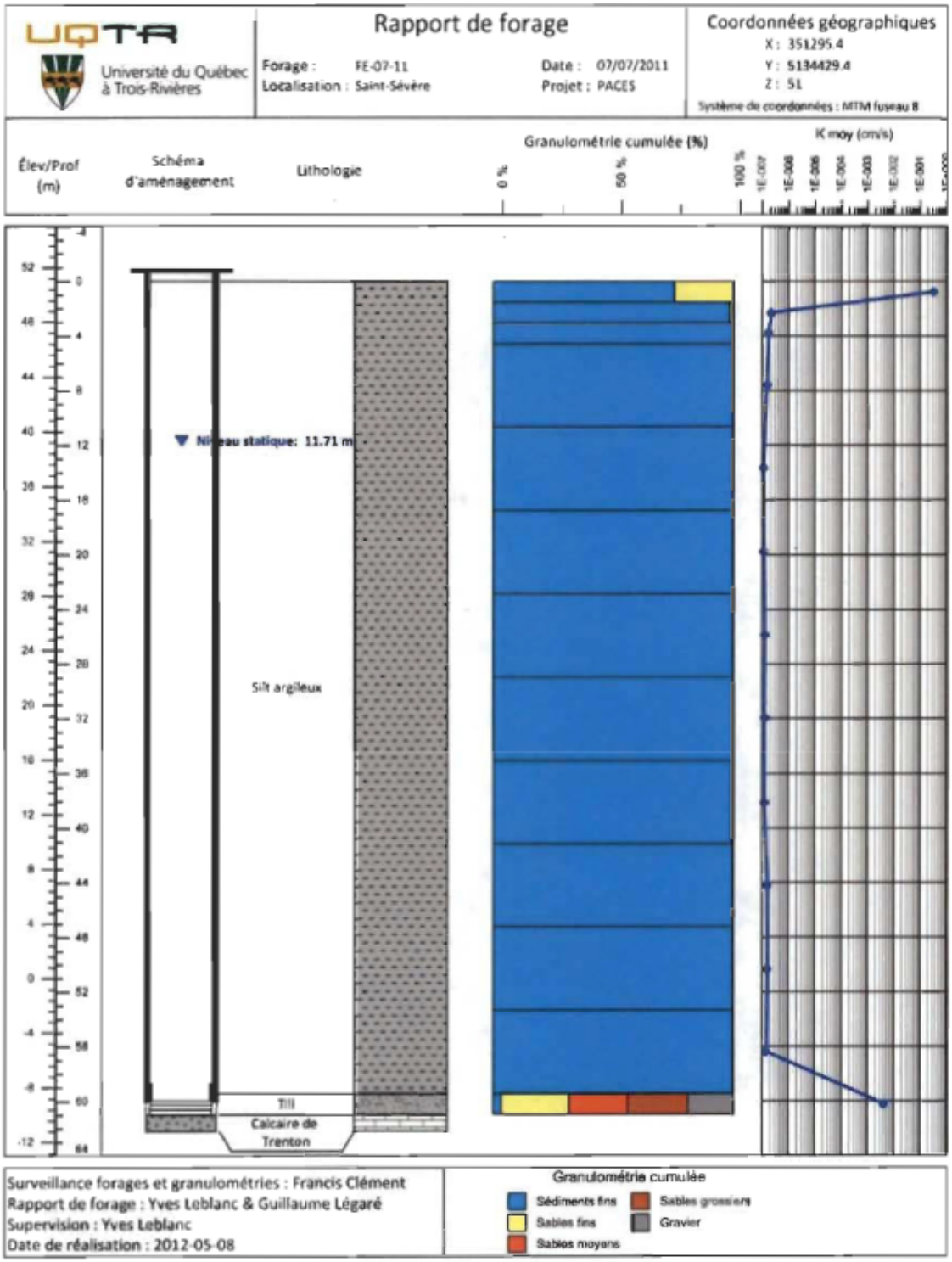


Figure 4.4 Rapport de forage- FE-07-11 – Saint-Sévère.

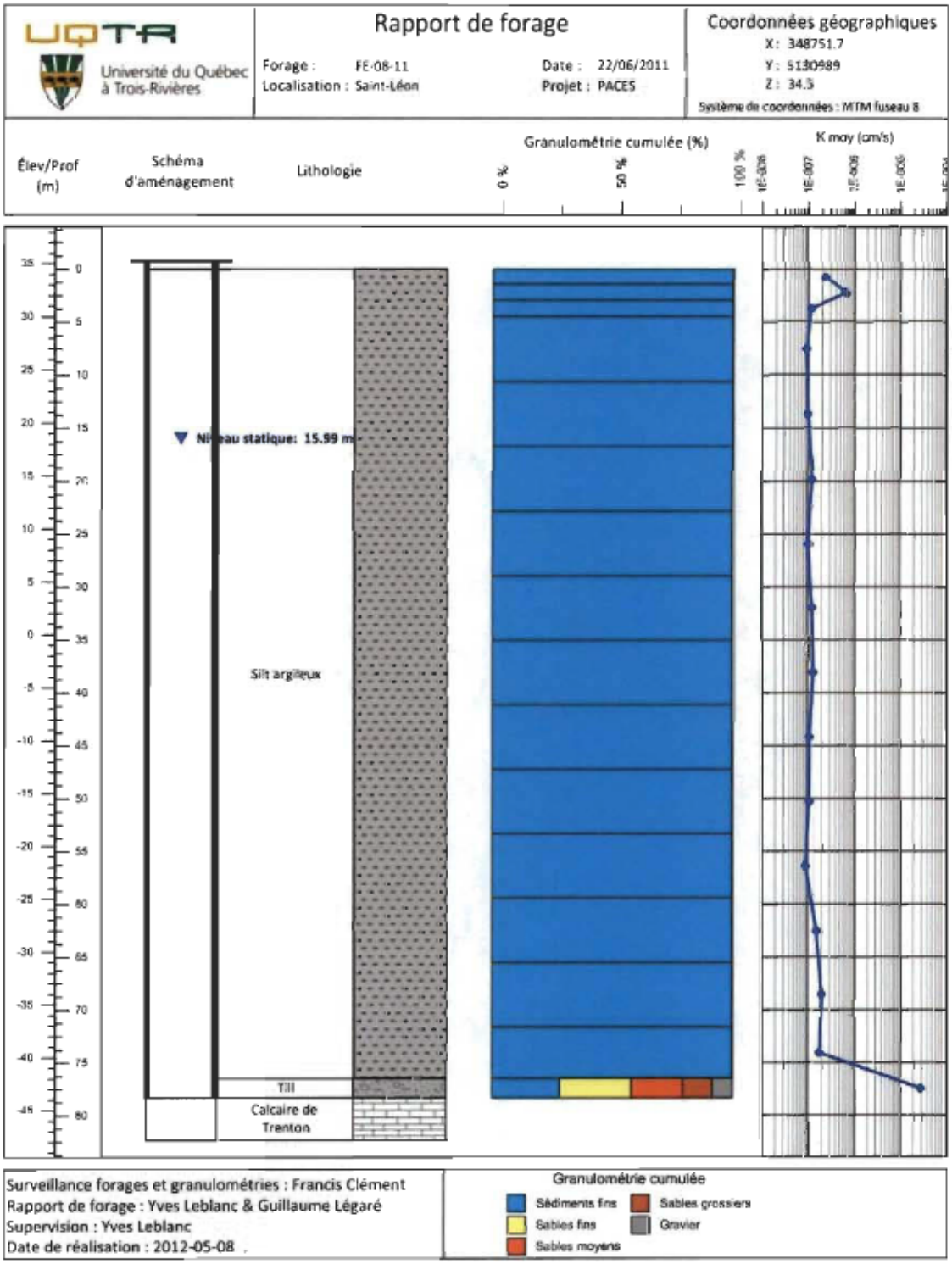


Figure 4.5 Rapport de forage- FE-08-11 – Saint-Léon.

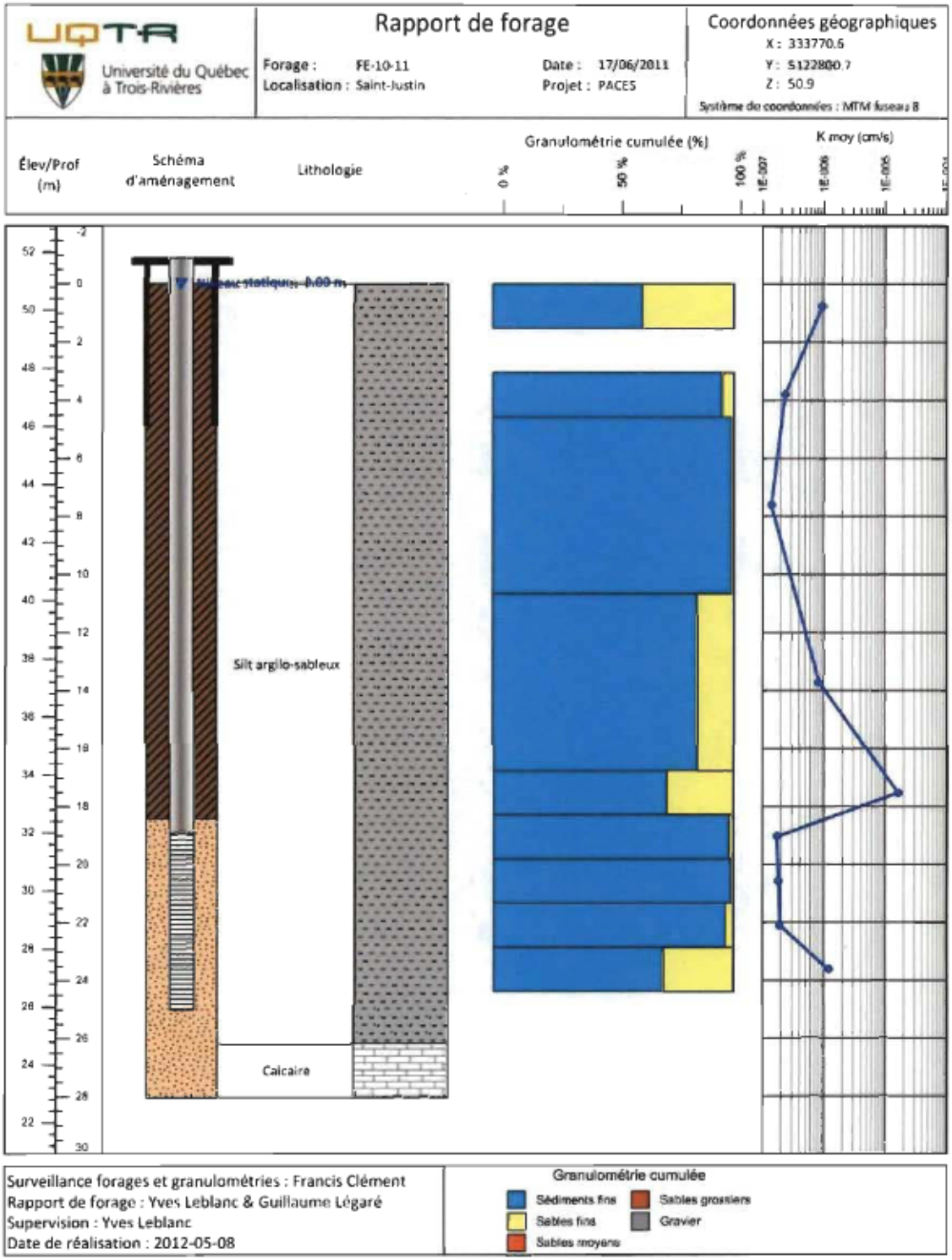


Figure 4.6 Rapport de forage- FE-10-11 – Saint-Justin.

4.2 Piedmont

Le secteur du Piémont a comme caractéristique géomorphologique principale la Moraine de Saint-Narcisse (Figure 4.7). Les aquifères de cette zone sont très exploités de part et d'autre de la crête de la moraine, surtout dans les secteurs de Saint-Édouard, Sainte-Ursule, Sainte-Angèle-de-Prémont, Saint-Paulin et Notre-Dame-du-Mont-Carmel. La recharge s'effectue principalement par les précipitations. La qualité de l'eau est en général excellente, bien que l'on retrouve quelques problématiques isolées de fer et de manganèse (Leblanc *et al.*, 2010).

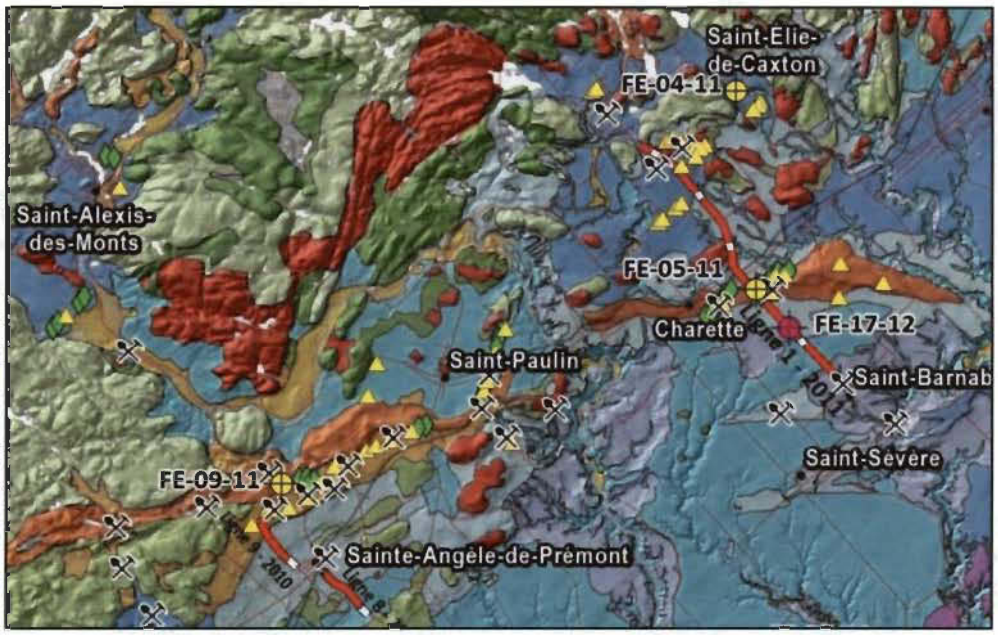


Figure 4.7 Contexte du piedmont.

Le rôle hydrostratigraphique de la Moraine de Saint-Narcisse est localement difficile à évaluer puisqu'on y recoupe en forage des faciès de granulométrie et de conductivités hydrauliques très variables. À l'échelle régionale, la structure est toutefois considérée comme un aquifère; la plupart des municipalités occupant la plaine située au nord du lac Saint-Pierre soutirent leur eau potable des aquifères avoisinants. La moraine joue un rôle essentiel dans le processus de recharge des aquifères sableux qui y sont connectés.

La moraine a été caractérisée sur trois segments : Sainte-Angèle-de-Prémont, Charette et Notre-Dame-du-Mont-Carmel. Dans le secteur de Sainte-Angèle-de-Prémont (Figure 4.8), plusieurs des sondages électriques réalisés (voir Annexe C) indiquent une épaisseur de sable de plus de 60 m. L'un des sondages électriques (SE-131) de même que deux sondages de sismique-réfraction (SR-31 et SR-32) permettent d'interpréter une remontée du socle rocheux à l'est du rang Waterloo. Au nord-est, en direction de Saint-Paulin, les sondages SE-100, SE-101, SR-47 et SR-48 indiquent plutôt la présence d'argile et/ou de silt très compacts sous une couche superficielle très mince sable grossier. Il est à noter que les relevés géophysiques n'ont pas permis d'identifier l'horizon d'argile recoupé par de nombreux forages dans ce secteur.

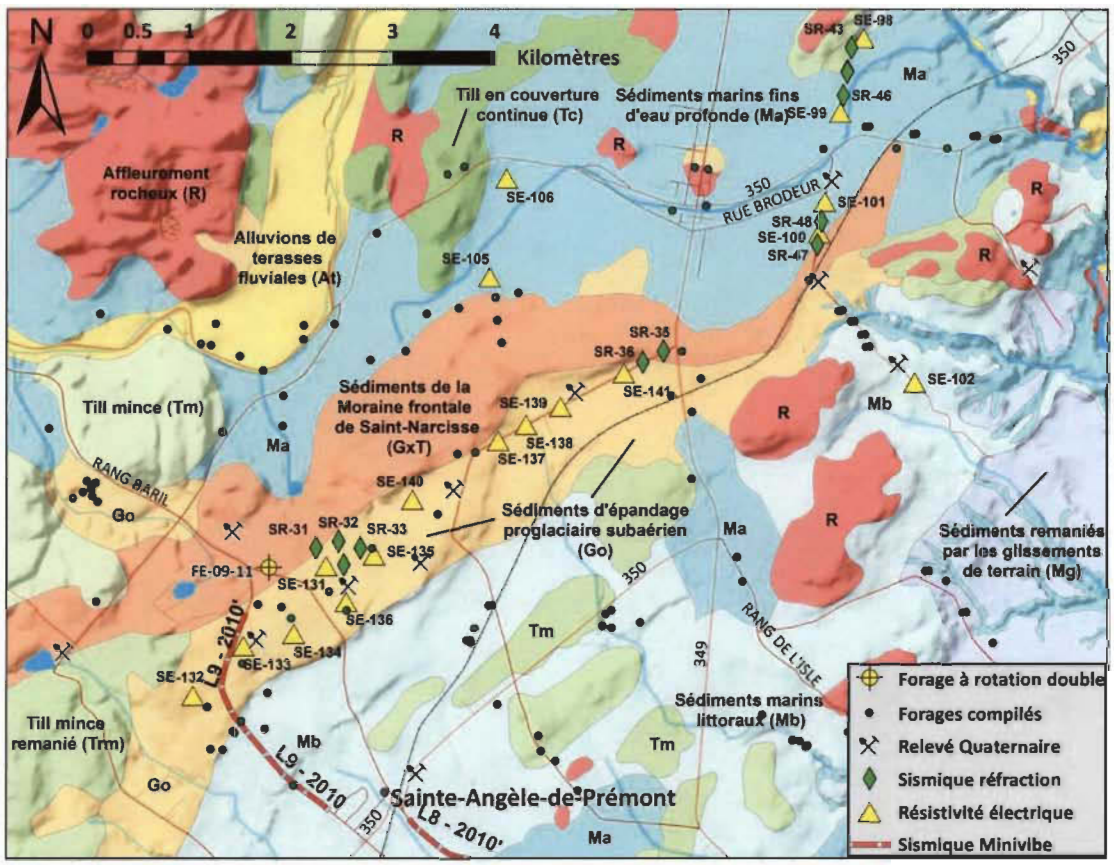


Figure 4.8 Localisation des travaux de terrain – Secteur Sainte-Angèle-de-Prémont.

Le forage FE-09-11 (Figure 4.9) fut réalisé dans la municipalité de Sainte-Angèle-de-Prémont, sur la Moraine de Saint-Narcisse. La roche en place (gneiss à grenat) est atteinte à 86,86 mètres. Le forage met en évidence une unité fluvio-glaciaire constituée

de sables (fins, moyens et grossiers) et de graviers à la base du forage qui fait une dizaine de mètres d'épaisseur. L'invasion de la Mer de Champlain est représentée entre 44,19 mètres à 67,05 mètres de profondeur. On y retrouve de fortes proportions de particules fines (silt et argile). La réavancée glaciaire ayant mis en place la Moraine frontale de Saint-Narcisse est représentée dans l'unité suivante. Sa granulométrie est caractérisée par des proportions variables de particules fines, de sable fin, moyen et grossier et de gravier, le tout doté d'une conductivité hydraulique très élevée associée à la grande porosité du matériel.

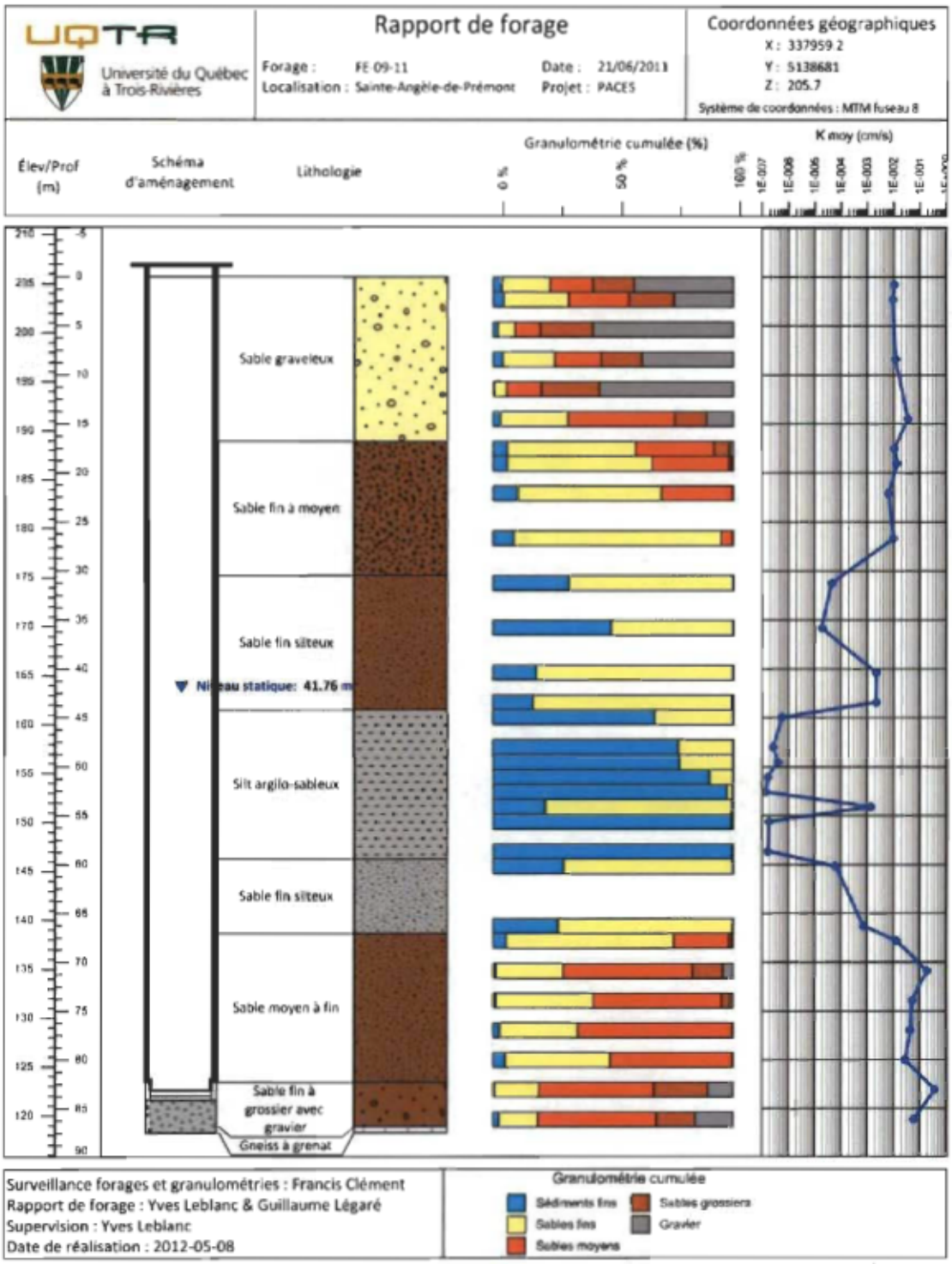


Figure 4.9 Rapport de forage- FE-09-11 – Sainte-Angèle-de-Prémont.

À Saint-Paulin, les sondages électriques (SE-98, SE-99, SE-100, SE-101 et SE-105; voir Annexe C) recoupent tous plus de 60 mètres d'argile, à l'exception du sondage SE-106, lequel permet d'identifier un sable silteux entre 30 et 60 mètres de

profondeur. Les sondages de sismique-réfraction (SR-43, SR-44, SR-45, SR-46, SR-47 et SR-48; voir Annexe D) permettent de préciser le profil du socle rocheux sous l'argile. Le socle rocheux interprété varie d'une profondeur de 19 mètres dans la section nord de la coupe transversale à la vallée à plus de 66 mètres dans les deux sondages au sud de cette coupe.

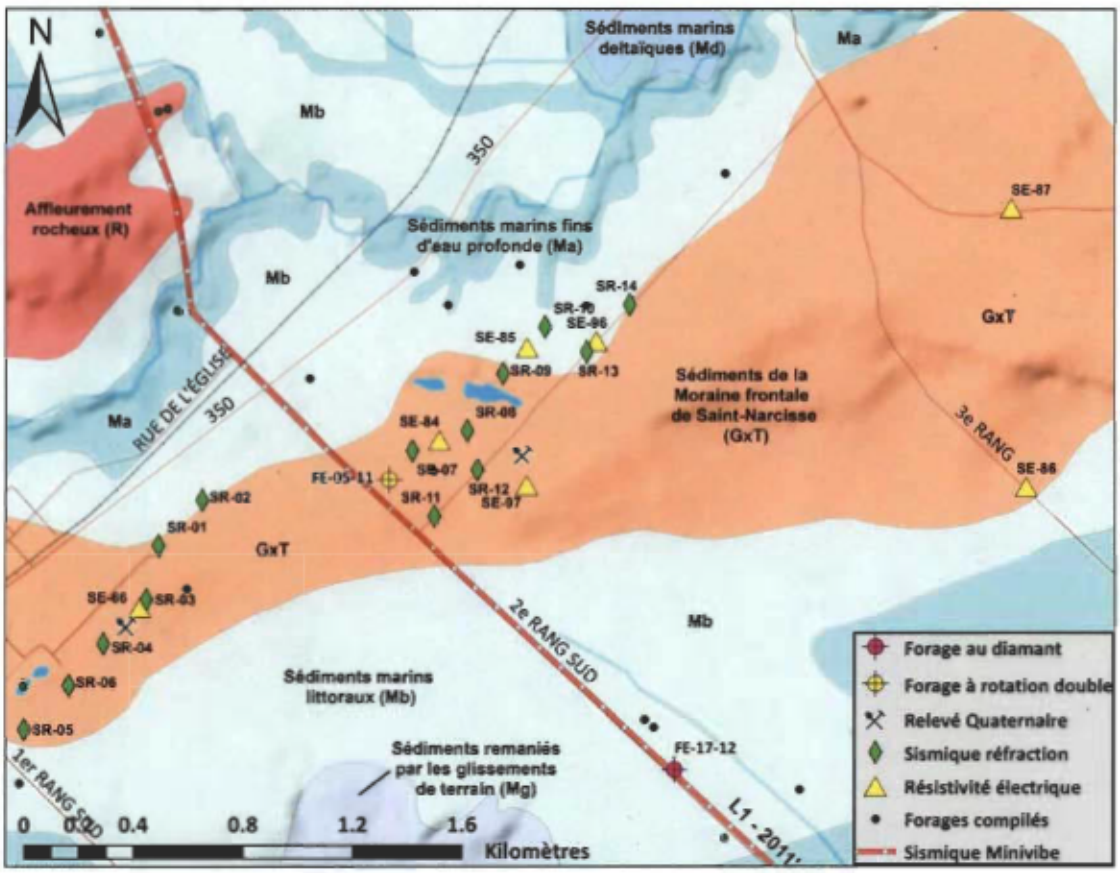


Figure 4.10 Localisation des travaux terrain – Secteur Charette.

Dans le secteur de Charette (Figure 4.10), deux types de résultats sont observés. Dans la portion centrale du dépôt de la moraine de St-Narcisse, les sondages électriques et sismiques (SE-84, SE-66, SE-96, SE-97, SR-05, SR-06, SR-07 SR-08, SR-11 et SR-12) exposent une unité de sable recouvrant un till jusqu'au socle rocheux. Aux bordures nord et sud du dépôt morainique (SE-85, SE-86, SE-95, SE-96, SR-01, SR-02, SR-09 et SR-10), on retrouve plutôt une séquence composée d'une couche de sable en surface, recouvrant une couche d'argile, laquelle surmonte soit un sable, soit le till, soit le socle rocheux. On peut remarquer une grande hétérogénéité dans les dépôts observés

dans le secteur; à l'intérieur d'une même sablière, il a été possible d'observer côte à côte, des sables lâches bien triés, des masses homogènes de till très compact et des lambeaux d'argile fossilifère. Les sablières situées dans le secteur de la moraine de Saint-Narcisse sont très actives, des coupes sont créées et détruites rapidement. La Figure 4.11 illustre les faciès retrouvés dans une sablière au sud de Charette.



Figure 4.11 Faciès du complexe morainique de Saint-Narcisse.
Silts sableux littoraux distaux (Mb) contenant des *Hiatella arctica* en thanatocénose, surmontés d'une unité fluvioglaciaire sablo-graveleuse stratifiés d'une granulométrie variant de fine à grossière du bas vers le haut, avec un faciès sommital grossier à blocaux.

La ligne de *Minivibe* L1-2011 (Figure 4.12) croise la Moraine de Saint-Narcisse dans un axe perpendiculaire à sa mise en place. La ligne débute sur un palier de roc précambrien enfoui sous des sables deltaïques marins moyens à grossier à Saint-Élie-de-Caxton. Le segment descend ensuite au travers une petite vallée avant de passer sur la moraine à la hauteur de Charette et de continuer de descendre la plaine argileuse jusqu'à Saint-Barnabé. L'élévation du socle se rabaisse ensuite par paliers à partir de 1,2 km, où les premiers sédiments fins sont identifiables à 172 mASL (*meters above sea level*, mètres au-dessus du niveau de la mer) installés par-dessus du matériel fluvioglaciaire comblant les dépressions du roc. Les deux unités présentent des épaisseurs semblables, variant de 1 m à 20 m chacune et fortement influencées par la variabilité locale de la topographie du roc. Le terrain s'abaisse progressivement jusqu'à 130 mASL à 3,6 km, où un affleurement important est rencontré.

La seconde portion de la ligne L1-2011 commence à environ 200 mètres au sud-est de la moraine. Celle-ci est localement couverte par une mince couche de sable, avant de faire place au matériel fluvioglaciaire de granulométrie très variable typiquement associé à une moraine. Les sables et graviers semblent reposer sur des lits argileux entrecroisés de biseaux de till associés aux mouvements du glacier lors de la mise en place dans la moraine (glaciotectonique). Le signal acoustique devient plus difficile à interpréter entre les kilomètres 0,5 et 0,8, probablement à cause du matériel grossier rencontré. Une unité de sable et gravier à la base de la séquence, sous la Moraine de Saint-Narcisse, est tout de même observable. Celle-ci est dotée d'une signature acoustique très différente des argiles la surmontant. Les lambeaux de till sont interprétés entre les kilomètres 0,1 et 2,3, où le till se plaque contre la roche en place. Celui-ci semble discontinu entre les kilomètres 2.4 et 3.0, où sa signature change pour celle d'un faciès moins dense, et donc interprété comme une unité fluvioglaciaire plus perméable d'une épaisseur pouvant atteindre 20 m.

Le forage FE-05-11 (Figure 4.13), réalisé dans la municipalité de Charette, est localisé directement dans l'axe de la moraine. Il s'agit du forage le plus profond réalisé dans le cadre de ce projet, le roc (gneiss à grenat) ayant été atteint à 133,5 mètres sous la surface. L'épaisseur importante de dépôts meubles à cet endroit peut être expliquée par la présence de la faille normale de Saint-Cuthbert, la limite entre le socle rocheux précambrien du Bouclier canadien et les roches sédimentaires des Basses-Terres du Saint-Laurent. La séquence marine fait localement plus de 70 mètres d'épaisseur, bien que les argiles soient moins bien représentées que dans les forages précédents (faciès proximal). Ces silts marins reposent sur des sables de granulométrie variant de fin à grossier qui correspondent à un mélange de till et possiblement de sédiments pré-Wisconsinien. La couche supérieure (0 à 54,86 mètres) est quant à elle associée à l'épisode de Saint-Narcisse et à la mise en place de la moraine frontale durant la dernière réavancée glaciaire. On y retrouve un étalement des sédiments allant des particules fines jusqu'aux graviers dans des proportions variables tout au long de cette couche, sans réelle stratification apparente.

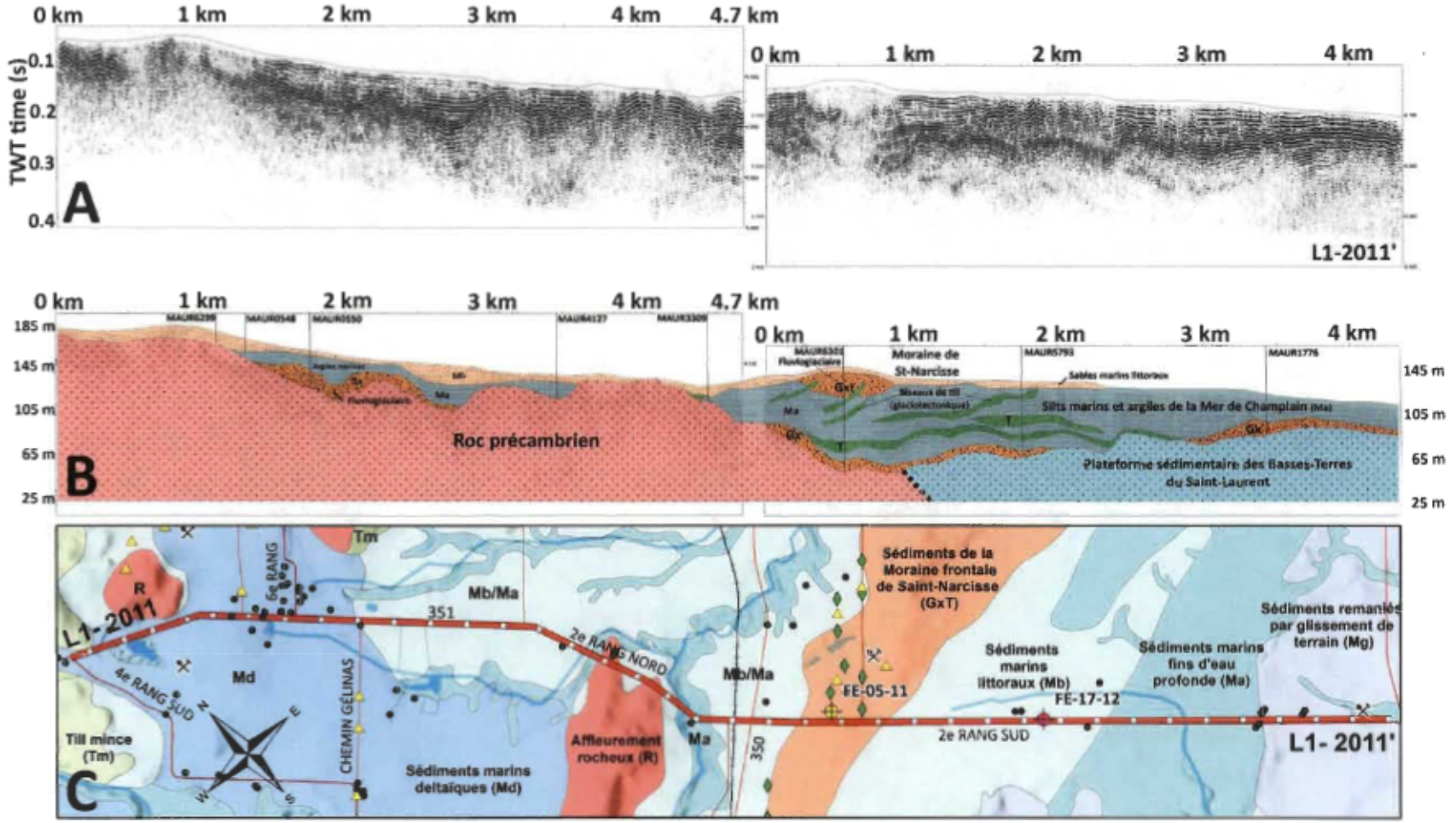


Figure 4.12 **Coupe géologique interprétée – Ligne *Minivibe* 1 – 2011**
A : Onde sismique, en secondes, **B :** Interprétation des résultats, élévation en mètres, **C :** Carte de localisation et formations superficielles (voir Figure 3.1 pour la légende des travaux sur le terrain).

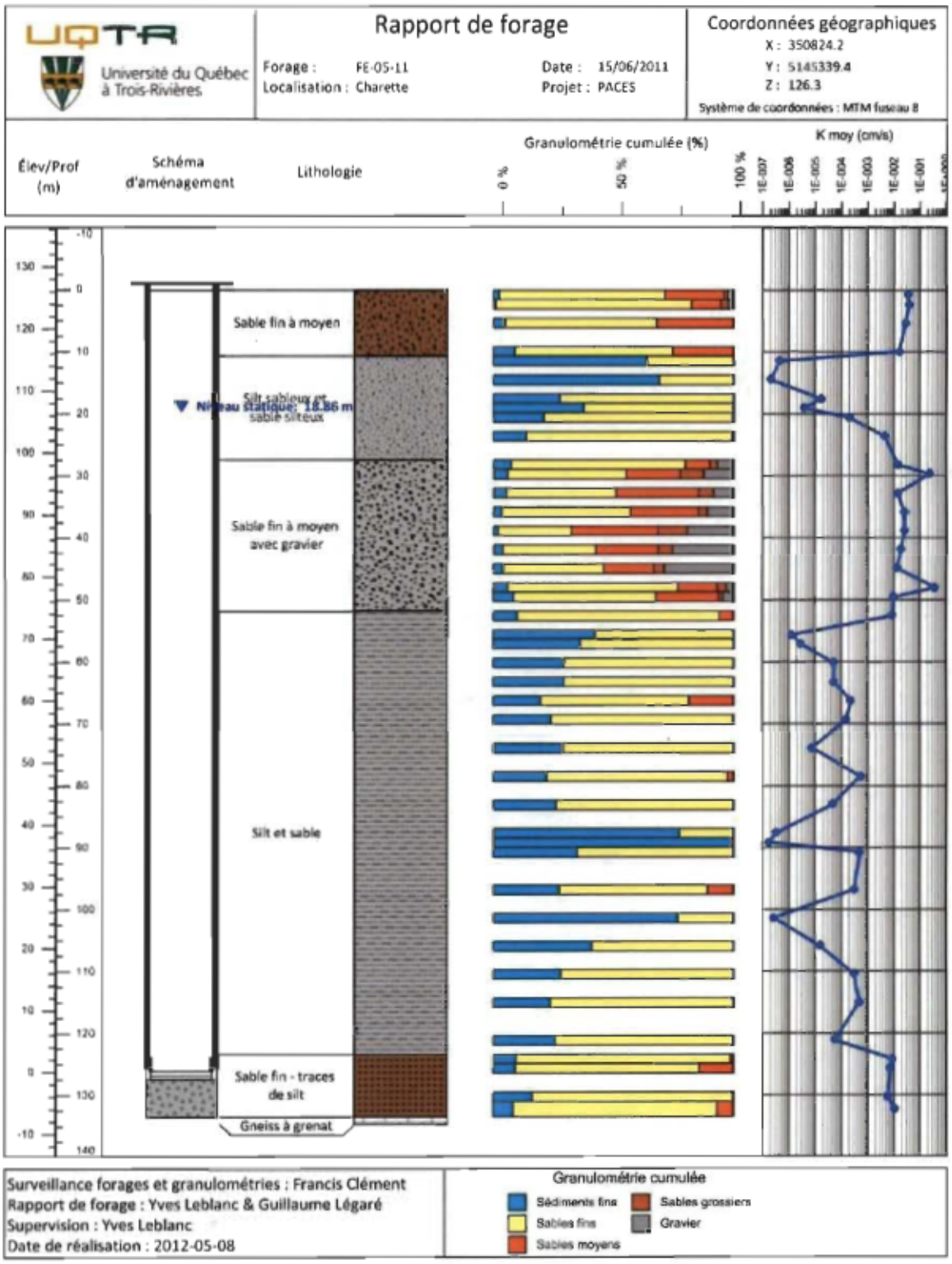


Figure 4.13 Rapport de forage- FE-05-11 – Charette.

Dans le secteur de Notre-Dame-du-Mont-Carmel (Figure 4.14), les mêmes types de résultats sont observés. Les sondages électriques et sismiques (SE-52, SE-61, SE-62, SR-15, SR-16, SR-17 et SR-18) montrent une unité de sable recouvrant un till, tandis qu'aux bordures du dépôt (SE-48, SE-60, SE-63, SR-19 et SR-20), on retrouve plutôt une séquence composée d'une couche de sable en surface, recouvrant une couche d'argile, laquelle surmonte une unité plus dense (soit un sable, soit le till, soit le socle rocheux).

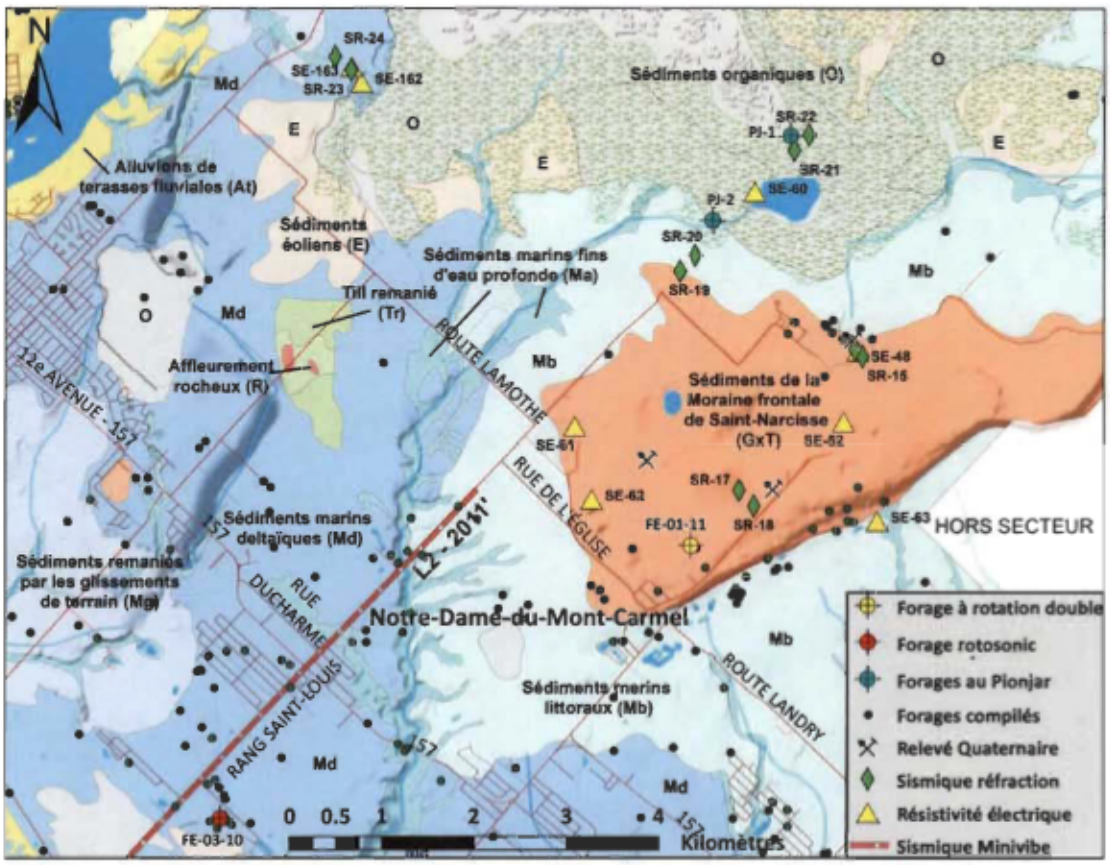


Figure 4.14 Localisation des travaux terrain – Secteur Mont-Carmel.

Le forage FE-01-11 (Figure 4.15) fut réalisé à Notre-Dame-du-Mont-Carmel, directement sur la Moraine de Saint-Narcisse. Une séquence stratigraphique complexe de 82 mètres de dépôts est recoupée en cet endroit et repose sur un socle gneissique. Une mince unité de sable fin à moyen est retrouvée à la base du forage et est associée au Till de Gentilly. La séquence marine de la Mer de Champlain et ses sédiments fins silteux surmontent le till sur une épaisseur de 35 mètres, une séquence entrecoupée par

un lit de sédiments grossiers d'une dizaine de mètres d'épaisseur, possiblement associée à première phase de formation de la Moraine de Saint-Narcisse. Une unité de sables et silts marins proximaux (prodeltaïques) d'environ 15 mètres d'épaisseur fait la transition entre le milieu marin profond et la portion supérieure de la coupe, composée principalement de sable dont la granulométrie varie de fine à la base à grossière en surface.

La ligne *Minivibe* L2-2011 (Figure 4.16) se trouve également dans l'axe de la moraine, mais du côté Est du Saint-Maurice, à Notre-Dame-du-Mont-Carmel. Le segment débute non loin de la rive du Saint-Maurice, où environ 50 mètres de sables silteux et silts argileux sont recoupés avant d'atteindre le roc. L'activité sédimentaire associée à la réavancée glaciaire durant l'épisode de Saint-Narcisse est bien visible dans cette coupe, le Till de Gentilly étant confiné par des silts argileux marins tout au long de la ligne. L'épaisseur du till varie de 1 m dans la portion sud-ouest à plus de 20 m au kilomètre 3,5, où une unité fluvioglaciaire est interprétée, comblant un rabaissement du roc. Des sables marins littoraux et deltaïques occupent la portion superficielle de la coupe, exception faite des bras de la Rivière Cachée qui sont coupés au kilomètre 3,75 et 0,5 (2^e portion de la coupe), qui sont encaissés jusqu'aux sédiments marins fins.

Le forage rotosonic FE-03-2011 (Figure 4.17) a également été réalisé à Notre-Dame-du-Mont-Carmel dans l'axe de la moraine, mais dans un secteur où les dépôts grossiers superficiels ont été érodés. On retrouve en surface un mince aquifère composé de sables marins deltaïques faisant une dizaine de mètres d'épaisseur, lequel est assis sur des sédiments marins qui deviennent progressivement de plus en plus fins avec la profondeur. Entre 72 et 60 mASL, un horizon grossier est observable dans la séquence de Champlain. Ce diamicton serait associé à l'extension souterraine de la Moraine de Saint-Narcisse, des fossiles d'origine marine ayant été observés dans les sédiments sous-jacents. Le socle est rencontré à 45 mASL, où l'argile recouvre directement le roc.

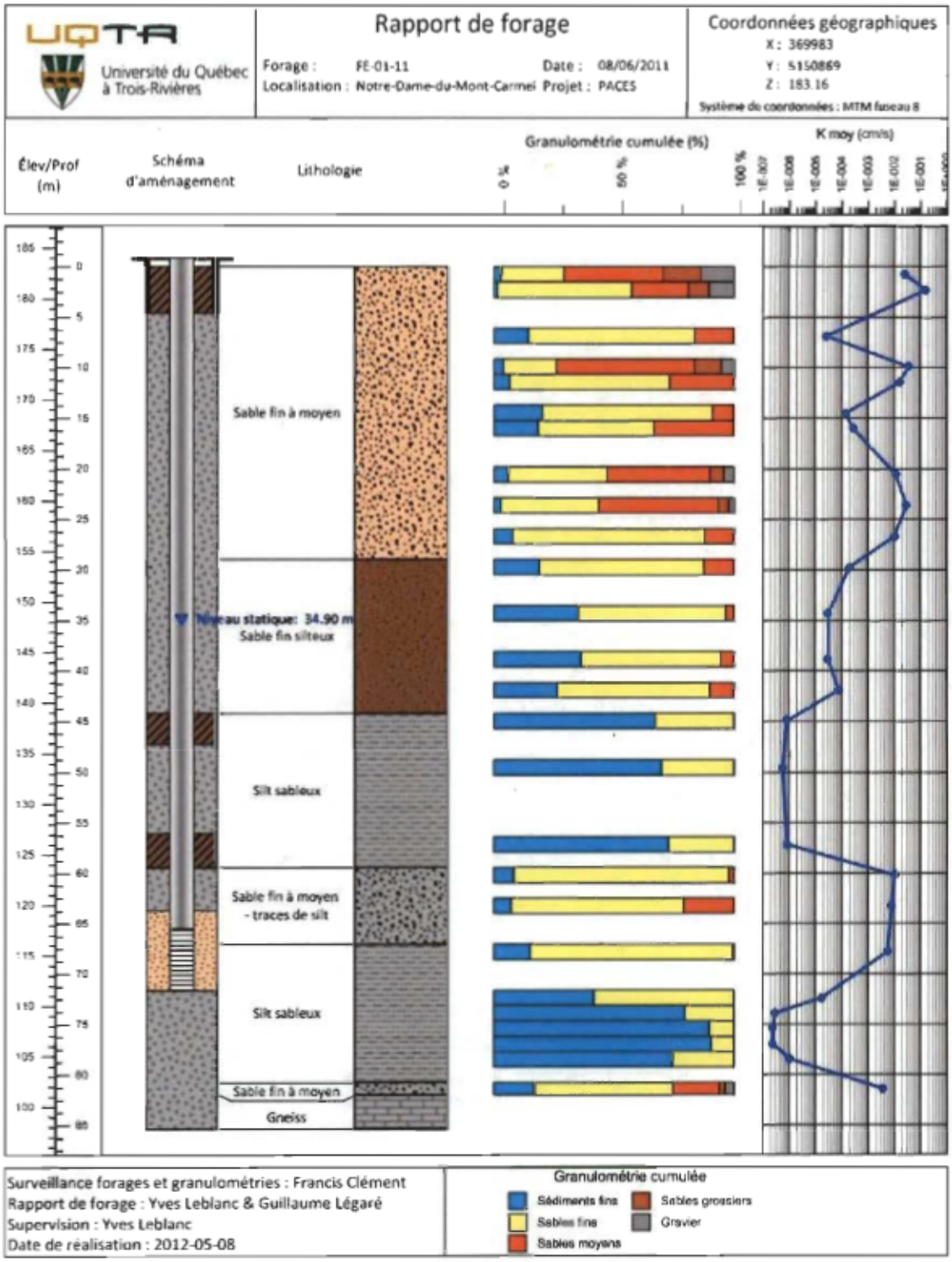


Figure 4.15 Rapport de forage- FE-01-11 – Notre-Dame-du-Mont-Carmel.

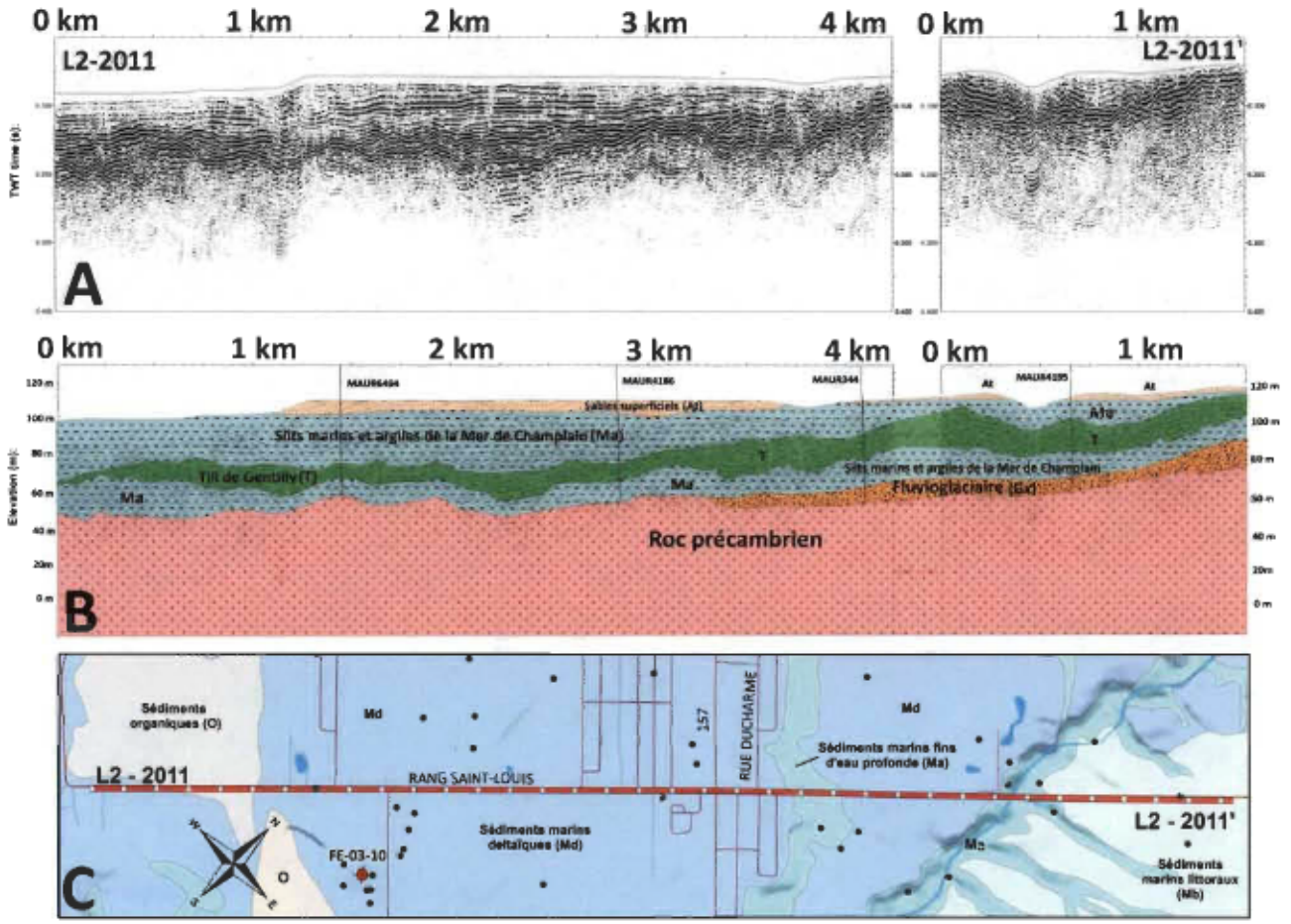


Figure 4.16 **Coupe géologique interprétée – Ligne *Minivibe* 2 – 2011**
A : Onde sismique, en secondes, **B :** Interprétation des résultats, élévation en mètres, **C :** Carte de localisation et formations superficielles (voir Figure 3.1 pour la légende des travaux sur le terrain).

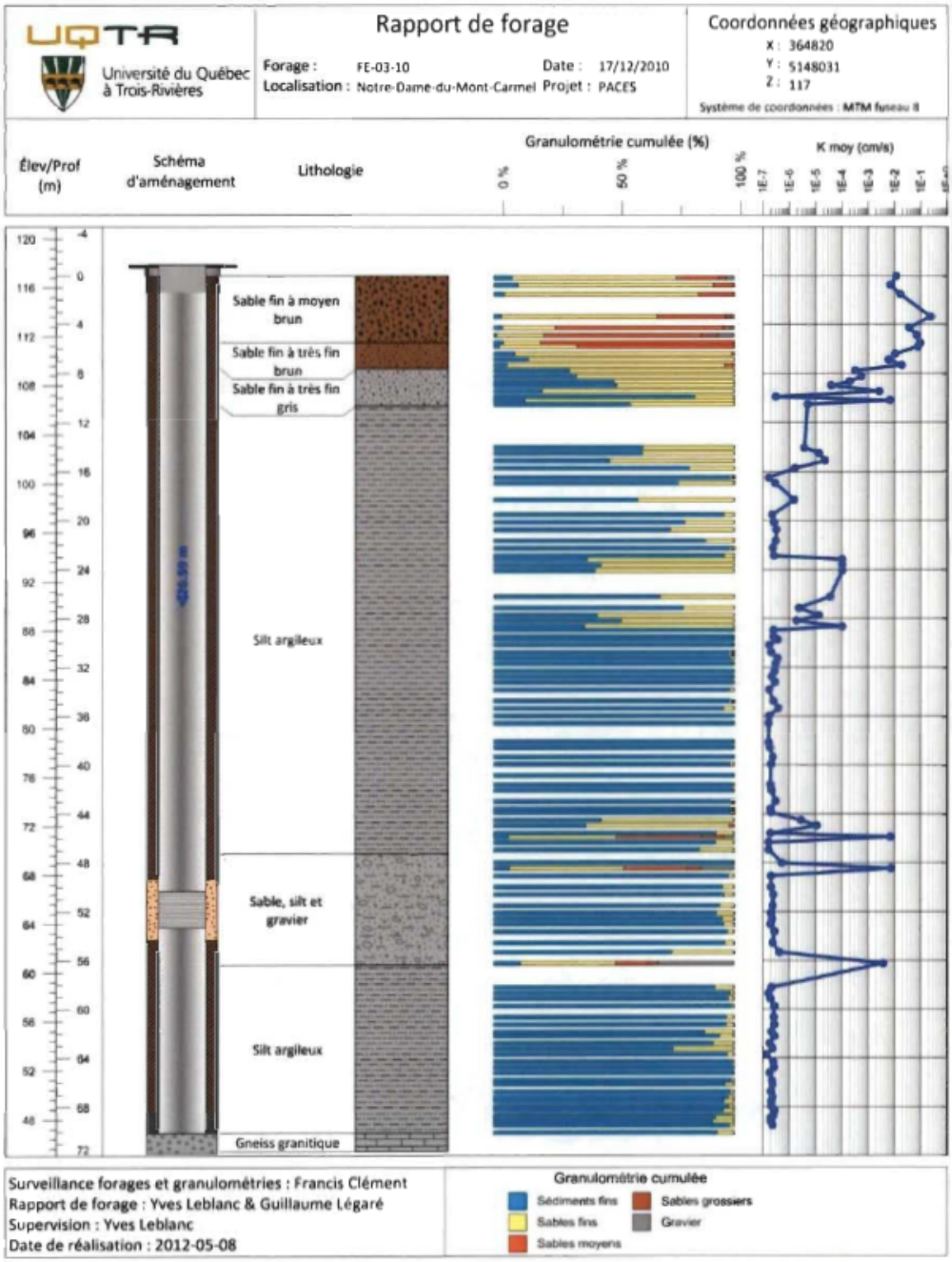


Figure 4.17 Rapport de forage- FE-03-11 – Notre-Dame-du-Mont-Carmel.

Ainsi, l'aquifère exploité par la Régie d'Aqueduc de Grand-Pré à Sainte Angèle-de-Prémont occuperait l'espace situé entre les rangs Paul-Lemay et Waterloo. Il existerait probablement un aquifère non exploité à Charette. Cet aquifère serait à nappe libre au centre du dépôt, tandis qu'il serait à nappe captive au nord et au sud. Le même contexte est observé à Notre-Dame-du-Mont-Carmel où un puits municipal (puits Bélisle) exploite un aquifère à nappe captive en bordure nord du dépôt morainique.

4.3 Paléodelta

Le paléodelta de la rivière Saint-Maurice forme un vaste cône d'épandage étagé mis en place à son embouchure par-dessus une mince couche de sédiments marins silteux dans le secteur Cap-de-la-Madeleine, et par-dessus des sédiments datant du Quaternaire ancien surtout dans le secteur de Pointe-du-Lac. Cette formation deltaïque affleurant sur cette portion du territoire forme l'aquifère le plus exploité de la région, dans les secteurs Cap-de-la-Madeleine, Trois-Rivières, Pointe-du-Lac, Trois-Rivières Ouest, Sainte-Marthe-du-Cap et Saint-Louis-de-France. Les municipalités de Saint-Étienne des Grès, Saint-Boniface et Notre-Dame-du-Mont-Carmel y puisent également leur eau potable. Tout comme le secteur du piémont, l'eau présente parfois des problématiques de fer et de manganèse, mais aussi de chlorures. La nappe exploitée dans ce secteur urbanisé est libre, et donc vulnérable à la contamination.

Le paléodelta a été investigué sur les deux rives du Saint-Maurice (Figure 4.18). Le secteur de Pointe-du-Lac à Trois-Rivières est particulier puisqu'il forme la transition entre le contexte de la plaine argileuse et le secteur du paléodelta typique. Le secteur du Cap-de-la-Madeleine, du côté Est de la rivière, est plus caractéristique de l'aquifère en nappe libre exploité par la Ville de Trois-Rivières.

Les données acquises ont permis de préciser l'épaisseur et la nature du substratum imperméable de l'aquifère à nappe libre composé de sables deltaïques et littoraux situé principalement à Trois-Rivières, mais également à Saint-Étienne-des-Grès, St-Boniface et Notre-Dame-du-Mont-Carmel. Cet aquifère a été caractérisé à l'aide de 22 sondages

électriques, 7 sondages sismiques, 12 essais de pénétration au cône et 31,6 km de lignes de sismique réflexion haute-résolution.

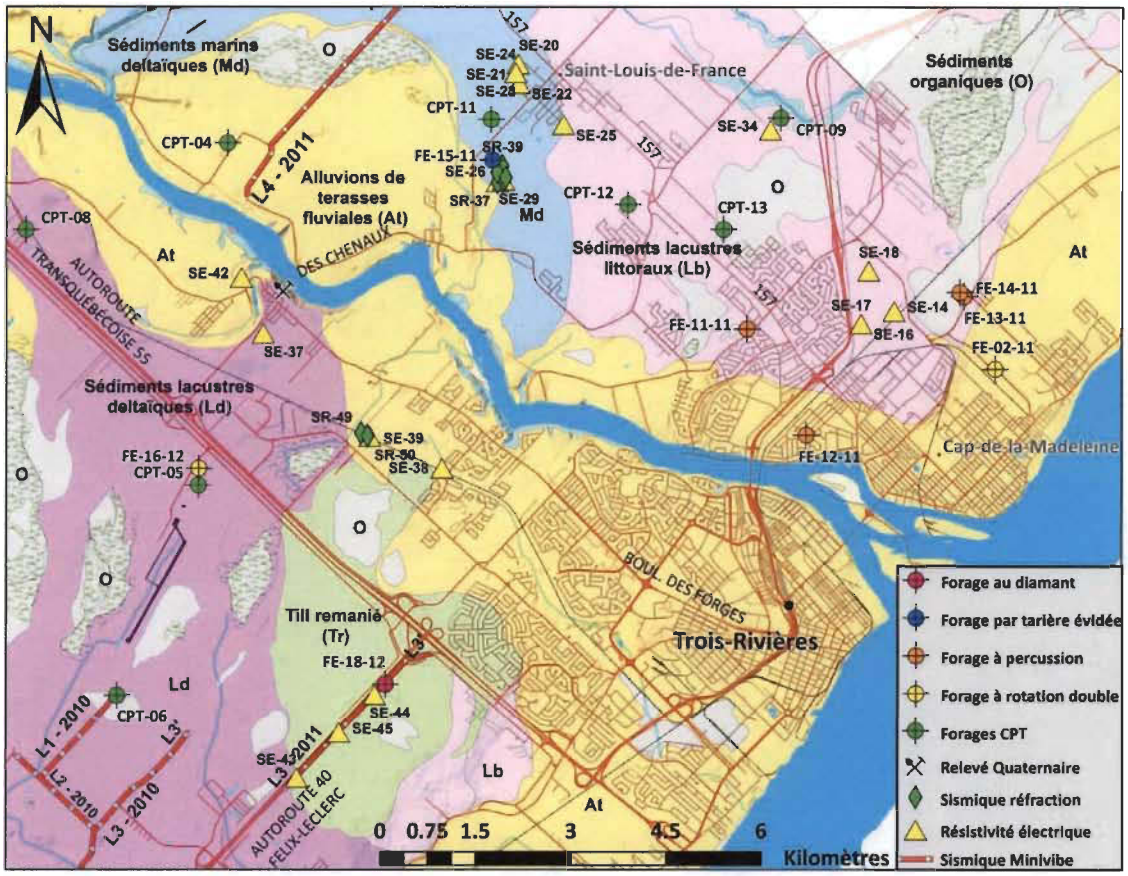


Figure 4.18 Localisation des travaux terrain – Secteur Trois-Rivières, Cap-de-la-Madeleine & Saint-Louis-de-France (les forages compilés ont été omis dans le but d'alléger la carte).

4.3.1 Secteur Ouest (Pointe-du-Lac & Trois-Rivières-Ouest)

Les lignes de *Minivibe* 5-2010, 4-2010, 3-2010 et 3-2011 forment un segment quasi parallèle à l'axe du fleuve Saint-Laurent. Ces segments illustrent bien la transition entre le milieu sédimentaire marin d'eau profonde typique de la plaine argileuse et la géologie complexe du secteur de Trois-Rivières, incluant les sables du Lac à Lampsilis, le panache de sédiments du Quaternaire ancien et l'affleurement du Till de Gentilly.

Sur la ligne 5 (Figure 4.19), la topographie du roc montre peu de variation d'ouest en est, atteignant – 100 mASL à 1,5 km, et où les sédiments fins de la Mer de Champlain remplissent le bassin sur plus de 80 mètres. Les alluvions récentes du lac Saint-Pierre actuels coiffent la séquence avec une dizaine de mètres de sables fins et silts. Un réflecteur est identifiable dans le milieu de la séquence marine. Toutefois, la description du seul forage recoupant la séquence entière ne donne aucune indication sur un changement de matériel ou de granulométrie. Ce réflecteur pourrait correspondre au diamicton de Yamachiche (Occhietti, 1980), un mince horizon grossier discontinue associé à l'épisode de Saint-Narcisse. À 4,6 km, un biseau de sédiments quaternaires anciens prend forme à la base de l'argile. Environ 60 m d'argile est recoupée avant d'atteindre des formations sableuses de granulométrie variables à la base. La séquence sous l'argile comprend le till de Gentilly, les sables des Vieilles Forges, les Rythmites du Saint-Maurice, les Varves de Deschaillons, les Sédiments de Saint-Pierre ainsi que les Sables de Lotbinière. Seuls les Sables de Lotbinière ont été identifiés hors de tout doute raisonnable dans les descriptions de forages, et ont donc été interprétés sur les coupes stratigraphiques. Les autres formations plus récentes ont été regroupées sous l'identifiant « Sédiments quaternaires anciens non-différenciés (Q) ».

La ligne 4-2010 (Figure 4.20) débute une centaine de mètres à l'est de la ligne 5-2010 sur le même axe. Le till et les sédiments anciens y sont maintenant mieux représentés que l'argile, qui passe à une épaisseur d'environ 30 m. Les contacts sont conformes et peu de variations sont observées, exception faite d'une incursion sableuse présumée glaciomarine à l'intersection de la ligne 4-2010 et 3-2010, scellée entre les sédiments marins fins et le till. Sur la ligne 3-2010, l'épaisseur du till passe de 4 mètres au début de la coupe à plus de 20 mètres au kilomètre 1,4, là où le Sable inférieur de Lotbinière commence à disparaître. Les silts et argiles de la Mer de Champlain s'estompent complètement à 2,8 kilomètres, où les sables du Lampsilis reposent directement sur le till qui remonte vers la surface en suivant les sédiments anciens. Les signaux de réflexion deviennent moins intéressants en raison du till très compact et dense près de la surface, et les contacts deviennent plus difficiles à identifier. En forage,

les sédiments quaternaires anciens occupent la plus grande partie de la colonne, faisant plus de 80 mètres d'épaisseur.

La ligne 3-2011 (Figure 4.21) correspond à la continuité de cette séquence, mais environ 1 km plus au sud. Les sables du Lampsilis ont laissé leur place au till de Gentilly qui affleure sur les 3 kilomètres de la ligne. Les forages gaziers dotés de descriptions de forage précises ainsi que le forage FE-18, réalisé dans le cadre de ce projet, permettent ici de différencier les Sables des Vieilles Forges et les Rythmites du Saint-Maurice des sédiments quaternaires anciens plus profonds. Puisque le roc n'est pas atteint en forage, le dernier réflecteur identifié sur le profil de géophysique est interprété comme le contact du socle; environ 50 mètres de dépôts sont recoupés localement.

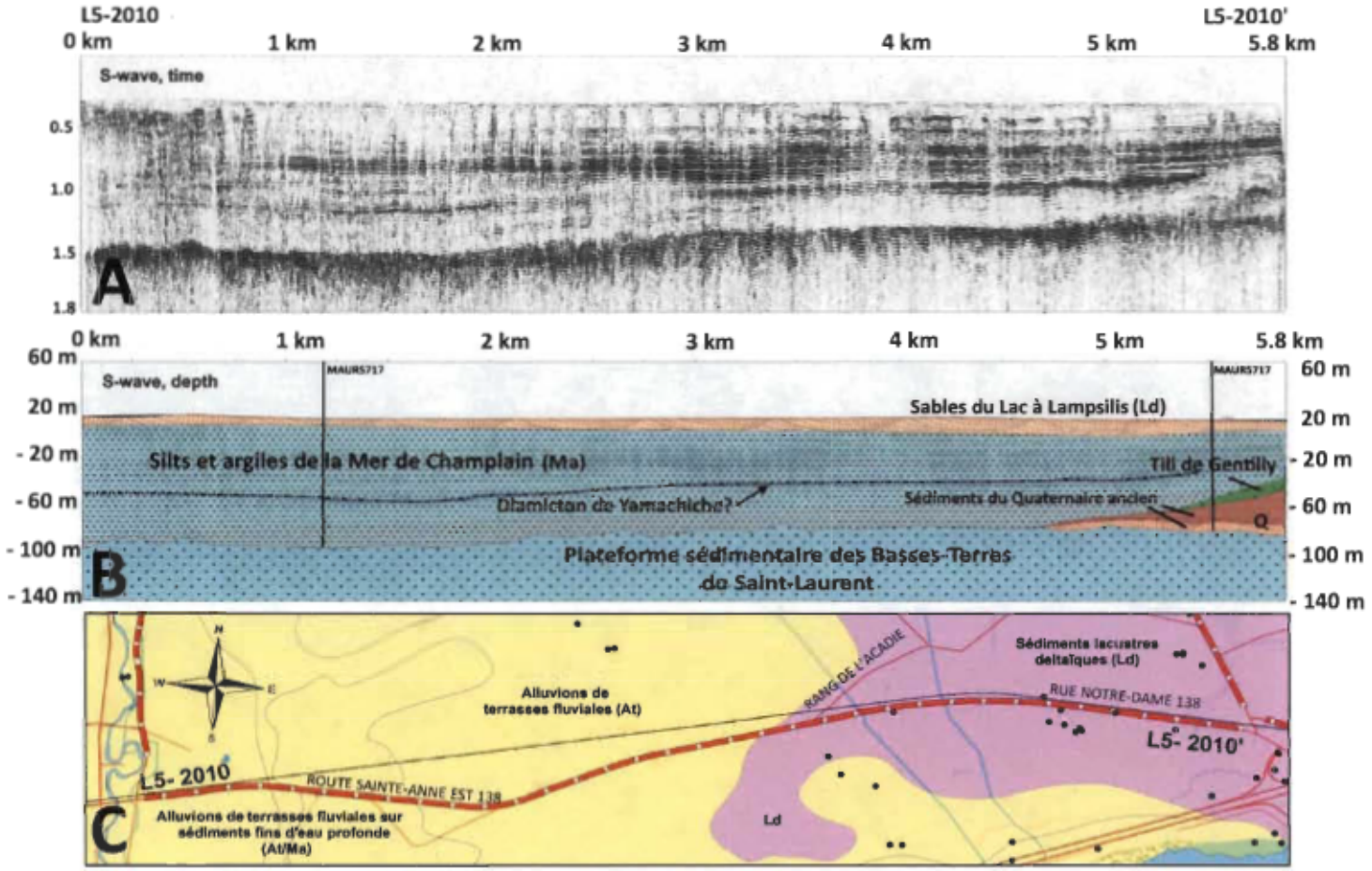


Figure 4.19 **Coupe géologique interprétée – Ligne *Minivibe* 5 – 2010**

A : Onde sismique, en secondes, **B :** Interprétation des résultats, élévation en mètres, **C :** Carte de localisation et formations superficielles (voir Figure 3.1 pour la légende des travaux sur le terrain).

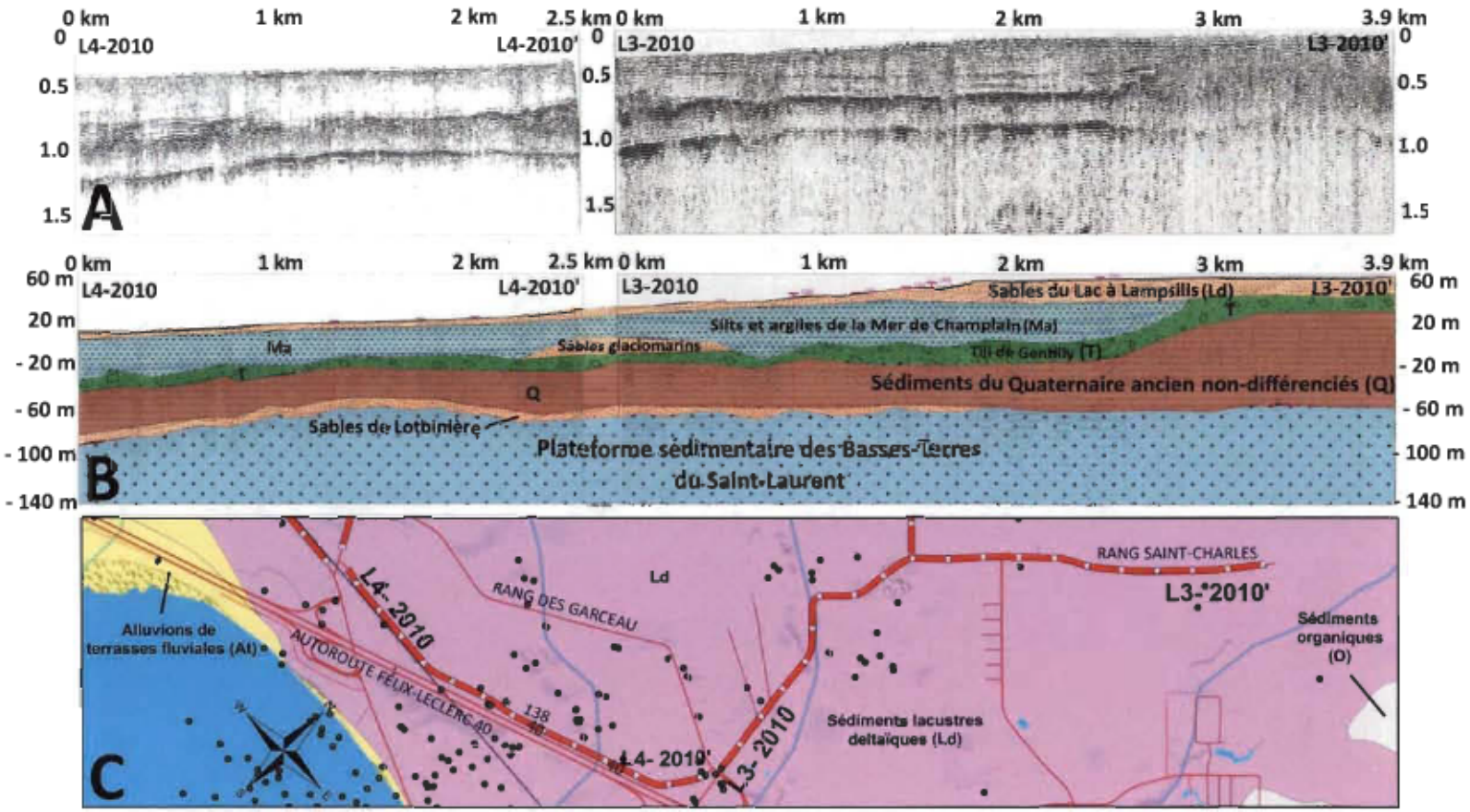


Figure 4.20 **Coupe géologique interprétée – Lignes *Minivibe* 4 et 3 – 2010**
A : Onde sismique, en secondes, **B :** Interprétation des résultats, élévation en mètres, **C :** Carte de localisation et formations superficielles (voir Figure 3.1 pour la légende des travaux sur le terrain).

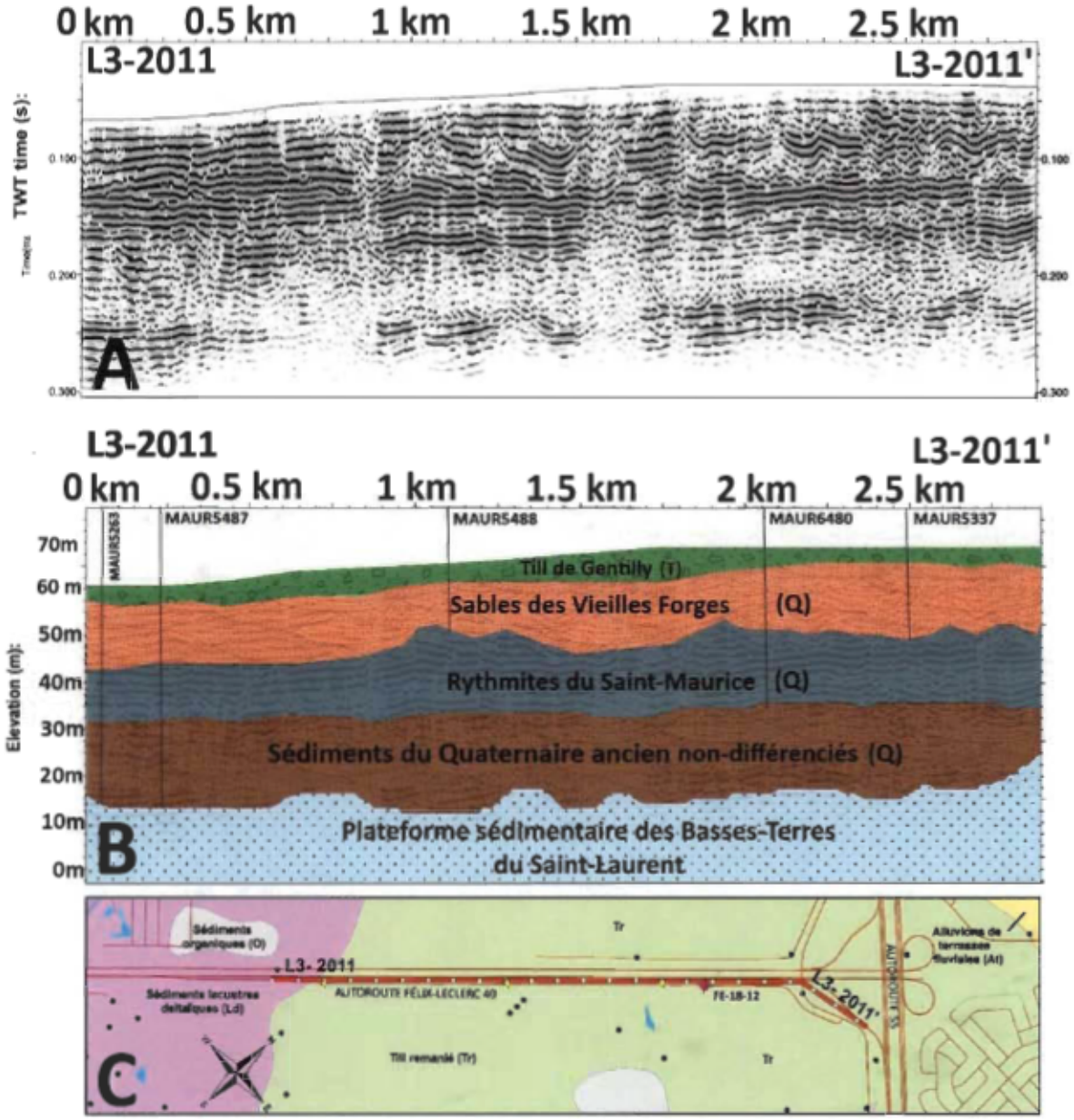


Figure 4.21 **Coupe géologique interprétée – Ligne *Minivibe* 3 – 2011**
A : Onde sismique, en secondes, **B :** Interprétation des résultats, élévation en mètres, **C :** Carte de localisation et formations superficielles (voir Figure 3.1 pour la légende des travaux sur le terrain).

Situés sur la rive ouest de la rivière Saint-Maurice, les sondages CPT-05, CPT-07 et CPT-08 (voir Annexe D) affichent un profil quasi-identique, montrant des faciès centraux plus fins entre deux strates de sables grossiers. Le CPT-06, quant à lui, montre un faciès grossier sur plus de 30 mètres, sans jamais rencontrer d'horizon plus fin, avant d'atteindre les sédiments marins.

Le forage FE-16-12 (Figure 4.22) fut réalisé à proximité de l'aéroport de Trois-Rivières, dans le contexte hydrogéologique du paléo-delta de la rivière St-Maurice. Ce forage visait à caractériser la distribution hydrogéochimique verticale dont notamment les concentrations en fer et en manganèse de l'eau souterraine exploitée par la ville de Trois-Rivières. Le forage fut réalisé jusqu'à une profondeur de 45,72 mètres, où une formation aquitard fut atteinte. Sept crépines furent installées afin de pouvoir procéder à des échantillonnages d'eau souterraine à différentes profondeurs. Un échantillon d'eau fut prélevé pour chaque crépine afin de déterminer la composition physico-chimique de l'eau en fonction de la profondeur. Une augmentation de la concentration en manganèse en fonction de la profondeur a pu être observée. Au niveau de la granulométrie, l'ensemble du forage est caractérisé par une variation entre les proportions de sable fin et de sable moyen. Les particules fines sont pratiquement inexistantes, à l'exception d'un horizon situé entre 8 et 14 mètres de profondeur où elles atteignent 20%. La colonne stratigraphique complète rencontrée lors de ce forage est associée au paléo-delta de la rivière St-Maurice. Un échantillon de bois prélevé à 29,87 mètres de profondeur fut daté à 8 920 ± 50 B.P. et permet ainsi de valider la géochronologie locale.

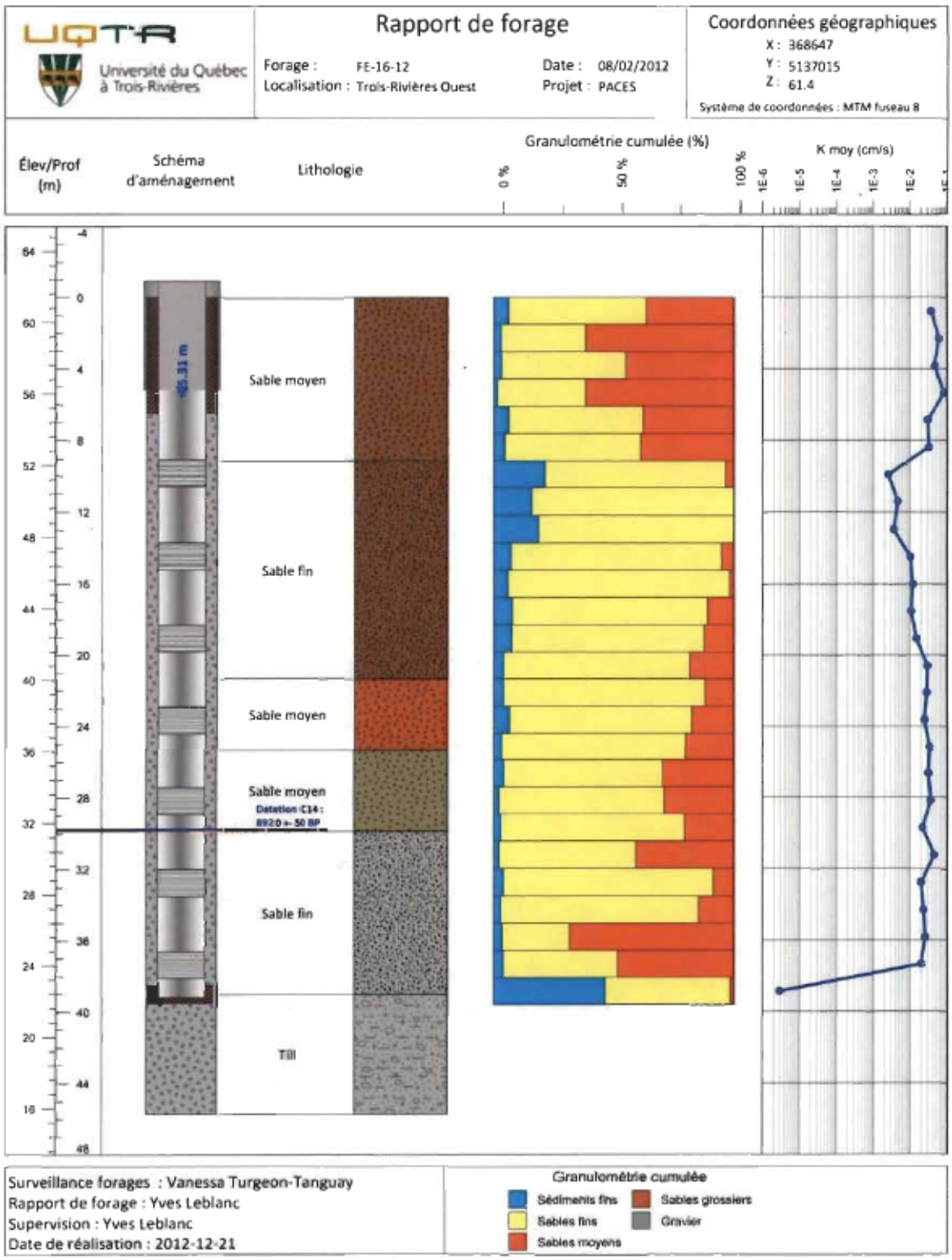


Figure 4.22 Rapport de forage- FE-16-11 – Trois-Rivières (Trois-Rivières).

4.3.2 Secteur Est (Trois-Rivières & Cap-de-la-Madeleine)

Dans le secteur du Cap-de-la-Madeleine, un mélange de sables marins deltaïques, lacustres et alluvionnaires forme un vaste aquifère d'une épaisseur variant de 11 à 35 mètres. Celui-ci repose sur un substratum argileux imperméable possédant une pente moyenne conforme à la surface topographique, en direction SE. Les épaisseurs les plus grandes sont recoupées dans la portion centrale du dépôt, tandis que les limites géographiques de celui-ci sont caractérisées par une épaisseur de sable de plus en plus faible. Le modèle conceptuel de cet aquifère est illustré à la Figure 4.23.

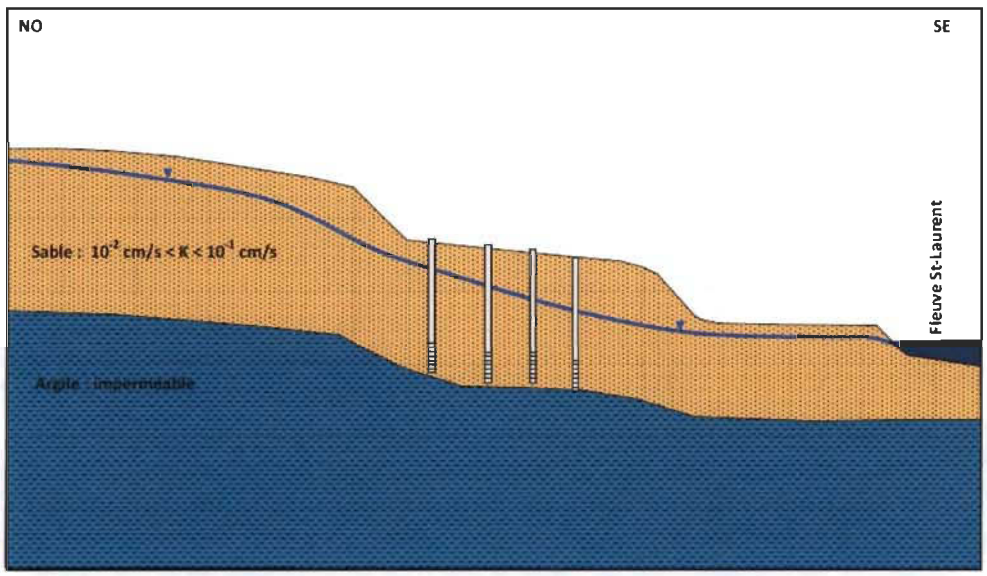


Figure 4.23 Modèle hydrogéologique conceptuel de l'aquifère du Cap-de-la-Madeleine (Leblanc *et al.* 2010).

L'interprétation des données lithostratigraphiques récoltées permet d'évaluer que l'aquifère n'est pas homogène mais plutôt fortement stratifié, sa composition variant d'un sable moyen à un sable silteux. L'épaisseur de l'aquifère varie de 11 à 32 mètres. Les épaisseurs les plus importantes sont recoupées dans la portion centrale du dépôt, tandis que les bordures externes du dépôt sont caractérisées par des plus faibles épaisseurs de sable.

La recharge de l'aquifère s'effectue uniquement par l'infiltration des précipitations, tandis que la vidange de l'aquifère s'effectue via les puits de production

ainsi que par des résurgences vers des cours d'eau. Le substratum imperméable de ces aquifères sableux est constitué d'argile, et le contact entre ces formations est généralement net.

Dans le secteur du Cap-de-la-Madeleine (rive est de la rivière Saint-Maurice, Figure 4.18), les forages CPT-12 et 13 (voir Annexe D) montrent un architecture de lits de sables fins/silts sableux sur une épaisseur d'une dizaine de mètres, correspondant à l'épisode du Lac à Lampsilis, surmontés d'un horizon plus grossier et graveleux. Après avoir traversé un mince horizon de sables moyens à grossiers, probablement associés au delta marin en phase de régression, l'argile est atteinte rapidement à une altitude relative de 41 mASL. Un kilomètre plus au nord, les forages CPT-03, CPT-09, CPT-10 et CPT-11 affichent des faciès beaucoup plus grossiers, alternant entre des lits de sables grossiers moyens, atteignant l'argile à 30 mASL. Le CPT-04, situé dans les sédiments alluviaux récents du Saint-Maurice actuel, montre une unité sommitale grossière de 5 mètres surmontant 10 mètres de sables fins silteux marins lités. Les sables passent ensuite d'une granulométrie fine à grossière sur 7 mètres avant la fin du forage à 36 mASL.

La ligne L4-2011 (Figure 4.24) débute à 300 mètres de la rive est du Saint-Maurice, sur la rue des Marguerites à Saint-Louis-de-France. Plus de 30 mètres de sables de terrasses alluviales associés aux anciens niveaux du Saint-Maurice sont recoupées au début de la ligne. Ils reposent sur une couche de sédiments fins d'environ 15 mètres d'épaisseur. L'absence du réflecteur typique du Till de Gentilly permet d'affirmer que cette argile est localement appuyée directement sur le roc, hypothèse appuyée par des données de forages historiques. Le roc étant légèrement encaissé dans l'axe principal de la rivière, il remonte progressivement pour atteindre un seuil à 40 mASL au kilomètre 0,8, où il devient plus bosselé. Les sables de terrasses sont remplacés par les sédiments organiques d'une tourbière entre 1,7 km et 2,6 km, sédiments qui reposent directement sur les argiles. Après cette zone humide, les sables alluviaux sont remplacés par les sables marins deltaïques d'un ancien bras de mer qui s'est formé dans un rabaissement du socle rocheux sédimentaire. Cette formation atteint 35 mètres d'épaisseur au kilomètre 3,4.

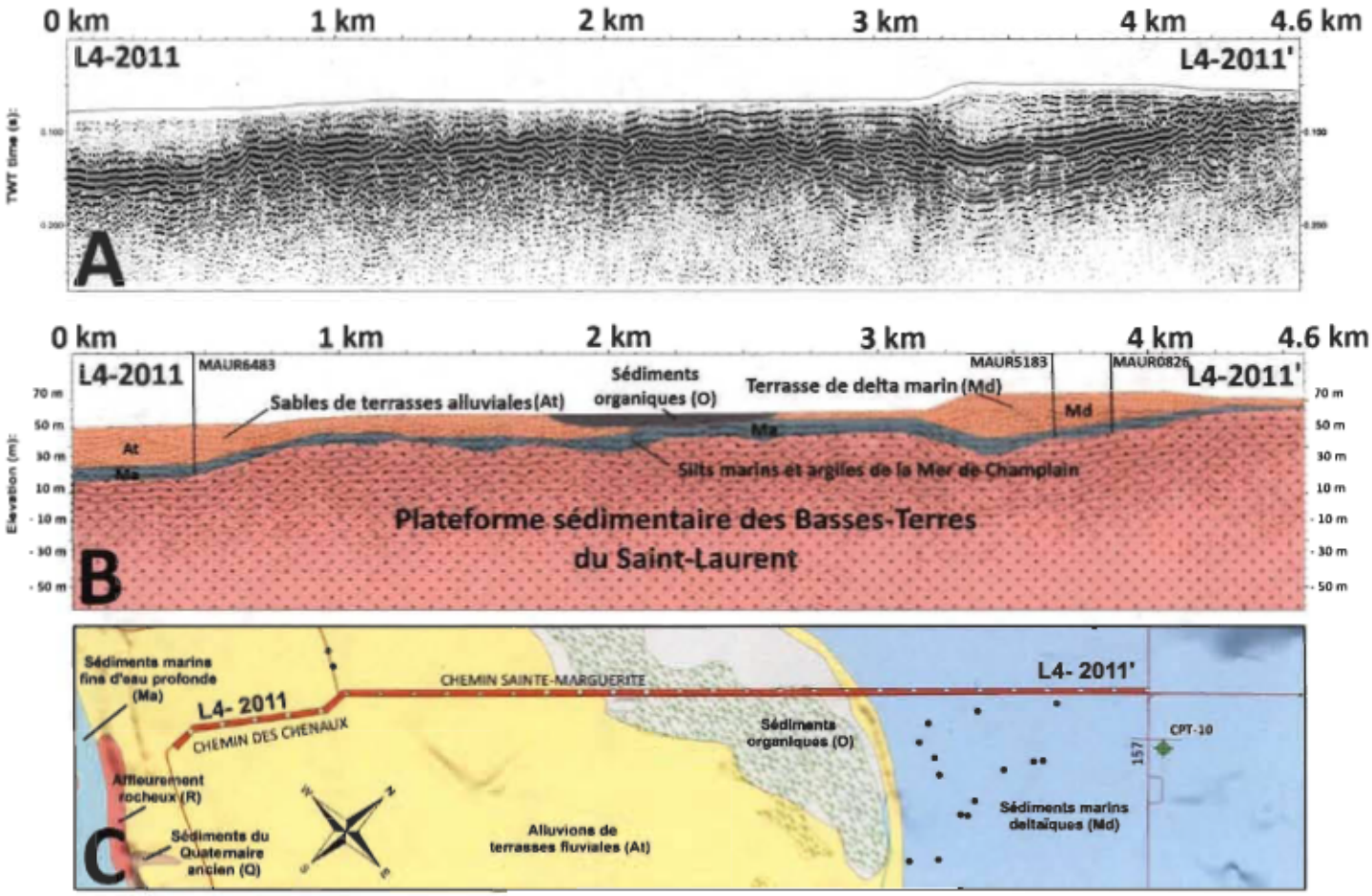


Figure 4.24 **Coupe géologique interprétée – Ligne *Minivibe* 4 – 2011**
A : Onde sismique, en secondes, **B :** Interprétation des résultats, élévation en mètres, **C :** Carte de localisation et formations superficielles (voir Figure 3.1 pour la légende des travaux sur le terrain).

Le forage FE-02-11 (Figure 4.25) a été foré dans le secteur de Sainte-Marthe-du-Cap, du côté Est de la rivière Saint-Maurice, dans les alluvions récemment mis en places par le fleuve Saint-Laurent. La séquence quaternaire rencontrée à ce niveau fait 56.39 mètres d'épaisseur et repose sur la plateforme sédimentaire des Basses-Terres, localement sur les Shales gazéifères de la formation de Nicolet datant de l'Ordovicien supérieur. Le Till de Gentilly, identifié à 38 mètres de profondeur (- 22 mASL), repose localement sur une séquence 8 mètres de sédiments pré-Wisconsinien indifférenciés. Les sédiments n'ont pas pu être identifiés en raison de la méthode destructive employée en forage. Ces sables silteux pourraient correspondre aux sables des Vieilles Forges, présents en épaisseur considérable sur la rive opposée de la rivière Saint-Maurice à une élévation similaire. Au-dessus du till, les argiles de la Mer de Champlain sont facilement identifiables entre 18 et 37 mètres de profondeur, les sédiments fins représentant 100 % de la granulométrie cumulée. La couche supérieure, de 0 à 18,29 mètres, représente des sédiments alluvionnaires mis en place par le remaniement des sédiments deltaïques laissés antérieurement par la rivière Saint-Maurice tout au long des fluctuations du niveau du fleuve St-Laurent. La mise en place de ce dépôt a pu être estimée à 7 500 B.P. en datation C14 suite à la découverte d'un morceau de bois à 14,5 mètres de profondeur (+-2 mASL).

Le forage FE-11-11 (Figure 4.26) fut réalisé dans la ville de Trois-Rivières, secteur Cap-de-la-Madeleine. Il s'agit de la région hydrogéologique du paléo-delta de la rivière St-Maurice. Ce forage visait à caractériser la distribution hydrogéochimique verticale dont notamment les concentrations en fer et en manganèse de l'eau souterraine exploitée par la ville de Trois-Rivières. Pour ce faire, un forage d'une profondeur totale de 29,87 mètres fut réalisé dans les sables reliés au contexte hydrogéologique du paléo-delta de la Saint-Maurice, jusqu'à l'atteinte de sédiments fins de l'épisode de Champlain. Suite au forage, cinq crépines en PVC espacées verticalement de trois mètres entre chacune d'entre elles furent installées dans le but de les échantillonner individuellement. On y remarque une augmentation de la concentration en manganèse dissous avec la profondeur. En termes granulométriques, les résultats démontrent que l'unité est dominée par une forte proportion de sable (fin et moyen) et généralement moins de 10 %

de particules fines. Ces sédiments associés à un épisode deltaïque lacustre (Lac Lampsilis).

Les sables situés au nord de l'agglomération de Pointe-du-Lac sont associés à des dépôts plus anciens du Proto-Saint-Laurent et constituent également des formations aquifères, bien que leur épaisseur soit inférieure à celle des sables deltaïques. Les lits silteux fréquents qu'on y retrouve nuisent à la conductivité hydraulique locale.

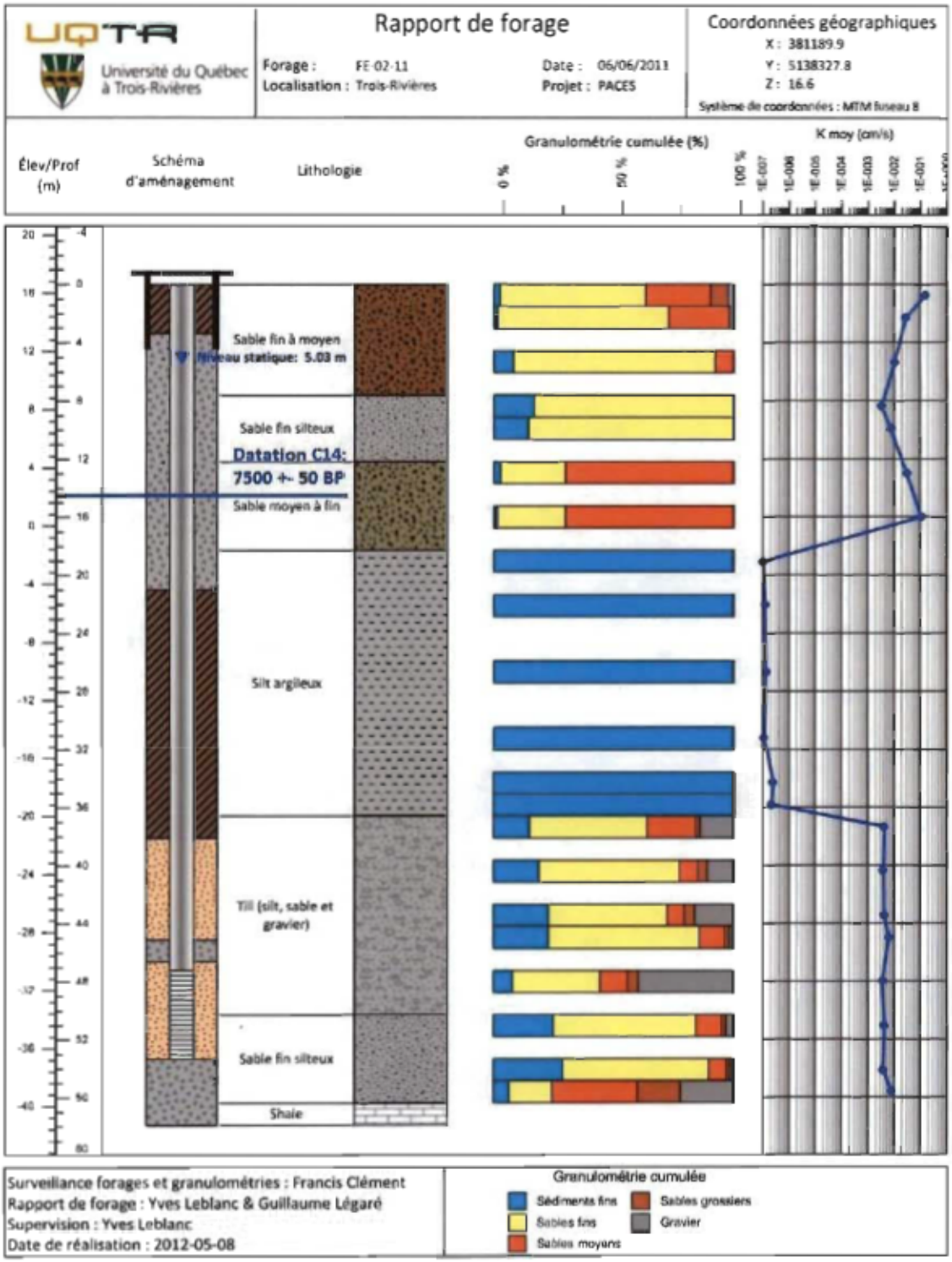


Figure 4.25 Rapport de forage- FE-02-11 – Trois-Rivières (Sainte-Marthe-du-Cap).

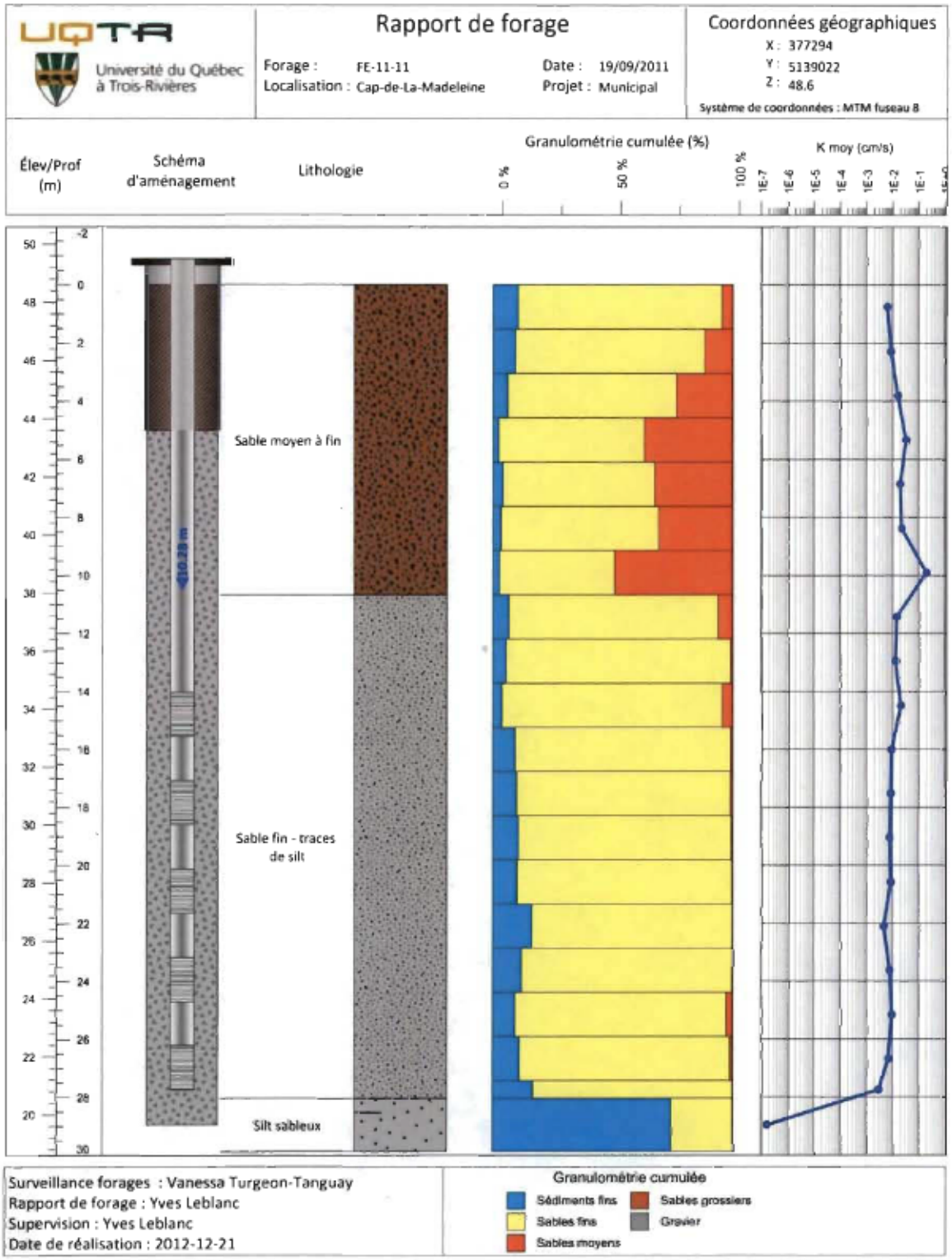


Figure 4.26 Rapport de forage- FE-11-11 – Trois-Rivières.

4.4 Bouclier Laurentien

Le contexte hydrogéologique du Bouclier Laurentien correspond en général à des aquifères constitués de dépôts fluvioglaciaires remplissant des vallées profondément encaissées ou encore à des aquifères de faible productivité en milieu rocheux fissuré. Ces sédiments ont ensuite été scellés par des sédiments marins lors de l'épisode de transgression marine de Champlain.

La vallée de la rivière du Loup a été caractérisée à Saint-Paulin (6 sondages électriques et 6 sondages de sismique-réfraction) et Saint-Alexis-des-Monts (2 sondages électriques et 6 sondages de sismique-réfraction) afin de déterminer le profil rocheux de la vallée. Le secteur de Saint-Élie-de-Caxton, situé dans une embouchure de vallée glaciaire, a également été investigué.

À Saint-Alexis-des-Monts (Figure 4.27), le sondage électrique SE-115 confirme une épaisseur de plus de 60 mètres d'argile dans la vallée de la rivière du Loup, tandis que le sondage électrique SE-112 permet d'interpréter une épaisseur de sable de l'ordre de 30 m dans ce qui apparait être une vallée secondaire anciennement occupée par la rivière aux Écorces. La présence de cette vallée est confirmée par les sondages de sismique-réfraction SR-25, SR-26, SR-27 et SR-28. Ces sondages montrent que la vallée est comblée par des sables et graviers dont l'épaisseur varie de 7 m au sud-ouest à 52 m au nord-est de la coupe effectuée le long du rang du Lac à Joe Bob.

Le socle rocheux du plateau laurentien possède en général peu de potentiel aquifère, mis à part le long des failles. Cependant, les fonds de vallées et les vallées enfouies pourraient s'avérer des réserves intéressantes. L'aquifère de Saint-Alexis-des-Monts, par exemple, consiste en une nappe captive montrant peu de lien hydrologique direct avec la rivière du Loup, située à proximité. Cette formation est exploitée par la municipalité et les quelques entreprises piscicoles locales (Leblanc *et al.*, 2010). La Figure 4.28 illustre le contexte hydrogéologique de l'aquifère, contexte qui pourrait également s'appliquer aux rivières Maskinongé, Yamachiche et Shawinigan.

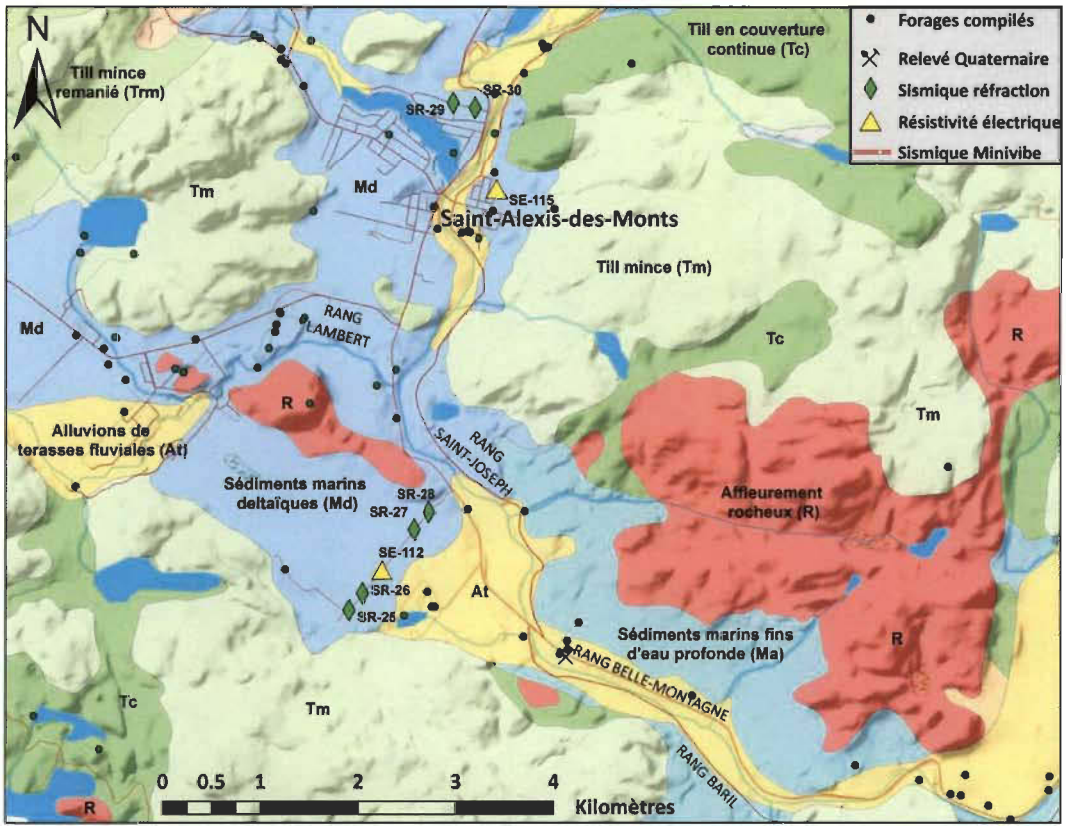


Figure 4.27 Localisation des travaux de terrain – Secteur Saint-Alexis-des-Monts.

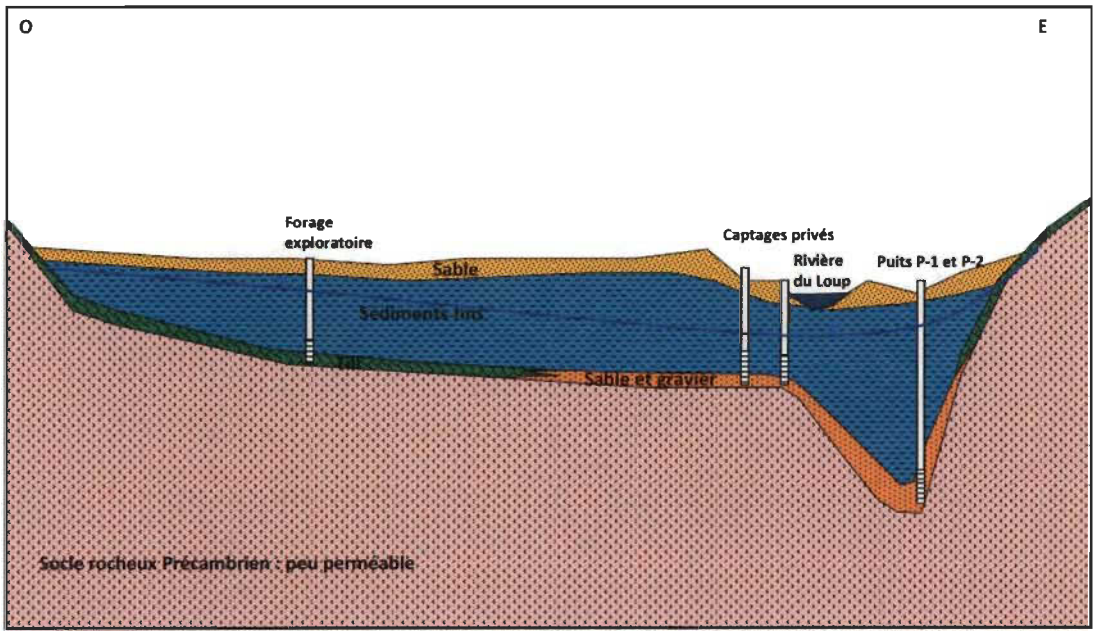


Figure 4.28 Modèle hydrogéologique conceptuel de l'aquifère de Saint-Alexis-des-Monts (Leblanc *et al.* 2010).

Plusieurs sondages électriques (12 sondages électriques) ont été réalisés sur le territoire de Saint-Élie-de-Caxton (Figure 4.29) afin de caractériser la géométrie d'un aquifère qui alimente les réseaux d'aqueduc de Saint-Élie-de-Caxton, de Charette et de Saint-Barnabé. Cet aquifère est formé dans un sable deltaïque à l'embouchure d'un ensemble fluvio-glaciaire d'orientation nord-sud entre Saint-Mathieu-du-Parc et Saint-Élie-de-Caxton.

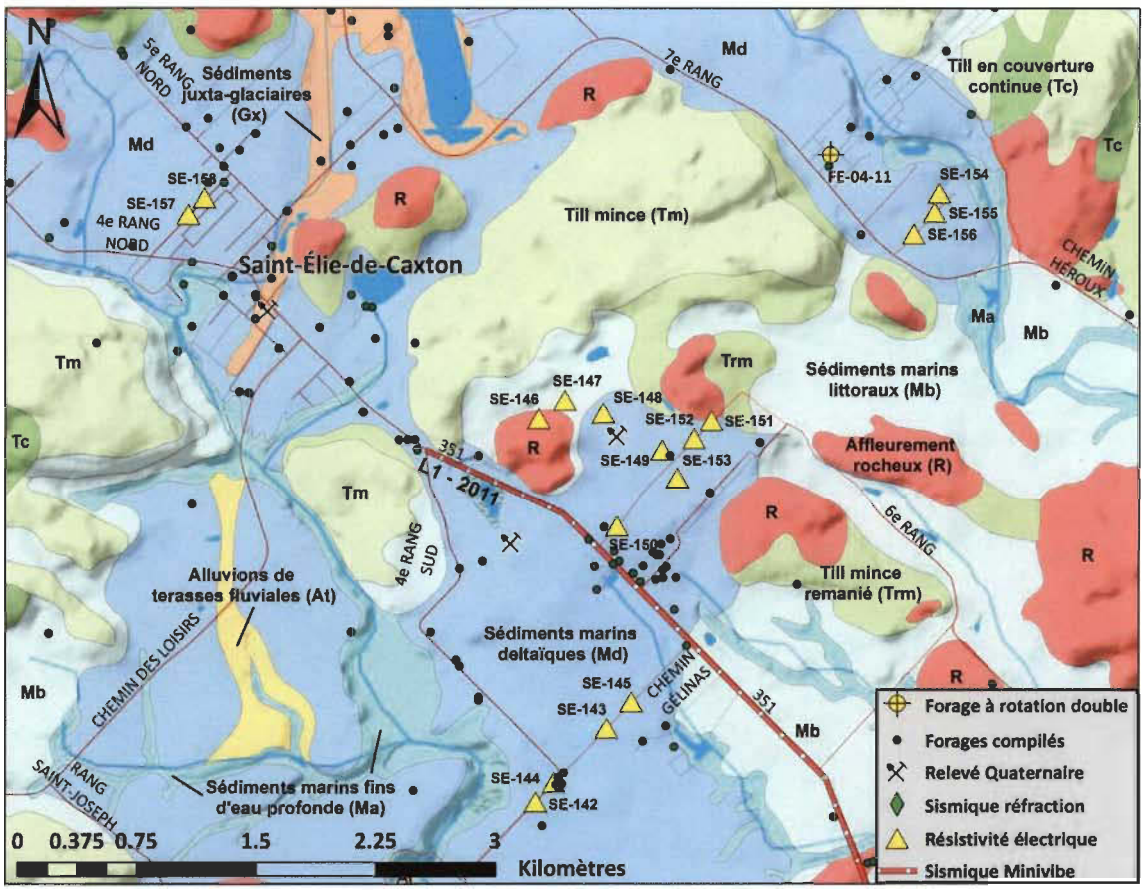


Figure 4.29 Localisation des travaux terrain – Secteur Saint-Élie-de-Caxton.

Au sud de Saint-Élie-de-Caxton, entre le rang 4 et le rang 6, la colonne stratigraphique est entièrement composée de sable deltaïque reposant sur le socle rocheux (SE-142 à SE-153). L'épaisseur de cette unité sableuse varie de 11 à plus de 60 mètres. Ces investigations ont été validées en examinant les résultats de trois forages exploratoires effectuées jusqu'au socle rocheux au pourtour d'une sablière à Saint-Élie-de-Caxton.

De l'autre côté d'une crête rocheuse, à l'est de la route 350, ce dépôt de sable deltaïque possède une épaisseur variant de 8 à 22 mètres et repose sur une couche d'argile qui atteint au moins 60 m de profondeur (sondages électriques SE-154, SE-155 et SE-156).

Le forage FE-04-11 (Figure 4.30), dans la localité de Saint-Élie-de-Caxton, est situé au piedmont dans une vallée creusée dans le socle rocheux et comblée de sédiments. Le socle rocheux de gneiss granitique a été atteint à 65,53 mètres. Les sédiments de la Mer de Champlain semblent s'être localement déposés directement sur le roc, affichant à la base de la séquence (109 mASL) un faciès proximal sableux en transition vers un faciès distal devenu argileux à 134 mASL. À cet élévation, le contact entre les argiles et les sables fins pro-deltaïques sus-jacent est franc, et se sont ces sédiments qui remplissent la vallée jusqu'à la surface. Un faciès juxta-glaciaire plus grossier est présent sur les 10 premiers mètres.

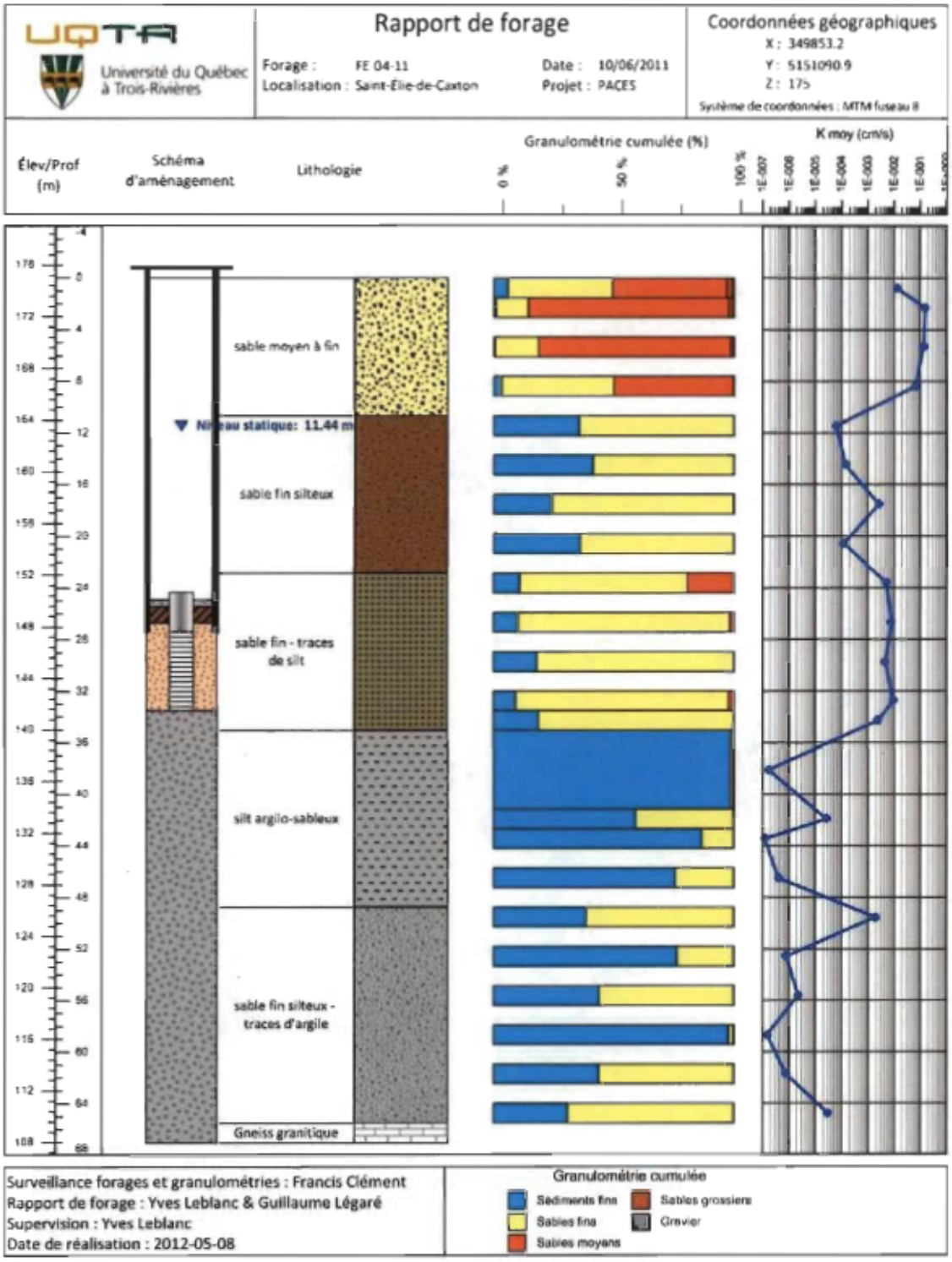


Figure 4.30 Rapport de forage- FE-04-11 – Saint-Élie-de-Caxton.

CHAPITRE V

GÉOLOGIE 3D ET HYDROSTRATIGRAPHIE DU SUD-OUEST DE LA MAURICIE

L'assemblage de toutes les données présentées au chapitre qui précède a permis la création d'un modèle 3D à sept couches des dépôts quaternaires du sud-ouest de la Mauricie, en plus de la topographie du socle rocheux.

5.1 Roc

Le socle rocheux de la région à l'étude est composé de roches appartenant à deux provinces géologiques distinctes; la Plate-forme sédimentaire paléozoïque des Basses-Terres du Saint-Laurent au sud, et le Bouclier Précambrien du plateau laurentien Grenvillien au nord. Au total, 1584 observations provenant de données de forage et de géophysique ont été utilisées pour modéliser la surface du socle rocheux (Figure 5.1). Avant l'ajout de points d'ajustements, l'erreur RMS (*Root mean square*) entre les valeurs observées et prédites en forages uniquement était de 5,04 m. Un total de 1164 observations ont été utilisées pour modéliser l'épaisseur totale des dépôts meubles sans rencontrer le roc pour ainsi créer la surface de validation « profondeur minimum du roc ». De plus, 484 polygones d'affleurements rocheux, pour une surface totale de 246,84 km^2, ont été utilisés pour imposer l'élévation du MNE à la surface du roc modélisé.

La topographie du roc (Figure 5.1) varie grandement entre les deux provinces géologiques. Dans le secteur des Basses-Terres, aux abords du Lac Saint-Pierre, la surface du roc est rabaissée jusqu'à -100 mASL (secteur Yamachiche – Pointe-du-Lac) et est peu accidenté. Sur un axe sud-nord, il remonte lentement vers le Piedmont et affleure même en surface à la hauteur de Sainte-Ursule. L'élévation du roc s'abaisse ensuite drastiquement dans l'axe de la faille de Saint-Cuthbert, la limite entre les

Basses-Terres et le Bouclier Laurentien. La topographie du socle Précambrien est beaucoup plus accidentée que celui du socle Paléozoïque et est très variable localement. L'élévation maximale de 540 mASL est atteinte dans le nord de la municipalité de Saint-Alexis-des-Monts. Les fonds de vallées sont cependant très encaissés, et ce, jusque dans le secteur nord, où le roc peut être atteint à moins de 250 mASL.

5.2 Quaternaire

5.2.1 Dépôts du Quaternaire ancien

Des sédiments provenant de l'époque du Sangamonien Supérieur sont observables en coupes en bordure de la rivière Saint-Maurice dans le secteur de Trois-Rivières. Ces dépôts correspondent au Till de Bécancour, aux Sédiments de Saint-Pierre, aux Rythmites du Saint-Maurice ainsi qu'aux Sables des Vieilles Forges. Au total, 85 observations provenant de données de forage et de géophysique ont été utilisées pour modéliser le contact supérieur des sédiments anciens (Figure 5.2). Avant l'ajout de points d'ajustements, l'erreur RMS entre les valeurs observées et prédites en forages uniquement était de 8,57 m. De plus, trois polygones d'affleurements, pour une surface totale de 0,44 km^2, ont été utilisés pour imposer l'élévation du MNE à la surface modélisée.

Des forages fiables rencontrant ces formations anciennes n'ont été retrouvés qu'autour de Trois-Rivières, où l'épaisseur maximum de ces dépôts atteint 80 mètres (secteur Pointe-du-Lac – Trois-Rivières-Ouest). Ces sédiments auraient pu être préservés de l'érosion glaciaire par un rehaussement de la surface du socle rocheux du côté Est de la rivière Saint-Maurice, ce qui expliquerait pourquoi on ne les retrouve pas à l'ouest de Yamachiche. Il est toutefois possible que d'autres lambeaux de sédiments quaternaires anciens soient préservés ailleurs sur le territoire.

Ces formations n'ont toutefois pas été modélisées séparément dans le modèle 3D en raison de leur rare occurrence dans les données de forages. De plus, ces formations

sont généralement peu connues des foreurs et sont donc moins bien identifiées. Leurs contacts ont toutefois été identifiés dans les résultats de sismique réflexion haute-résolution (*Minivibe*) lorsque la netteté des profils et la précision des forages de calibration permettaient leur identification hors de tout doute raisonnable. Ces formations sont discontinues par endroits, et leur épaisseur varie fortement en fonction de la topographie du roc.

Des sédiments illinoiens (Till de Bécancour?) ont été retrouvés dans certaines dépressions dans les secteurs nord de Sainte-Angèle-de-Prémont et Saint-Paulin. Leur extension étant trop difficile à évaluer, ils n'ont pas été modélisés en 3D.

5.2.2 Séquence glaciaire wisconsinienne

La séquence glaciaire régionale est représentée par le till de Gentilly. Le retrait du glacier Wisconsinien laissa en héritage au sud-ouest de la Mauricie une couverture de till relativement continue sur le territoire à l'étude. Il correspond généralement à un diamicton à faciès sableux gris, de texture variée lorsqu'il est déposé sous la limite marine en raison d'un fort remaniement par l'action des vagues (Bolduc, 1999b). Au total, 162 observations provenant de données de forage et de géophysique ont été utilisées pour modéliser le contact supérieur du Till de Gentilly (Figure 5.3). Avant l'ajout de points d'ajustements, l'erreur RMS entre les valeurs observées et prédites en forages uniquement était de 3,62 m. De plus, 241 polygones d'affleurements, pour une surface totale de 686,39 km^2, ont été utilisés pour imposer l'élévation du MNE à la surface modélisée.

Bien souvent, les secteurs cartographiés comme étant des zones de roc affleurant sur la cartographie des dépôts meubles sont en fait recouverts d'une mince couche discontinue de sédiments glaciaires. Autrement, les distinctions apportées sur cette cartographie sont généralement représentatives des épaisseurs rencontrées dans la région du Bouclier Laurentien. Les zones de till en couverture discontinue montrent des épaisseurs variant de 0,1 m à 2 mètres, alors que les zones de till en couverture continue

peuvent atteindre 6 mètres d'épaisseur. Dans l'axe de la Moraine de Saint-Narcisse, les épaisseurs de till rapportés dans les bases de données de forages varient entre 1 m et 50 m; dans cette zone, le till proprement dit et les sédiments fluvioglaciaires mis en place subséquemment sont difficiles à différencier et ont été fortement remaniés. Au sud de la moraine, dans la plaine argileuse, le till prend généralement la forme d'un placage qui varie d'épaisseur en fonction de la topographie du roc. Dans le secteur de Trois-Rivières, le till, tout comme les sédiments anciens, tend à remplir les dépressions du roc, atteignant parfois 20 m d'épaisseur.

5.2.3 Séquence fluvioglaciaire

La séquence fluvioglaciaire correspond à des sédiments stratifiés mis en place par les eaux de fonte à proximité du glacier. Cette unité se veut un regroupement des faciès d'épandage subaérien, subaquatique, et juxta glaciaire. Au total, 341 observations provenant de données de forage et de géophysique ont été utilisées pour modéliser le contact supérieur des sédiments fluvioglaciaires (Figure 5.4). Avant l'ajout de points d'ajustements, l'erreur RMS entre les valeurs observées et prédites en forages uniquement était de 2,61 m. De plus, 117 polygones d'affleurements, pour une surface totale de 142,85 km^2, ont été utilisés pour imposer l'élévation du MNE à la surface modélisée.

Ces sédiments sont principalement localisés sur l'axe de la Moraine frontale de Saint-Narcisse et atteignent une épaisseur de plus de 50 mètres en marge de la faille de Saint-Cuthbert. Des épaisseurs importantes sont également observables dans les vallées profondément encaissées à l'entrée du Bouclier Laurentien, notamment dans la vallée entre Saint-Élie-de-Caxton et Saint-Mathieu du Parc. Ces vallées occupées en majeure partie par des lacs proglaciaires de formes allongées (lac Vert, Grand lac Long, lac Garant) formaient probablement des chenaux d'évacuation des eaux de fonte dotés d'un débit suffisant pour transporter du matériel grossier.

5.2.4 Séquence marine

Des silts et argiles ont été déposés durant la transgression marine de la Mer de Champlain pendant la phase de retrait du glacier. Au total, 2287 observations provenant de données de forage et de géophysique ont été utilisées pour modéliser le contact supérieur des sédiments marins (Figure 5.5). Avant l'ajout de points d'ajustements, l'erreur RMS entre les valeurs observées et prédites en forages uniquement était de 5,10 m. De plus, 118 polygones d'affleurements, pour une surface totale de 378,20 km^2, ont été utilisés pour imposer l'élévation du MNE à la surface modélisée.

Les épaisseurs les plus importantes sont recoupées dans le secteur de Yamachiche et Louiseville, où plus de 100 m de sédiments fins sont rencontrés en forage. Le rabaissement du roc dans cette zone a contribué à la création d'une grande zone de sédimentation en eau profonde. Des épaisseurs de 0 à 30 m sont recoupées dans le secteur du paléodelta. Dans l'axe de la Moraine de Saint-Narcisse, les épaisseurs sont plus variables. Les sédiments fins retrouvés sont plus silteux qu'argileux, ce qui est caractéristique d'un paléo environnement agité. Des bras de mer ont créé des deltas marins un peu partout dans les fonds de vallées dans le secteur du Bouclier Laurentien, où des unités silteuses peuvent être retrouvées jusqu'à 230 mASL.

Des argiles lacustres déposées en milieu proglaciaire ont été identifiées en forage dans le secteur du Lac Sacacomie. Leur extension étant trop difficile à évaluer, ils n'ont pas été modélisés en 3D.

5.2.5 Séquence Saint-Narcisse

La structure principale de la Moraine de Saint-Narcisse fut déposée par-dessus des sédiments fins proximaux de la Mer de Champlain lors d'un épisode de réavancée glaciaire. Au total, 75 observations provenant de données de forage et de géophysique ont été utilisées pour modéliser le contact supérieur des sédiments de la Moraine de Saint-Narcisse (Figure 5.6). Avant l'ajout de points d'ajustements, l'erreur RMS entre les valeurs observées et prédites en forages uniquement était de 7,5 m. De plus,

41 polygones d'affleurements, pour une surface totale de 42,34 km^2, ont été utilisés pour imposer l'élévation du MNE à la surface modélisée.

Les faciès rencontrés dans la moraine varient beaucoup localement, mais ils sont généralement composés de graviers, de sables grossiers et de sables moyens mal triés déposés par-dessus une couche de sédiments marins. L'épaisseur de cette couche de sédiments grossiers varie de 10 m dans le secteur de Saint-Paulin à 50 mètres à Notre-Dame-du-Mont-Carmel. Ces épaisseurs sont très variables localement sans tendance générale. Cependant, la moraine a été plus érodée sur les grands axes d'écoulement d'eau de fonte, qui correspondent notamment aux rivières Maskinongé et du Loup actuelles.

5.2.6 Sables supérieurs

L'unité des sables supérieurs inclut ici toutes les formations sableuses retrouvées par-dessus les argiles de la Mer de Champlain sur le territoire à l'étude, incluant les sables silteux marins littoraux et deltaïques, les sables et silts lacustres associés à l'épisode du Lac Lampsilis, ainsi que les sables deltaïques de la rivière Saint-Maurice. Les épaisseurs les plus importantes sont recoupées dans le secteur nord de Trois-Rivières, au Cap-de-la-Madeleine (rive Est du Saint-Maurice) ainsi que dans le secteur de Sainte-Angèle-de-Prémont, en marge de la Moraine de Saint-Narcisse.

La surface des sables supérieurs utilisée dans le modèle correspond au MNE et n'a donc pas été modélisée séparément (Figure 5.7). Le sable affleure sur une surface totale de 1077,83 km^2. Dans le secteur de Trois-Rivières, le volume total de l'aquifère supérieur a été estimé à 4,7 milliards de m^3, 31 % de ce volume étant contenu sous le niveau de l'eau observé. La porosité de ces sables étant estimée à 25 %, environ 380 millions de m^3 seraient donc contenus dans cette nappe libre. L'aquifère possède une conductivité hydraulique moyenne de 6 x 10^{-2} cm/s et une porosité de drainage moyenne de 0,25. L'écoulement souterrain s'effectue généralement en direction SE à des élévations qui varient de 60 mètres en amont à 6 mètres à l'exutoire. La limite

latérale ouest de l'aquifère correspond au talus qui surplombe la rivière Saint-Maurice, où le plancher de l'aquifère est surélevé par rapport au cours d'eau. La limite adjacente est plutôt associée à un amincissement de l'épaisseur saturée couplé à une diminution de perméabilité des dépôts meubles par la présence de lits silteux. Cette unité est l'aquifère le plus exploité, et montre un lien hydraulique négligeable avec les formations sous-jacentes. Les argiles de la Mer de Champlain forment le plancher de l'aquifère supérieur, empêchant l'eau souterraine de continuer sa descente verticale et formant ainsi un réservoir.

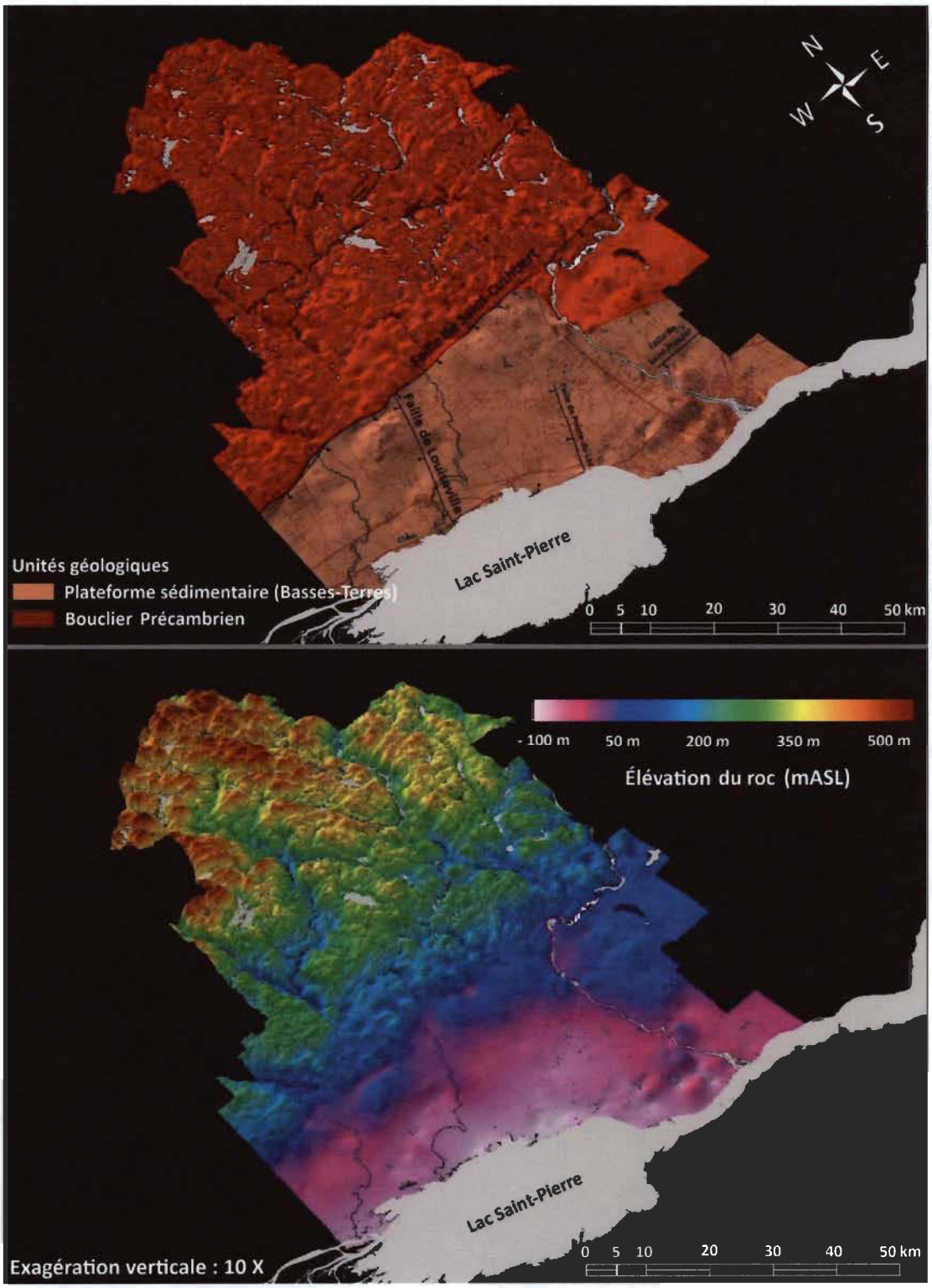


Figure 5.1 Élévation du socle rocheux.

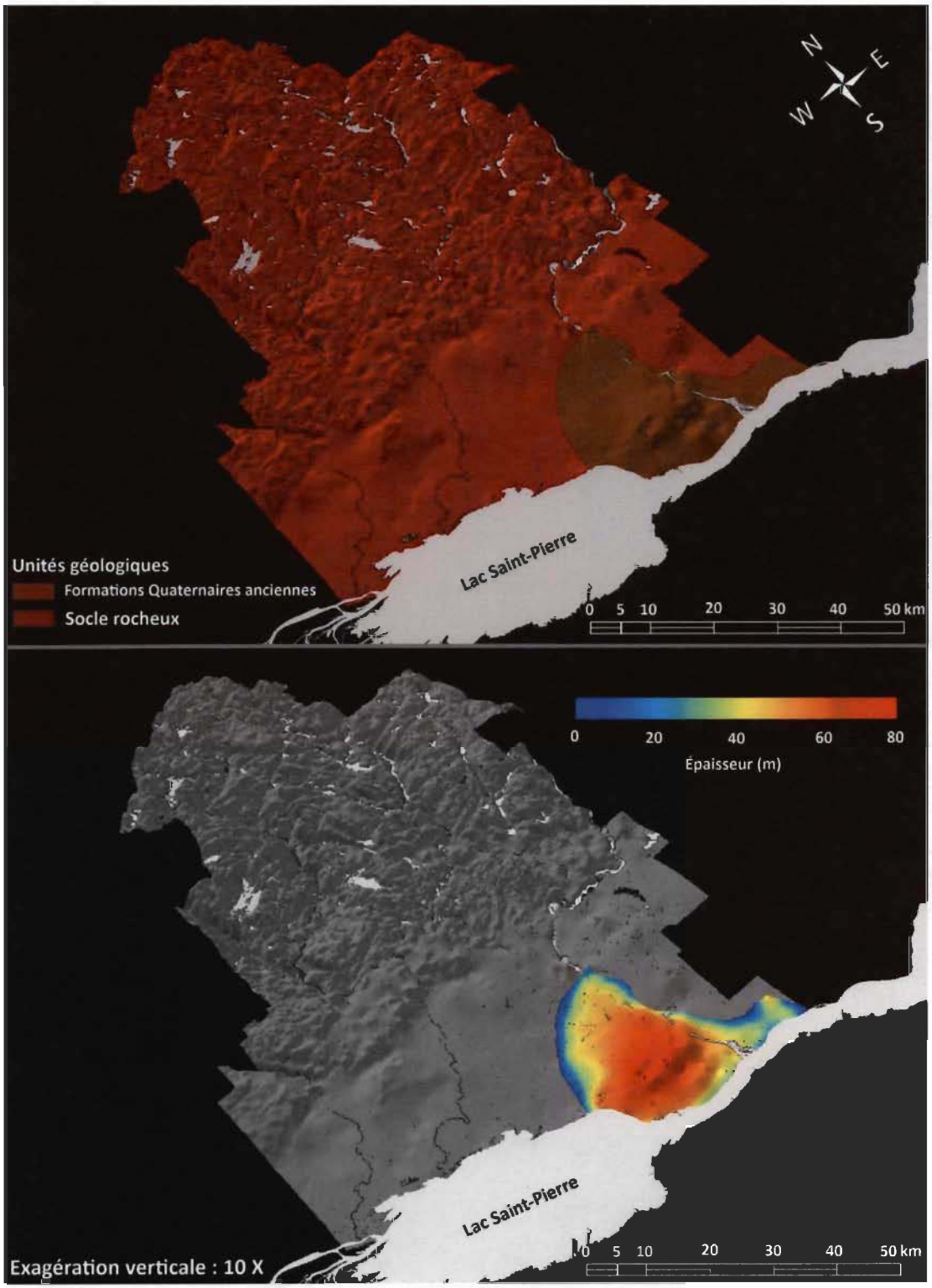


Figure 5.2 Répartition et épaisseur des sédiments du Quaternaire ancien.

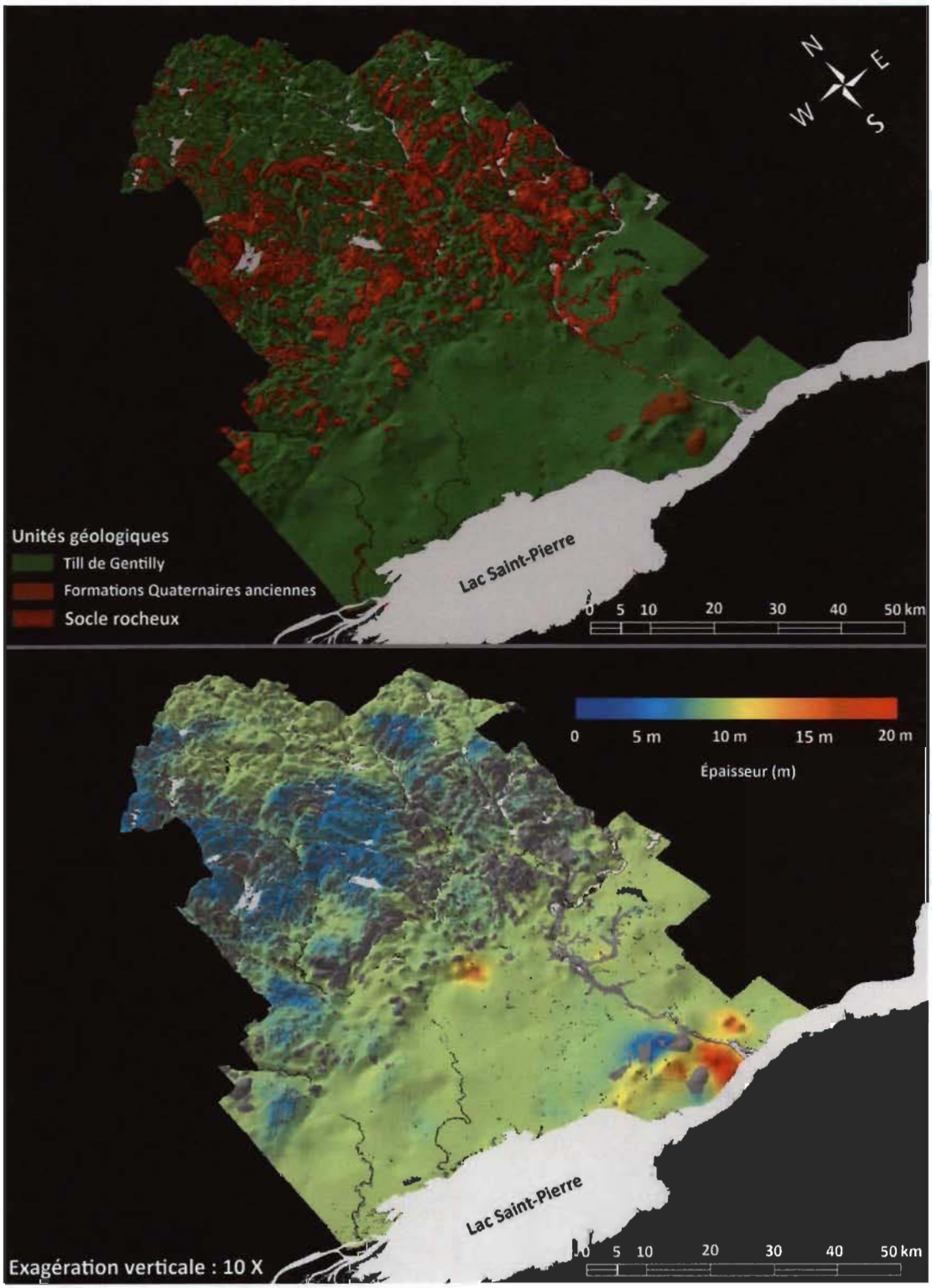


Figure 5.3 Répartition et épaisseur du till de Gentilly.

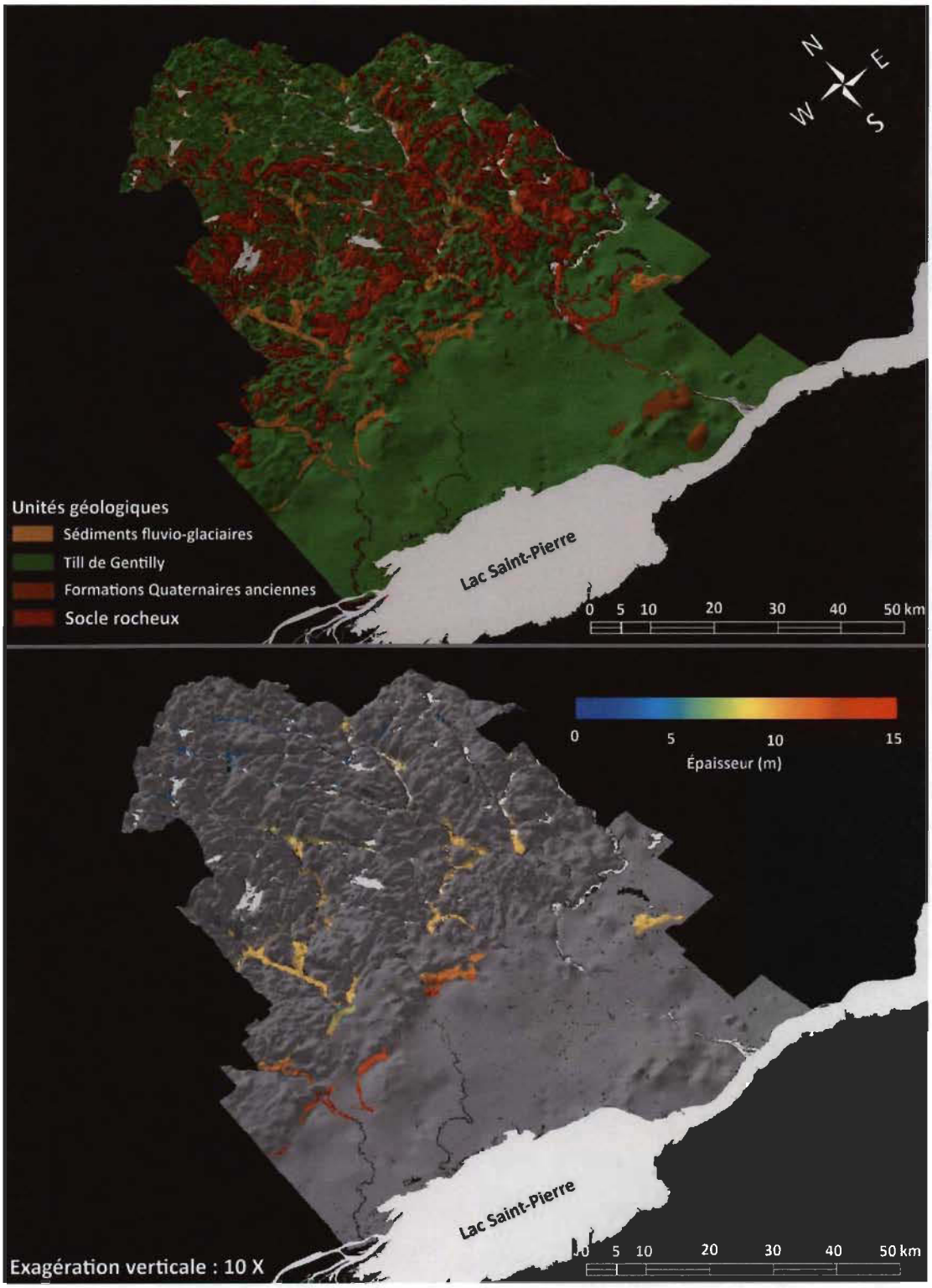


Figure 5.4 Répartition et épaisseur des sédiments fluvioglaciaires.

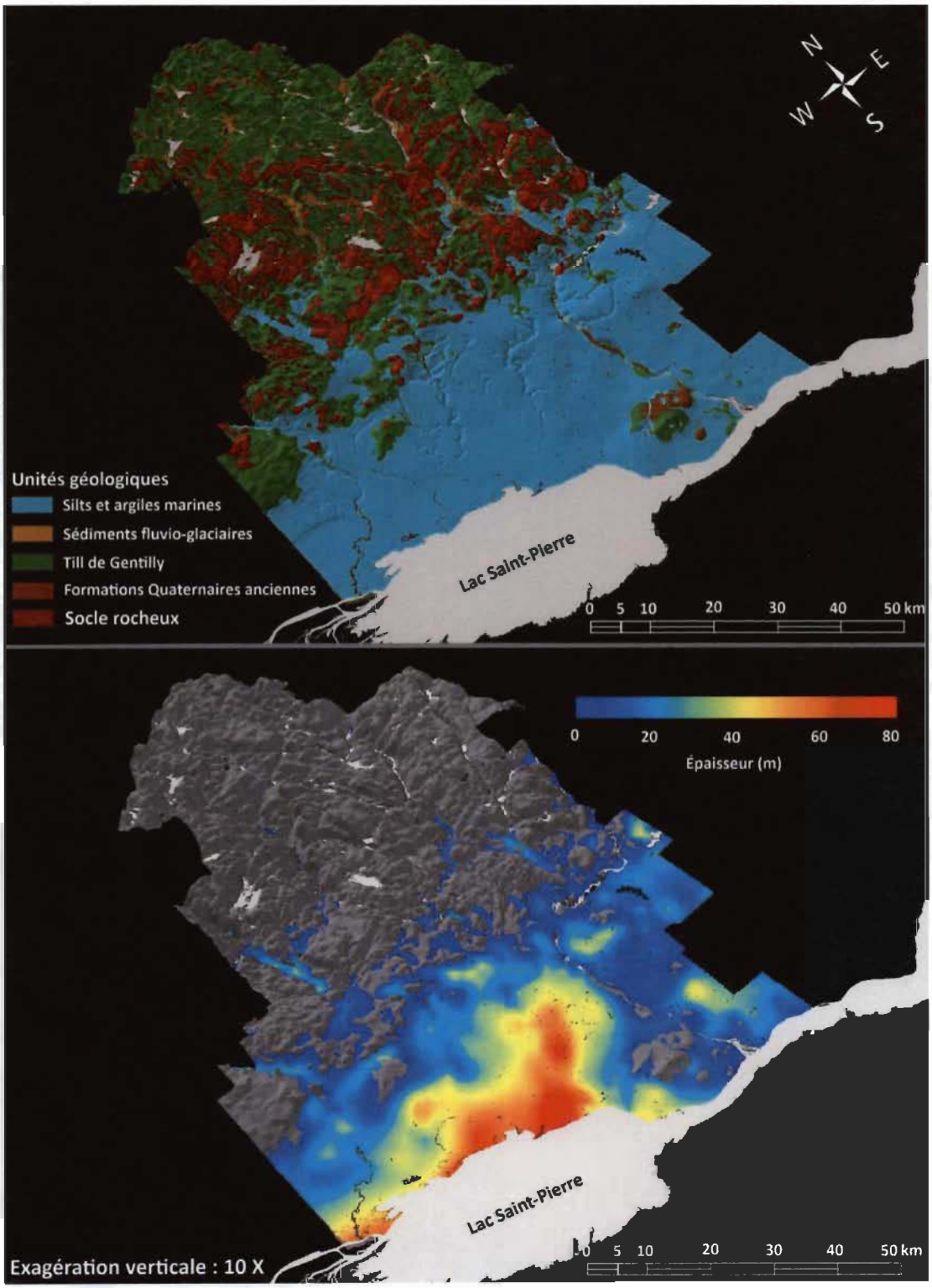


Figure 5.5 Répartition et épaisseur des sédiments fins de la Mer de Champlain.

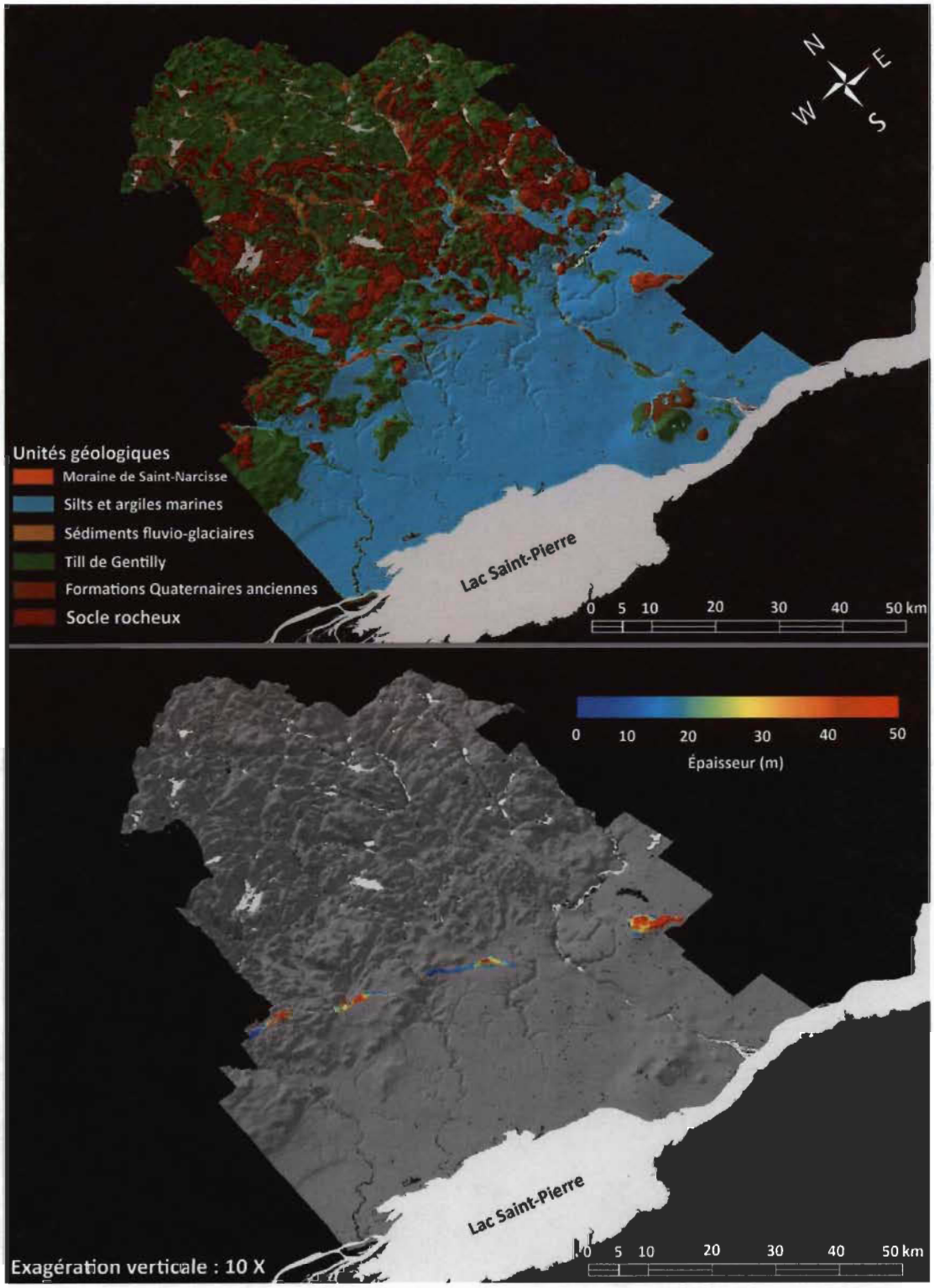


Figure 5.6 Répartition et épaisseur de la Moraine de Saint-Narcisse.

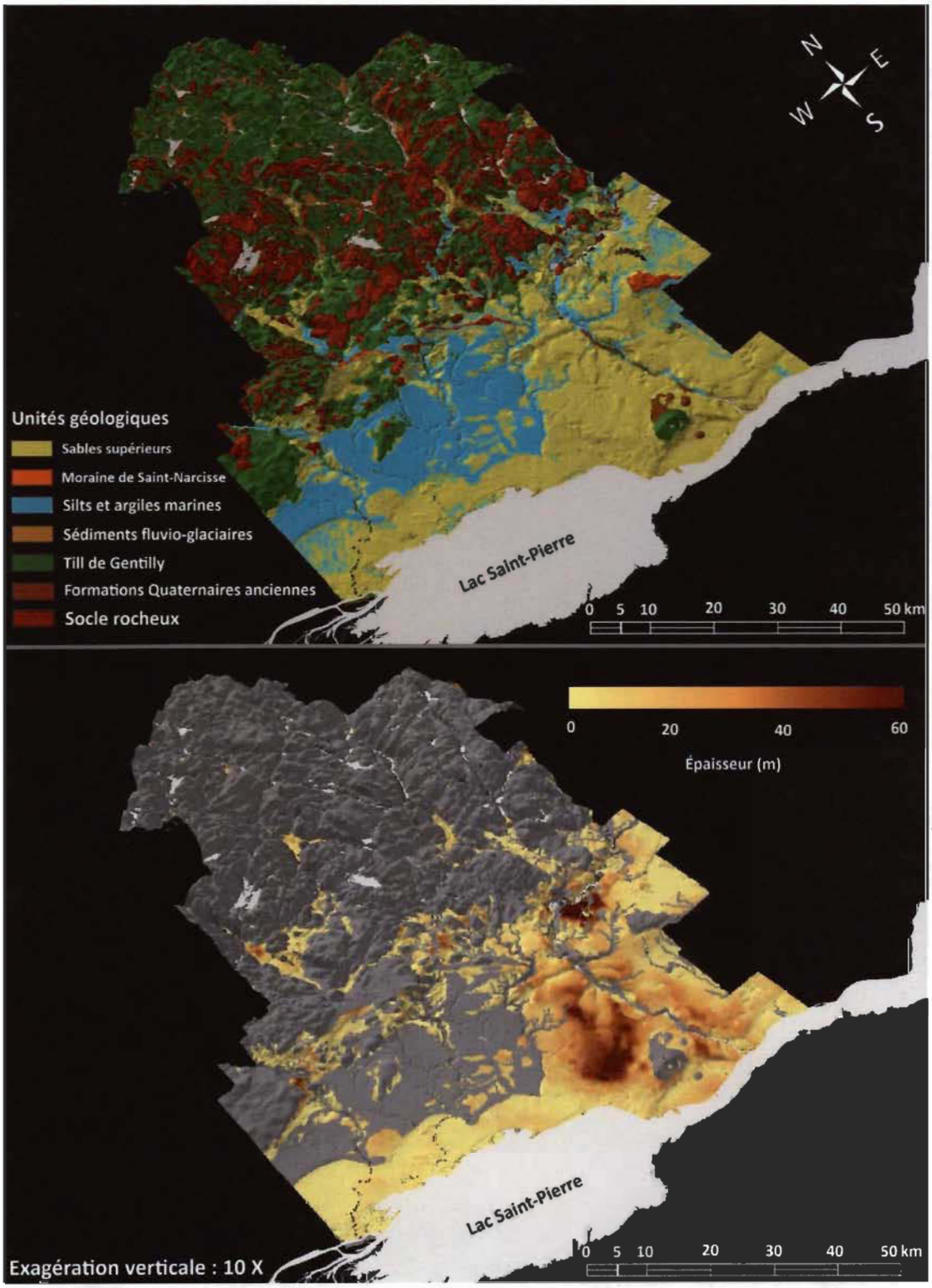


Figure 5.7 Répartition et épaisseur des sables supérieurs.

CHAPITRE VI

DISCUSSION ET CONCLUSION

6.1 Synthèse stratigraphique régionale

La stratigraphie du sud-ouest de la Mauricie, modélisée en 3D à partir de données de forages et de géophysique, est conforme à la séquence régionale proposée par Gadd et Karrow (1959), Denis (1971) et Occhietti (1982).

La topographie du roc se veut toutefois plus accidentée qu'anticipée dans le secteur de Trois-Rivières. Des forages au roc supplémentaires seraient nécessaires afin d'appuyer les données historiques. L'élévation du socle est également très variable sur l'axe de la Moraine de Saint-Narcisse, particulièrement dans le secteur de Saint-Ursule et Saint-Édouard.

Le forage FE-02-11 à Sainte-Marthe-du-Cap a permis d'identifier les Sables des Vieilles Forges sous la couche d'argile marine. Il s'agit du premier forage rapportant la présence de cette unité datant du Quaternaire ancien en marge du fleuve Saint-Laurent du côté est de la rivière Saint-Maurice. Il confirme donc son étendue au-delà du delta actuel du Saint-Maurice. Ainsi, il est possible que certains puits de production de la Ville de Trois-Rivières puisent en fait leur eau dans la formation des Sables des Vieilles Forges plutôt que dans les sables supérieurs post-Champlain.

Le till de Gentilly rencontré en surface dans le secteur nord-ouest de Trois-Rivières semble stratigraphiquement conforme avec la séquence régionale, et serait déposé par-dessus une séquence complexe de sédiments datant du Quaternaire ancien. Des forages supplémentaires (avec datations) seraient nécessaires pour confirmer les résultats de sismique réflexion haute résolution obtenus dans cette zone puisque les contrastes acoustiques ne sont plus différentiables sous le till.

En général, les sédiments fluvioglaciaires occupent les fonds de vallées et les vallées enfouies. Les épaisseurs les plus importantes ont été rencontrées en forage autour de la moraine, dans les embouchures de corridors ayant contribué à l'évacuation des eaux de fonte (Saint-Élie-de-Caxton), ainsi qu'à la base des vallées profondément encaissées dans le Bouclier (Rivière-du-Loup, rivière Maskinongé). La sismique réflexion haute-résolution permet d'identifier une dépression enfouie de plus de deux kilomètres de largeur dans l'axe de la faille de Saint-Cuthbert, une dépression possiblement comblée à sa base par des sédiments fluvioglaciaires. Un forage serait nécessaire pour déterminer la granulométrie du matériel et évaluer si la formation aurait un potentiel de réservoir. Celle-ci serait en contact direct avec le roc dans une zone fracturée et donc dotée d'un bon potentiel aquifère. Des contextes similaires pourraient être retrouvés sur toute l'extension de la faille de Saint-Cuthbert, c'est-à-dire au contact entre les roches sédimentaires des Basses-Terres du Saint-Laurent et celles du Bouclier précambrien.

L'épaisseur de l'argile est plus variable qu'anticipée initialement. Bien que le territoire ait été recouvert intégralement par la Mer de Champlain jusqu'à environ 230 mètres d'élévation, les sédiments fins n'ont pas été mis en place uniformément. C'est le cas dans le secteur de Trois-Rivières, mais également dans celui de Saint-Étienne-des-Grès, où les quelques forages historiques existants sont impossibles à corréler étant donné la grande variabilité des descriptions de matériel rencontré.

Les faciès décrits en forage dans la Moraine de Saint-Narcisse sont très variables. En général, la couche supérieure forme un horizon de matériel grossier passant de blocs au sable moyen, et est associée à la réavancée de la moraine. Ce matériel étant en général au-dessus du niveau piézométrique et trop grossier pour former un réservoir, l'unité contribue plutôt à la recharge des aquifères environnants dans le secteur du piedmont. De multiples forages stratigraphiques effectués dans l'axe de la Moraine de Saint-Narcisse montrent la présence d'une couche de sédiments fins à la base de la séquence morainique, ce qui confirme le contexte de réavancée glaciaire durant lequel la moraine se serait mise en place. L'épaisseur de cette unité marine de même que la

proportion de sédiments fins de ce faciès est très variable sur l'axe de la moraine. Bien que sa perméabilité soit plus faible que celui du matériel grossier sus-jacent, cette unité ne peut être considérée comme un aquitard en raison de la forte proportion de sable fin que l'on y retrouve. Le forage FE-09-11 à Sainte-Angèle-de-Prémont a permis d'identifier une formation aquifère formée de sable moyen et fin d'environ 20 mètres d'épaisseur à la base de la séquence, une unité ayant toutes les caractéristiques d'un bon réservoir. Localement, la forte proportion de sédiments fins dans la séquence marine sus-jacente rend la possibilité d'un lien hydraulique avec la surface faible. La formation serait donc plutôt en lien avec l'aquifère rocheux régional. Selon les résultats de la modélisation de l'élévation du roc, la moraine ne serait pas mise en place sur un renflement local du socle rocheux. Les forages réalisés sur son axe montrent une élévation du roc variable, mais toujours semblable à celle dans les environs.

L'aquifère des sables supérieurs du secteur de Trois-Rivières correspond à un mélange de sables marins deltaïques, lacustres littoraux et deltaïques, ainsi que de sables plus récents associés au delta du Saint-Maurice. La formation repose sur des sédiments marins imperméables de part et d'autre de la rivière, mais l'épaisseur de cet aquitard est plus variable sur la rive ouest (Trois-Rivières/Trois-Rivières-Ouest) que sur la rive est (Cap-de-la-Madeleine). L'aquifère est fortement stratifié, et les faciès observés sont très nombreux. Une tentative de différenciation génétique des sables à partir de leur granulométrie a été tentée sans réel succès. Des variations granulométriques importantes au sein d'une même unité empêchent d'établir des corrélations hors de tout doute raisonnable. En termes d'épaisseur de sable et de granulométrie, la rive ouest montre un plus grand potentiel aquifère que la rive est; la portion nord de la Ville de Trois-Rivières montre en surface des épaisseurs de sables plus importantes que prévues. La ville étant en phase active de développement urbain dans ce secteur, cet aquifère pourrait l'approvisionner en eau. Le potentiel réel de cet aquifère reste cependant à être évalué considérant la problématique de concentration en fer et en manganèse dans l'eau omniprésente dans ce secteur.

La distribution des unités géologiques modélisées (surface couverte) en fonction de leur épaisseur est illustrée sur la Figure 6.1, où l'aire sous la courbe représente le volume occupé par les unités. Les sédiments datant du Quaternaire ancien (Q) ne sont retrouvés que dans le secteur de Trois-Rivières et ne couvrent qu'une portion limitée du territoire. Ils atteignent localement jusqu'à 70 mètres d'épaisseur et forment un important volume. À l'inverse, le till recouvre pratiquement le territoire en entier, mais est constitué généralement d'une mince couverture de quelques mètres d'épaisseur. Les sédiments fluvioglaciaires (Gx) sont très locaux (fonds de vallées) et occupent donc une surface restreinte. L'épaisseur des sédiments grossiers de la moraine (GxT) est plus variable que celle des sédiments fluvioglaciaires.

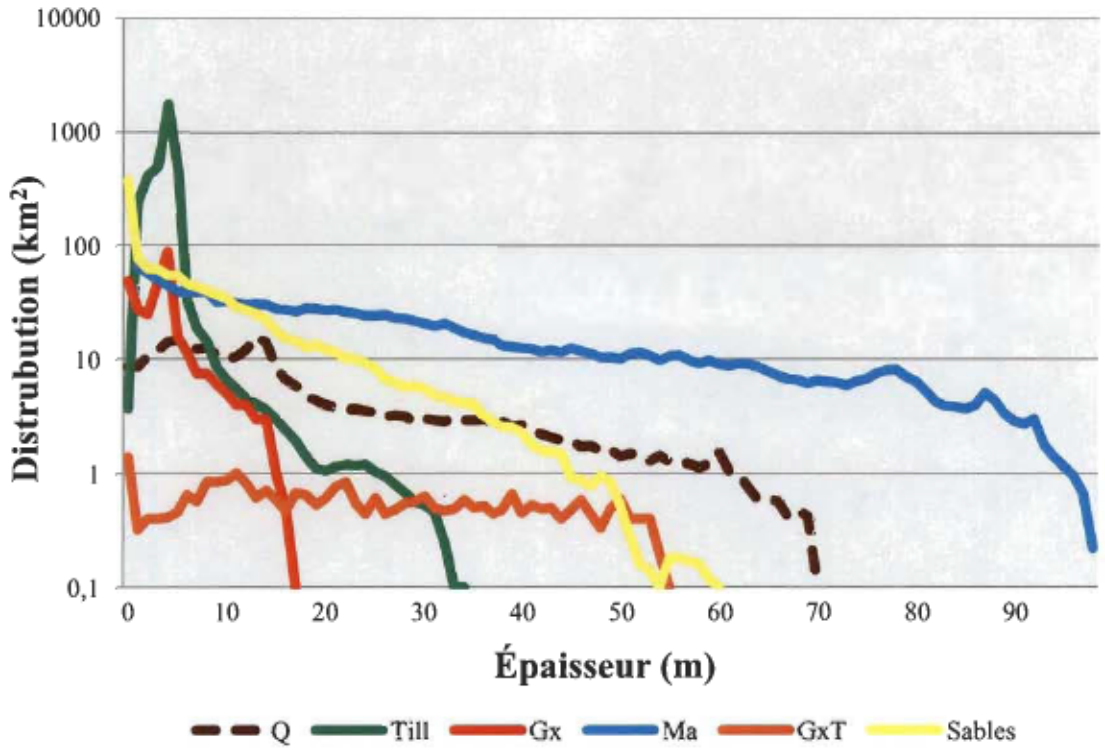


Figure 6.1 **Distribution de l'épaisseur des sédiments en fonction de la surface totale couverte.**
Q : sédiments du Quaternaire ancien; Gx : Fluvioglaciaire; Ma : Sédiments marins; GxT : Moraine de Saint-Narcisse.

6.2 Fiabilité du modèle, incertitudes et développements futurs

À l'échelle régionale, les limitations principales lors de la construction d'un modèle géologique 3D sont la qualité des données, leur quantité et leur distribution spatiale. Un contrôle de la qualité est essentiel pour bien reconnaître les erreurs potentielles. Par exemple, une opération de contrôle de qualité dans la base de données des puisatiers de l'Ontario a révélé que 27 % des entrées sont soupçonnées de contenir des erreurs de géoréférence (Kenny *et al.*, 1997). Aucune étude n'expose de statistique semblable en ce qui a trait à la base de données équivalente du Québec (SIH), mais il est raisonnable d'anticiper le même phénomène. Or, dans des modèles à grande échelle, il est pratiquement impossible de se passer de cette base de données puisqu'il s'agit souvent de la seule source d'information disponible, surtout dans les secteurs ruraux. La réalisation de nouveaux forages n'est pas toujours possible pour plusieurs raisons (propriété du terrain, lignes électriques, possibilité de gaz naturel), et leur localisation doit être choisie stratégiquement en raison de leur coût considérable. Dans la présente étude, plusieurs puits du SIH se sont avérés utiles à la construction du modèle, mais les descriptions géologiques ont dues être standardisées et les localisations validées avec précaution.

Aucun modèle géologique n'est à l'abri des incertitudes. Les géologues traitent de l'information souvent incomplète ou de nature interprétative, interprétations réalisées par des individus n'ayant pas de réelle formation en géologie (ex. SIH). Il est sage d'assumer que l'architecture stratigraphique représentée est incomplète par endroits et contient des incertitudes. En général, cette dernière varie pour un point XY en fonction de l'épaisseur totale des dépôts meubles ainsi qu'en fonction de la distance par rapport à des forages fiables. Des erreurs d'interprétation peuvent également être incluses dans un modèle pourtant fonctionnel et logique, compliquant la tâche de distinction entre le vrai et le faux.

La quantification de l'erreur est un sujet souvent évité dans les études traitant des résultats de modélisation géologique 3D. Il est généralement assumé que les modèles présentés correspondent au scénario le plus probable en fonction de l'information

géologique disponible pour le secteur au moment où la recherche est réalisée. Dans le cadre de cette recherche, l'utilisation d'une méthode géostatistique a permis de quantifier l'erreur associée à la modélisation de chaque surface avant l'intégration de données d'ajustement.

Une des limites importantes du modèle 3D réalisé concerne la limite des sédiments datant du Quaternaire ancien. Dans le cadre de cette recherche, de nouvelles données ont permis de mieux évaluer la limite ouest dans le secteur de Pointe-du-Lac. Par contre, des forages fiables supplémentaires (avec datations) seraient nécessaires afin de valider leur extension au nord de Trois-Rivières de même que dans le secteur des basses terrasses du Cap-de-la-Madeleine. La perméabilité de ces formations anciennes ainsi que la qualité de l'eau qu'elles contiennent restent toutefois difficiles à évaluer régionalement, tout comme les liens hydrauliques possibles avec l'aquifère des sables supérieurs et l'aquifère rocheux régional. Un projet de recherche sur la géochimie des eaux souterraines du sud-ouest de la Mauricie est actuellement en cours et tente de répondre à ces questions.

Une modélisation plus raffinée de l'aquifère supérieur en fonction de la genèse des sables serait intéressante. La grande variabilité de la conductivité hydraulique à l'intérieur d'une même unité génétique (ex. sable marin deltaïque) rend cependant cette tâche de différenciation très ardue. La première étape à réaliser dans cette direction serait de modéliser la granulométrie, la résistivité et la teneur en eau en 3D à l'intérieur du volume de l'aquifère supérieur.

6.3 Conclusion

La géologie complexe des dépôts meubles du sud-ouest de la Mauricie fait en sorte que la région est abondamment pourvue d'aquifères constitués de matériaux granulaires, tels les paléodeltas des rivières Saint-Maurice et Yamachiche, la Moraine de Saint-Narcisse et les hautes terrasses sablonneuses remaniées par le littoral de la mer de Champlain. Ces aquifères sont partiellement connus via les études hydrogéologiques

réalisées dans le cadre de projets locaux de recherche en eau (aqueducs municipaux, embouteillage commercial, pisciculture, études d'impacts, etc.). L'objectif du présent projet de recherche visait à rassembler l'ensemble des connaissances existantes afin de construire un modèle géologique représentant avec cohérence l'architecture des dépôts meubles.

La compilation des données existantes a permis de rassembler plus de 6800 descriptions géologiques de forages, de puits ou piézomètres, provenant autant de sources publiques que de rapports privés. La fiabilité des données historiques a été évaluée et des codes hydrostratigraphiques ont été assignés aux entrées dans une base de données dans le but de mieux différencier les contacts rencontrés en forage. Ces données historiques ont été appuyées par de nouvelles données récoltées sur le terrain dans les secteurs moins connus. Au total, plus de 30 nouveaux forages ont été réalisés dans le cadre du projet, en plus de 200 mesures de géophysique (sismique réfraction et résistivité) et de 63 kilomètres linéaires de sismique-réflexion haute résolution. Toutes ces données ont été utilisées dans le but de créer des surfaces représentant les contacts supérieurs et inférieurs des formations géologiques, modélisées par cokrigeage en tenant compte des cotes de fiabilité mentionnées précédemment. Le modèle a été modifié pour prendre en considération la cartographie des formations superficielles du secteur à l'étude. Il en résulte un modèle 3D à sept couches représentant la géologie des formations meubles du sud-ouest de la Mauricie reflétant bien nos connaissances actuelles.

La modélisation de l'architecture des dépôts meubles du secteur a permis d'établir que la séquence régionale des dépôts meubles rencontrée en forage correspond en général à la stratigraphie typique des Basses-Terres du Saint-Laurent. Le rôle hydrogéologique régional de ces formations a également pu être identifié. Un secteur peu exploité doté d'un potentiel aquifère considérable a pu être identifié au nord de l'agglomération de Trois-Rivières. À l'intérieur des limites de la Ville, le volume total de l'aquifère supérieur a été estimé à 4,7 milliards de m^3. Avec 31 % de ce volume étant

contenu sous le niveau piézométrique observé, cette unité formerait un réservoir d'environ 380 millions de m^3 d'eau qui serait disponible.

Le modèle 3D est présentement utilisé comme base pour la modélisation de l'écoulement souterrain dans le cadre du projet de caractérisation hydrogéologique du sud-ouest de la Mauricie. Il est également utilisé pour effectuer des calculs reliés à la recharge, l'infiltration de l'eau ainsi que l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe. Ces modélisations sont en quelque sorte une validation supplémentaire qui sera imposée au modèle géologique, et des modifications pourront être apportées au besoin. Dans un contexte où la Ville de Trois-Rivières fait face à d'importants problèmes d'approvisionnement en eau, il apparait pertinent de définir la structure des formations géologiques locales. Un des buts ultimes de ce projet de recherche était de créer un outil intéressant pour nos partenaires régionaux (aménagistes, MRC et municipalités) dans le but d'améliorer et de faciliter la gestion durable de la ressource en eau souterraine sur le territoire. Les données géoscientifiques produites pourront également être utilisées par les experts-conseils dans le cadre de mandats locaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

American Society for Testing and Materials (2003) ASTM Standard D2487-11 "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)," ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D2487-11, www.astm.org.

BAJC, A. F., NEWTON, M. J. (2006) 3D modeling of Quaternary deposits in Waterloo region, Ontario; a case study using Datamine studio software. Three-Dimensional Ceologic Mappingfor Croundlllater Applications: Workshop Extended Abstracts, Geological Survey of Canada. Open File S048.

BÉLANGER, C. (2010) Acquisition et intégration des données hydrogéophysiques de surface et en forage pour la caractérisation environnementale des aquifères : application au site d'enfouissement sanitaire de Saint-Lambert-de-Lauzon, Québec. Mémoire de maîtrise, INRS-ÉTÉ, Québec.

BESRÉ, F., OCCHIETTI, S. (1990) Les Varves de Deschaillons, les Rythmites du Saint-Maurice et les Rythmites de Leclercville, Pléistocène supérieur, vallée du Saint-Laurent, Québec. *Geographie Physique Et Quaternaire*, 44, 2, 181-198.

BOLDUC, A. M. (1999a) Géologie des formations superficielles : région de Shawinigan, Québec. Ottawa, Commission géologique du Canada. Document cartographique.

BOLDUC, A. M. (1999b) Géologie des formations superficielles, région de Trois-Rivières, Québec. Ottawa, Commission géologique du Canada. Document cartographique.

CLARK, T. H., GLOBENSKY, Y. (1976) Rapport géologique RG-164 : Région de Trois-Rivières. Ministère des Richesses Naturelles : Direction générale des mines. Rapport et document cartographique.

CLET, M., OCCHIETTI, S. (1996) La sous-séquence des sédiments de Saint-Pierre - Rythmites du Saint-Maurice - Sables des Vieilles-Forges, Pléistocène supérieur, vallée du Saint-Laurent, Québec. *Géographie Physique et Quaternaire*, 50, 3, 287-310.

COBARIC-UPA (2008) Atlas des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Chaudière : secteurs de la Basse-Chaudière et de la Moyenne-Chaudière.

Comité d'experts sur la prospection pédologique (1998) Le système Canadien de classification des Sols (3ième éditions). Agriculture Canada. Publication 1646, 187 p.

COURRIOUX, G., NULLANS, S., GUILLEN, A., BOISSONNAT, J. D., REPUSSEAU, P., RENAUD, X., THIBAUT, M. (2001) 3D volumetric modelling of Cadomian terranes (Northern Brittany, France): an automatic method using Voronoi diagrams. *Tectonophysics*, 331, 181-196.

DENIS, R. (1971) Géologie du Quaternaire - Saint-Gabriel-de-Brandon. Document cartographique.

DENIS, R. (1974) Late quaternary geology and geomorphology in the lake maskinonge area, Quebec. Thèse de doctorat, Uppsala Universitet.

FAGNAN, N., NASTEV, M., LEFEBVRE, R., MARTEL, R., SAVARD, M. (2001) Résultats initiaux d'une partie des travaux de caractérisation hydrogéologique des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec. Commission géologique du Canada.

FERLAND, P., OCCHIETTI, S. (1990) Révision du stratotype des Sédiments de Saint-Pierre et implications stratigraphiques, vallée du Saint-Laurent, Québec. *Geographie Physique et Quaternaire*, 44, 2, 147-158.

FRIND, E., MUHAMMAD, D., MOLSON, J. (2002) Delineation of Three-Dimensional Well Capture Zones for Complex Multi-Aquifer Systems. *Ground Water*, 40, 6, 586-598.

GADD, N. R. (1971) Surficial geology, central St. Lawrence Lowland, Quebec. Ottawa, Commission géologique du Canada.

GADD, N. R., KARROW, P. F. (1959) Surficial geology of Trois-Rivières: Saint-Maurice, Champlain, Maskinongé and Nicolet Counties, Québec. 54-1959.

GLOBENSKY, Y. (1987) Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. 63 p.

HÉBERT, C. (2010) Compilation géologique du sud-ouest de la Mauricie. 19 p.

KARROW, P. F., ANDERSON, T. W., CLARKE, A. H., DELORME, L. D., SREENIVASA, M. R. (1975) Stratigraphy, paleontology, and age of Lake Algonquin sediments in southwestern Ontario, Canada. *Quaternary Research*, 5, 1, 49-87.

KENNY, F., HUNTER, G., CHAN, P. (1997) Georeferencing quality control of Ontario's water well data base for the Greater Toronto and Oak Ridges Moraine areas of Southern Ontario. Proceedings of the 1997 Canadian Geomatics conference, Canada. Abstract 219.

LAMARCHE, L. (2005) Histoire géologique Holocène du lac Saint-Pierre et de ses ancêtres. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, 225 p.

LEBLANC, Y., LÉGARÉ, G., HÉBERT, C., GRATTON, D., ASSANI, A. A., CAMPEAU, S. (2010) Caractérisation hydrogéologique du sud-ouest de la Mauricie : Rapport d'étape I. Université du Québec à Trois-Rivières. Université du Québec à Trois-Rivières. 86 p.

LONG, B. (2011) L'analyse scanographique. *INRS-ETE*, Document maison, 16 p.

MDDEP (2008) Règlement sur le captage des eaux souterraines : En bref. Bibliothèque et Archives nationales du Québec. ISBN 978-972-550-53988-53989.

NADEAU, L., BROUILLETTE, P. (1995) Carte structurale de la région de Trois-Rivières SNRC 31I: Province de Grenville, Québec. Document cartographique. Ottawa & Québec, Commission géologique du Canada & Centre géoscientifique de Québec.

NADEAU, L., BROUILLETTE, P., HÉBERT, C. (2006) Architecture et évolution tectonique de l'orogène du Grenville, région de Portneuf-Mauricie, Québec. Excursion B6. Congrès annuel de l'AGC-AMC Planète Terre, Montréal.

NASTEV, M., LAMONTAGNE, C., TREMBLAY, T., LAVOIE, D., HARDY, F., LAMOTHE, M., CROTEAU, A., BLANCHETTE, D., LAVIGNE, M.-A., ROY, N., PARADIS, D., BENOIT, N., LEFEBVRE, R., MARCOTTE, D., GAUDIN, R., ROULEAU, A. (2004) Hydrogeological overview of the trans-boundary aquifers in the Châteauguay River Basin, Canada-United States. 5th Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, Québec.

OCCHIETTI, S. (1980) Le quaternaire de la région de Trois-Rivières - Shawinigan, Québec : contribution à la paléogéographie de la vallée moyenne du St-Laurent et corrélations stratigraphiques. Montréal, Presses de l'Université du Québec.

OCCHIETTI, S. (1982) Synthèse lithostratigraphique et paléoenvironnements du Quaternaire au Québec méridional. *Géographie physique et Quaternaire*, 36, 1-2, 15-49.

OCCHIETTI, S. (2007) The Saint-Narcisse morainic complex and early Younger Dryas events on the southeastern margin of the Laurentide Ice Sheet. *Geographie Physique Et Quaternaire*, 61, 2, 89-117.

OCCHIETTI, S., BALESCU, S., LAMOTHE, M., CLET, M., CRONIN, T., FERLAND, P., PICHET, P. (1996) Late Stage 5 Glacio-isostatic Sea in the St. Lawrence Valley, Canada and United States. *Quaternary Research*, 45, 2, 128-137.

PARENT, M., DUBOIS, M. M., JACOB, M. M., BAIL, A., LAROCQUE, A. (1985) Paléogéographie du Québec méridonal entre 12 500 et 8000 ans BP. *Recherches Amérindiennes au Québec*, 15, 17-37.

PARENT, M., GIRARD, F., FAGNAN, N., MICHAUD, Y., BOISVERT, E., FORTIER, R. (2003) Caractérisation géologique des formation superficielles enfouies; dans "Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires". Ressources naturelles Canada. 162 p.

PARENT, M., OCCHIETTI, S. (1988) Late Wisconsinan Deglaciation and Champlain Sea Invasion in the St. Lawrence Valley, Québec. *Geographie Physique Et Quaternaire*, 42, 3, 215-246.

PARENT, M., PARADIS, S. J., BOIVIN, R. (2009) Formations superficielles : Légende & notes descriptives - 1 : 50 000 à 1 : 125 000. CGC-Québec. CGC-Québec. 8 p.

PUGIN, A., LARSON, T., SARGENT, S., MCBRIDE, J., BEXFIELD, C. (2004) Near-surface mapping using SH-wave and P-wave seismic land-streamer data acquisition in Illinois, U.S. *The Leading Edge*, 23, 7, 677-682.

RICHARD, P., OCCHIETTI, S. (2004) Meltwater discharge and the triggering of Younger Dryas : new data on the chronology of Champlain Sea transgression in the St-Lawrence River Valley. American Geophysical Union, Spring Meeting.

RIVERS, T., MARTIGNOLE, J., GOWER, C., DAVIDSON, T. (1989) New tectonic divisions of the Grenville Province Southeast Canadian Shield. *Tectonics*, 8, 1, 63-84.

ROSS, M., PARENT, M., LEFEBVRE, R. (2005) 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 13, 5, 690-707.

ROSS, M., PARENT, M., MICHAUD, Y., BOISVERT, E., GIRARD, F. (2001) On the construction of 3D geological models for applications in regional hydrogeology in complex Quaternary terrains of eastern Canada. Geological Models for Groundwater Flow Modeling, Workshop Extended Abstracts.

RUSSELL, H. A. J., BRENNAND, T. A., LOGAN, A., SHARPE, D. R. (1998) Standardization and assessment of geological descriptions from water well records, Greater Toronto and Oak Ridges Moraine areas, southern Ontario. Geological Survey of Canada. 89-102.

SMIRNOFF, A., BOISVERT, E., PARADIS, S. J. (2008) Support vector machine for 3D modelling from sparse geological information of various origins. *Comput. Geosci.*, 34, 127-143.

TREECE, G. M., PRAGER, R. W., GEE, A. H., BERMAN, L. (1999) Fast surface and volume estimation from non-parallel cross-sections, for freehand three-dimensional ultrasound. *Medical Image Analysis*, 3, 2, 141-173.

TREMBLAY, T., NASTEV, M., LAMOTHE, M. (2010) Grid-based hydrostratigraphic 3D modelling of the Quaternary sequence in the Châteauguay River watershed, Québec. *Canadian Water Resources Journal*, 35, 4, 377-389.

ANNEXE A

CARTE DE LA GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX DU SUD-OUEST DE LA MAURICIE

UQTR Université du Québec à Trois-Rivières



ANNEXE B

RÉSULTATS : SISMIQUE RÉFRACTION

Sondage	MTM X (m)	MTM Y (m)	MNE Z (m)	Municipalité	Stratigraphie (épaisseur en mètres, à partir de la surface)					
SR-01	349978	5145117	125	Charette	0-5	sable	5-43	argile	43-60	roc ou till
SR-02	350141	5145278	120	Charette	0-3	sable	3-35	argile	35-60	roc ou till
SR-03	349930	5144923	124	Charette	0-6	sable sec	6+	sable saturé		
SR-04	349770	5144767	121	Charette	0-6	sable sec	6+	sable saturé		
SR-05	349475	5144465	117	Charette	0-4	sable silteux	4-62	till	62+	roc ou till
SR-06	349641	5144619	119	Charette	0-4.5	sable silteux	4.5-37.5	till	37.5+	roc
SR-07	350910	5145443	121	Charette	0-6	sable silteux	6+	till		
SR-08	351113	5145511	118	Charette	0-6	sable silteux	6+	till		
SR-09	351247	5145715	120	Charette	0-4	sable	4+	argile		
SR-10	351403	5145880	114	Charette	0-4	sable	4+	argile		
SR-11	350987	5145204	121	Charette	0-1.5	sable graveleux	1.5-17.5	gravier	17.5+	till
SR-12	351147	5145368	121	Charette	0-1.5	sable graveleux	1.5-17.5	gravier	17.5+	till
SR-13	351553	5145787	118	Charette	0-3	sable sec	3+	sable saturé		
SR-14	351713	5145954	116	Charette	0-3	sable sec	3+	sable saturé		
SR-15	371891	5152861	136	Notre-Dame-du-Mont Carmel	0-3	sable non compact	3-20.55	sable et gravier	20.55+	till argileux dense
SR-16	371812	5152938	134	Notre-Dame-du-Mont Carmel	0-3	sable non compact	3-20.55	sable et gravier	20.55+	till argileux dense
SR-17	370520	5151453	171	Notre-Dame-du-Mont Carmel	0-4	sable non compact	4-48.36	silt	48.36+	grès ou till argileux dense

Sondage	MTM X (m)	MTM Y (m)	MNE Z (m)	Municipalité	Stratigraphie (épaisseur en mètres, à partir de la surface)					
SR-18	370677	5151280	170	Notre-Dame-du-Mont Carmel	0-4	sable non compact	4-48.36	silt	48.36+	grès ou till argileux dense
SR-19	369922	5153820	129	Notre-Dame-du-Mont Carmel	0-4	sable non compact	4-47.5	argile	47.5+	till
SR-20	370089	5153989	123	Notre-Dame-du-Mont Carmel	0-4	sable non compact	4-47.5	argile	47.5+	till
SR-21	371191	5155090	120	Notre-Dame-du-Mont Carmel	0-4.5	sable non compact				
SR-22	371353	5155251	120	Notre-Dame-du-Mont Carmel	0-4.5	sable non compact				
SR-23	366392	5156039	125	Shawinigan	0-3	sable	3-39	argile	39+	roc
SR-24	366220	5156192	124	Shawinigan	0-4	sable	4-56	argile	56+	roc
SR-25	331207	5142836	171	St-Alexis-des-Monts	0-7	sable et gravier	7+	roc		
SR-26	331348	5143005	172	St-Alexis-des-Monts	0-7	sable et gravier	7+	roc		
SR-27	331890	5143640	172	St-Alexis-des-Monts	0-3	sable	3-21	gravier	21+	roc
SR-28	332041	5143815	173	St-Alexis-des-Monts	0-6	sable	6-52	gravier	52+	roc
SR-29	332354	5147956	163	St-Alexis-des-Monts	0-4	sable	4+	till argileux		

Sondage	MTM X (m)	MTM Y (m)	MNE Z (m)	Municipalité	Stratigraphie (épaisseur en mètres, à partir de la surface)					
SR-43	343758	5143616	161	Saint-Paulin	0-4	sable	4-19	argile	19+	roc
SR-44	343714	5143392	158	Saint-Paulin	0-3	sable	3-25	argile	25+	roc
SR-45	343712	5143379	157	Saint-Paulin	0-3.5	sable	3.5-49.5	argile	49.5+	roc
SR-46	343670	5143154	150	Saint-Paulin	0-3	sable	3-44	argile	44+	roc
SR-47	343389	5141710	159	Saint-Paulin	0-4	sable	4-66	argile	66+	roc
SR-48	343434	5141937	158	Saint-Paulin	0-4	sable	4-66	argile	66+	roc
SR-49	371202	5137519	58	Trois-Rivières	0-4	sable	4+	sable saturé		
SR-50	371300	5137472	59	Trois-Rivières	0-4	sable	4+	sable saturé		

Sondage	MTM X (m)	MTM Y (m)	MNE Z (m)	Municipalité	Stratigraphie (épaisseur en mètres, à partir de la surface)					
SR-30	332578	5147902	164	St-Alexis-des-Monts	0-4	sable	4+	till argileux		
SR-31	338423	5138861	199	Ste-Angèle-de-Prémont	0-2	sable	2-24	sable fin silteux	24+	roc
SR-32	338645	5138922	200	Ste-Angèle-de-Prémont	0-2	sable	2-24	sable fin silteux	24+	roc
SR-33	338857	5138851	199	Ste-Angèle-de-Prémont	0-4	sable	4-46	silt	46+	roc
SR-34	338692	5138691	196	Ste-Angèle-de-Prémont	0-4	sable	4-46	silt	46+	roc
SR-35	341863	5140707	177	Ste-Angèle-de-Prémont	0-6	sable	6+	till		
SR-36	341658	5140603	172	Ste-Angèle-de-Prémont	0-5.5	sable	5.5+	till		
SR-37	373411	5141371	61	Saint-Louis-de-France	0-5	sable	5+	sable saturé		
SR-38	373511	5141396	61	Saint-Louis-de-France	0-5	sable	5+	sable saturé		
SR-39	373493	5141619	62	Saint-Louis-de-France	0-5	sable	5+	sable saturé		
SR-40	373425	141538	62	Saint-Louis-de-France	0-5	sable	5+	sable saturé		
SR-41	373408	5141523	62	Saint-Louis-de-France	0-5	sable	5+	sable saturé		
SR-42	373539	5141438	61	Saint-Louis-de-France	0-5	sable	5+	sable saturé		

ANNEXE C

RÉSULTATS : RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

#	MTM X	MTM Y	MNE Z	Municipalité	Stratigraphie (épaisseur en mètres, à partir de la surface)					
	(m)	(m)	(m)		Épaisseur 1	Description 1	E2	D2	E3	D3
SE-14	379615	5139256	38.75	Cap-de-la-Madeleine	28	sable	32	argile		
SE-16	379090	5139071	39.50	Cap-de-la-Madeleine	26	sable	34	argile		
SE-17	379090	5139071	39.50	Cap-de-la-Madeleine	26	sable	34	argile		
SE-18	379225	5139886	41.26	Cap-de-la-Madeleine	26	sable	34	argile		
SE-20	373767	5143201	60.62	St-Louis-de-France	4	sable	27	sable fin	29	sable fin silteux
SE-21	373771	5143201	60.59	St-Louis-de-France	8	sable	82	sable silteux		
SE-22	373776	5142898	60.64	St-Louis-de-France	7	sable	53	sable silteux		
SE-23	373727	5143066	61.04	St-Louis-de-France	7	sable	53	sable silteux		
SE-24	373727	5143064	61.04	St-Louis-de-France	non concluant					
SE-25	374462	5142242	57.52	St-Louis-de-France	4	sable	18	sable fin-grossier	38	argile
SE-26	373409	5141373	60.88	St-Louis-de-France	4	sable	18	sable fin-grossier	38	argile
SE-29	373509	5141396	60.92	St-Louis-de-France	4	sable	18	sable fin-grossier	38	argile
SE-34	377718	5142099	44.44	St-Louis-de-France	5	sable	14	sable fin-grossier	41	argile
SE-37	369694	5139092	61.83	Trois-Rivières	60	sable				
SE-38	372464	5136944	56.02	Trois-Rivières	9	sable	51	argile		
SE-39	371335	5137462	59.09	Trois-Rivières	6	sable	34	argile	20	inconnu

#	MTM X	MTM Y	MNE Z	Municipalité	Stratigraphie (épaisseur en mètres, à partir de la surface)					
	(m)	(m)	(m)		Épaisseur 1	Description 1	E2	D2	E3	D3
SE-42	369370	5139965	30.16	Trois-Rivières	9	sable	51	argile		
SE-43	370100	5132166	59.98	Trois-Rivières	32	sable	28	argile		
SE-44	371344	5133450	74.11	Trois-Rivières	non-concluant					
SE-45	370773	5132861	70.00	Trois-Rivières	23	sable	37	argile		
SE-48	371841	5152923	134.53	Notre-Dame-du-Mont-Carmel	7	sable	26	argile	27	sable silteux
SE-52	371675	5152162	193.78	Notre-Dame-du-Mont-Carmel	30	sable				
SE-60	370751	5154652	119.51	Notre-Dame-du-Mont-Carmel	4	dépôt organique	12	sable-till	34	argile
SE-61	368748	5152171	141.09	Notre-Dame-du-Mont-Carmel	4	sable fin	26	sable-till		
SE-62	368915	5151388	173.76	Notre-Dame-du-Mont-Carmel	6	sable	24	sable fin		
SE-63	372015	5151093	123.09	Notre-Dame-du-Mont-Carmel	6	sable	38	argile	16	roc
SE-66	349905	5144894	123.39	Charette	6	sable	54	till		
SE-84	351010	5145479	118.66	Charette	30	sable et gravier				
SE-85	351336	5145807	115.42	Charette	20	argile	40	sable et gravier		
SE-86	353152	5145270	118.51	Charette	5	sable	28	argile		
SE-87	353116	5146277	144.28	Charette	5	sable	32	sable et gravier ou till	23	sable
SE-95	354371	5145783	130.05	Charette	26	sable	34	argile		

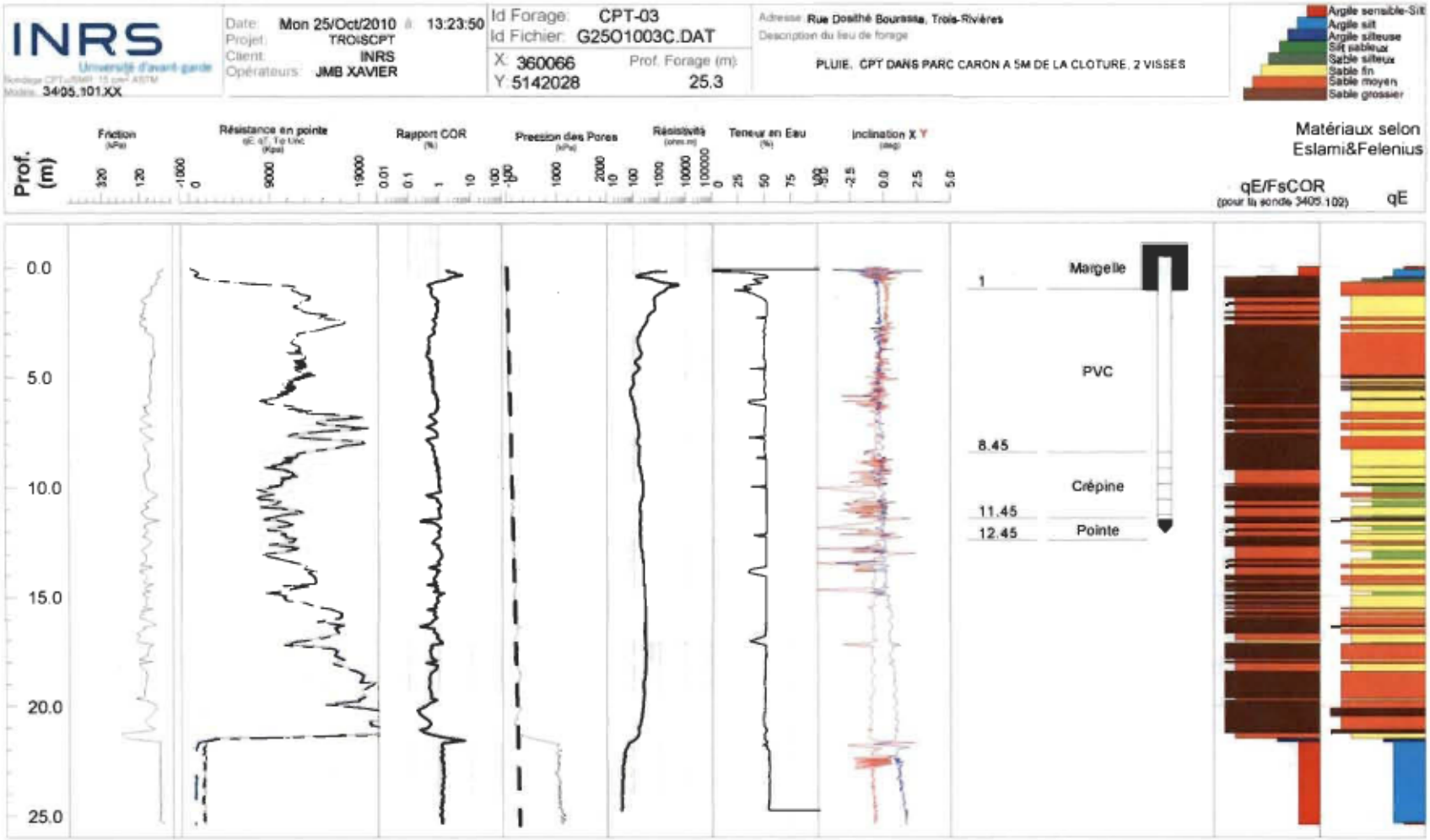
#	MTM X	MTM Y	MNE Z	Municipalité	Stratigraphie (épaisseur en mètres, à partir de la surface)					
	(m)	(m)	(m)		Épaisseur 1	Description 1	E2	D2	E3	D3
SE-96	351589	5145825	118.41	Charette	20	argile	40	till		
SE-97	351325	5145310	132.95	Charette	33	sable et gravier	17	till		
SE-98	343878	5143706	153.25	Saint-Paulin	5	sable	55	argile		
SE-99	343637	5142990	149.42	Saint-Paulin	60	argile				
SE-100	343410	5141824	157.92	Saint-Paulin	60	argile				
SE-101	343472	5142126	155.53	Saint-Paulin	60	argile				
SE-102	344324	5140350	137.30	Saint-Paulin	18	sable	42	sable-gravier ou till		
SE-105	340172	5141457	157.34	Saint-Paulin	60	argile				
SE-106	340353	5142410	156.02	Saint-Paulin	30	argile	30	sable silteux		
SE-112	331547	5143238	173.24	Saint-Alexis-des-Monts	30	sable				
SE-115	332790	5147067	167.14	Saint-Alexis-des-Monts	5	sable	55	argile		
SE-131	338518	5138683	198.27	Sainte-Angèle-de-Prémont	21	sable	39	roc		
SE-132	337191	5137449	206.63	Sainte-Angèle-de-Prémont	60	sable				
SE-133	337694	5137921	207.68	Sainte-Angèle-de-Prémont	10	sable	50	sable silteux		
SE-134	338192	5138031	202.57	Sainte-Angèle-de-Prémont	60	sable				
SE-135	338992	5138777	193.43	Sainte-Angèle-de-Prémont	20	sable	40	sable silteux		

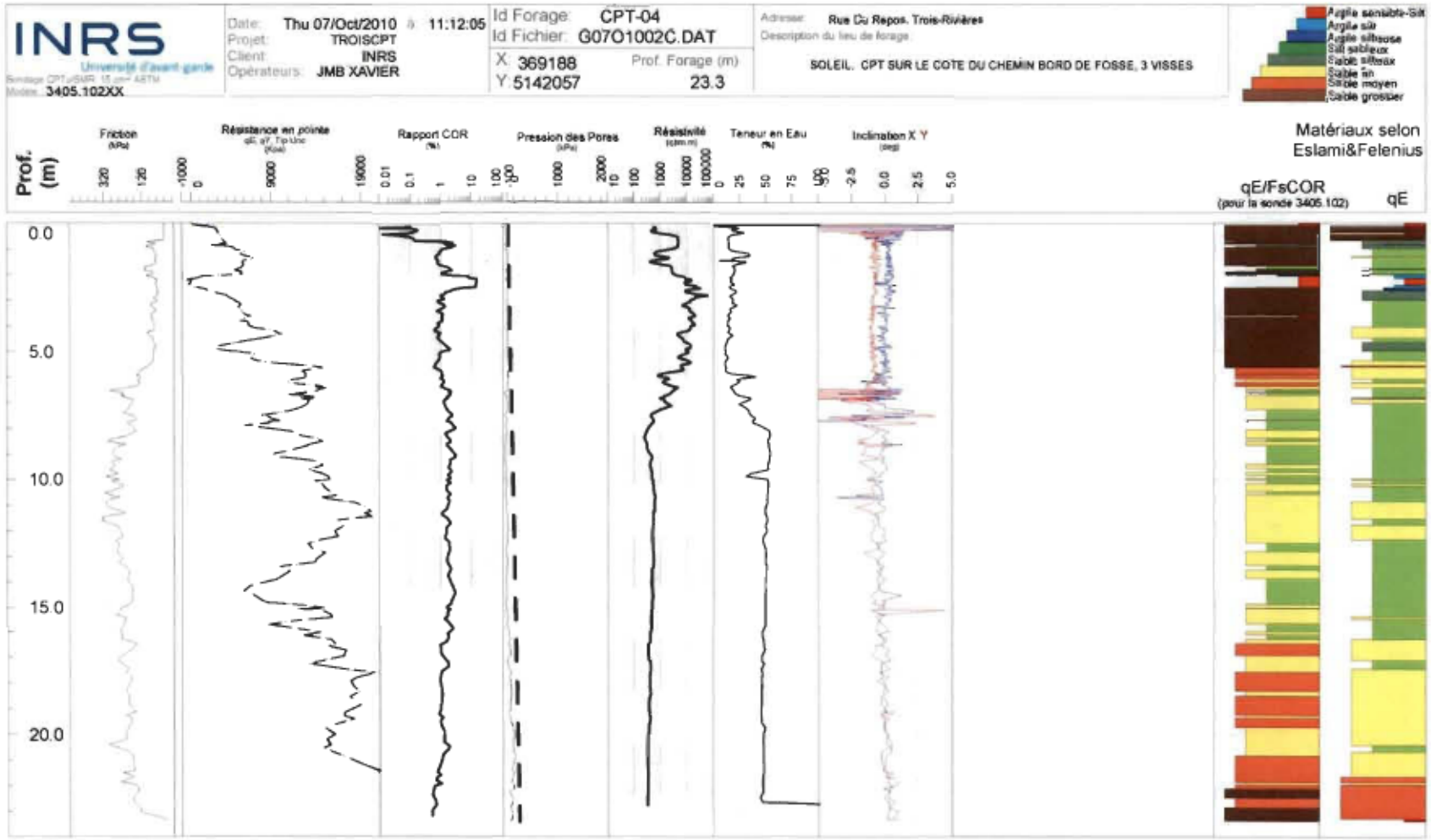
#	MTM X	MTM Y	MNE Z	Municipalité	Stratigraphie (épaisseur en mètres, à partir de la surface)					
	(m)	(m)	(m)		Épaisseur 1	Description 1	E2	D2	E3	D3
SE-136	338709	5138330	198.19	Sainte-Angèle-de-Prémont	60	sable				
SE-137	340226	5139869	175.82	Sainte-Angèle-de-Prémont	21	sable	39	sable silteux		
SE-138	340502	5140017	168.45	Sainte-Angèle-de-Prémont	23	sable	37	sable silteux		
SE-139	340842	5140186	165.98	Sainte-Angèle-de-Prémont	13	sable	47	argile		
SE-140	339375	5139310	193.45	Sainte-Angèle-de-Prémont	60	sable				
SE-141	341470	5140500	167.73	Sainte-Angèle-de-Prémont	23	silt	36	sable fin		
SE-142	347924	5147102	169.02	Saint-Élie-de-Caxton	14	sable fin	26	sable	20	roc
SE-143	348378	5147552	159.92	Saint-Élie-de-Caxton	16	sable	44	roc		
SE-144	348042	5147221	165.53	Saint-Élie-de-Caxton	12	sable fin	32	sable	16	roc
SE-145	348537	5147711	156.21	Saint-Élie-de-Caxton	13	sable fin	27	sable	20	roc
SE-146	347991	5149491	199.49	Saint-Élie-de-Caxton	60	roc				
SE-147	348156	5149602	186.12	Saint-Élie-de-Caxton	26	sable	34	roc		
SE-148	348396	5149517	183.18	Saint-Élie-de-Caxton	8	sable	24	sable fin	28	roc
SE-149	348760	5149276	177.46	Saint-Élie-de-Caxton	11	sable	49	roc		

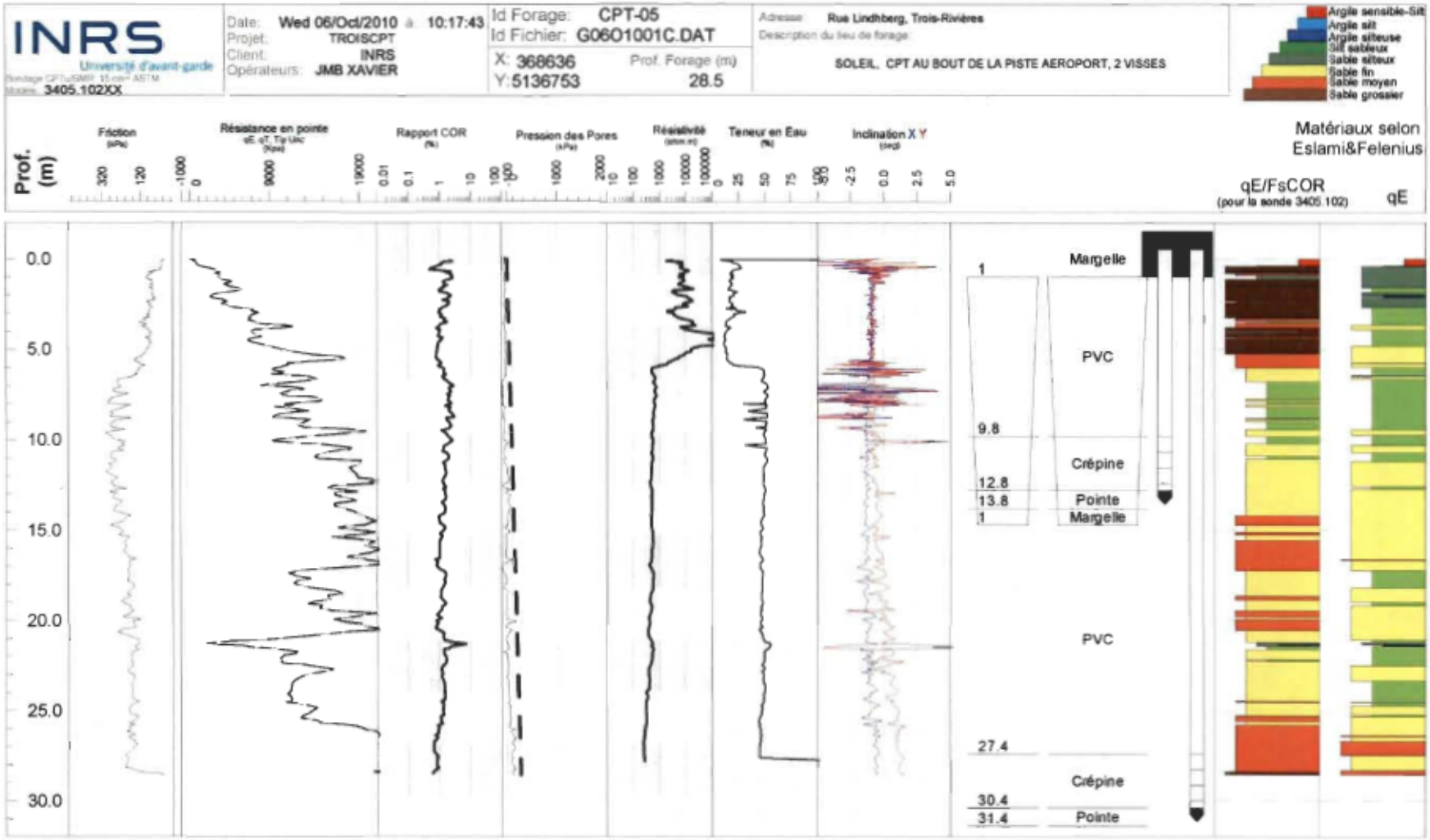
#	MTM X	MTM Y	MNE Z	Municipalité	Stratigraphie (épaisseur en mètres, à partir de la surface)					
	(m)	(m)	(m)		Épaisseur 1	Description 1	E2	D2	E3	D3
SE-150	348467	5148808	175.41	Saint-Élie-de-Caxton	14	sable fin	34	sable	12	roc
SE-151	349075	5149458	188.36	Saint-Élie-de-Caxton	60	sable				
SE-152	348963	5149348	184.09	Saint-Élie-de-Caxton	40	sable	20	roc		
SE-153	348852	5149099	179.98	Saint-Élie-de-Caxton	16	sable	44	sable fin		
SE-154	350532	5150841	163.98	Saint-Élie-de-Caxton	22	sable	38	argile		
SE-155	350501	5150722	163.09	Saint-Élie-de-Caxton	8	sable	52	argile		
SE-156	350368	5150591	163.25	Saint-Élie-de-Caxton	8	sable	52	argile		
SE-157	345814	5150798	177.32	Saint-Élie-de-Caxton	14	sable fin	31	sable	15	roc
SE-158	345917	5150898	176.85	Saint-Élie-de-Caxton	14	sable fin	26	sable	20	sable silteux
SE-160	361158	5133049	41.54	Pointe-du-Lac	16	sable	44	argile		
SE-161	361691	5134235	50.57	Pointe-du-Lac	16	sable	44	argile		
SE-162	366499	5155908	119.51	Shawinigan	7	sable	43	argile		
SE-163	366396	5156079	125.40	Shawinigan	8	sable	52	argile		

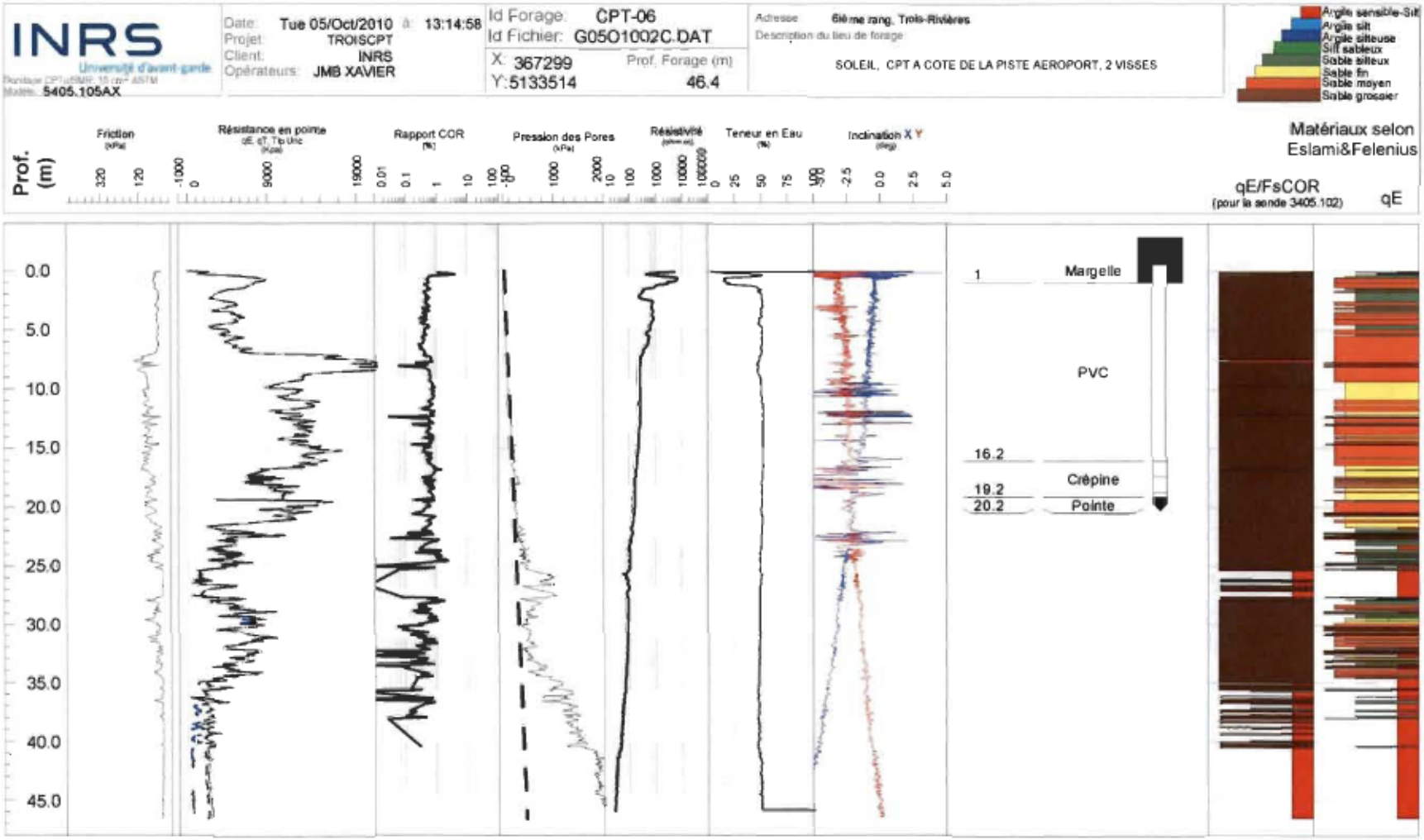
ANNEXE D

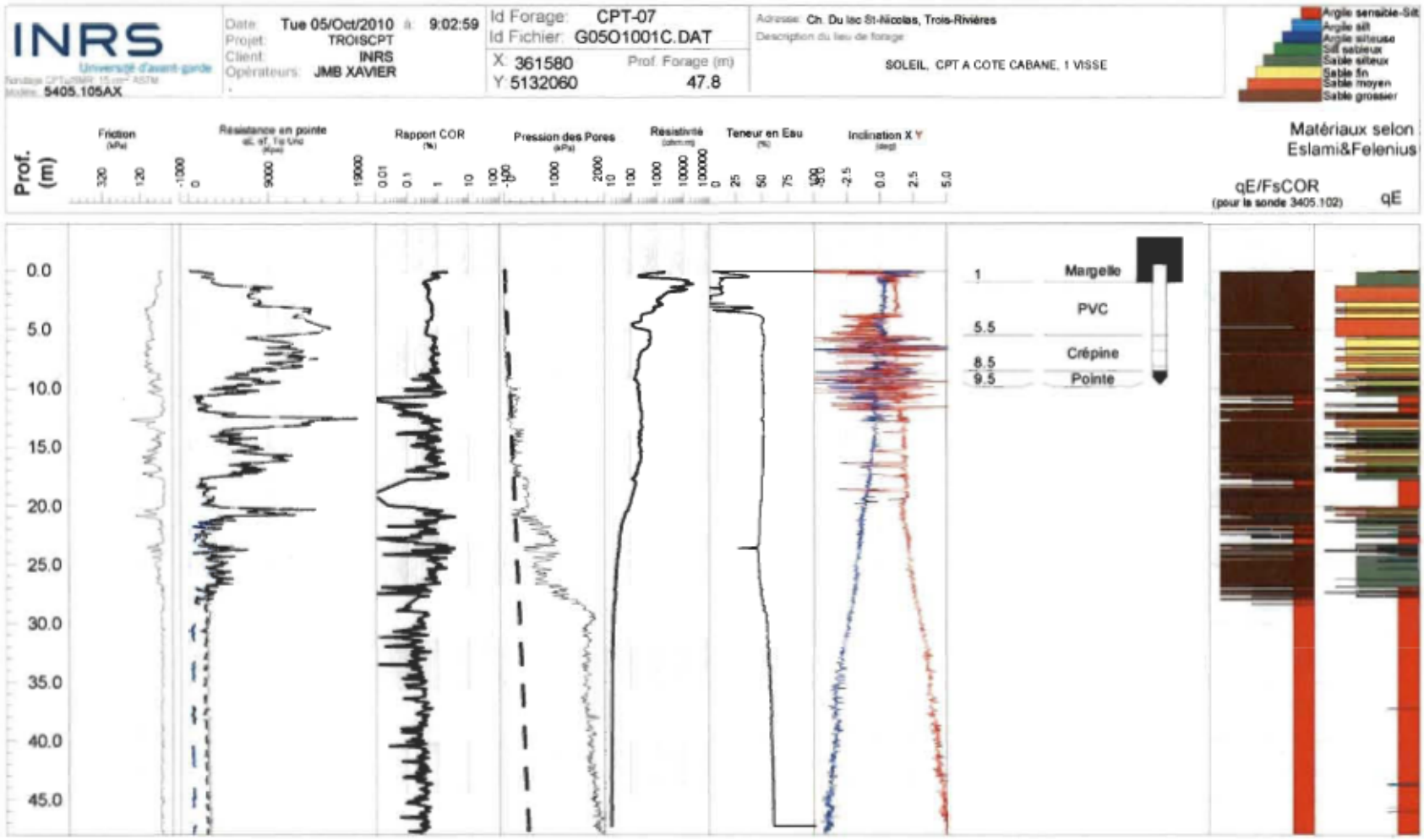
SONDAGES CPT

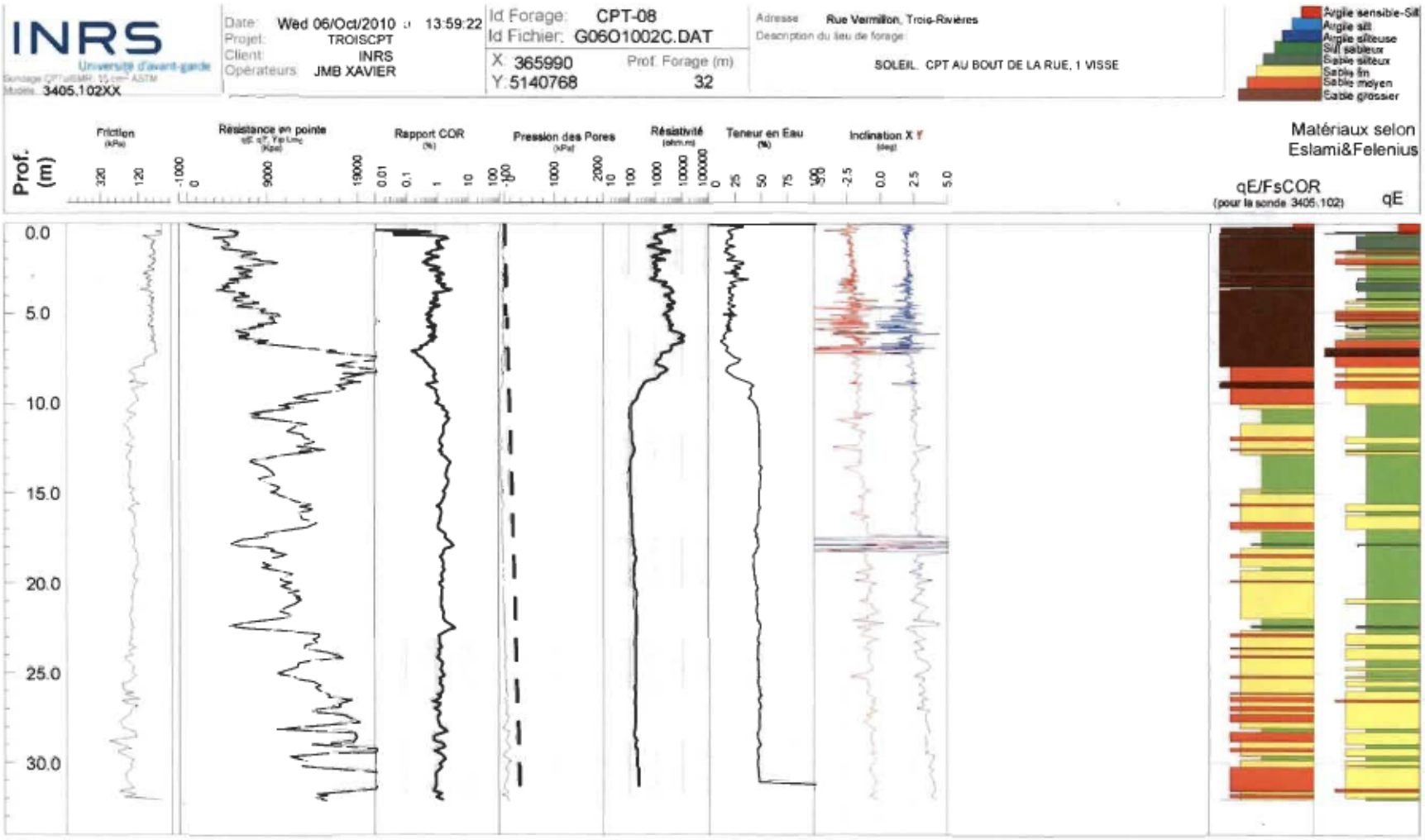

INRS
Université d'avant-garde
Modèle: 3405.101.XX
Date: Mon 25/Oct/2010 à 13:23:50
Projet: TROISCPT
Client: INRS
Opérateurs: JMB XAVIER
Id Forage: CPT-03
Id Fichier: G25O1003C.DAT
X: 360066
Y: 5142028
Prof. Forage (m): 25.3
Adresse: Rue Dosithé Bourassa, Trois-Rivières
Description du lieu de forage
PLUIE. CPT DANS PARC CARON A 5M DE LA CLOTURE, 2 VISSES
Argile sensible-Silt
Argile silt
Argile silteuse
Silt sableux
Sable silteux
Sable fin
Sable moyen
Sable grossier
Matériaux selon Eslami&Felenius
Prof. (m)
Friction (kPa)
Résistance en pointe qE, qT, 1-a Unc (Kpa)
Rapport COR (%)
Pression des Pores (kPa)
Résistivité (ohm.m)
Teneur en Eau (%)
Inclination X Y (deg)
qE/FsCOR (pour la sonde 3405.102)
qE
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
1
8.45
11.45
12.45
Margelle
PVC
Crépine
Pointe

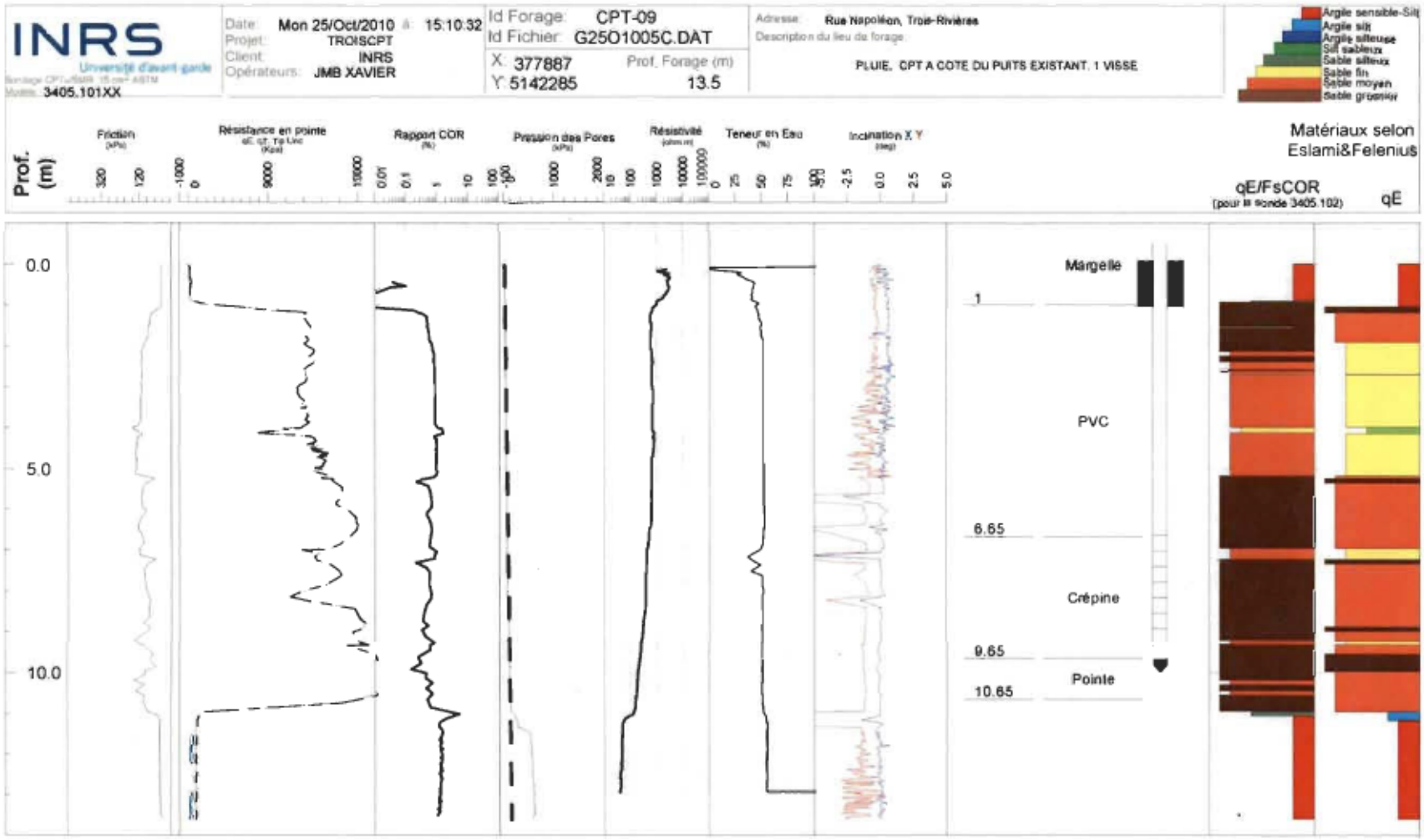

INRS
Université d'avant garde
Modèle: 3405.102XX
Date: Thu 07/Oct/2010 à 11:12:05
Projet: TROISCPT
Client: INRS
Opérateurs: JMB XAVIER
Id Forage: CPT-04
Id Fichier: G07O1002C.DAT
X: 369188
Y: 5142057
Prof. Forage (m) 23.3
Adresse: Rue Du Repos, Trois-Rivières
Description du lieu de forage:
SOLEIL. CPT SUR LE COTE DU CHEMIN BORD DE FOSSE, 3 VISSES
Argile sensible-Silt
Argile silt
Argile silteuse
Silt sableux
Sable silteux
Sable fin
Sable moyen
Sable grossier
Matériaux selon Eslami&Felenius
Prof. (m)
Friction (kPa)
Résistance en pointe
Rapport COR (%)
Pression des Pores (kPa)
Résistivité (ohm.m)
Teneur en Eau (%)
Inclination X Y (deg)
qE/FsCOR
(pour la sonde 3405.102)
qE
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0

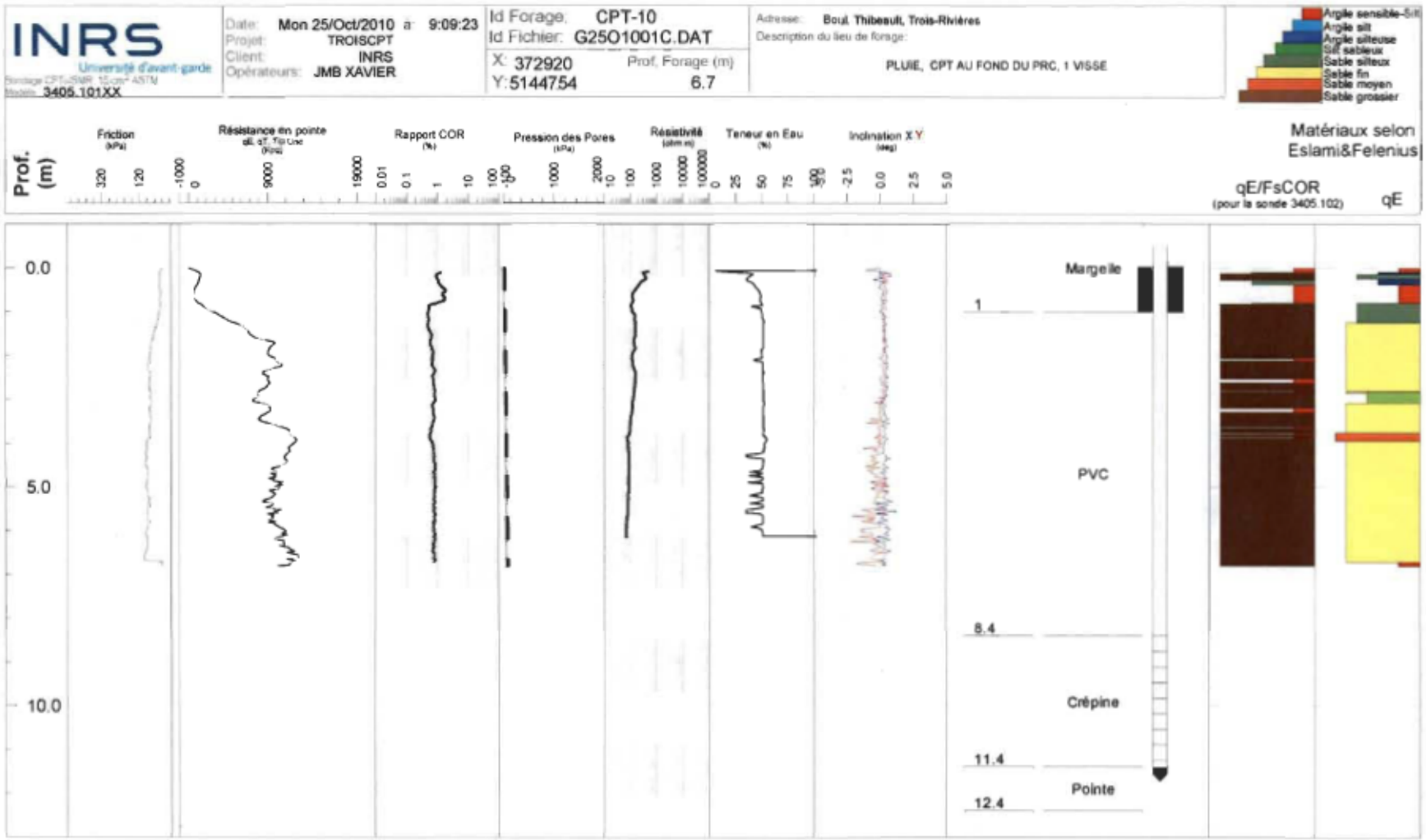

INRS
Université d'avant-garde
Modèle: 3405.102XX
Date: Wed 06/Oct/2010 à 10:17:43
Projet: TROISCPT
Client: INRS
Opérateurs: JMB XAVIER
Id Forage: CPT-05
Id Fichier: G06O1001C.DAT
X: 368636
Y: 5136753
Prof. Forage (m) 28.5
Adresse: Rue Lindhberg, Trois-Rivières
Description du lieu de forage:
SOLEIL, CPT AU BOUT DE LA PISTE AEROPORT, 2 VISSES
Argile sensible-Silt
Argile silt
Argile silteuse
Silt sableux
Sable silteux
Sable fin
Sable moyen
Sable grossier
Matériaux selon Eslami&Felenius
qE/FsCOR
(pour la sonde 3405.102)
qE
Prof. (m)
Friction
Résistance en pointe
Rapport COR
Pression des Pores
Résistivité
Teneur en Eau
Inclination X Y
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
Margelle
1
PVC
9.8
Crépine
12.8
Pointe
13.8
Margelle
1
PVC
27.4
Crépine
30.4
Pointe
31.4

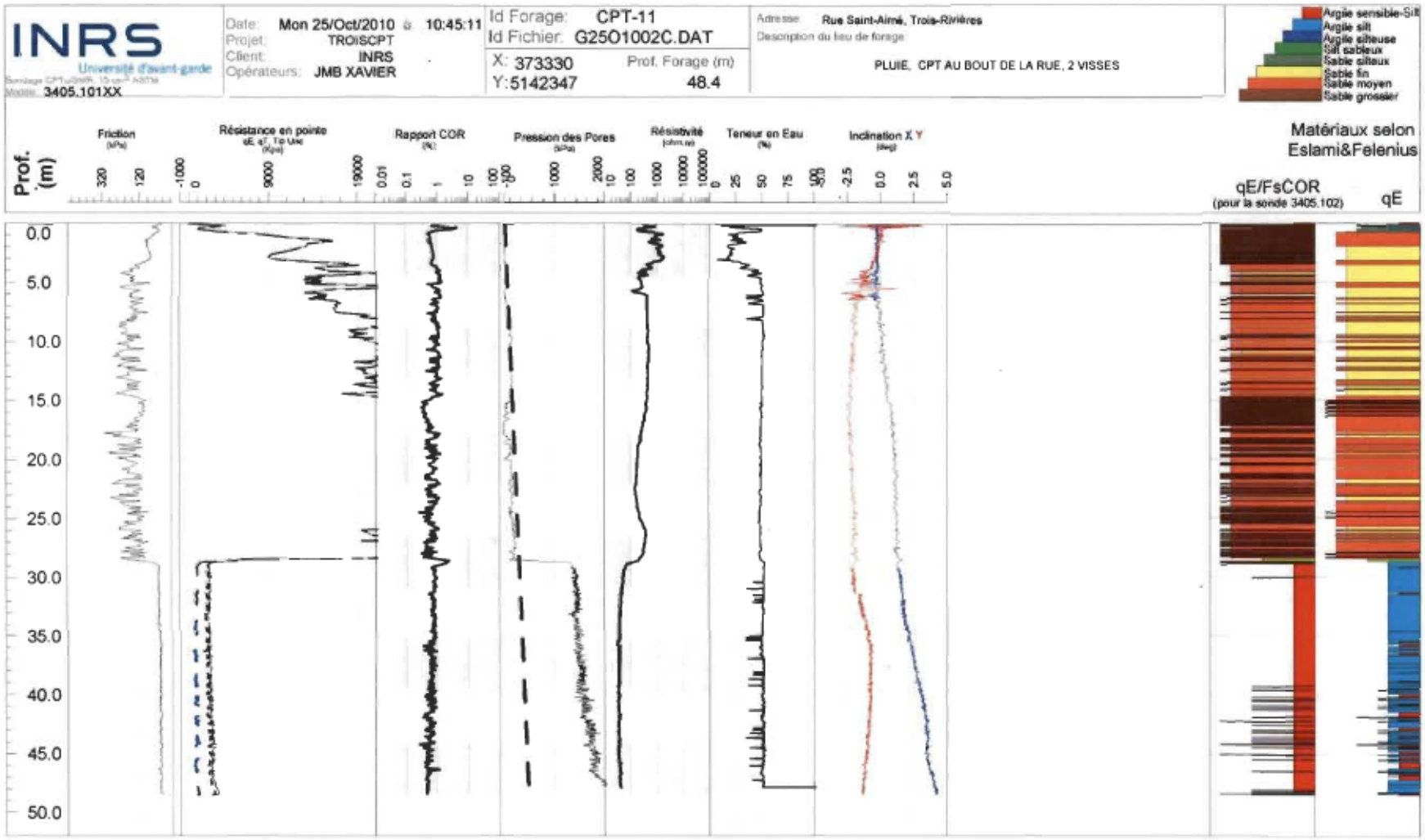

INRS
Université d'avant-garde
Modèle: 5405.105AX
Date: Tue 05/Oct/2010 à: 13:14:58
Projet: TROISCPT
Client: INRS
Opérateurs: JMB XAVIER
Id Forage: CPT-06
Id Fichier: G05O1002C.DAT
X: 367299
Y: 5133514
Prof. Forage (m) 46.4
Adresse 6ième rang, Trois-Rivières
Description du lieu de forage
SOLEIL, CPT A COTE DE LA PISTE AEROPORT, 2 VISSES
Argile sensible-Silt
Argile silt
Argile silteuse
Silt sableux
Sable silteux
Sable fin
Sable moyen
Sable grossier
Matériaux selon
Eslami&Felenius
Prof. (m)
Friction (kPa)
Résistance en pointe qE, qT, Tip Unc (kpa)
Rapport COR (%)
Pression des Pores (kPa)
Résistivité (ohm-m)
Teneur en Eau (%)
Inclination X Y (deg)
qE/FsCOR
(pour la sonde 3405.102)
qE
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
45.0
1
Margelle
PVC
16.2
19.2
Crépine
20.2
Pointe

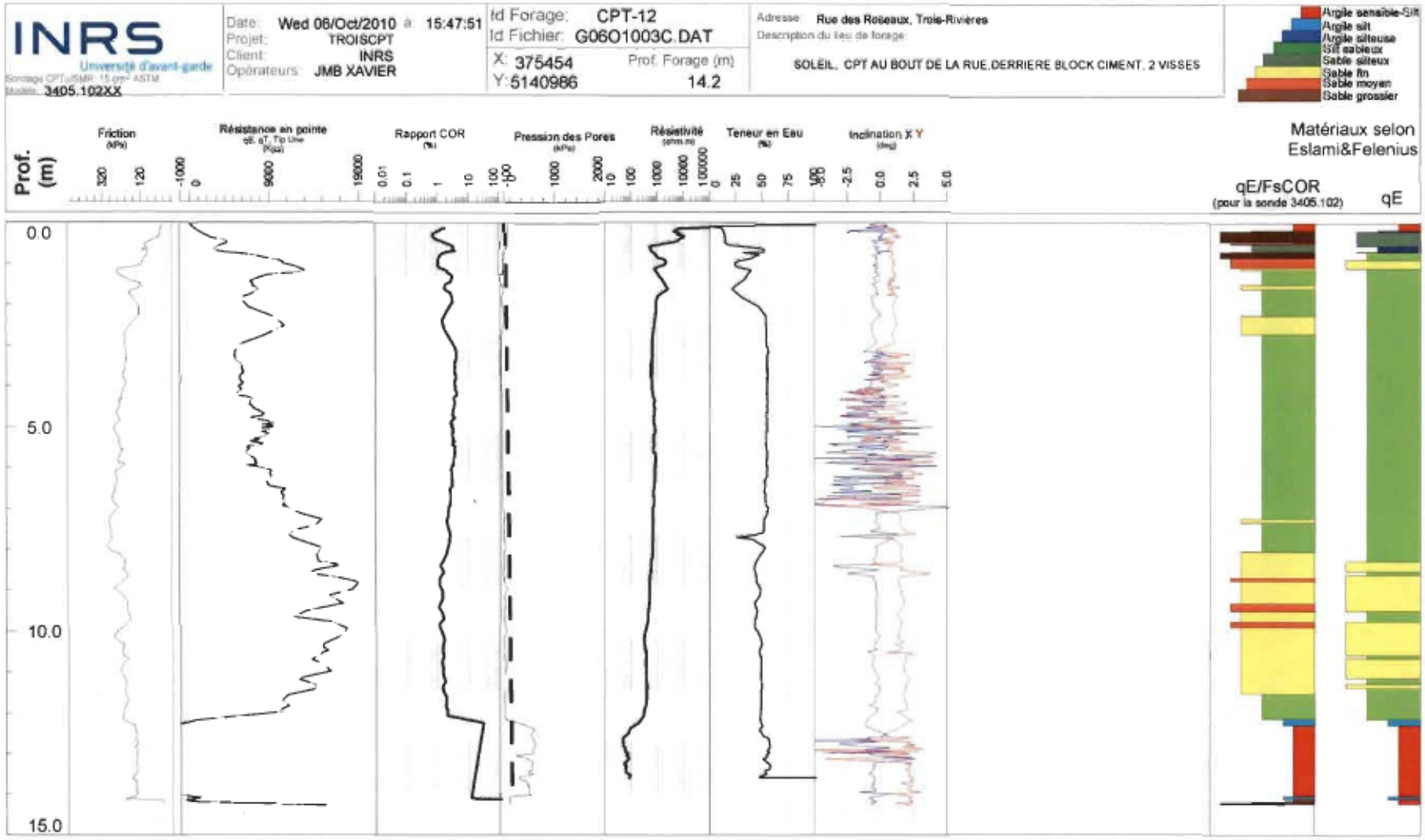

INRS
Université d'avant-garde
Modèle: 5405.105AX
Date: Tue 05/Oct/2010 à 9:02:59
Projet: TROISCPT
Client: INRS
Opérateurs: JMB XAVIER
Id Forage: CPT-07
Id Fichier: G05O1001C.DAT
X: 361580
Y: 5132060
Prof. Forage (m) 47.8
Adresse: Ch. Du lac St-Nicolas, Trois-Rivières
Description du lieu de forage:
SOLEIL, CPT A COTE CABANE, 1 VISSE
Argile sensible-Silt
Argile silt
Argile siteuse
Silt sableux
Sable siteux
Sable fin
Sable moyen
Sable grossier
Matériaux selon Eslami&Felenius
Prof. (m)
Friction (kPa)
Résistance en pointe
Rapport COR (%)
Pression des Pores (kPa)
Résistivité (ohm-m)
Teneur en Eau (%)
Inclination X Y (deg)
qE/FsCOR
(pour la sonde 3405.102)
qE
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
45.0
1
Margelle
5.5
PVC
8.5
Crépine
9.5
Pointe

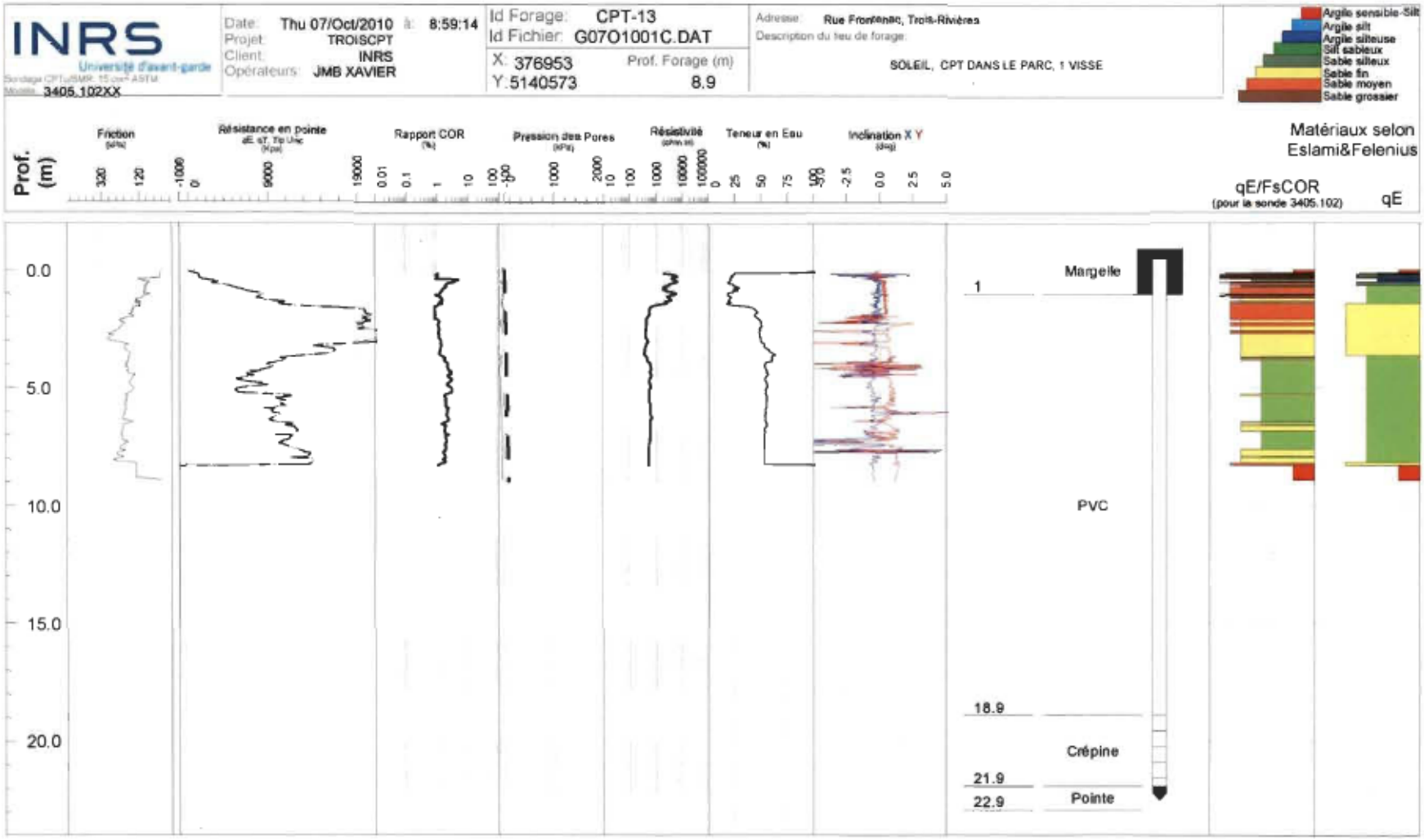

INRS
Université d'avant-garde
Modèle: 3405.102XX
Date: Wed 06/Oct/2010 13:59:22
Projet: TROISCPT
Client: INRS
Opérateurs: JMB XAVIER
Id Forage: CPT-08
Id Fichier: G06O1002C.DAT
X: 365990
Y: 5140768
Prof. Forage (m) 32
Adresse Rue Vermillon, Trois-Rivières
Description du lieu de forage
SOLEIL. CPT AU BOUT DE LA RUE, 1 VISSE
Argile sensible-Silt
Argile silt
Argile silteuse
Silt sableux
Sable silteux
Sable fin
Sable moyen
Sable grossier
Matériaux selon Eslami&Felenius
qE/FsCOR
(pour la sonde 3405.102)
qE
Prof. (m)
Friction (kPa)
Résistance en pointe
Rapport COR (%)
Pression des Pores (kPa)
Résistivité (ohm.m)
Teneur en Eau (%)
Inclination X Y (deg)
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0


INRS
Université d'avant garde
Modèle: 3405.101XX
Date: Mon 25/Oct/2010 à 15:10:32
Projet: TROISCPT
Client: INRS
Opérateurs: JMB XAVIER
Id Forage: CPT-09
Id Fichier: G25O1005C.DAT
X: 377887
Y: 5142285
Prof. Forage (m) 13.5
Adresse: Rue Napoléon, Trois-Rivières
Description du lieu de forage:
PLUIE, CPT A COTE DU PUITS EXISTANT. 1 VISSE
Argile sensible-Silt
Argile silt
Argile silteuse
Silt sableux
Sable silteux
Sable fin
Sable moyen
Sable grossier
Matériaux selon Eslami&Felenius
Prof. (m)
Friction (kPa)
Résistance en pointe (Kpa)
Rapport COR (%)
Pression des Pores (kPa)
Résistivité (ohm-m)
Teneur en Eau (%)
Inclination X,Y (deg)
qE/FsCOR
(pour la sonde 3405.102)
qE
0.0
5.0
10.0
Margelle
1
PVC
6.65
Crépine
9.65
Pointe
10.65


INRS
Université d'avant-garde
Modèle: 3405.101XX
Date: Mon 25/Oct/2010 à 9:09:23
Projet: TROISCPT
Client: INRS
Opérateurs: JMB XAVIER
Id Forage: CPT-10
Id Fichier: G25O1001C.DAT
X: 372920
Y: 5144754
Prof. Forage (m) 6.7
Adresse: Boul. Thibeault, Trois-Rivières
Description du lieu de forage:
PLUIE, CPT AU FOND DU PRC, 1 VISSE
Argile sensible
Argile silt
Argile silteuse
Silt sableux
Sable silteux
Sable fin
Sable moyen
Sable grossier
Matériaux selon Eslami&Felenius
Prof. (m)
Friction (kPa)
Résistance en pointe
Rapport COR (%)
Pression des Pores (kPa)
Résistivité (ohm m)
Teneur en Eau (%)
Inclination X Y (deg)
qE/FsCOR
(pour la sonde 3405.102)
qE
0.0
5.0
10.0
Margelle
1
PVC
8.4
Crépine
11.4
Pointe
12.4


INRS
Université d'avant-garde
Modèle: 3405.101XX
Date: Mon 25/Oct/2010 à 10:45:11
Projet: TROISCPT
Client: INRS
Opérateurs: JMB XAVIER
Id Forage: CPT-11
Id Fichier: G25O1002C.DAT
X: 373330
Y:5142347
Prof. Forage (m) 48.4
Adresse: Rue Saint-Aimé, Trois-Rivières
Description du lieu de forage:
PLUIE, CPT AU BOUT DE LA RUE, 2 VISSES
Argile sensible-Silt
Argile silt
Argile silteuse
Silt sableux
Sable silteux
Sable fin
Sable moyen
Sable grossier
Matériaux selon Eslami&Felenius
qE/FsCOR
(pour la sonde 3405.102)
qE
Prof. (m)
Friction
Résistance en pointe
Rapport COR
Pression des Pores
Résistivité
Teneur en Eau
Inclination X Y
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
45.0
50.0


INRS
Université d'avant-garde
Sondage CPT ø15MR: 15 cm² ASTM
Modèle: 3405.102XX
Date: Wed 06/Oct/2010 à 15:47:51
Projet: TROISCPT
Client: INRS
Opérateurs: JMB XAVIER
Id Forage: CPT-12
Id Fichier: G06O1003C.DAT
X: 375454
Y: 5140986
Prof. Forage (m) 14.2
Adresse: Rue des Roseaux, Trois-Rivières
Description du lieu de forage:
SOLEIL, CPT AU BOUT DE LA RUE,DERRIERE BLOCK CIMENT, 2 VISSES
Argile sensible-Silt
Argile silt
Argile silteuse
Silt sableux
Sable silteux
Sable fin
Sable moyen
Sable grossier
Matériaux selon Eslami&Felenius
qE/FsCOR
(pour la sonde 3405.102)
qE
Prof. (m)
Friction (MPa)
Résistance en pointe qE, qT, Tip Unw (Kpa)
Rapport COR (%)
Pression des Pores (kPa)
Résistivité (ohm.m)
Teneur en Eau (%)
Inclination X Y (deg)
0.0
5.0
10.0
15.0


INRS
Université d'avant-garde
Modèle: 3405.102XX
Date: Thu 07/Oct/2010 à: 8:59:14
Projet: TROISCPT
Client: INRS
Opérateurs: JMB XAVIER
Id Forage: CPT-13
Id Fichier: G07O1001C.DAT
X: 376953
Y:5140573
Prof. Forage (m) 8.9
Adresse: Rue Fronfenac, Trois-Rivières
Description du lieu de forage:
SOLEIL, CPT DANS LE PARC, 1 VISSE
Argile sensible-Silt
Argile silt
Argile silteuse
Silt sableux
Sable silteux
Sable fin
Sable moyen
Sable grossier
Matériaux selon Eslami&Felenius
qE/FsCOR
(pour la sonde 3405.102)
qE
Prof. (m)
Friction
Résistance en pointe
Rapport COR
Pression des Pores
Résistivité
Teneur en Eau
Inclination X Y
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
Margelle
1
PVC
18.9
Crépine
21.9
22.9
Pointe

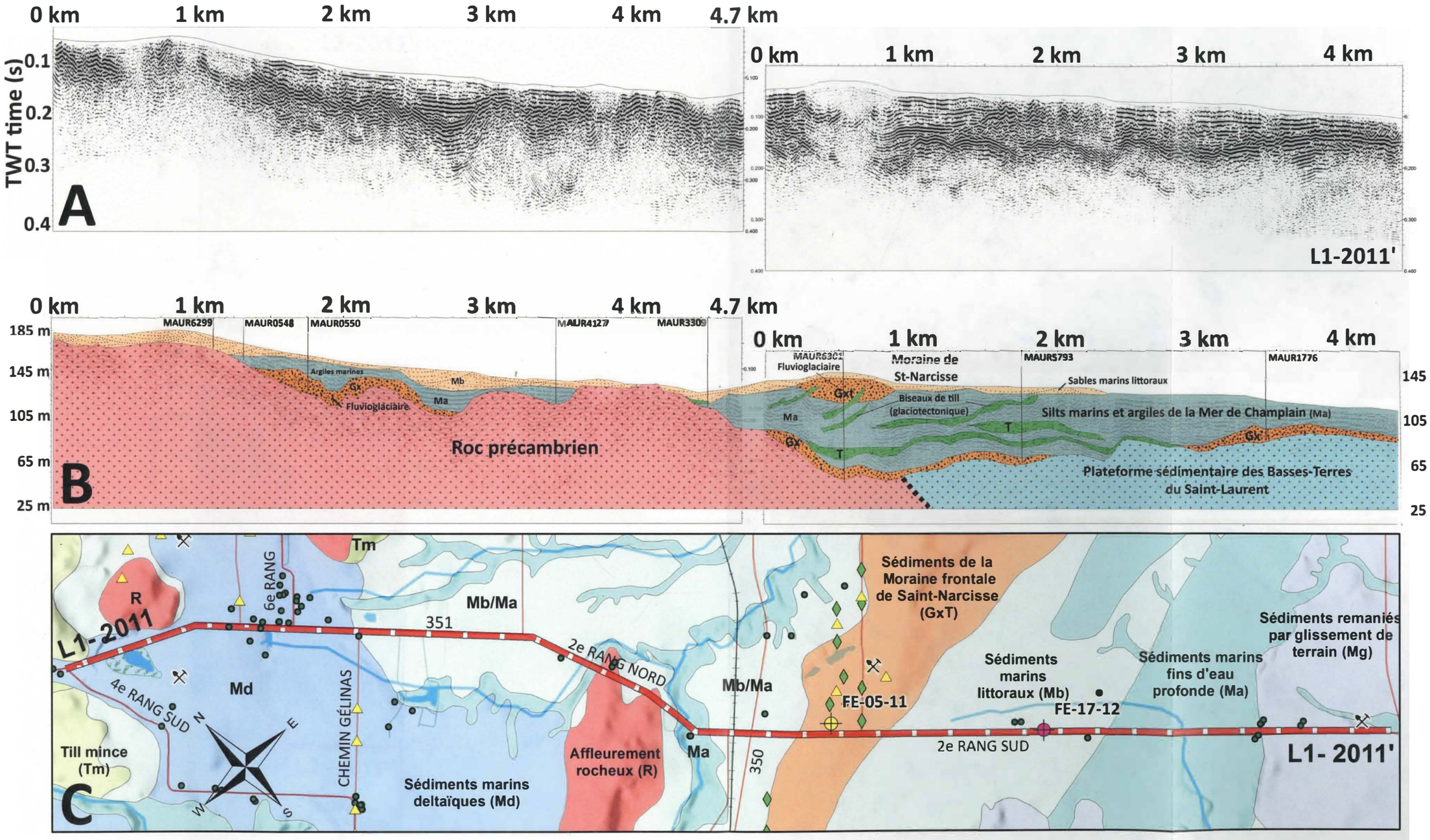
ANNEXE E

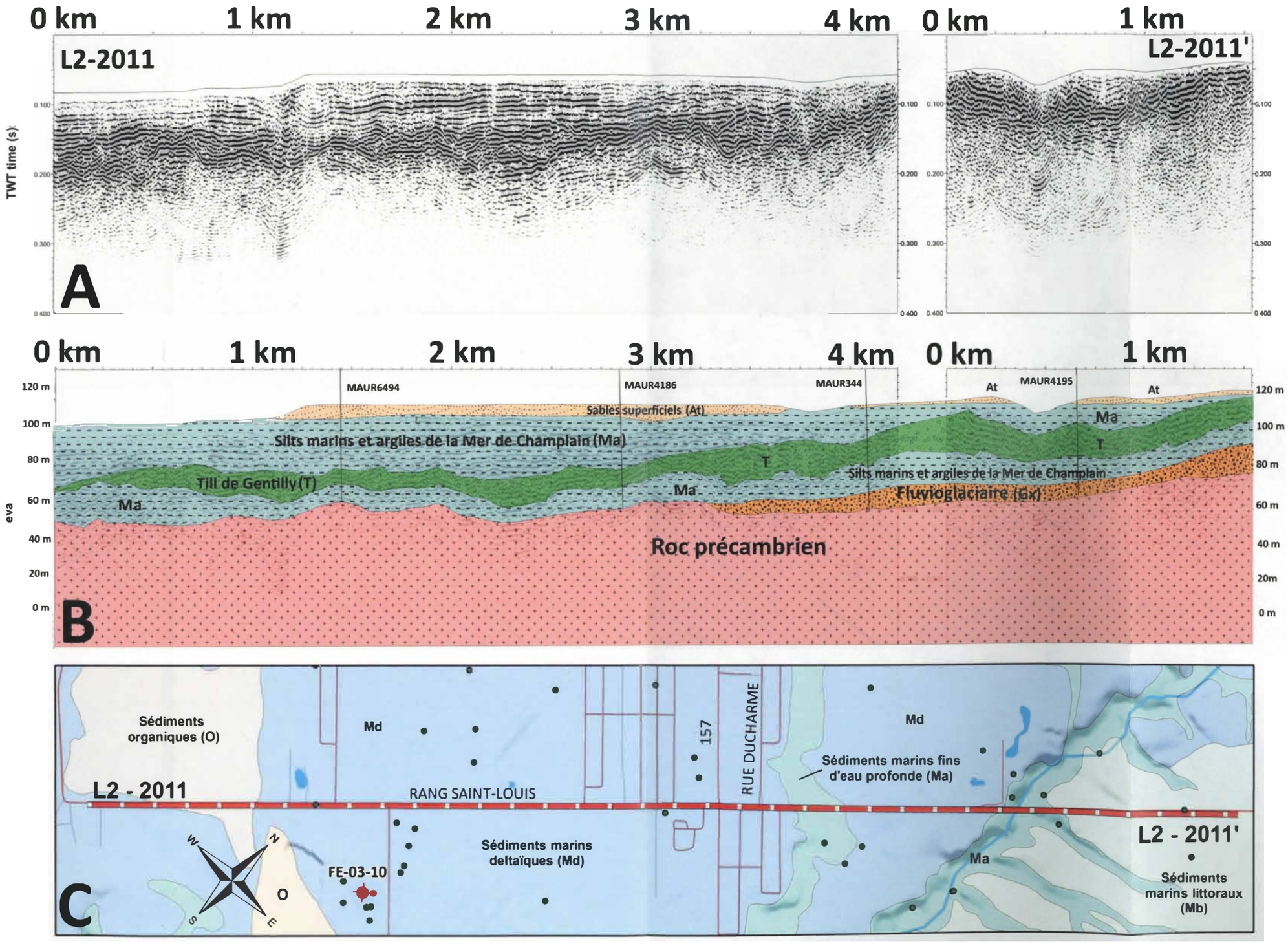
GRILLE D'ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ DES FORAGES (PACES, 2009)

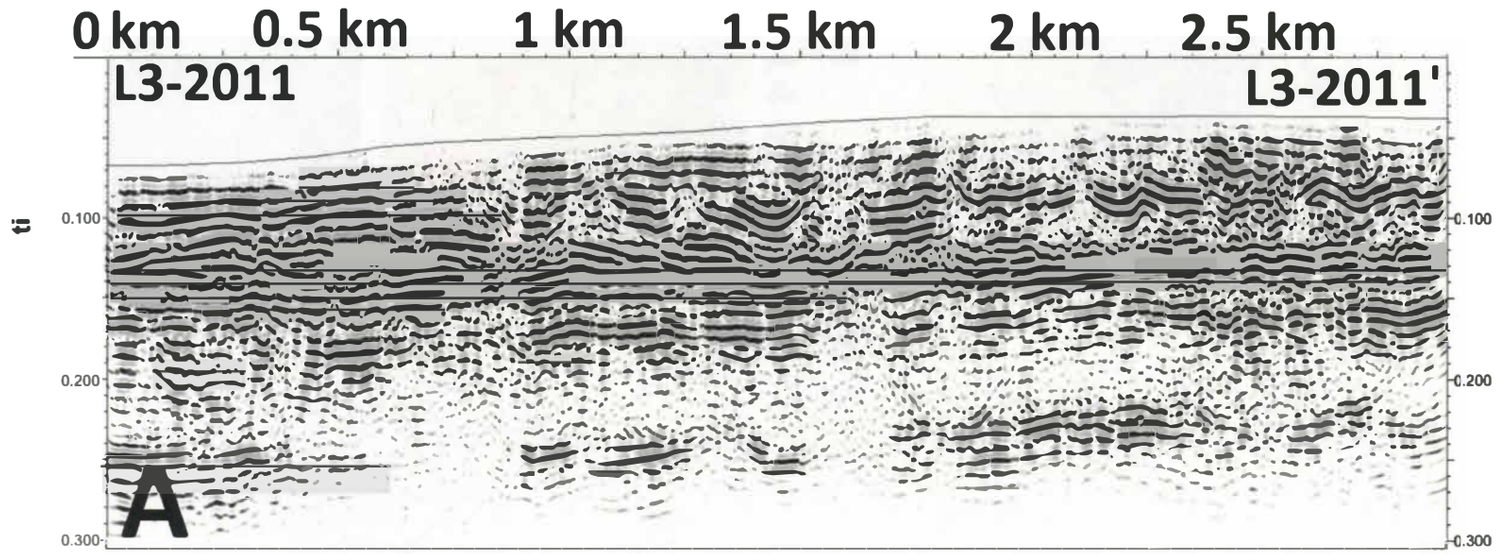
	Cote de fiabilité	Description	Valeurs possibles
LOCALISATION	FL1	Source des coordonnées	1 - Nouvelles coordonnées prises sur le terrain dans le cadre du projet PACES 2 - Les coordonnées proviennent du document source 3 - Erreur évidente dans les coordonnées sources (ex: Y= 5 332 444 au lieu de 5 232 444). L'erreur a été corrigée.
	FL2	Degré d'incertitude sur les coordonnées XY	1 - Précision entre 0m et 1m (ex : GPS haute précision, arpentage) 2 - Précision entre 1m et 10m (ex : GPS simple) 3 - Précision entre 10m et 100 m (ex : extraites par géoréférencement d'une carte, extraites d'une carte topographique, localisation visuelle) 4 - Inconnu
	FL3-A	Degré d'incertitude sur le géoréférencement de la carte	1 - Les coordonnées XY fournies 2 - Géoréférencement excellent 3 - Géoréférencement bon 4 - Géoréférencement acceptable 5 - Aucun géoréférencement, localisation visuelle
	FL3-B	Degré d'incertitude sur la localisation visuelle	1 - Les coordonnées XY fournies ou carte géoréférencée 2 - Repères visuels fiables situés à proximité du forage 3 - Repères visuels éloignés 4 - Repères visuels peu fiables ou inexistants
SOURCE	FS1	Provenance de l'information (Descriptive, stratigraphique et technique)	1 - Données extraites de rapports techniques obtenus dans le cadre du projet 2 - Forages réalisés dans le cadre du PACES 3 - Données extraites d'une compilation de données de même source 4 - Données extraites d'une compilation de sources multiples 5 - SIH 6 - Source de données douteuses
	FS2	Accessibilité des données sources (rapport originaux)	1 - Les valeurs ont été vérifiées à l'aide des données sources 2 - Les valeurs ne peuvent être vérifiées à l'aide des données sources (source non-disponible)

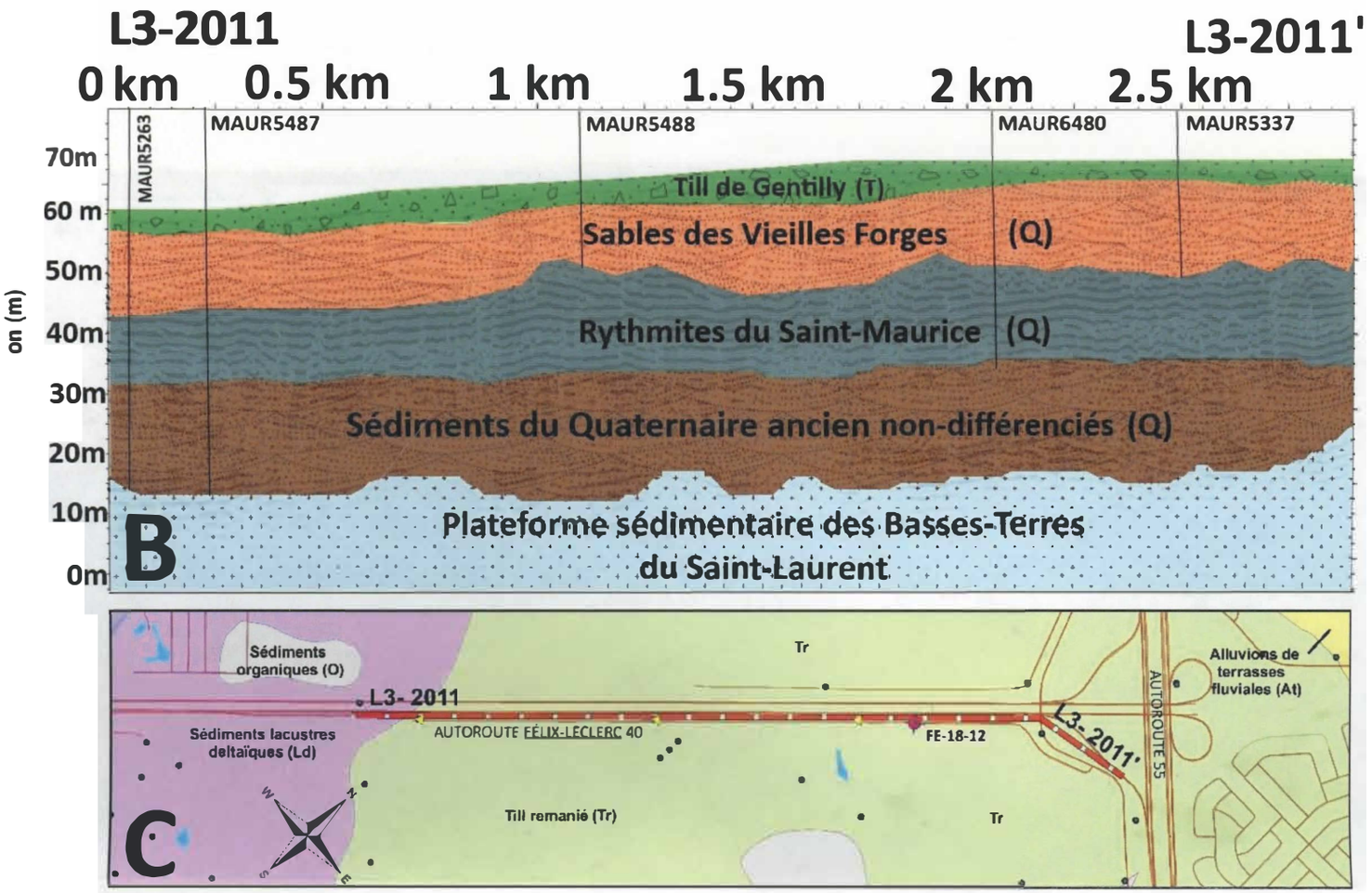
ANNEXE F

COUPES GÉOLOGIQUES INTERPRÉTÉES DE SISMIQUE RÉFLEXION HAUTE RÉSOLUTION : VERSIONS COMPLÈTES

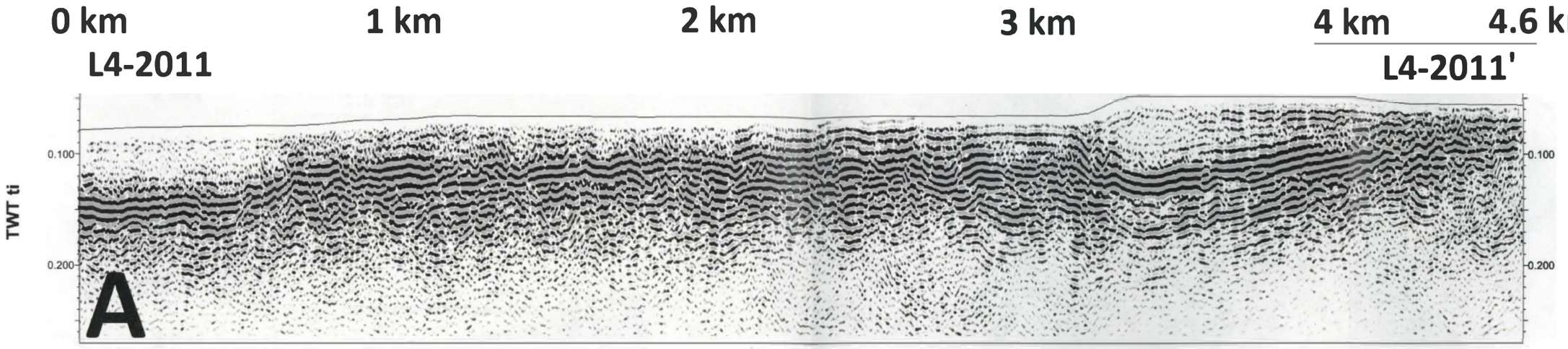

0 km
1 km
2 km
3 km
4 km
4.7 km
TWT time (s)
0.1
0.2
0.3
0.4
A
L1-2011'
MAUR6299
MAUR0548
MAUR0550
MAUR4127
MAUR3309
MAUR6301
MAUR5793
MAUR1776
185 m
145 m
105 m
65 m
25 m
Argiles marines
Gx
Fluvioglaciaire
Mb
Ma
Roc précambrien
Moraine de
St-Narcisse
Fluvioglaciaire
Gxt
Biseaux de till
(glaciotectonique)
Sables marins littoraux
Silts marins et argiles de la Mer de Champlain (Ma)
T
Plateforme sédimentaire des Basses-Terres
du Saint-Laurent
B
Tm
R
6e RANG
Mb/Ma
351
L1-2011
2e RANG NORD
4e RANG SUD
Md
CHEMIN GÉLINAS
Till mince
(Tm)
Affleurement
rocheux (R)
Sédiments marins
deltaïques (Md)
Ma
350
Sédiments de la
Moraine frontale
de Saint-Narcisse
(GxT)
FE-05-11
Sédiments
marins
littoraux (Mb)
FE-17-12
Sédiments marins
fins d'eau
profonde (Ma)
Sédiments remaniés
par glissement de
terrain (Mg)
2e RANG SUD
L1- 2011'
N
E
W
S
C

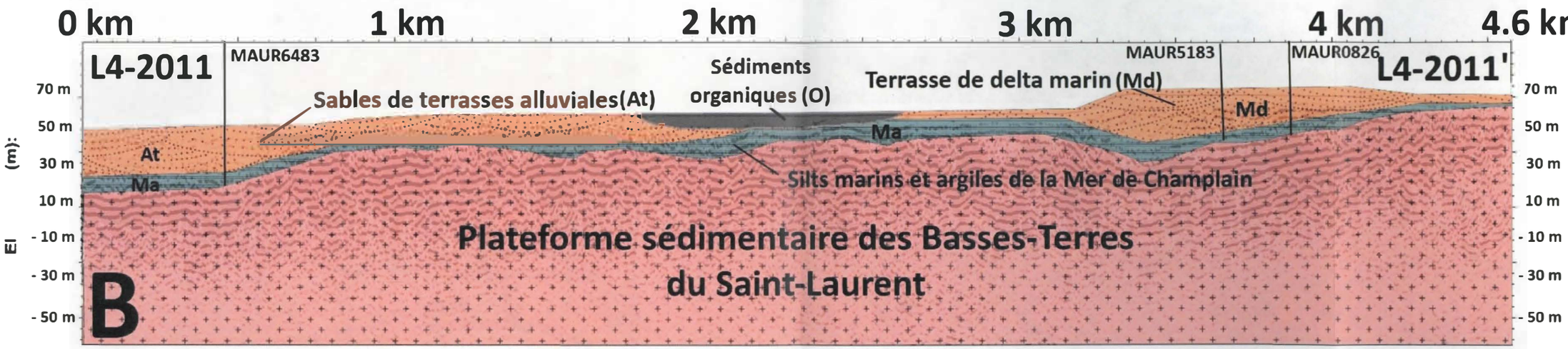

0 km
1 km
2 km
3 km
4 km
L2-2011
TWT time (s)
0.100
0.200
0.300
0.400
A
0 km
1 km
L2-2011'
MAUR6494
MAUR4186
MAUR344
MAUR4195
At
Sables superficiels (At)
Silts marins et argiles de la Mer de Champlain (Ma)
Till de Gentilly (T)
Ma
T
Fluvioglaciaire (Gx)
Roc précambrien
eva
120 m
100 m
80 m
60 m
40 m
20m
0 m
B
Sédiments organiques (O)
Md
157
RUE DUCHARME
Sédiments marins fins d'eau profonde (Ma)
L2 - 2011
RANG SAINT-LOUIS
L2 - 2011'
Sédiments marins deltaïques (Md)
FE-03-10
O
Sédiments marins littoraux (Mb)
C

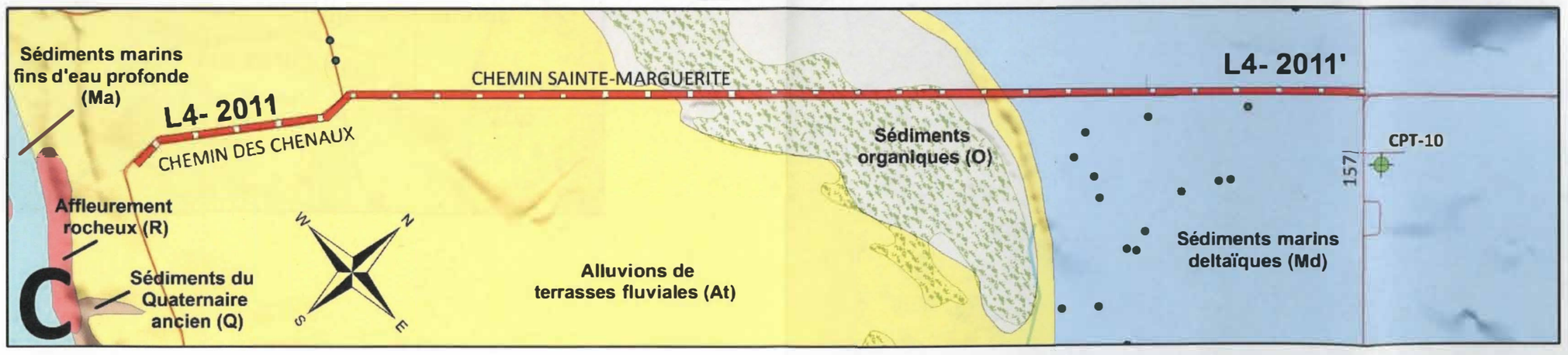

0 km
0.5 km
1 km
1.5 km
2 km
2.5 km
L3-2011
L3-2011'
ti
0.100
0.200
0.300
A

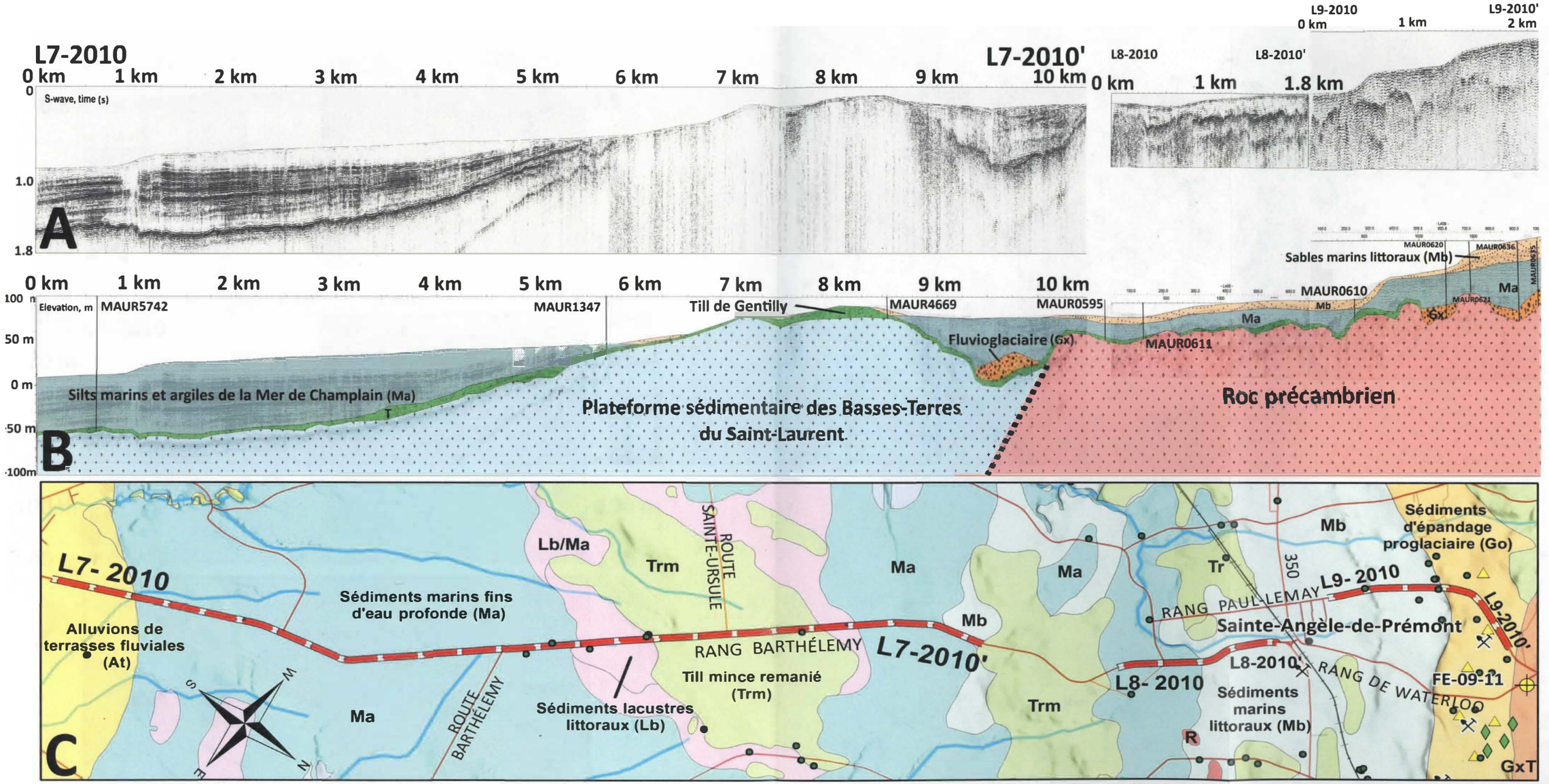

L3-2011
L3-2011'
0 km
0.5 km
1 km
1.5 km
2 km
2.5 km
on (m)
70m
60 m
50m
40m
30m
20m
10m
0m
MAUR5263
MAUR5487
MAUR5488
MAUR6480
MAUR5337
Till de Gentilly (T)
Sables des Vieilles Forges (Q)
Rythmites du Saint-Maurice (Q)
Sédiments du Quaternaire ancien non-différenciés (Q)
Plateforme sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent
B

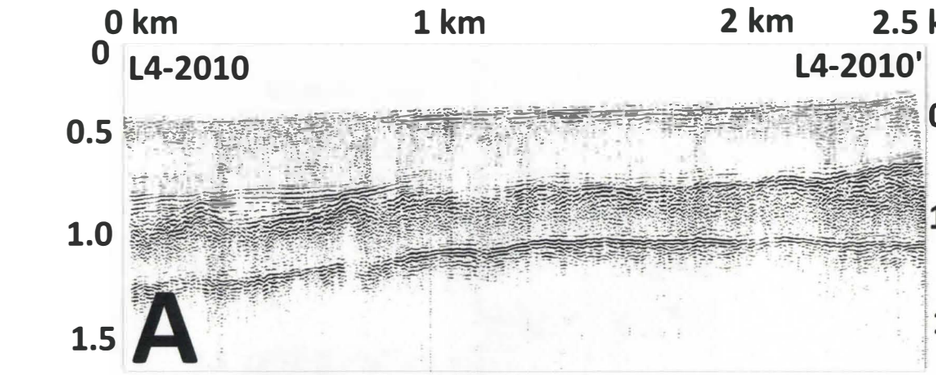
Sédiments organiques (O)
L3- 2011
Sédiments lacustres deltaïques (Ld)
AUTOROUTE FÉLIX-LECLERC 40
Till remanié (Tr)
Tr
FE-18-12
L3- 2011'
AUTOROUTE 55
Alluvions de terrasses fluviales (At)
C

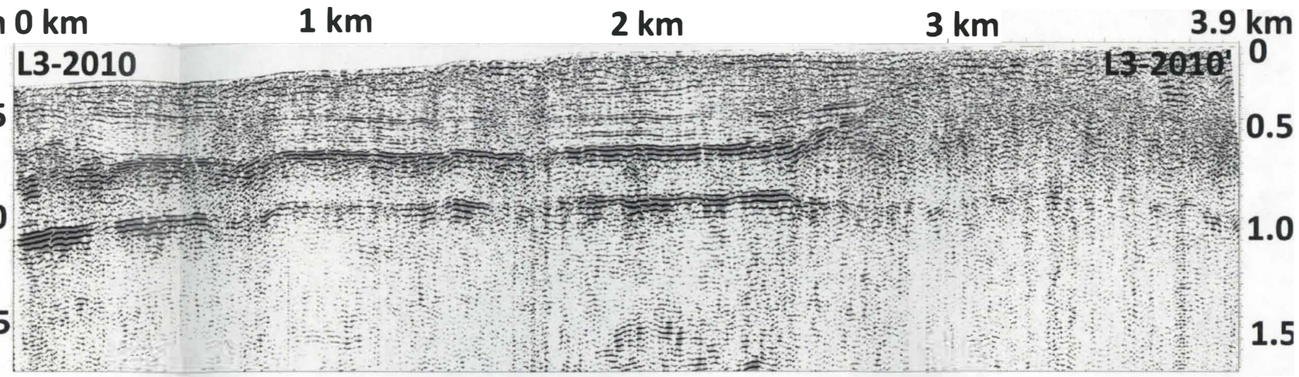

0 km
1 km
2 km
3 km
4 km
4.6 km
L4-2011
L4-2011'
TWT ti
0.100
0.200
A

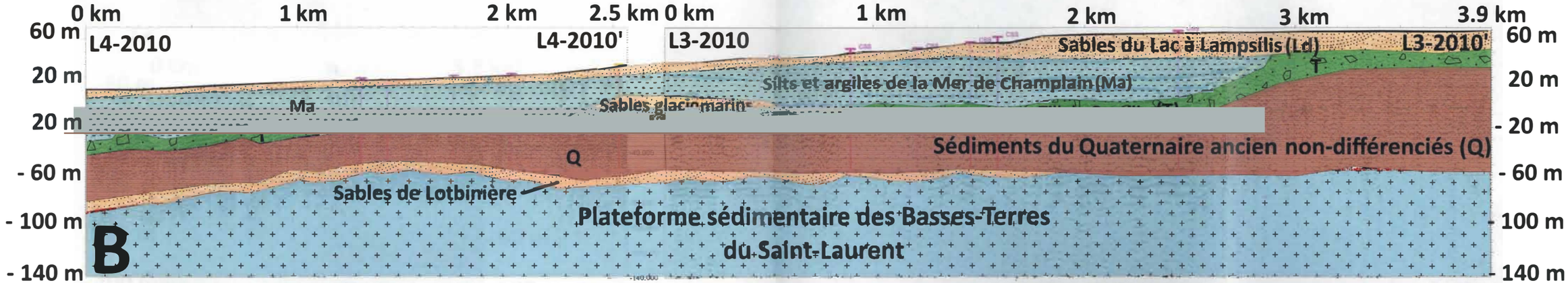

0 km
1 km
2 km
3 km
4 km
4.6 km
L4-2011
L4-2011'
MAUR6483
MAUR5183
MAUR0826
Sédiments organiques (O)
Terrasse de delta marin (Md)
Sables de terrasses alluviales(At)
Md
Ma
At
Silts marins et argiles de la Mer de Champlain
Plateforme sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent
(m): El
70 m
50 m
30 m
10 m
- 10 m
- 30 m
- 50 m
B

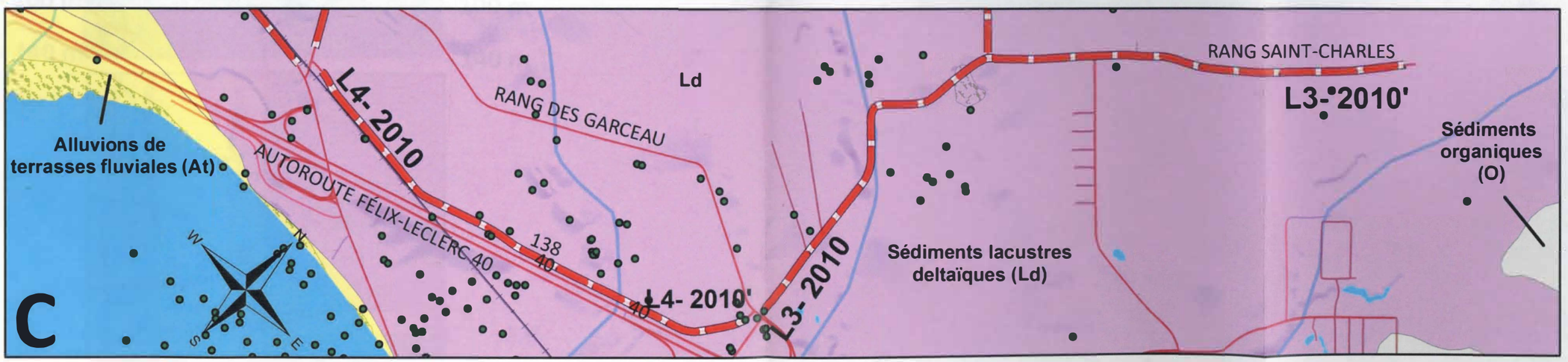

Sédiments marins fins d'eau profonde (Ma)
L4- 2011
CHEMIN DES CHENAUX
CHEMIN SAINTE-MARGUERITE
L4- 2011'
Sédiments organiques (O)
CPT-10
157
Affleurement rocheux (R)
Sédiments du Quaternaire ancien (Q)
Alluvions de terrasses fluviales (At)
Sédiments marins deltaïques (Md)
C


L7-2010
L7-2010'
L8-2010
L8-2010'
L9-2010
L9-2010'
0 km
1 km
2 km
3 km
4 km
5 km
6 km
7 km
8 km
9 km
10 km
1.8 km
S-wave, time (s)
0
1.0
1.8
A
Elevation, m
100 m
50 m
0 m
-50 m
-100m
MAUR5742
MAUR1347
MAUR4669
MAUR0595
MAUR0610
MAUR0611
MAUR0620
MAUR0636
MAUR0621
Till de Gentilly
Fluvioglaciaire (Gx)
Sables marins littoraux (Mb)
Silts marins et argiles de la Mer de Champlain (Ma)
Plateforme sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent
Roc précambrien
Ma
Mb
Gx
T
B
Lb/Ma
Trm
Tr
Alluvions de terrasses fluviales (At)
Sédiments marins fins d'eau profonde (Ma)
Sédiments lacustres littoraux (Lb)
Till mince remanié (Trm)
Sédiments d'épandage proglaciaire (Go)
Sédiments marins littoraux (Mb)
ROUTE SAINTE-URSULE
ROUTE BARTHÉLEMY
RANG BARTHÉLEMY
RANG PAUL-LEMAY
RANG DE WATERLOO
Sainte-Angèle-de-Prémont
350
FE-09-11
GxT
R
C
N
E
S
W


0 km
1 km
2 km
2.5 km
0
0.5
1.0
1.5
L4-2010
L4-2010'
A


0 km
1 km
2 km
3 km
3.9 km
0
0.5
1.0
1.5
L3-2010
L3-2010'


0 km
1 km
2 km
2.5 km
3 km
3.9 km
60 m
20 m
- 20 m
- 60 m
- 100 m
- 140 m
L4-2010
L4-2010'
L3-2010
L3-2010'
Sables du Lac à Lampsilis (Ld)
Silts et argiles de la Mer de Champlain (Ma)
Ma
Sables glaciomarin
Sédiments du Quaternaire ancien non-différenciés (Q)
Q
Sables de Lotbinière
Plateforme sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent
B


L4- 2010
RANG DES GARCEAU
Ld
RANG SAINT-CHARLES
L3- 2010'
Alluvions de terrasses fluviales (At)
AUTOROUTE FÉLIX-LECLERC 40
138
40
L4- 2010'
L3- 2010
Sédiments lacustres deltaïques (Ld)
Sédiments organiques (O)
W
N
S
E
C

L5-2010

L5-2010'

0 km 1 km 2 km 3 km 4 km 5 km 5.8 km

S-wave, time

0.5

1.0

1.5

1.8

A

0 km 1 km 2 km 3 km 4 km 5 km 5.8 km

60 m

20 m

- 60 m

- 100 m

- 140 m

S-wave, depth

MAUR5717

MAUR5717

Sables du Lac à Lampsilis (Ld)

Silts et argiles de la Mer de Champlain (Ma)

Till de Gentilly

Diamicton de Yamachiche?

Sédiments du Quaternaire ancien

Q

Plateforme sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent

B

N

W

E

S

Alluvions de terrasses fluviales (At)

RANG DE L'ACADIE

Sédiments lacustres deltaïques (Ld)

RUE NOTRE-DAME 138

L5- 2010'

L5- 2010

ROUTE SAINTE-ANNE EST 138

Alluvions de terrasses fluviales sur sédiments fins d'eau profonde (At/Ma)

Ld

C