

**ÉVOLUTION PALÉOENVIRONNEMENTALE DE LA DYNAMIQUE QUATERNAIRE  
DANS LA RÉGION DE QUÉBEC :  
APPLICATION EN MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE ET HYDROGÉOLOGIQUE**

Par  
Lise Lamarche

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

Jury d'évaluation

Président du Jury et examineur interne	Richard Martel, INRS-Ete
Examineurs externes	Michel Lamothe, UQAM Martin Ross, University of Waterloo
Directeur de recherche	Michel Parent, Commission géologique du Canada
Codirecteurs de recherche	René Lefebvre, INRS-Ete Didier Perret, Commission géologique du Canada



## Résumé

L'architecture des sédiments quaternaires dans la région de Québec résulte de l'évolution complexe d'un système d'érosion-sédimentation glaciaire, marine, estuarienne et fluviale. Élément charnière dans l'évolution quaternaire du Québec méridional, la compréhension des événements marquants survenus dans la région de Québec revêt une importance cruciale en ce qui concerne tout le cycle d'invasion marine dans les Basses-Terres du Saint-Laurent suite à la dernière glaciation. En effet, l'épisode de la Mer de Champlain résulte de l'effet combiné de la hausse du niveau marin global suite à la déglaciation wisconsinienne et de l'enfoncement glacio-isostatique de toute la vallée du Saint-Laurent. Le seuil de Québec, quant à lui, contrôlait les échanges d'eau entre cette mer presque fermée et le milieu glaciomarin ouvert de la Mer de Goldthwait.

La réalisation d'un modèle géologique 3D a permis de reconstituer de façon cohérente les différentes combinaisons d'unités géologiques quaternaires dans la région d'étude. L'intégration de données archivées et de nouvelles données a permis d'élucider la complexité architecturale des sédiments dans la vallée enfouie de la basse ville et dans les terrains adjacents. Au cours de cette étude, une réinterprétation des différentes cartes géologiques des dépôts de surface a été réalisée, de même que l'élaboration d'un modèle géologique conceptuel. La réalisation de forages, de levés géophysiques, de coupes géologiques, ainsi que celle d'analyses paléoécologiques, sédimentologiques et géochronologiques ont permis d'élaborer un cadre stratigraphique et par le fait même l'évolution paléoenvironnementale dans le secteur de Québec, et de poser de meilleurs diagnostics sur les conditions d'érosion-sédimentation dans les différents milieux observés.

La base de la séquence stratigraphique observée est constituée d'un till inférieur que l'on peut attribuer à une avancée glaciaire régionale, mais dont l'âge n'a pu être établi. Par contre, le sable marin inférieur surmontant ce till a été déposé dans un environnement glaciomarin proximal associé vraisemblablement au Wisconsinien moyen. Toutefois, l'âge de cette unité n'est pas connu et pourrait être plus vieux qu'attendu, puisque la datation IRSL (Infra-Red Simulation Luminescence) de ces sables n'est que préliminaire. Le till supérieur surmontant ces sables marins représente la phase principale de la glaciation laurentienne dans le secteur de Québec, de même que l'épisode de courant glaciaire qui l'a suivie dans la région. Sur ce till reposent des silts argileux marins concentrés principalement dans les diverses dépressions topographiques, ainsi que de grands complexes deltaïques à l'embouchure des principales rivières. Dans la basse ville, un delta tardif, mis en place par le Proto-Saint-Laurent dans la Mer de Goldthwait, a fait l'objet d'une analyse hydrogéologique préliminaire. En effet, l'épaisseur et l'étendue de ce delta en font un important aquifère, susceptible d'être exploité tant sur le plan hydrique que géothermique. Les silts estuariens recouvrant ces sables deltaïques avaient jusqu'à présent été confondus avec les silts marins francs, ce qui explique l'absence du delta dans les interprétations et modèles géologiques antérieurs. Deux oscillations du niveau marin relatif ont été identifiées dans la basse ville de Québec. La plus ancienne, associée à la Transgression laurentienne vers 6 000 ans, a atteint environ le niveau de 15 m et a donné lieu à la mise en place des silts estuariens mentionnés ci-haut. La plus récente, associée à la phase de Mitis (de 2500 à 1000 ans), a été d'amplitude plus modeste, atteignant la cote de 8 m dans la basse ville.

Les divers scénarios stratigraphiques et paléogéographiques postulés sont directement liés à l'architecture et aux séquences de faciès sédimentaires observés dans le paléodelta de sorte que cela affecte même notre compréhension de la distribution des propriétés hydrauliques du système. Ainsi, la modélisation géologique 3D a comme but premier de définir les limites spatiales des différentes unités hydrostratigraphiques dans le contexte d'une étude hydrogéologique préliminaire, notamment celle du delta de la basse ville de Québec. Ce travail permet d'identifier et de caractériser une série représentative d'hydrofaciès. L'aquifère de la basse ville peut être divisé en deux sous-unités : soit celle à la base caractérisée par des faciès plus perméables et une autre au sommet caractérisée par des faciès de perméabilité très variable. Il a été établi selon les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de même que les propriétés hydrauliques des unités identifiées dans le modèle géologique 3D que la recharge provient majoritairement des unités latérales plus perméables et que l'écoulement de l'eau dans l'aquifère est plutôt rapide.

La modélisation géologique tridimensionnelle permet de contraindre l'interpolation des propriétés hydrauliques à l'intérieur des différents hydrofaciès. La réalisation du modèle géologique 3D requiert une méthodologie standardisée d'intégration des données de différentes sources, le premier filtre étant la classification des données en fonction de leur degré de fiabilité. En effet, seules des données de haute qualité doivent être utilisées dans la modélisation géologique 3D afin de produire un modèle cohérent. Toutefois, lorsque localement les données sont éparées et de faible qualité, la réalisation d'un modèle géologique conceptuel s'avère important afin de respecter les connaissances des divers milieux de sédimentation et des hiatus et discordances affectant la série sédimentaire visée. Ainsi, 14 unités hydrostratigraphiques ont pu être identifiées dans le secteur de Québec et leurs propriétés ont été distribuées dans un maillage tridimensionnel. Dans la perspective d'une étude hydrostratigraphique, la réalisation d'un modèle géologique tridimensionnel, de même que l'analyse paléoenvironnementale sont des outils conceptuels essentiels pour la réalisation d'un modèle hydrostratigraphique robuste et cohérent.

---

Lise Lamarche,  
Étudiante

---

Michel Parent,  
Directeur de recherche

## Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier sincèrement mon directeur de recherche, Michel Parent, pour le support qu'il m'a accordé tout au long de ma thèse. Nos discussions sur la stratigraphie et la géochronologie m'ont permis de mieux définir le cadre de ma thèse. Je tiens également à remercier mes co-directeurs : Didier Perret pour les nombreuses données qu'il a su dénicher et son appui pour la réalisation du forage et René Lefebvre pour la réalisation des sondages par piézocône, les nombreuses données dans le secteur de Valcartier et son intérêt dans l'application des méthodes de modélisation géologique 3D en hydrogéologie.

Je tiens à souligner l'importance de la contribution de mes correcteurs. Leurs commentaires ont permis d'améliorer le contenu de ce texte.

Cette thèse n'aurait pas pu être réalisée sans le soutien financier du CRSNG, du FQRNT, de la Commission géologique du Canada, ainsi que de l'INRS.

Je remercie tous les membres du LCNP pour leur soutien technique, plus particulièrement, Ruth Boivin qui réalise des chefs d'œuvre en cartographie, Éric Boivert, programmeur hors-pair; Étienne Girard pour les nombreuses réponses à mes questions et surtout pour nos discussions de voisins de bureau; Christine Deblonde pour la mise en place de ma base de données. Un grand merci à Alain Larouche, Jean-Pierre Guilbault et Marc Greendale pour les différentes analyses qu'ils ont réalisées. Je tiens à souligner la contribution de l'équipe de Jim Hunter (Commission géologique du Canada, division du Nord) pour la réalisation du profil sismique, plus particulièrement André Pugin pour son interprétation. Je tiens à remercier mes nombreux aides de terrain québécois et d'outre-mer. Merci Jean-Marc Ballard pour la réalisation des sondages par piézocône et Clarisse Deschenes-Rancourt pour le développement de mes puits malgré le froid automnal. Merci à Sébastien Huot et Magali Barré pour l'analyse des données de luminescence.

Merci à tous mes amis pour m'avoir supporté durant les hauts et les bas de ma thèse. Plus particulièrement, Catherine Guay pour ses recettes de brousse et les randonnées qui s'en sont suivies, Guillaume et ses p'tit Comeau, Jean-Philippe Drolet pour sa question du jour, Olivier Caron, Hugo Dubé-Loubert et Guillaume Allard pour leur discussion sur le Quaternaire, Karine Bédard et Martin Blouin pour les discussions sur gOcad, Annie, Magalie, Sandra, Marie-Josée, Emma, Eve, Isabelle qui ont toujours su me comprendre, tout en me changeant les idées dans les moments où j'en avais le plus besoin. Un grand merci à Christine, Olivier et Renée pour avoir accepté de relire ma thèse, plusieurs fautes ont pu ainsi être évitées.

Je dédie cette thèse à ma famille qui m'a toujours soutenu tout au long de mes nombreuses années d'étude. Bonne lecture Papa! Un petit clin d'œil à mes deux nièces (Rose et Léa) qui ont mis un rayon de soleil dans ma rédaction.



## Table des matières

Résumé	iii
Remerciements	v
Table des matières	vii
Liste des figures	xii
Liste des tableaux	xvii
Liste des annexes	xviii
<b>Chapitre 1</b> Introduction	<b>1</b>
1.1 Présentation de la recherche	1
1.1.1 Cadre général de la thèse	1
1.2 Problématique	2
1.2.1 Géologie du Quaternaire	2
1.2.2 Modélisation tridimensionnelle	2
1.2.3 Hydrogéologie	3
1.3 Objectifs	3
1.4 Secteur d'étude proposé	4
1.5 Travaux antérieurs	5
1.5.1 Substratum rocheux	5
1.5.2 Quaternaire	5
1.5.2.1 Pléistocène (1.8 Ma à 10 ka)	5
1.5.2.1.1 Pré-Illinoien et Illinoien (1.8 Ma à 130 ka)	5
1.5.2.1.2 Sangamonien (130 ka à 80 ka)	7
1.5.2.1.3 Wisconsinien inférieur et moyen (80 ka à 23 ka)	7

1.5.2.1.4 Wisconsinien supérieur (23 ka à 10 ka)	8
1.5.2.2 Holocène (10 ka à aujourd'hui)	9
1.5.3 Stratigraphie régionale	12
1.5.3.1 Vallée moyenne du Saint-Laurent	12
1.5.3.2 Région de Québec	15
1.5.3.3 Estuaire moyen du Saint-Laurent	15
1.5.4 Modélisation tridimensionnelle	16
1.5.5 Hydrogéologie	18
1.6 Méthodologie	20
1.6.1 Travaux de terrain	20
1.6.1.1 Caractérisation des dépôts de surface	20
1.6.1.2 Coupes géologiques	21
1.6.1.3 Levés géophysiques et hydrogéologiques	21
1.6.2 Travaux de laboratoire	22
1.6.3 Modélisation tridimensionnelle (gOcad® version 2.8)	22
1.6.3.1 Compilation et traitement des données	22
1.6.3.2 Importation et validation des données	23
1.6.3.3 Contraintes	23
1.6.3.4 Interpolation des surfaces	24
1.6.3.5 Construction du modèle	24
1.6.3.6 Validation du modèle	24
1.6.3.7 Exportation des données	24
<b>Chapitre 2 Géologie et stratigraphie du Quaternaire de la région de Québec</b>	<b>27</b>
2.1 Carte géologique des formations superficielles	27
2.2 Stratigraphie	29
2.2.1 Site de la sablière de Saint-Augustin (DL20.5)	32



2.2.2 Site de la rivière Beauport (DL18.1)	33
2.2.3 Site des gravières de Valcartier (DL16.3)	33
2.2.4 Site des sablières de la rivière Montmorency (DL7.5)	34
2.2.5 Site du nouveau développement résidentiel de Cap-Rouge (DL20.2)	35
2.2.6 Sites des bassins de rétention d'eau de la ville de Québec	35
2.2.7 Piézocônes (CPT : Cone Penetrometer Testing unit)	41
2.2.8 Site du Parc Chauveau (DL12.3)	53
2.2.9 Forages FL06-01 et FL07-01	54
2.2.10 Levé de sismique réflexion	54
2.3 Géologie tridimensionnelle du secteur d'étude	57
2.3.1 Substratum rocheux	57
2.3.2 Géologie des formations quaternaires	57
2.3.2.1 Séquence pré-wisconsinienne	57
2.3.2.1.1 Sédiments glaciaires inférieurs	57
2.3.2.1.2 Sédiments interstadiaires	58
2.3.2.2 Séquences glaciaires et fluvioglaciaires	58
2.3.2.2.1 Sédiments glaciaires supérieurs	58
2.3.2.2.2 Sédiments fluvioglaciaires non-différenciés	58
2.3.2.3 Séquences glaciolacustres et glaciomarines	58
2.3.2.3.1 Sédiments deltaïques glaciolacustres	58
2.3.2.3.2 Sédiments glaciomarins	59
2.3.2.4 Séquence fluviale précoce	60
2.3.2.4.1 Sédiments du Proto-Saint-Laurent	60
2.3.2.5 Séquence fluviale récente	61
2.3.2.5.1 Alluvions de terrasses fluviales	61
2.3.2.5.2 Sédiments organiques	61

2.3.2.5.3 Alluvions actuelles	61
2.3.2.5.4 Remblai, sédiments anthropiques	61
<b>Chapitre 3 Paléoenvironnement et géochronologie</b>	71
3.1 Analyses microfauniques	71
3.1.1 Sédiments de la dernière phase glaciomarine	72
3.1.2 Sédiments interstadiaires	73
3.2 Analyses macrofauniques	77
3.3 Datation	79
3.3.1 Luminescence	79
3.3.2 Radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ )	81
3.3.2.1 Datations réalisées dans le cadre de cette thèse	81
3.3.2.2 Datations antérieures	82
<b>Chapitre 4 Modélisation géologique 3D dans un environnement urbain : le cas de l'aquifère de la ville de Québec</b>	89
4.1 Contribution de l'auteure	89
4.2 Abstract	89
4.3 Résumé	90
4.4 Introduction	90
4.5 Région d'étude	91
4.6 Méthodologie	92
4.6.1 Méthode d'acquisition des données	92
4.6.1.1 Standardisation et interprétation des données	96
4.6.1.2 Modèle géologique conceptuel	97
4.6.2 Modélisation	99
4.6.2.1 Contraintes	99
4.6.2.2 Interpolation	101

4.6.2.3 Construction du modèle géologique 3D	101
4.6.2.4 Attribution des propriétés aux régions du modèle géologique 3D	101
4.6.2.5 Validation du modèle géologique 3D	101
4.6.2.6 Exportation du modèle géologique 3D	102
4.6.3 Incertitudes	102
4.7 Résultats	102
4.7.1 Modèle géologique 3D	102
4.7.2 Hydrofaciès	111
4.8 Discussion	112
4.9 Conclusion	115
4.10 Références	116
<b>Chapitre 5</b> Synthèse stratigraphique et interprétation de la mise en place des formations quaternaires	121
5.1 Déglaciation et incursion marine dans la région de Québec	121
5.1.1 Dynamique glaciaire et déglaciation	122
5.1.2 Incursion marine et évolution du niveau marin relatif	123
5.1.3 Limite entre la Mer de Champlain et la Mer de Goldthwait	126
5.2 Stratigraphie	127
5.2.1 Région de Québec	127
5.2.2 Paléogéographie wisconsinienne du Québec méridional	131
5.3 Modélisation tridimensionnelle	131
<b>Conclusion</b>	133
<b>Références</b>	137

## Liste des figures

Figure 1.1 Localisation de la zone d'étude	4
Figure 1.2. Socle rocheux des environs de la ville de Québec; zone d'étude dans l'encadré rouge (Modifié du Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec)	6
Figure 1.3 Coupe géologique à travers le Québec méridional (tiré de Pagé, 1999; modifié de Shilts, 1982 et de Lamothe, 1987)	7
Figure 1.4 Niveaux des terrasses délimitant les différentes phases du Lac à <i>Lampsilis</i> dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (modifié de MacPherson, 1966)	10
Figure 1.5 Évolution des niveaux d'eau relatifs du Lac à <i>Lampsilis</i> et du Proto-Saint-Laurent dans le secteur nord du lac Saint-Pierre d'après les âges IRSL (Infra Red Luminescence stimulation) et les âges $^{14}\text{C}$ (Lamarche, 2005).	11
Figure 1.6 Procédure de construction d'un modèle étape par étape (Ross et al., 2005)	17
Figure 1.7 Modèle géologique 3D du secteur de Valcartier (Lefebvre et al., 2004)	18
Figure 1.8 Caractéristiques des données CPT pour chaque hydrofaciès (H1, H2, H3, H4) reporté sur le diagramme d'Eslami et Fellenius (2004) (Fauveau, 2006).	19
Figure 2.1 Principaux dépôts et formes quaternaires de la rive nord de la région de Québec	28
Figure 2.2 Localisation des différents sites d'intérêt	31
Figure 2.3 Unité sommitale graveleuse à blocs sur des sables moyens à grossiers lités de la sablière Saint-Augustin (DL20.5)	32
Figure 2.4 Schéma simplifié de la stratigraphie dans la vallée de la rivière Beauport. A) argile compacte déformée surmontée de till et donc associée aux formations quaternaires anciennes (Q), B) Rythmites silto-argileuses associées aux formations quaternaires anciennes (Q), C) Thanatocénose de <i>Hiatella artica</i> au sein de sédiments littoraux et pré-littoraux (Mb).	33
Figure 2.5 Complexe fluvioglacière au nord de Valcartier (DL16.3)	34
Figure 2.6 Déformations glaciotectoniques passives du delta de la Montmorency (DL7.5)	35
Figure 2.7 Coupe schématique du site du nouveau développement de l'arrondissement de Cap-Rouge (DL20.2)	36
Figure 2.8 Coupe schématisée du bassin de rétention du IGA (DL19.3)	37

Figure 2.9 Coupe schématisée du bassin de rétention de l'hôpital Sacré-Coeur (DL3.5)	37
Figure 2.10 Coupe schématisée du bassin de rétention du Parc Victoria, paroi nord (DL20.1A)	38
Figure 2.11 Coupe schématisée du bassin de rétention du Parc Victoria, paroi sud (DL20.1B)	39
Figure 2.12 Coupe schématisée du bassin de rétention du Parc Cartier-Brébeuf (DL19.1)	39
Figure 2.13 Coupe schématisée du bassin de rétention du Colisée (DL18.3)	40
Figure 2.14 Coupe schématisée du bassin de rétention de l'usine de traitement (DL19.2)	40
Figure 2.15 Sondage au piézocône (CPT) de la base de plein air de Ste-Foy (FL07-02)	42
Figure 2.16 Sondage au piézocône (CPT) au coin des rues John-Molson et Einstein (FL07-03)	43
Figure 2.17 Sondage au piézocône (CPT) au site de Aeterna (FL07-04)	44
Figure 2.18 Sondage au piézocône (CPT) sur le Boulevard Central (FL07-06)	45
Figure 2.19 Sondage au piézocône (CPT) au cimetière Saint-Charles (FL07-09)	46
Figure 2.20 Sondage au piézocône (CPT) sur la rue Cardinal-Roy (FL07-13)	47
Figure 2.21 Sondage au piézocône (CPT) à la Place Fleurs de Lys (FL07-15)	48
Figure 2.22 Sondage au piézocône (CPT) au site de la papeterie Daishowa (FL07-17)	49
Figure 2.23 Sondage au piézocône (CPT) sur la rue Cornwall (FL07-19)	50
Figure 2.24 Sondage au piézocône (CPT) sur le Boulevard De l'Ornière (FL07-24)	51
Figure 2.25 Sondage au piézocône (CPT) sur la rue Bergemont (FL07-25)	52
Figure 2.26 Coupe schématisée du Parc Chauveau (DL12.3)	53
Figure 2.27 Coupe schématisée des forages FL06-01 et FL07-01	55
Figure 2.28 Profil granulométrique des forages FL06-01 et FL07-01	56
Figure 2.29 Substratum rocheux modélisé	62
Figure 2.30 Sédiments glaciaires inférieurs modélisés	62
Figure 2.31 Formations quaternaires anciennes modélisées non-différenciées	63
Figure 2.32 Sédiments glaciaires supérieurs modélisés	63

Figure 2.33 Sédiments fluvioglaciaires modélisés non-différenciés	64
Figure 2.34 Sédiments glaciolacustres modélisés	64
Figure 2.35 Sédiments marins d'eau profonde modélisés	65
Figure 2.36 Sédiments marins intertidaux modélisés	65
Figure 2.37 Sédiments plénimarin deltaïques et prodeltaïques modélisés	66
Figure 2.38 Sédiments marins littoraux et pré littoraux modélisés	66
Figure 2.39 Sédiments deltaïques grossiers tardifs modélisés	67
Figure 2.40 Sédiments deltaïques tardifs modélisés	67
Figure 2.41 Alluvions de terrasses fluviales précoces modélisées	68
Figure 2.42 Sédiments estuariens précoces modélisés	68
Figure 2.43 Alluvions de terrasses fluviales modélisées	69
Figure 2.44 Sédiments organiques modélisés	69
Figure 2.45 Alluvions actuelles modélisées	70
Figure 2.46 Remblai, sédiments anthropiques modélisés	70
Figure 3.1 Analyses des foraminifères de l'unité glaciomarine d'eau profonde aux forages FL06-01 et FL07-01	74
Figure 3.2 Analyses des foraminifères de l'unité interstadaire au forage FL06-01	78
Figure 3.3 Exemple d'une courbe de croissance lumineuse en fonction de la dose reçue (aliquote FL06-01-208 #25)	80
Figure 3.4 Distribution des probabilités des âges obtenues pour chacun des aliquotes de l'échantillon FL06-01-208.	80
Figure 3.5 Diagramme radial de la probabilité des âges de l'échantillon FL06-01-208	80
Figure 3.6 Corrélation stratigraphique dans les coupes et forages de la basse ville de Québec réalisés dans le cadre de cette thèse	85
Figure 3.7 Localisation des datations dans le secteur environnant de Québec. La ligne bleu représente la limite marine maximale.	86
Figure 3.8 Datations au radiocarbonate publiées pour la région de Québec en fonction de l'élévation	87

Figure 3.9	Courbe du niveau marin relatif de la région de Québec, de la dernière déglaciation à aujourd'hui. Le trait plein correspond au niveau le plus probable, le trait pointillé indique l'enveloppe de confiance.	87
Figure 4.1	Localisation de la zone d'étude dans les environs de la ville de Québec (limite représentée par le trait noir).	92
Figure 4.2	Localisation des données intégrées au modèle géologique 3D	94
Figure 4.3	Modèle géologique conceptuel de la région de Québec	98
Figure 4.4	Schéma du processus de modélisation géologique 3D étape par étape (modifié de Ross et al., 2005)	100
Figure 4.5A	Modèle géologique 3D de la ville de Québec : a) socle rocheux et son élévation, b) Till supérieur et sédiments anciens et leur épaisseur.	105
Figure 4.5B	Modèle géologique 3D de la ville de Québec : c) sédiments fluvioglaciaires et leur épaisseur; d) sédiments marins d'eau profonde et leur élévation.	106
Figure 4.5C	Modèle géologique 3D de la ville de Québec : e) sédiments marins deltaïques de haut niveau et leur élévation, f) sédiments marins intertidaux et leur élévation.	107
Figure 4.5D	Modèle géologique 3D de la ville de Québec : g) sédiments marins littoraux et pré-littoraux et leur élévation, h) sédiments marins deltaïques grossiers de bas niveau et leur élévation.	108
Figure 4.5E	Modèle géologique 3D de la ville de Québec : i) sédiments marins deltaïques de bas niveau et leur élévation, j) sédiments estuariens du Proto-Saint-Laurent et leur élévation.	109
Figure 4.5F	Modèle géologique 3D de la ville de Québec : k) Alluvions de terrasses anciennes du Proto-Saint-Laurent et leur élévation, l) alluvions actuels, sédiments organiques et remblai et leur élévation.	110
Figure 4.6	Interprétation des hydrofaciès des sédiments deltaïques basée sur la charte des matériaux d'Eslami et Fellenus (2004) (modifié de Ouellon et al., 2008)	111
Figure 4.7	Exemple d'interprétation stratigraphique et des hydrofaciès du sondage par piézocône FL07-19 basé sur la charte des matériaux d'Eslami et Fellenus (2004). La largeur de la colonne stratigraphique est proportionnelle à la granulométrie de l'échantillon. Les lignes pointillées indiquent les limites des unités stratigraphiques.	113
Figure 4.8	Modèle conceptuel hydrogéologique de l'aquifère deltaïque de Québec; a) nappes divisées par la ligne de partage des eaux souterraines (ligne pointillée rouge), b) zones de recharge et directions des apports d'eau à l'aquifère à partir des terrasses fluviales anciennes.	114

Figure 5.1 Localisation de la marge glaciaire à 11,5 ka, du Lac Agassiz, du Lac Algonquin et de la Mer de Champlain avec les différents exutoires des lacs proglaciaires. (Cronin et al., 2008)	124
Figure 5.2 Localisation du seuil de Québec entre Neuville et Donnacona.	126
Figure 5.3 Modèle stratigraphique schématique de la rive nord de Québec (contact érosif en gras)	128



## Liste des tableaux

Tableau 1.1 Stratigraphie dans les Basses-Terres du Saint-Laurent	13
Tableau 1.2 Stratigraphie de la région de la vallée moyenne du Saint-Laurent	14
Tableau 1.3 Codification des propriétés du modèle géologique 3D de Québec	25
Tableau 2.1 Localisation des sites d'intérêts	30
Tableau 3.1 Nouvelles datations au radiocarbone dans la région de Québec	84
Tableau 4.1 Caractéristiques des sources de données utilisées dans la réalisation du modèle géologique 3D	93
Tableau 4.2 Code abrégé des descriptifs de forage du Centre géoscientifique de Québec (Parent et al., 2008)	97
Tableau 4.3 Codification des propriétés du modèle géologique 3D	103
Tableau 4.4 Descriptions des hydrofaciès (modifié de Ouillon et al., 2008)	111
Tableau 5.1 Résumé des événements géologiques depuis la dernière déglaciation dans le secteur de la rive nord de Québec.	125
Tableau 5.2 Hypothèse de corrélation stratigraphique suprarégionale de la région de Québec.	130

## Liste des annexes

<b>Annexe A</b> : Lignes de code pour la réalisation du modèle géologique 3D (Gocad® version 2.8)	149
<b>Annexe B</b> : Levé géophysique du forage FL06-01	157
<b>Annexe C</b> : Levé de sismique réflexion	161
<b>Annexe D</b> : Données de la microfaune des sédiments de la dernière phase glaciomarine	165
<b>Annexe E</b> : Données de la microfaune des sédiments interstadiaires	169
<b>Annexe F</b> : Datations au radiocarbone publiées pour la région de Québec	173
<b>Annexe G</b> : Modèle géologique 3D de la région de Québec et épaisseurs des unités modélisées	181
<b>Annexe H</b> : Paramètres des eaux souterraines du delta tardif enfoui de la basse ville de Québec	219

### Annexes électroniques

Coupes géologiques réalisées à l'aide de l'utilitaire « traverse »

Rapports granulométriques

Rapports palynologiques

Modèle géologique 3D de la région de Québec (Projet Gocad ®)

Lamarche, L., Parent, M., Bolduc, A. et Paradis, S. J. 2010. Géologie des formations superficielles, région de Québec, Québec, Commission géologique du Canada, Dossier public 6665, échelle 1/50 000.

Lamarche, L., Parent, M. et Perret, D. 2010. Cartes des formations meubles de surface et de sous-surface, Ville de Québec, Québec – Intervalles verticaux de 5m et maillage de 250m X 250m X 1m. Dossier public xxxx, échelle 1/140 000.

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Présentation de la recherche

#### 1.1.1 Cadre général de la thèse

La région de Québec comprend un port stratégique depuis la fondation de la ville de Québec, il y a plus de 400 ans. Sa localisation géographique revêt une importance à plus grande échelle. Point charnière dans la dynamique fluviale, le secteur de la ville de Québec est également considéré comme région clé lors des épisodes de glaciation-déglaciation de la vallée du Saint-Laurent. De ce fait, l'élaboration d'un cadre géologique adéquat dans la reconstitution de l'histoire quaternaire de cette région permet d'établir une base à l'étude des changements paléo-environnementaux du nord-est du continent. En raison de l'enfoncement glacio-isostatique régional, la présence de glace bloquant ce détroit a constitué le principal obstacle à l'incursion d'un bras de mer dans les Basses-Terres du Saint-Laurent tout au cours du Quaternaire. Ainsi lors de la dernière déglaciation, le détroit de Québec constituait un seuil important lors de l'incursion de la Mer de Champlain, de même que lors de sa régression. De plus, en restreignant le passage et le mélange des masses d'eau marine, ce détroit ainsi que les hauts-fonds adjacents ont également contrôlé l'évolution et l'hydrodynamique tout au long de l'épisode de la Mer de Champlain et de ses bassins successeurs. L'analyse plus détaillée des corps sédimentaires quaternaires dans cet environnement charnière vise à mettre en évidence les différentes étapes depuis l'incursion de la Mer de Champlain jusqu'à aujourd'hui. Cette reconstitution paléo-environnementale fournit les éléments clés de la transition entre les estuaires fluvial et maritime.

Cette thèse s'inscrit dans un effort conjoint entre la Commission géologique du Canada (CGC-Québec) et l'Institut National de Recherche Scientifique, Eau, Terre et Environnement (INRS-ete) visant à établir un modèle géologique tridimensionnel des formations superficielles de la région de Québec. Suite à la modélisation de l'étendue et de la géométrie des différentes unités géologiques, des paramètres physiques pourront leur être attribués afin de calculer la propagation des ondes sismiques du socle rocheux vers la surface du sol (Nastev et al., 2008). Ce projet constitue l'une des avenues à l'utilisation du modèle géologique 3D généré par la présente thèse.

D'autre part, l'identification d'un vaste aquifère sableux potentiellement exploitable dans la basse ville de Québec lors des premiers travaux a mis en évidence une source additionnelle d'approvisionnement en eau pour la ville. Malgré leur nature renouvelable, les eaux souterraines sont sujettes à la contamination et à la surexploitation. Il importe donc de protéger cette ressource. Toutefois, une gestion durable des eaux souterraines exige une étude approfondie du potentiel et des différentes caractéristiques du système hydrogéologique. Pour ce faire, il est essentiel de bien comprendre la dynamique régionale de l'écoulement des eaux souterraines. La représentation

tridimensionnelle de la géométrie de cet aquifère est un aspect important dans la caractérisation préliminaire de cette ressource.

## **1.2 Problématiques**

### **1.2.1 Géologie du Quaternaire**

De nombreuses études citent la ville de Québec comme un point charnière lors de la déglaciation des Basses-Terres du Saint-Laurent (MacPherson, 1966; Lasalle et Elson, 1975; Parent et al., 1985; Parent et Occhietti, 1988, 1999; Richard et Occhietti, 2004). Plusieurs lacs glaciaires ont résulté de l'obstruction à cet endroit de la vallée, tel que le Lac Deschaillons (Lasalle dans Lamothe, 1987) lors de l'englaciation et le Lac *Candona* lors de la déglaciation (Parent et Occhietti, 1999; Ross et al., 2005; Tremblay, 2008). Ce rôle prépondérant de la région de Québec est essentiellement lié à son contexte topographique dicté par la variabilité du relief du socle rocheux, lequel est issu de la rencontre des trois grands ensembles géologiques dans la ville de Québec, soit le Bouclier canadien, les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches. L'érosion différentielle au Quaternaire a modelé les différentes unités géologiques, l'un des résultats étant un rétrécissement du chenal du fleuve au niveau du secteur à l'étude. L'encaissement des Basses-Terres du Saint-Laurent en comparaison au Bouclier canadien et aux Appalaches constitue également un facteur important dans la dynamique glaciaire régionale. En effet, l'amincissement de l'Inlandsis laurentidien lors de la déglaciation a entraîné une modification de son écoulement créant deux courants glaciaires dans la vallée des Basses-Terres du Saint-Laurent, l'un au nord-est traversant le secteur d'étude pour se terminer dans l'océan (Parent et Occhietti, 1999), l'autre au sud-ouest depuis la région de Montréal vers le bassin des Grands-Lacs (Ross et al., 2005)

Suite à la déglaciation, les environs de la ville de Québec constituent le point de rencontre entre un milieu marin ouvert (Mer de Goldthwait) et un milieu marin fermé (Mer de Champlain). Sujet à l'action des vagues, des courants et des marées, le détroit de la région de Québec constitue un milieu dont la dynamique se modifie rapidement avec l'abaissement et les fluctuations du niveau d'eau. En effet, la régression causée par le relèvement isostatique ne s'est pas faite de façon unidirectionnelle, plusieurs fluctuations ayant été identifiées de part et d'autre de la zone d'étude et entraînant une sédimentation complexe (Lasalle, 1978, Dionne, 2001; Lamarche, 2005).

### **1.2.2 Modélisation tridimensionnelle**

Le développement informatique depuis une trentaine d'années permet de réaliser des modèles tridimensionnels de plus en plus complexes en intégrant de multiples sources de données. (Calcagno et al., 2008). L'élaboration d'un modèle 3D dans le cadre d'une étude quaternaire requiert la mise en place d'une base physique permettant d'améliorer la compréhension des différents milieux sédimentaires. En visualisant l'agencement des unités sédimentaires, il est possible de mieux comprendre les différents milieux de sédimentation. Puisque les unités de sédiments quaternaires sont largement enfouies et donc inaccessibles à l'observation visuelle directe, cet outil est un précieux atout pour ce type d'étude. Toutefois, la limite de cette investigation réside dans la qualité des données de sous surface disponibles (Ross et al., 2005,

MacCormack et Eyles, 2010). Ainsi, l'incertitude est variable sur l'ensemble du domaine modélisé.

### 1.2.3 Hydrogéologie

Le couplage de la compréhension de la mise en place des dépôts et des paramètres géophysiques et hydrogéologiques est de plus en plus intégré aux différents projets de caractérisation des aquifères (Ouillon et al., 2008; Fauveau, 2006). L'intégration des différentes disciplines apporte un aspect plus global aux études environnementales. L'utilisation de divers types de données permet également une validation croisée de ces mêmes données. De plus, certaines méthodes géophysiques apportent une deuxième dimension aux données ponctuelles obtenues par les méthodes traditionnelles de forage. Le défi réside dans l'intégration de tous ces types de données de façon cohérente dans un modèle 3D de la meilleure qualité possible.

## 1.3 Objectifs

La thèse comporte quatre objectifs, qui se résument comme suit :

1. Élaborer un cadre stratigraphique des formations quaternaires dans la région de Québec. Un tel cadre repose sur l'identification des unités stratigraphiques et l'analyse de leurs relations de superposition avec les autres unités dans la région de Québec. Une description détaillée des caractéristiques de ces unités permet d'établir leur milieu de sédimentation et de les retracer sur l'ensemble du territoire. La carte des formations superficielles nous informe sur la localisation en surface des différentes unités. Leur distribution de même que leurs relations verticales et horizontales, observées ou inférées, nous renseigne sur les relations spatio-temporelles et l'architecture stratigraphique des divers sédiments quaternaires. Ainsi, cela permet de reconstituer un cadre paléo-environnemental régional, lequel constitue le fondement des connaissances du Quaternaire régional.
2. Reconstituer l'histoire géologique du Quaternaire dans la région de Québec. La datation des épisodes de sédimentation et d'érosion et leur corrélation permet de replacer dans le temps et l'espace les différents événements qui ont marqué le Quaternaire de la région de Québec. Ce type d'analyse établit, de façon qualitative et quantitative, le cadre chronologique des événements. Ainsi, il est possible de comparer les différentes unités de la région d'étude avec celles de régions voisines et avec des événements environnementaux dont l'âge est connu. La reconstitution des successions paléo-environnementales est un élément important de cette analyse. Dans un même environnement, il peut exister divers types de sous-environnements, lesquels constituent autant de milieux de sédimentation : par exemple, un lac comporte des zones riveraines souvent caractérisées par des sédiments sablo-graveleux, ainsi que des milieux profonds, ceux-là caractérisés par des sédiments argilo-silteux ou organo-minéraux. La reconstitution de ces paléo-environnements permet de replacer les différents assemblages de lithofaciès dans leur contexte régional, voire même supra-régional, et de ce fait d'identifier les grands événements géologiques.

3. Réaliser un modèle géologique tridimensionnel. L'intégration complète des données de sous-surface dans une plateforme de modélisation (Gocad® version 2.8) passe par la standardisation et la hiérarchisation de différents types de données. La modélisation 3D permet de définir la stratigraphie et l'architecture des sédiments quaternaires et de fournir un cadre géologique à la caractérisation et à la modélisation hydrogéologique. Cette étape permet de valider notre compréhension des événements qui se sont succédé et de poser un cadre physique robuste pour des études hydrogéologiques et géotechniques. La production de cartes de sous-surface à des profondeurs variables (5, 10, 15, 20, 30, 35 m) et d'épaisseur des unités constitue un excellente façon de diffuser ces informations pour les besoins de l'aménagement régional.
4. Caractériser de façon préliminaire les caractéristiques de l'aquifère sableux de la basse ville de Québec. La distribution 3D de cet aquifère est susceptible de nous informer sur le sens d'écoulement de l'eau souterraine, la localisation des zones de recharge et des lignes de partage des eaux, de même que le niveau de vulnérabilité de la nappe.

#### 1.4 Secteur d'étude proposé

Le secteur d'étude proposé est la région immédiate de la ville de Québec (figure 1.1). Cette zone recoupe partiellement les feuillets cartographiques 21L14 et 21L13 et comprend la portion sud du bassin versant de la rivière Jacques-Cartier, jusqu'à l'île d'Orléans. La limite nord correspond à la latitude 47° 00' N (5 213 500 m UTM NAD 83 zone 19), tandis que la limite sud concorde avec le fleuve Saint-Laurent. Il intègre une partie des MRC de Portneuf, de la Jacques-Cartier, et de la côte de Beauport, de même que la totalité de la MRC de la ville de Québec. Les rivières importantes localisées sur le territoire sont les rivières Jacques-Cartier, Saint-Charles, Beauport et Montmorency.

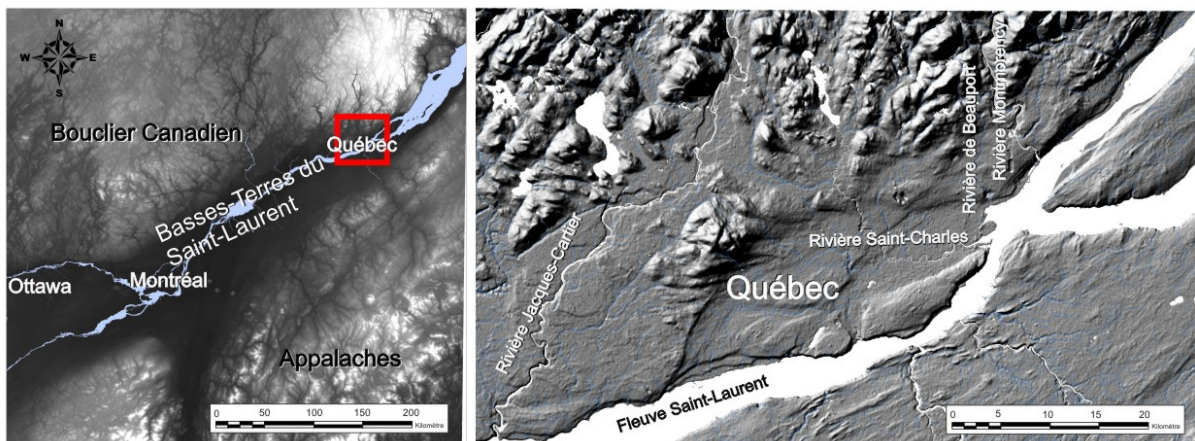


Figure 1.1 Localisation de la zone d'étude.

## **1.5 Travaux antérieurs**

### **1.5.1 Substratum rocheux**

La ville de Québec est localisée à la jonction des Appalaches, des Basses-Terres du Saint-Laurent et du Bouclier canadien (figure 1.2). Le Bouclier canadien apparaît dans la partie nord de la ville. Ces roches précambriennes de la Province de Grenville sont constituées principalement de gneiss accompagnés de bandes de calcaire cristallin, de quartzite, de quelques amas de métagabbros, d'un massif d'anorthosite et de quelques petits affleurements de pegmatites (Riva, 1972; Castonguay et al., 2002).

Séparées des roches précambriennes par des failles en échelon, les formations du Paléozoïque inférieur sous-tendent la basse ville de Québec. Composées de roches carbonatées non déformées et de roches clastiques, les formations de Trenton et d'Utica forment une bande étroite orientée nord-est s'étendant jusqu'à l'extrémité est de l'île d'Orléans.

Dans la région de la haute ville de Québec de même que sur la rive sud du fleuve se trouve l'allochtone appalachien. Il est formé de nappes et d'écaillés de chevauchement mises en place lors de l'orogénèse taconique à l'Ordovicien moyen. La ligne de Logan, partie frontale du chevauchement, traverse le fleuve Saint-Laurent à 18 km en amont de Québec, puis passe au centre de la ville et se prolonge dans le secteur nord-ouest de l'île d'Orléans et dans le fleuve en aval (Riva, 1972; Castonguay et al., 2002). Une longue période d'érosion marque la fin de l'orogénèse appalachienne jusqu'au Quaternaire.

### **1.5.2 Quaternaire**

Le Quaternaire de la vallée du Saint-Laurent est marqué par une succession complexe d'avancées et de retraits glaciaires accompagnés de la mise en place de tills et d'un cortège de sédiments glaciolacustres, glaciomarins et fluviaux. La coupe schématique de la figure 1.3 présente l'interprétation actuelle du cadre stratigraphique régional du Québec méridional; celle-ci sera détaillée et discutée dans les sections ultérieures.

#### **1.5.2.1 Pléistocène (1.8 Ma à 10 ka)**

##### **1.5.2.1.1 Pré-illinoien et Illinoien (1.8 Ma à 130 ka)**

Les premières traces d'activité glaciaire conservées au cœur du Québec remontent vraisemblablement à l'Illinoien et correspondent au Till de Bécancour. Ce till est caractérisé par une couleur rouge brique produite par l'érosion de shale rouge incorporé dans la matrice carbonatée. Il contient des éléments d'origine ignée et métamorphique provenant du Bouclier canadien. Certains sites montrent des indices de fluctuations du front glaciaire, tandis que d'autres incorporent des sédiments proglaciaires. L'orientation de l'écoulement glaciaire est du NNW vers le SSE (Lamothe, 1985).

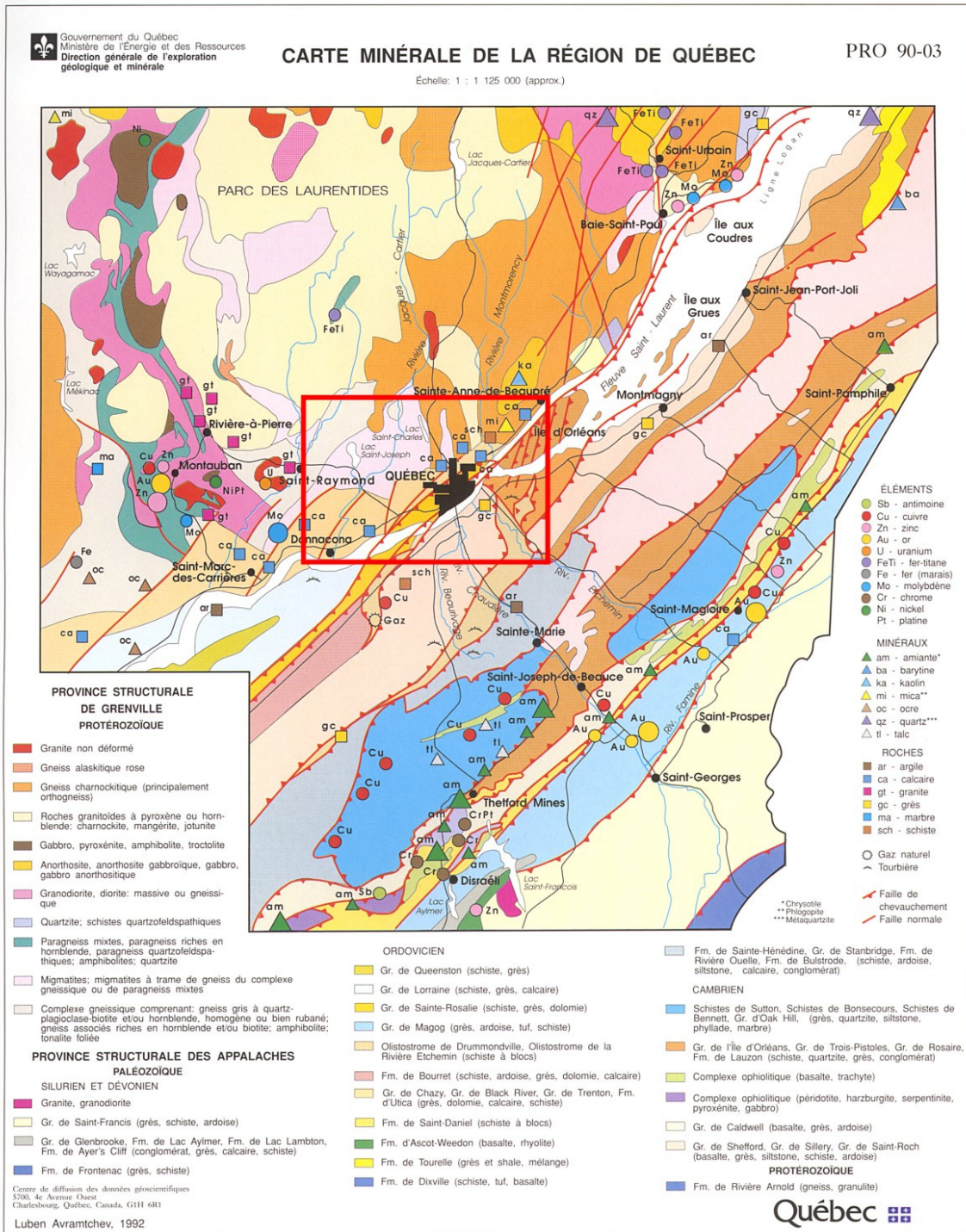


Figure 1.2 Socle rocheux des environs de la ville de Québec; zone d'étude dans l'encadré rouge. (Modifié du Ministère de l'Énergie et des ressources du Québec).



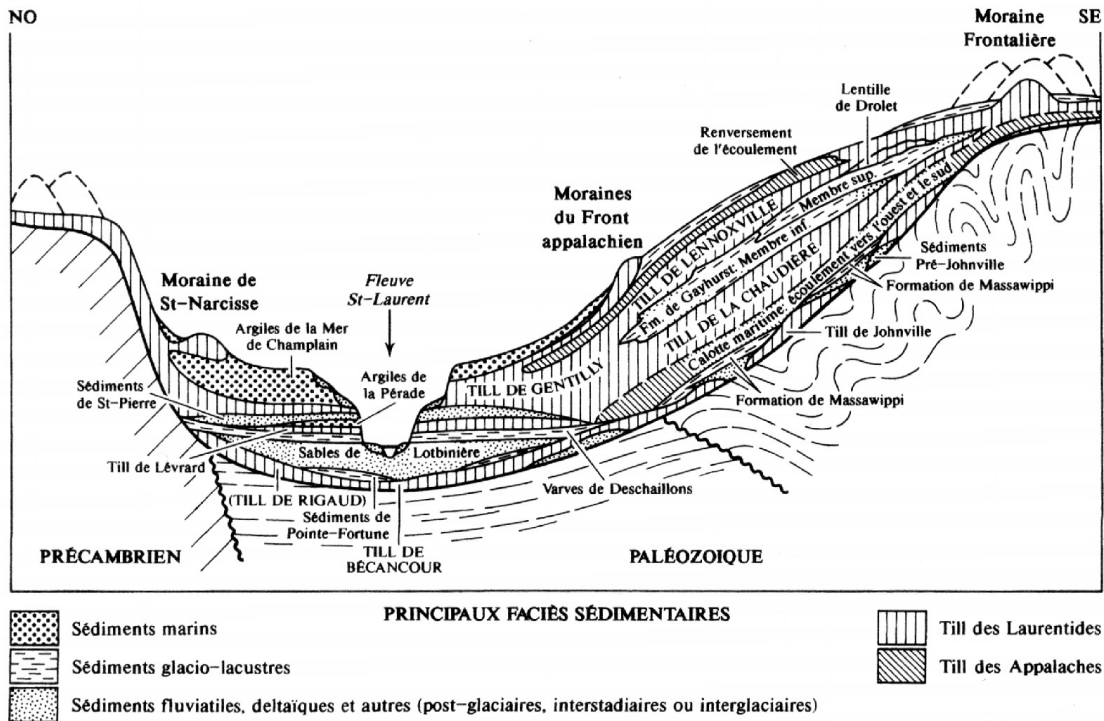


Figure 1.3 Coupe géologique à travers le Québec méridional (Modifié de Shilts, 1981)

Il semble que les sédiments pré-illinois n'aient pas résisté à l'érosion glaciaire dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, à l'exception de quelques lambeaux observés à la coupe de la Rivière-aux-Vaches (silts massifs sous le till au site de Pierreville) (Lamothe, 1987).

#### 1.5.2.1.2 Sangamonien (130 ka à 80 ka)

Le Sangamonien est caractérisé par un climat similaire ou légèrement plus chaud que l'actuel. Lors de la déglaciation, un système de lacs et de mers proglaciaires ou post-glaciaires a existé, laissant les dépôts de la Mer de Guettard et les silts de la Rivière-aux-Vaches. À l'optimum climatique, un système fluviatile s'est installé dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, épisode lors duquel se sont mis en place les Sables de Lotbinière (Lamothe, 1989). Dans le secteur de Québec, cet intervalle est associé à la Formation de l'Anse-aux-Hirondelles et dans l'estuaire du Saint-Laurent à la Formation de l'Île-aux-Coudres (Lasalle, 1984).

#### 1.5.2.1.3 Wisconsinien inférieur et moyen (80 ka à 23 ka)

Au Wisconsinien inférieur, le début de la glaciation entraîne la mise en place d'une succession sédimentaire comprenant les Varves de Deschaillons (Lac Deschaillons), le Till de Lévrard, les Argiles de la Pérade (Mer de Cartier) et les Sédiments de Saint-Pierre (Gadd, 1971; Hillaire-Marcel et Pagé, 1981; Lamothe 1987). Le Till de Lévrard est associé à une troisième avancée glaciaire reconnue tardivement lors de l'analyse détaillée de nouvelles coupes et de nouveaux forages le long du fleuve Saint-Laurent (Lamothe, 1989). Cette séquence stratigraphique

représente un épisode glaciaire séparant deux événements interglaciaires définis par des sédiments organiques. Un hiatus de durée indéterminée est observé entre ces dépôts et l'avancée glaciaire subséquente associée au Till de Gentilly (Lamothe, 1985 et 1987). Localement, ce till supérieur a été nommé Till de Québec, Till de St-Édouard ou Till supérieur. Ce till représente un diamicton calcaireux gris, de textures variées. Dans les Basses-Terres centrales, la fabrique, la lithologie et les plans de cisaillement de ce till indiquent une orientation de l'écoulement du glacier du NNW vers le SSE (Lamothe, 1985 et 1987). Durant cette période, l'inlandsis s'est étendu jusqu'à la latitude de New York. Des fluctuations de la marge glaciaire au Wisconsinien moyen ont été observées au sud dans les régions des rivières Saint-François et Chaudière. Ce recul a permis la formation des dépôts associés au Lac proglaciaire de Gayhurst (Shilts, 1981; Caron, en cours).

Dans le secteur à l'étude, le till de Québec (Till de Gentilly) est l'unité glaciaire la plus récente. Il est caractérisé par une matrice calcaireuse et compacte. Un complexe de contact glaciaire a été identifié à St-Augustin (Lasalle dans Lamothe, 1987). Plusieurs moraines ont également été retrouvées dans la région, telles que les moraines de Breakyville, du lac St-Charles et de St-Narcisse. Une réavancée glaciaire (St-Nicolas) est également citée dans la littérature (diamicton identifié à Pointe St-Nicolas); (Lasalle dans Lamothe, 1987; Lasalle et Shilts, 1993). Le Till de Gentilly montre des variations localisées du sens d'écoulement glaciaire. On distingue ainsi le Till de St-Édouard qui présente un écoulement vers le NNE (Lasalle dans Lamothe, 1987).

#### **1.5.2.1.4 Wisconsinien supérieur (23 ka à 10 ka)**

Plusieurs études ont traité de la déglaciation, de l'invasion marine et de la phase lacustre qui a suivi le maximum glaciaire dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (MacPherson, 1966; Lasalle et Elson, 1975; Parent et al., 1985; Parent et Occhietti, 1988, 1999; Richard et Occhietti, 2004). Dans les Appalaches, le retrait actif de la marge glaciaire qui a débuté vers 18 ka permet la formation de plusieurs moraines frontales. Le recul de la glace est estimé à environ 200 m/an (Parent et Occhietti, 1999). Pendant ce temps dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, un courant glaciaire se forme dans l'actuel golfe, où il se termine par une baie de vélage. Ce n'est que vers 12,5 ka <sup>14</sup>C BP que les Montérégiennes percent la glace pour former des nunataks. La coalescence des Lacs Memprémagog, Vermont et Iroquois permet la formation du Lac *Candona* dans le secteur de Montréal. Caractérisé par une faune d'eau douce, ce lac perdurera jusqu'à l'invasion de la Mer de Champlain. Toutefois, la limite nord du Lac *Candona* est mal définie (Parent et Occhietti, 1988; 1999; Ross et al., 2006).

La déglaciation du détroit de Québec vers 12,0 ka <sup>14</sup>C BP permet l'incursion de l'eau marine dans les Basses-Terres du Saint-Laurent et ce jusque dans la vallée de la rivière des Outaouais, modifiant de façon drastique les conditions sédimentaires. Cette incursion marine est connue depuis fort longtemps sous le nom de Mer de Champlain (Elson, 1970). L'épisode marin s'est échelonné sur une période de plus de 2000 ans. Les constructions deltaïques situent son niveau maximal sur la rive nord entre 180-250 m (MacPherson, 1966; Parent et Occhietti, 1988) et à près de 175 m sur la rive sud (Parent, 1987). On distingue trois phases majeures dans l'évolution de la Mer de Champlain. Tout d'abord, une phase glaciomarine s'étendant entre 12,0 ka <sup>14</sup>C BP et 11,6 ka <sup>14</sup>C BP alors que la faune d'eau douce du Lac *Candona* est remplacée soudainement par

une faune d'eau très froide et salée (Parent et Occhietti, 1999; Cronin et al., 2010). Dans un second temps, on retrouve une phase plénimarine, définie par une série d'espèces bivalves, la plus fréquente étant *Hiatella arctica*. Il s'agit donc de conditions marines arctiques similaires à l'actuel associées à une augmentation de la salinité de l'eau (30-33‰) qui ont duré jusque vers 10,8 – 10,6 ka <sup>14</sup>C BP. La détérioration climatique débute vers 11,6 ka <sup>14</sup>C BP et culmine vers 11 ka <sup>14</sup>C BP par la réavancée glaciaire du Dryas récent (Lasalle et Elson, 1975). Même si le refroidissement du Dryas récent, associé à la Moraine de Saint-Narcisse, est désormais bien reconnu dans les environnements terrestres, il ne semble pas y avoir un refroidissement équivalant du climat marin dans les eaux de la Mer de Champlain. La phase tardive de l'évolution de la Mer de Champlain entre 10,8-10,6 ka <sup>14</sup>C BP et 10 ka <sup>14</sup>C BP est marquée par l'apparition de faunes plus tempérées, notamment *Mya arenaria*.

Étant donné les problèmes de correspondance entre les âges <sup>14</sup>C sur les coquilles marines et les âges <sup>14</sup>C provenant de végétaux terrestres, il est difficile de préciser le moment des vidanges catastrophiques de lacs proglaciaires de l'ouest (Lac Algonquin et Lac Agassiz) vers la Mer de Champlain. Leur influence sur les conditions paléo-environnementales au sein de la Mer de Champlain est encore à démontrer, malgré les efforts déployés (Rodrigues, 1994). Des apports pouvant atteindre plus de 4000 km<sup>3</sup> d'eau douce sur de brèves périodes (de 2 à 4 ans) ont pu mener à des conditions mésohalines (3-18‰) dans le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent (Marshall et Clarke, 1999; Clark et al., 2001; Muller et al., 2003). La déglaciation complète des Basses-Terres du Saint Laurent s'effectue entre 11,6 ka <sup>14</sup>C BP et 10,9 ka <sup>14</sup>C BP (Richard et Occhietti, 2004). Il est à noter qu'un effet réservoir variant entre 500 ans et 1000 ans a été identifié sur les âges coquilles de la Mer de Champlain (Tremblay, 2008). Par ces éléments nouveaux, la chronologie des événements est en cours de révision.

### 1.5.2.2 Holocène (10 ka à aujourd'hui)

Le Lac à *Lampsilis* est l'étendue d'eau douce qui a succédé à la Mer de Champlain lorsque le relèvement isostatique a chassé les eaux salées des Basses-Terres du Saint-Laurent. Puisque leurs sédiments possèdent sensiblement les mêmes caractéristiques sédimentologiques à l'exception de leurs faunes respectives, la limite stratigraphique entre la Mer de Champlain et le Lac à *Lampsilis* est difficile à déterminer. Ainsi, la limite inférieure du lac correspond à la transition d'un milieu salin à un milieu lacustre. Plusieurs études palynologiques ont établi cette frontière aux environs de 9,8 ka <sup>14</sup>C BP (Richard et Occhietti, 2004).

Trois niveaux de terrasse délimitent les diverses phases du Lac à *Lampsilis*, soit les niveaux de Rigaud (60 m : 9,8 ka <sup>14</sup>C BP), de Montréal (31 m : 8,8 ka <sup>14</sup>C BP) et de Saint-Barthélémy (20 m : 8 ka <sup>14</sup>C BP) (figure 1.4). Toutefois, l'âge de ces événements est plutôt imprécis. Tout d'abord définis par MacPherson (1966), ces assignations chronologiques ont été réfutées par Richard (1977a). Depuis, l'âge retenu pour ces terrasses repose sur l'extrapolation de la courbe d'émersion (Parent et al., 1985). Cependant, ces âges estimés ne tenaient pas compte des fluctuations du niveau marin mises en évidence depuis, ce qui nous ramène à une certaine imprécision. La limite supérieure suggérée pour la fin du Lac à *Lampsilis* est le niveau de la terrasse de Saint-Barthélémy. Ce dernier était maintenu par un seuil dans la région de Québec. Une seconde vidange du Lac Agassiz (phase Nipigon) érode ce seuil vers 8 ka <sup>14</sup>C BP laissant la

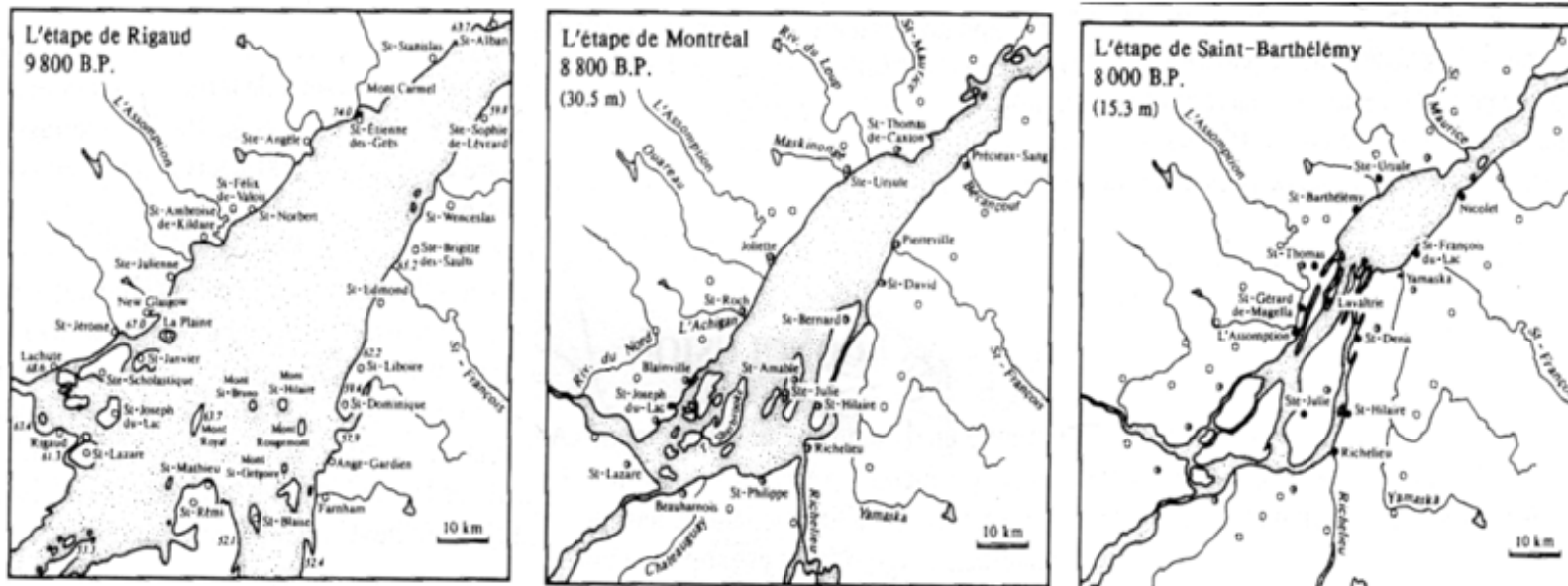


Figure 1.4 Niveaux des terrasses délimitant les différentes phases du Lac à *Lampilis* dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (modifié de MacPherson, 1966)

place au Proto-Saint-Laurent (MacPherson, 1966; Marshall et Clarke, 1999; Parent et Occhietti, 1999; Lapointe, 2000; Clark et al., 2001; Muller et al., 2003).

Le Proto-Saint-Laurent correspond aux événements postérieurs à la formation de la terrasse de Saint-Barthélémy établie précédemment à 8 ka  $^{14}\text{C}$  BP. Trois fluctuations majeures ont pu être observées dans le secteur nord du lac Saint-Pierre (figure 1.5). Ainsi, une baisse des niveaux est suggérée vers 6000-7000 ans, 4000 ans et 1500 ans, tandis que des hauts niveaux sont identifiés vers 5000 ans, 3000 ans et 1000 ans (Lamarche, 2005). Ces niveaux ont également été identifiés par Dionne (2001) dans l'estuaire du Saint-Laurent.

L'importance des variations des niveaux d'eau du fleuve dans l'établissement des populations humaines a été démontrée par la localisation de divers sites archéologiques (Allard et Séguin, 1992; Garneau, 1997). Depuis que l'on enregistre les niveaux d'eau, des fluctuations interannuelles des niveaux de base marque l'évolution récente du fleuve (Bondue, 2004; Centre Saint-Laurent, 2000). Les modèles climatiques prévoient une diminution des niveaux de base pour ce qui est de la partie fluviale du Saint-Laurent, pendant que le niveau marin sera à la hausse (IPCC, 2001).

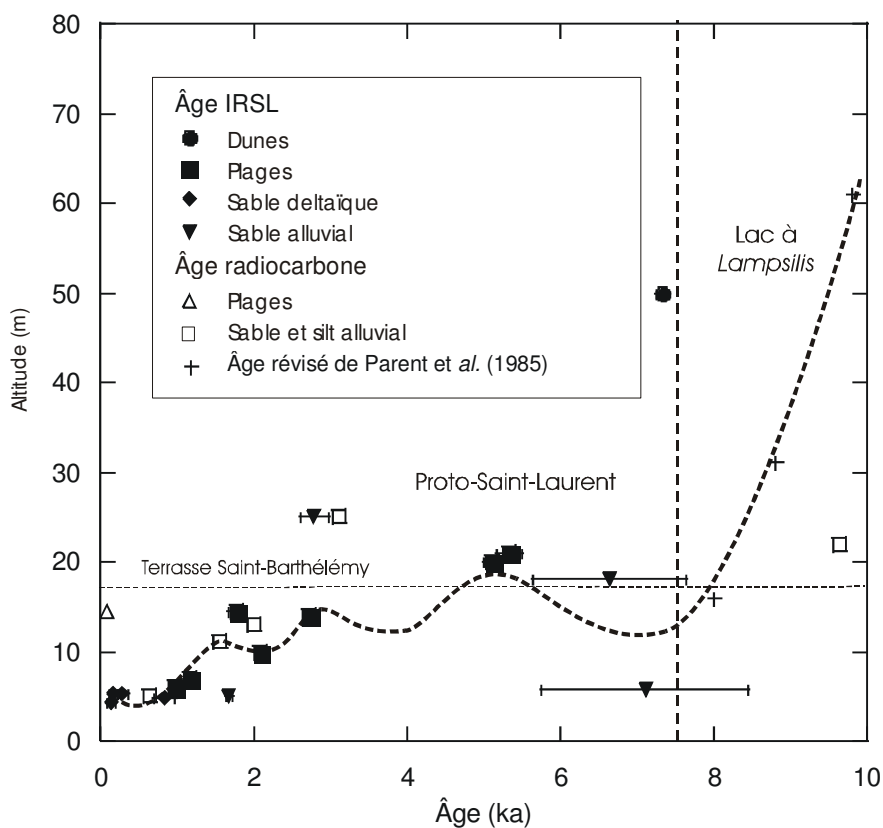


Figure 1.5 Évolution des niveaux d'eau relatifs du Lac à *Lampsilis* et du Proto-Saint-Laurent dans le secteur nord du lac Saint-Pierre d'après les âges IRSL (Infra Red Luminescence stimulation) et les âges  $^{14}\text{C}$  (Lamarche, 2005).

### 1.5.3 Stratigraphie régionale

La région de la ville de Québec demeure un secteur méconnu en ce qui concerne la stratigraphie du Quaternaire. La corrélation entre les secteurs en amont et en aval de ce détroit reste une question déterminante et non résolue dans la reconstitution paléogéographique des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les connaissances sur ces trois principales régions sont résumées au tableau 1.1 et élaborées dans les sections suivantes. Toutefois, il est à noter que deux hypothèses, en ce qui concerne le moment de mise en place des dépôts anciens, sont reconnues dans la littérature. Lamothe (1989) associe les Sédiments de Saint-Pierre au Wisconsinien moyen tandis que Occhietti et al. (1996) attribuent ces dépôts à la fin du Sangamonien, soit au stade isotopique 5e, tel que défini dans la stratigraphie océanique.

#### 1.5.3.1 Vallée moyenne du Saint-Laurent

La stratigraphie dans la région de la vallée moyenne du Saint-Laurent a été décrite dans quatre secteurs différents, soit le secteur de Pierreville (Terasmae, 1958; Gadd, 1971; Lamothe, 1985 et Occhietti et Clet, 1989), le secteur de Saint-Pierre-les-Becquets (Gadd, 1971; Terasmae, 1958, Karrow, 1957; Lamothe, 1989; Hillaire-Marcel et Pagé, 1981), le secteur de Trois-Rivières (Terasmae, 1958; Occhietti et Clet, 1989 et Hardy et Lamothe, 1997) et le secteur de la Rivière Beauport (Karrow, 1957; Gadd, 1971 et Lasalle et Elson, 1975) (tableau 1.2).

Dans la région, les sédiments lacustres les plus anciens sont localisés à la coupe de la Rivière-aux-Vaches près de Pierreville. On y retrouve des silts massifs sous le till (Illinoien moyen) (Lamothe, 1987). Cependant, les données très éparses rendent difficile la reconstitution de la dynamique glaciaire (Lamothe, 1987; Hardy et Lamothe, 1997).

Suite à la première période glaciaire conservée dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (Till de Bécancour), on retrouve une alternance d'unités organiques, sableuses et silteuses. À la base, on observe les varves fossilifères de Pierreville liées à la Mer de Guettard et associées à la transition entre l'Illinoien et le Sangamonien (stades isotopiques 6/5) (Clet-Pellerin et Occhietti, 2000). Cette mer serait associée au rebond isostatique suite à la déglaciation. Dans le secteur de Pierreville, ces varves sont surmontées par les Sédiments de Saint-Pierre.

Dans le secteur de Saint-Pierre-les-Becquets, on retrouve à la base de la stratigraphie des rythmites non corrélées au-dessus du Till de Bécancour. Ces rythmites sont surmontées par les Sables de Lotbinière. Ces sables caractérisent l'optimum climatique du Sangamonien et sont associés à une période fluviale similaire à l'actuel. Localisée au niveau du fleuve actuel, ils contiennent des stratifications parallèles avec des rides à petite échelle. Les structures sédimentaires montrent une orientation des courants vers le NE (Lamothe, 1985 et 1989).

Toutefois, à la coupe de Sainte-Anne de la Pérade, les Sables de Lotbinière reposent sur les Argiles de La Pérade associées à la Mer de Cartier (Ferland et Occhietti, 1990). Datées à plus de 35,6 ka BP (âge  $^{14}\text{C}$  minimum sur coquilles), ces argiles sont attribuées à la transition des stades isotopiques 5a/5b. On retrouve cette unité jusqu'à une élévation de 22 m, ce qui permet de dire que cette mer résulte de l'enfoncement isostatique qui a permis une transgression marine suite à la déglaciation (Ferland et Occhietti, 1990).

Tableau 1.1 Stratigraphie dans les Basses-Terres du Saint-Laurent

Âge (ka)	Étage/ Sous-étage	Étage isotopique	Vallée moyenne du Saint-Laurent (Lamothe, 1989; Hardy et Lamothe, 1997)	Vallée moyenne du Saint-Laurent (Occhietti et al., 1996)	Région de Québec (Lasalle, 1984; Cummings et Occhietti, 2001)	Estuaire du Saint-Laurent: Île aux Coudres (Brodeur et Allard, 1985; Occhietti et al., 1996)	
10-13	Holocène	1	Sédiments de la Mer de Champlain	Sédiments de la Mer de Champlain	Sédiments de la Mer de Champlain	Tourbes de l'île aux Coudres	
23-32	Wisconsinien supérieur	2	Till de Gentilly	Till de Gentilly	Till de Gentilly (Till de Québec)	Sédiments de la Mer de Champlain	
65	Wisconsinien moyen	3	Varves grises	Till de Gentilly	Till de Gentilly (Till de Québec)	Till supérieur	
80	Wisconsinien inférieur	4	Till de Lévrard	SVF/RStM*	Varves de Beaupré	Sables fluvioglaciaires	
130	Sangamonien	5	Varves de Deschaillons	SStP*	Formation de L'Anse-aux-Hirondelles	Sables et tourbes***	
198			a	Sables de Lotbinière		Argile de La Pérade	Érosion/ non-déposition
			b			Till de Lévrard	
			c			Till de Sainte-Anne	
			d			Sables de Lotbinière	
	e		Érosion/ non-déposition				
130	Illinoien supérieur	6	Varves de Pierreville	Dépôts stratifiés	Till de Bécancour (Till de la Pointe Saint-Nicolas)	Formation de l'Île aux Coudres	
198			Till de Bécancour	Till de Rigaud Till de Bécancour	Till de Bécancour (Till de la Pointe Saint-Nicolas)	Complexe glaciaire de Baie-Saint-Paul	

\* SVF: Sables des Vieilles Forges  
RStM: Rythmites du Saint-Maurice  
SStP: Sédiments de Saint-Pierre

\*\* TStN: Till de Saint-Nicolas

\*\*\* Unité 3-4-5 de Brodeur et Allard, 1985

Les Sables de Lotbinière sont surmontés par les Varves de Deschaillons dans le secteur de Saint-Pierre-les-Becquets (Lamothe, 1989). Cette unité représente un épisode glaciolacustre de type distal d'une durée de plus de 3800 ans (Hillaire-Marcel et Pagé, 1981 et Besré et Occhietti, 1990). Elle est constituée de silt et d'argile finement laminés et rythmés renfermant des concrétions carbonatées peu épaisses.

Les Sédiments de St-Pierre montrent une alternance hétérogène de dépôts fluviaux, lacustres et palustres et surmontent toutes les unités antérieures (Gadd, 1971; Lamothe, 1987; Occhietti et Clet, 1989). Ils sont divisés en trois sous-unités. Ils sont constitués d'une sous-unité sableuse jaunâtre bien classée, non-carbonatée avec des débris végétaux et surmontée d'une sous-unité tourbeuse compactée (selon les localités, on compte entre 1 et 3 lits de tourbes). Au sommet, on retrouve une sous-unité de silt granoclassé avec une faible rythmicité à la base (Lamothe, 1987). Une datation par la méthode de luminescence a permis de situer les varves supérieures de Deschaillons à 80 ka, tandis que les sédiments de Saint-Pierre sont datés à environ 65 ka (Lamothe et Huntley, 1988).

Tableau 1.2 Stratigraphie de la région de la vallée moyenne du Saint-Laurent

Section de Pierreville (Terasmae, 1958; Gadd, 1971; Lamothe, 1987; Occhietti et Clet, 1989)	Section de Saint-Pierres-Becquets (Terasmae, 1958; Gadd, 1971; Karrow, 1957; Lamothe, 1987; Hillaire-Marcel et Pagé, 1981)	Section de Saint-Anne de la Pérade (Rivière Saint-Maurice) (Terasmae, 1958; Lamothe, 1987; Occhietti et Clet, 1989; Hardy et Lamothe, 1997)	Section de la rivière Beauport (Karrow, 1957; Gadd, 1971; Lasalle et Elson; 1975)
Sédiments de la Mer de Champlain			
Till de Gentilly			
	Rythmites non-calcareuses à la base (corrélées aux Varves de Deschaillons)	Sables des Vieilles Forges  Rythmites du Saint-Maurice	
Sédiments de Saint-Pierre			
3 sous-unités :  • Sable non-calcareux avec boules de tourbes  • Tourbe compact  • Silt rythmé à la base (localement déformé)	Même profil pollinique que les tourbes de Pierreville		
Varves de Pierreville	Till de Lévrard  Varves de Deschaillons  Varves	Argile de la Pérade  Sable  Diamicton de St-Anne  Varves de déglaciation	Varves avec de la glacio-tectonique  Sable et gravier avec injection de diamicton  Varves inférieures dans le lit de la rivière
Till de Bécancour			
Silt massif Pré-Odanak			
Roche en place			



Le Till de Lévrard est une unité diamictique observée dans le secteur de Saint-Pierre-les-Becquets. Il est localisé entre les Sédiments de Saint-Pierre et les Varves de Deschaillons (Lamothe, 1989).

Les Rythmites du Saint-Maurice sont l'unité stratigraphique qui surmonte les sédiments de Saint-Pierre dans le secteur de la rivière Saint-Maurice. Elles sont constituées de rythmites grisâtres silto-sableuses devenant de plus en plus sableuses vers le sommet avec des rides de courant et des laminations sableuses. Dans ce secteur, les Rythmites du Saint-Maurice sont tronquées par les Sables des Vieilles-Forges. Ces sables diamictiques jaunâtres, massifs ou légèrement stratifiés et ces silts carbonatés grisâtres à stratification ondulée sont associés à un environnement de marge glaciaire (Besré et Occhietti, 1990).

Le Till de Gentilly recouvre l'ensemble des unités quaternaires décrites précédemment. Il est surmonté successivement par les dépôts associés au Lac *Candona*, à la Mer de Champlain, au Lac à *Lampsilis* et par les sédiments du Proto-Saint-Laurent et ceux du Saint-Laurent actuel.

### 1.5.3.2 Région de Québec

La dernière compilation parue de la stratigraphie quaternaire dans la région de Québec remonte à Lasalle dans Lamothe (1987). Les sédiments interglaciaires de l'Anse-aux-Hirondelles surmontent l'unité glaciaire (Till de Bécancour) au site de la Pointe St-Nicolas. Ils sont constitués principalement de strates de sables et de graviers interlités avec des lits organiques. Datés à environ 60 ka <sup>14</sup>C BP, ils montrent un écoulement parallèle à l'écoulement actuel du fleuve. Des sédiments varvés, corrélés au Lac Deschaillons, ont été identifiés près du Mont Sainte-Anne et dans la vallée de la rivière Beauport. Cette unité montre des déformations glaciotectoniques, ainsi que des structures de charge.

Comme dans la vallée moyenne du Saint-Laurent, les unités stratigraphiques supérieures sont le Till de Gentilly, surmonté par les dépôts associés à la Mer de Champlain et à la Mer de Goldthwait suivis par les sédiments du Proto-Saint-Laurent et du fleuve actuel. Les dépôts du Lac à *Lampsilis* y sont absents, puisque dans le secteur les conditions d'eau salée, comme dans la Mer de Goldthwait, ont perduré lors de la régression.

### 1.5.3.3 Estuaire moyen du Saint-Laurent

Deux études ont porté sur la stratigraphie dans l'estuaire moyen du Saint-Laurent. Tout d'abord, Boespflug et al. (1995) ont décrit un forage de près de 150 m localisé à l'Île aux Coudes. On y retrouve une succession de dépôts associés à des hauts ou des bas niveaux marins. À la base, un till est présent, surmonté par un complexe glaciaire prodeltaïque. Le forage montre ensuite une succession représentant un prodelta de transgression, un haut niveau marin et suivi d'une régression. Au sommet de la carotte, on observe les dépôts associés à l'Holocène. Par ailleurs, Brodeur et Allard (1985) ont décrit la stratigraphie de l'Île aux Coudres à l'aide de trois coupes naturelles sur la côte nord-ouest de l'île. La coupe composite comprend 7 unités, de la base vers le sommet : 1) des sédiments sablo-graveleux associés à une plaine d'épandage fluvio-glaciaire; 2) des rythmites fluvioglaciaires; 3) des sables fluviatiles devenant plus fins au sommet; 4) des

sédiments organiques datés entre 26 ka et 35 ka BP; 5) des sables stratifiés déformés; 6) le Till de Gentilly et 7) les sédiments littoraux de la Mer de Goldthwait.

#### 1.5.4 Modélisation tridimensionnelle

Les nouvelles innovations dans le domaine de l'informatique permettent à présent de simuler une réalité tridimensionnelle de plus en plus complexe. Les designs assistés par ordinateur (Computer-aided design : CAD) ont connu un développement accru depuis les années 1980. Plusieurs domaines, tels que la médecine, la biologie, la géologie et l'hydrogéologie, ont exploité ces techniques dans le but de reproduire des formes tridimensionnelles. On définit la géomodélisation comme étant l'ensemble des méthodes mathématiques utilisées afin de modéliser de façon coordonnée la topologie, la géométrie et les paramètres physiques d'objets géologiques en tenant compte de tous les types de données liées à l'objet (Mallet, 2002). Deux approches sont possibles afin de représenter dans l'espace ces différents objets, soit l'approche par limite ou l'approche matricielle (Appel, 2006). Dans l'approche par limite, les éléments modélisés sont en général des limites physiques (surfaces) entre deux phénomènes distincts. Par exemple, il est possible de représenter le contact entre deux unités stratigraphiques ou entre deux hydrofaciès. L'approche matricielle, quant à elle, représente une hiérarchisation de cellules liées les unes aux autres par des propriétés.

L'élaboration d'un modèle géologique tridimensionnel repose sur la disponibilité et la qualité des données de sous-surface. Le type et la distribution des données sources peuvent différer selon les projets. Ainsi, une méthode intégrée doit tenir compte des données primaires d'observation (description de forage, coupes stratigraphiques, géophysique, informations structurales et géométriques spécifiques, propriétés physiques du milieu) et du modèle géologique conceptuel de la région d'étude (Appel, 2006). L'approche par coupe permet d'interpréter les données de sous-surface en respectant le modèle géologique conceptuel. Ces éléments comportent en eux mêmes un certain degré d'incertitude. Une hiérarchisation de la fiabilité des données s'avère nécessaire afin de réduire l'incertitude du modèle liée aux données sources. Ainsi, seules les données avec un haut niveau de fiabilité sont utilisées dans la réalisation du modèle géologique (Ross et al., 2005).

L'acquisition des données dans le modèle se situe au niveau de l'application de contraintes sur les surfaces limites (figure 1.6). Ainsi, il est possible de forcer les surfaces à respecter la localisation des limites identifiées, soit dans les forages, soit dans les levés géophysiques ou encore dans les coupes interprétées. Ces contraintes peuvent être de deux types, souple ou stricte. Ainsi, il est possible d'obliger les surfaces à se conformer de façon plus ou moins flexible aux données sources selon leur niveau de fiabilité. Une contrainte est dite souple lorsque la fonction de la contrainte doit être respectée de façon approximative, tandis qu'une contrainte stricte demande le respect exact de la fonction de cette contrainte. L'intégration successive de plusieurs sources de données peut conduire à des contradictions entre les différentes contraintes. Une hiérarchisation des contraintes peut s'avérer nécessaire dans certaines situations (Mallet, 2002).

L'interpolation des données permet d'intégrer les différentes propriétés au modèle. La méthode DSI (Discrete Smooth Interpolation) se base sur la réduction de la rugosité de la surface en

réduisant au maximum la violation des contraintes (Mallet, 2002). À deux nœuds voisins, la différence entre la tangente de ces deux points sera réduite le plus possible en respectant le mieux possible les contraintes du modèle (Mallet, 2002).

Suite à la définition des limites entre les différents phénomènes, deux sorties du modèle peuvent être réalisées, soit un modèle 3D des limites ou un maillage 3D. Le modèle 3D des limites représente des régions fermées par une surface renfermant l'ensemble de l'objet (approche par limite). Le maillage 3D consiste en une hiérarchisation de cellules identifiées par une propriété identique (approche matricielle) (Mallet, 2002).

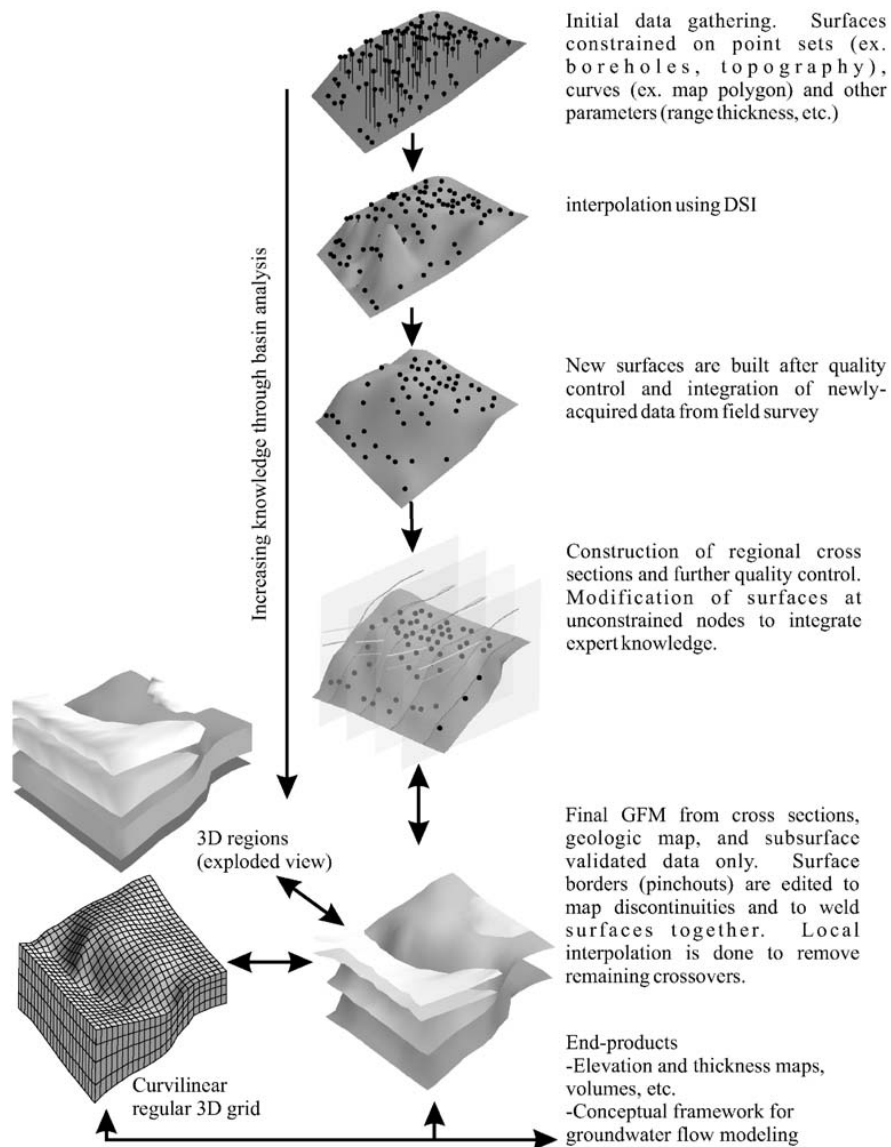


Figure 1.6 Procédure de construction d'un modèle étape par étape (Ross et al., 2005)

### 1.5.5 Hydrogéologie

Suite à la découverte en 1997 d'un panache de trichloroéthylène (TCE) sur la base militaire de Valcartier, une campagne de caractérisation environnementale visant à comprendre la stratigraphie et l'hydrogéologie a été entreprise par l'équipe de René Lefebvre à l'Institut National de Recherche Scientifique (INRS-ete) (Martel et al., 2000). Depuis 2001, cette étude a permis de compiler un très grand nombre de données dans un territoire restreint (Lefebvre et al., 2004). Ainsi, un modèle géologique 3D détaillé a été réalisé dans le cadre de ces recherches et intégré au modèle géologique plus régional de la présente étude. Cette aquifère est également un analogue au delta enfoui découvert en basse ville de Québec et constitue une base à la caractérisation hydrogéologique de ce dernier.

Le secteur de Valcartier est localisé dans la vallée de la rivière Jacques-Cartier. Il est bordé au nord par les Monts Keables, à l'est par le Mont Brillant et à l'ouest par le Mont Rolland-Auger (figure 1.7). Une vallée enfouie est présente sous le secteur administratif de la base militaire et est comblée par un maximum de plus de 50 m de sédiments quaternaires. La principale unité aquifère est constituée de sable deltaïque très perméable variant de 1,5 m à 30 m d'épaisseur. Dans la partie est, une unité prodeltaïque silteuse pouvant atteindre plus de 14 m d'épaisseur divise cette unité en deux. À la base, une unité de silt glaciomarine recouvre les sables et graviers proglaciaires (Lefebvre et al., 2004). Le contexte sédimentaire de ce delta présente des similitudes avec celui identifié dans la basse ville de Québec lors de la présente étude. Ainsi, les comparaisons des propriétés physiques réalisées à Valcartier sont applicables dans le secteur deltaïque de basse altitude de la présente étude.

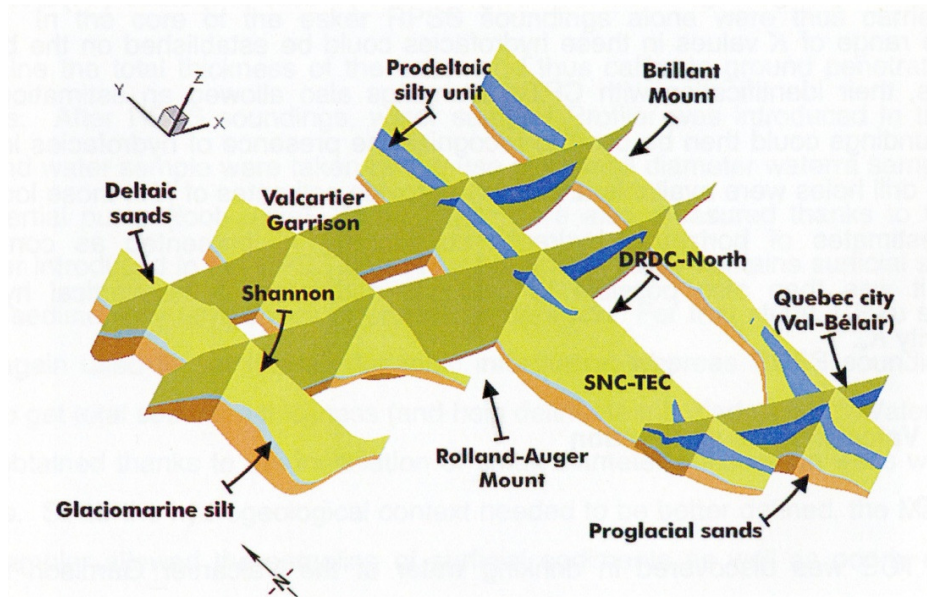


Figure 1.7 Modèle géologique 3D du secteur de Valcartier (Lefebvre et al., 2004)

Les études hydrogéologiques devenant de plus en plus coûteuses, le développement de nouvelles techniques de caractérisation des aquifères est devenu un aspect important. Les ressources déployées dans le cadre de l'étude de Valcartier ont permis d'approfondir diverses méthodes d'acquisition de données. Les sondages par enfoncement direct et par rotoperçusion permettent d'acquérir une multitude de données dans un court laps de temps et à moindre coût. L'outil piézocône (CPT : Cone Penetrometer Testing) par enfoncement direct permet de mesurer la résistance en pointe, le frottement latéral et la pression interstitielle. À l'aide d'une étude comparative entre ces caractéristiques mécaniques et les caractéristiques hydrauliques du milieu (Eslami et Fellenius, 2004), divers hydrofaciès ont pu être identifiés par Fauveau (2006) et Ouellon (2006) dans un milieu deltaïque.

De nombreux tests hydrauliques ont permis d'identifier 4 hydrofaciès dont les caractéristiques hydrauliques sont similaires dans le secteur de Valcartier (Ouellon et al., 2008). Basés principalement sur la granulométrie des échantillons, ces hydrofaciès ont pu être associés aux propriétés physiques mesurées à l'aide des CPT (Fauveau, 2006) (figure 1.8). Cette étude confirme l'efficacité de cette méthode dans ce type de milieu. Ainsi, il a été possible d'appliquer cette méthode dans le cadre d'une caractérisation hydrogéologique préliminaire dans le secteur de la basse ville de Québec.

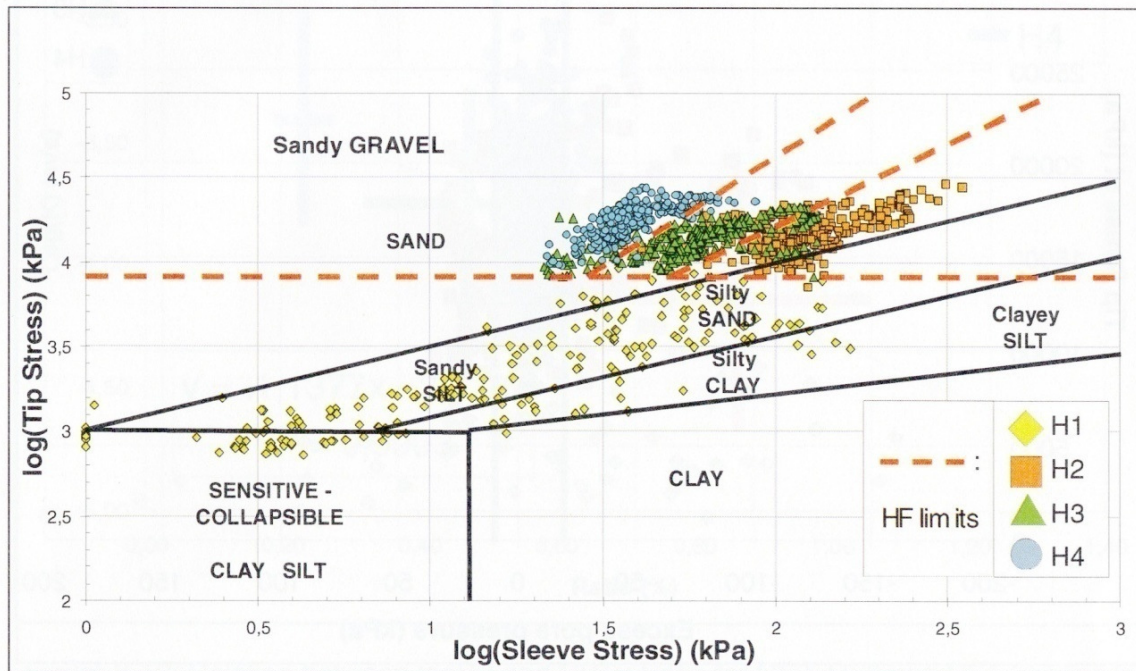


Figure 1.8 Caractéristiques des données CPT pour chaque hydrofaciès (H1, H2, H3, H4) reporté sur le diagramme d'Eslami et Fellenius (2004) (Fauveau, 2006).

## **1.6 Méthodologie**

La présente étude propose, dans un premier temps, une approche classique de l'étude du Quaternaire dans la région de Québec. L'analyse de photos aériennes, d'images satellitaires et de cartes, ainsi que l'examen de coupes géologiques sur le terrain sont les premières étapes dans l'établissement de la succession stratigraphique des formations meubles. Des analyses paléocéologiques et géochronologiques ont été réalisées afin de compléter le cadre stratigraphique et paléogéographique préexistant. L'utilisation de la méthode de datation au radiocarbone (Stuiver et al., 1998) permet de préciser le cadre chronologique régional. L'analyse de macro- et micro-fossiles aquatiques et terrestres, combinée à l'analyse stratigraphique et géochronologique, permet de reconstituer la succession des paléo-environnements régionaux et de les mettre en corrélation avec des événements quaternaires d'envergure suprarégionale. Par la suite, la modélisation des unités de sous-surface à l'aide des données de forages, la réalisation de nouveaux forages et l'acquisition de données géophysiques vient consolider la reconstruction de l'histoire géologique. Une étude préliminaire des eaux souterraines permettra de définir la qualité ainsi que la provenance des eaux souterraines présentes dans le secteur de la basse ville de Québec. Une analyse sommaire des paramètres physico-chimiques de l'eau de même que la géométrie et la répartition des hydrofaciès de l'aquifère ont été réalisées.

En résumé, la démarche scientifique mise en œuvre repose sur l'analyse des faciès et environnements sédimentaires afin d'obtenir un modèle stratigraphique des sédiments quaternaires de la zone d'étude. Par la suite, l'interprétation des différentes caractéristiques de ces sédiments permet d'établir l'évolution spatio-temporelle des épisodes d'érosion et de sédimentation qui sont survenus dans cette région de la vallée du Saint-Laurent. Un modèle géologique 3D représentant les différentes étapes de la dynamique fluviale et estuarienne dans le secteur de Québec de même que la répartition des unités stratigraphiques est produit afin d'illustrer spatialement la configuration des différents événements. Dans un second volet, ce modèle géologique 3D sert de base géospatiale à une première analyse du potentiel hydrogéologique de l'aquifère de la basse ville de Québec.

### **1.6.1 Travaux de terrain**

#### **1.6.1.1 Caractérisation des dépôts de surface**

Trois cartes géologiques et géomorphologiques préexistantes (Cloutier et al., 1997, Bolduc, 2003; Bolduc et al., 2003) recoupant la zone d'étude ont été révisées. La validation des diverses unités présentes sur le terrain a été réalisée lors de la campagne de terrain de l'été 2006. Ainsi, deux secteurs ont été identifiés dans le but de réévaluer l'interprétation géologique, soit le secteur de Valcartier et la basse ville de Québec. De nouvelles données géomorphologiques ont également fait l'objet d'une réinterprétation suite aux nouvelles interprétations suprarégionales de la dynamique glaciaire (Parent et Occhietti, 1999). La présence de linéaments morainiques associés aux courants glaciaires dans les Basses-Terres du Saint-Laurent a aussi été identifiée.

### 1.6.1.2 Coupes géologiques

L'analyse stratigraphique en milieu urbain s'avère un défi de taille en ce qui concerne l'identification et la caractérisation des différentes unités. En effet, les bâtiments et les routes présents sur le territoire limitent considérablement l'accessibilité aux unités géologiques de surface. De ce fait, il faut compter sur la construction de nouvelles infrastructures pour ainsi avoir accès à la sous-surface. Durant l'été 2006, la ville de Québec a construit sept bassins de rétention d'eaux pluviales, ce qui a donné accès à des excavations de quelque 20 m de profondeur et a mené à une réinterprétation des unités géologiques récentes du secteur à l'étude. Les excavations liées à de nouveaux développements domiciliaires ont également permis de confirmer la stratigraphie dans différents secteurs.

Dans les années 1980, Lasalle dans Lamothe (1987) a décrit plusieurs coupes dans le secteur d'étude. Deux sites ont été revisités, soit la rivière Beauport et le site de St-Augustin. La rivière St-Charles de même que les sablières longeant la rivière Montmorency ont également fait l'objet d'un intérêt particulier; diverses coupes ont pu ainsi être décrites.

### 1.6.1.3 Levés géophysiques et hydrogéologiques

Des levés géophysiques ont été réalisés dans les secteurs névralgiques de la zone d'étude, soit la vallée enfouie dans la basse ville de Québec. En effet, dans ce secteur les données directes sont peu nombreuses dans la partie profonde du bassin. La plupart des forages ne permettent pas l'identification des différentes unités jusqu'au roc. Ainsi, 1 forage profond, 11 CPT, plus de 300 analyses du bruit ambiant par la méthode de Nakamura (1989), 40 profils sismiques ponctuels et 1 transect de sismique réflexion ont été réalisés et intégrés à la plateforme de modélisation gOcad® version 2.8 afin de palier à cette rareté de données en profondeur.

À l'automne 2006, un forage rotasonic avec récupération complète de près de 80 m de carottes de sédiments a été réalisé dans la partie la plus profonde du bassin. Un carottage complémentaire de l'unité marine a été complété au printemps 2007. L'installation d'un tubage de PVC a permis d'obtenir un profil par diagraphie à l'aide de diverses sondes. Par la suite, 11 sondages de type CPT ont été réalisés par l'équipe de l'INRS-ete à l'automne 2007. Une récupération partielle des unités importantes a été effectuée, puis traitée en laboratoire afin de valider la corrélation entre les paramètres de la sonde et la granulométrie (Eslami et Fellenius, 2004). Deux piézomètres ont été installés dans la majorité des puits lorsque l'épaisseur de l'aquifère le permettait, soit l'un au sommet et l'autre à la base de l'unité perméable. Au printemps 2008, les puits ont été développés et les paramètres physico-chimiques (oxygène dissous, température, conductivité électrique, pH, Eh) ont été mesurés *in-situ* à l'aide d'une sonde multi-paramètres YSI modèle 556. L'épaisseur au roc a été estimée à l'aide d'un appareil de mesure du bruit ambiant (modèle Tromino). Une corrélation entre la fréquence mesurée et l'épaisseur des dépôts est préétablie à l'aide de la formule :

$$h \approx \frac{V_s}{4f}$$

où  $h$  est l'épaisseur des dépôts meubles,  $V_s$  est la vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement et  $f$  est la fréquence mesurée. Une validation de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le milieu d'étude a été effectuée aux endroits où la profondeur au roc et la vitesse moyenne de propagation des ondes sont connues. Un transect de sismique réflexion perpendiculaire à la vallée enfouie a été effectué à l'aide du Minivibe-Landstreamer au niveau de la 4<sup>e</sup> avenue, par l'équipe de recherche de géophysique de surface de la CGC, division du Nord.

### **1.6.2 Travaux de laboratoire**

Plusieurs échantillons ont été récoltés sur le terrain durant les diverses campagnes et analysés en laboratoire. Les carottes provenant du forage profond ont été décrites puis sous-échantillonnées à tous les 30 cm, ainsi qu'aux contacts géologiques. Une sélection de 72 échantillons provenant de ce forage a été réalisée aux fins d'analyse granulométrique dans les laboratoires de l'INRS-ete. Des analyses granulométriques ont également été réalisées sur 20 échantillons provenant des différents sondages CPT, afin de valider la corrélation entre les paramètres mécaniques et hydrogéologiques et l'identification des différentes unités.

Une analyse de la composition de la microfaune a été réalisée dans les laboratoires de Jean-Pierre Guilbault afin de reconstituer les différents paléo-environnements associés aux unités non glaciaires du forage profond, soit 26 échantillons dans l'unité marine profonde récente et 24 échantillons dans l'unité marine ancienne. Des restes végétaux provenant d'unités organiques identifiées dans 29 échantillons provenant de divers sites ont également été identifiés dans les laboratoires de Pierre Richard (Université de Montréal), dans le but de déterminer les meilleurs échantillons pour fin de datation. Ainsi, 5 échantillons ont été datés dans les laboratoires de « IsoTrace Radiocarbon Laboratory » et 12 ont été datés au laboratoire de « Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory ». Trois coquilles marines ont également fait l'objet d'échantillonnage et de datation au radiocarbone et une datation par la méthode de luminescence (IRSL) a également été tentée dans le laboratoire LUX à l'Université du Québec à Montréal (UQAM) sur l'unité marine inférieure du forage profond.

### **1.6.3 Modélisation tridimensionnelle (gOcad® version 2.8)**

Il existe différentes sources de données de sous-surface. Les données directes sont associées aux marqueurs des différents forages, aux observations de surface ou aux coupes géologiques sur le terrain, tandis que les mesures indirectes proviennent généralement de levés géophysiques dont les paramètres peuvent être reliés aux propriétés physiques ou mécaniques du sol. La compilation des différentes données de forages est réalisée sur une plateforme de diffusion élaborée par la CGC à l'aide du logiciel Access ® version 2007, tandis que la modélisation géologique 3D est réalisée à l'aide du logiciel gOcad ® version 2.8 dans laboratoire de cartographie numérique et de photogramétrie (LCNP) à la Commission géologique du Canada, division Québec (CGCQ).

#### **1.6.3.1 Compilation et traitement de données**

Le type, le format et la fiabilité des données sont variables et demandent un traitement préliminaire avant leur intégration dans le logiciel de modélisation. La multitude des sources de données oblige une évaluation de la fiabilité des données et une standardisation de celles-ci (Ross



et al., 2005). Plusieurs descriptions de forages sont disponibles sur le site du Ministère de l'Environnement du Québec ([www.menv.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm](http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm)). Par contre, ces données doivent être triées puisque les sources sont diverses et peuvent s'avérer plus ou moins fiables. Il existe également d'autres alternatives afin d'obtenir des données plus fiables et plus précises, soit le Ministère des transports de Québec, la ville de Québec, la CGC et les rapports d'études réalisés par des firmes de consultants. En ce qui concerne les données géophysiques, elles doivent être converties dans un format compatible avec la plateforme de modélisation, puis réinterprétées afin de permettre leur utilisation lors de l'interpolation. Par exemple, le profil sismique a été importé dans un fichier ASCII sous forme de points (X, Y, Z, intensité du signal). Les contacts géologiques ont par la suite été redessinés. Les valeurs de bruit ambiant ont tout d'abord été converties en épaisseur puis en élévation du roc pour ensuite être importées.

### **1.6.3.2 Importation et validation des données**

Après traitement, les données de localisation de forage et la profondeur des diverses unités pourront facilement être incorporées au modèle géologique 3D à l'aide d'une approche par coupe 2D. L'utilitaire « Traverse » développé au laboratoire de cartographie numérique et de photogramétrie (LCNP) à la Commission géologique du Canada, division Québec (CGCQ) permet de projeter sur une ligne de coupe les forages situés à une certaine distance fixée arbitrairement (Boisvert, comm. pers.). Une distance de 500 m a été déterminée dans les secteurs où la densité des forages était élevée et une distance de 1 km là où les forages étaient peu nombreux. Les unités géologiques ont été interprétées et dessinées sur chacune des coupes pour être ainsi exportées et positionnées par la suite directement dans gOcad ® version 2.8. Cette méthode permet une première validation des données de forages par une validation croisée entre les forages situés à proximité l'un de l'autre. Les données géophysiques ont été validées à l'aide des forages localisés à proximité des levés. L'interprétation a été modifiée pour correspondre aux données directes déjà compilées.

### **1.6.3.3 Contraintes**

L'intégration dans le modèle 3D des différentes sources de données s'effectue par l'application de contraintes sur les surfaces limitant les unités géologiques. Pour ce faire, il existe 2 types de contraintes fréquemment utilisées, soit une contrainte souple ou stricte. Les contraintes strictes sont utilisées dans le cas où les données sont localisées avec une précision acceptable dans les 3 axes (XYZ), par exemple, les marqueurs des forages dont la fiabilité est maximale. Les contraintes souples sont utilisées lorsqu'il existe une incertitude sur la localisation de la donnée, toutefois les renseignements liés à cette donnée donnent une information supplémentaire sur la géométrie de sous-surface d'une unité. Par exemple, le profil sismique montre la topographie des unités, par contre le Z peut varier selon la vitesse de propagation des ondes. De même, l'interprétation d'une unité mince sur la carte géologique indique que la seconde unité est située à faible profondeur, ainsi une contrainte d'épaisseur flexible peut être appliquée sur l'unité sous-jacente.

### **1.6.3.4 Interpolation des surfaces**

La méthode d'interpolation utilisée est la DSI (Discrete Smooth Interpolation) qui réduit le plus possible la tangente à la pente de la surface (Mallet, 2002). Cette méthode crée une surface la plus lisse possible en respectant la hiérarchie des contraintes appliquées sur la surface. Les surfaces construites représentent la limite supérieure des différentes unités géologiques, puisque que les différentes données sur les unités correspondent aux premiers contacts avec cette unité donc la surface supérieure.

### **1.6.3.5 Construction du modèle**

Un maillage (voxe) de 250-250-2 m a été construit sur l'ensemble de la zone d'étude, tandis que la zone névralgique de la MRC de Québec a été compilée avec un maillage de 250-250-1m pour des fins de calculs ultérieurs. Un script (annexe A) a été élaboré afin de répartir les cellules associées aux unités dans les différentes régions du modèles 3D. Tout d'abord, la région correspondante à chacune des unités géologiques est construite en sélectionnant l'ensemble des cellules localisées sous la surface modélisée représentant la limite supérieure de l'unité. Par la suite, une soustraction des cellules correspondant aux unités sous-jacentes est réalisée.

### **1.6.3.6 Validation du modèle**

Une validation systématique des coupes produites par le modèle géologique 3D au 250 m a été réalisée afin de reconnaître les incongruités géologiques et de voir si les descriptifs des forages et des données géophysiques ont bien été respectés. Globalement, la géomodélisation 3D est le meilleur outil pour effectuer l'intégration et la validation des données de sous-surface à l'échelle régionale.

### **1.6.3.7 Exportation des données**

Le modèle a été exporté sous forme de fichier ASCII (XYZ, unités, âge, granulométrie) pour des fins de modélisation ultérieure dans le cadre du projet de microzonage sismique (Nastev et al., 2008). Chaque ligne du fichier correspond à une des cellules du modèle et leurs caractéristiques.

Tableau 1.3 Codification des propriétés du modèle géologique 3D de Québec

Unités géologiques	Codification numérique de l'unité	Âge*	Granulométrie**
<b>Remblai</b>			
Remblai	18	1	7
<b>Sédiments organiques</b>			
Sédiments organiques	17	1	8
<b>Sédiments alluviaux</b>			
Alluvions récents	16	1	4
Sédiments estuariens anciens	15	2	3
Alluvions de terrasses fluviales	14	2	5
Alluvions de terrasses fluviales anciennes	13	2	5
<b>Sédiments marins</b>			
Sédiments deltaïques et prodeltaïques tardifs	12	2	4
Sédiments deltaïques et prodeltaïques tardifs (grossier)	11	2	5
Sédiments littoraux et pré-littoraux	10	2	4
Sédiments intertidaux	9	2	3
Sédiments deltaïques et prodeltaïques	8	2	3
Sédiments fins d'eau profonde	7	2	2
<b>Sédiments glaciolacustres</b>			
Sédiments deltaïques et prodeltaïques	6	2	4
<b>Sédiments fluvioglaciaires</b>			
Sédiments fluvioglaciaires non différenciés	5	3	5
<b>Sédiments glaciaires récents</b>			
Till supérieur	4	3	1
<b>Sédiments interstadiare</b>			
Sédiments interstadiare non différenciés	3	3	3-5
<b>Sédiments glaciaires anciens</b>			
Till inférieur	2	3	1
<b>Socle rocheux</b>			
Roc non différencié	1	4	6

\* Âge :

1. Récent
2. Holocène
3. Pléistocène et antérieur
4. Socle rocheux

\*\* Granulométrie :

1. Diamicton
2. Argile
3. Silt
4. Sable
5. Gravier
6. Roc
7. Remblai
8. Organique

## **Chapitre 2**

### **Géologie et stratigraphie du Quaternaire de la région de Québec**

Les sédiments quaternaires dans le secteur de Québec sont particulièrement diversifiés. On y observe une succession quasi complète de sédiments glaciaires, fluvioglaciaires, glaciolacustres, glaciomarins, marins, estuariens et fluviaux. Cette succession de sédiments ainsi que leur architecture stratigraphique résultent d'une suite complexe d'épisodes d'érosion et de sédimentation qui ont marqué la fin de la glaciation, la déglaciation, puis l'incursion marine qui l'a suivie, puis enfin l'exondation des terrains et l'encaissement du réseau fluvial qu'a amenés le rebond isostatique postglaciaire.

Les différentes hypothèses sur la déglaciation du Québec méridional ont évolué au fil du temps. De nouvelles interprétations, notamment celle de la formation d'un courant glaciaire dans la vallée du Saint-Laurent (Parent et Occhietti, 1999), ont permis d'expliquer certains phénomènes observés depuis plusieurs années, tels que les stries orientées vers le nord reconnues sur la rive sud de Québec (Lamarche, 1971; Chauvin et al., 1985) et ce jusqu'en Gaspésie (David et Leblond, 1985). La formation de ce courant glaciaire a en effet complètement perturbé la dynamique glaciaire aux abords de la vallée du Saint-Laurent. Ainsi ce serait ce courant glaciaire, et non pas une baie de vîlage, qui serait responsable de l'inversion d'écoulement glaciaire qui a marqué la déglaciation des Appalaches du Québec méridional (Parent et Occhietti, 1999). L'intégration de ces nouvelles données paléoenvironnementales nécessite une réévaluation du contexte et de l'origine de plusieurs des sédiments quaternaires dans le secteur d'étude, ainsi que la réédition de la carte des formations superficielles.

#### **2.1 Carte géologique des formations superficielles**

Outre la nécessaire familiarisation avec la région d'étude, la première campagne de terrain réalisée à l'été 2006 a mené à la réinterprétation de certains dépôts de surface, laquelle a été intégrée à la nouvelle carte géologique des formations superficielles (cf. carte : Lamarche et al., 2010). Ainsi le nouveau cadre tardiglaciaire a amené à identifier plusieurs grandes traînées moraines orientées vers l'est et le nord-est en bordure des hautes terres laurentiennes, ainsi qu'à y réinterpréter le sens d'écoulement des eskers (Figure 2.1). Plusieurs traînées morainiques de ce groupe ont pu être cartographiées en sous-surface lors de la modélisation 3D.

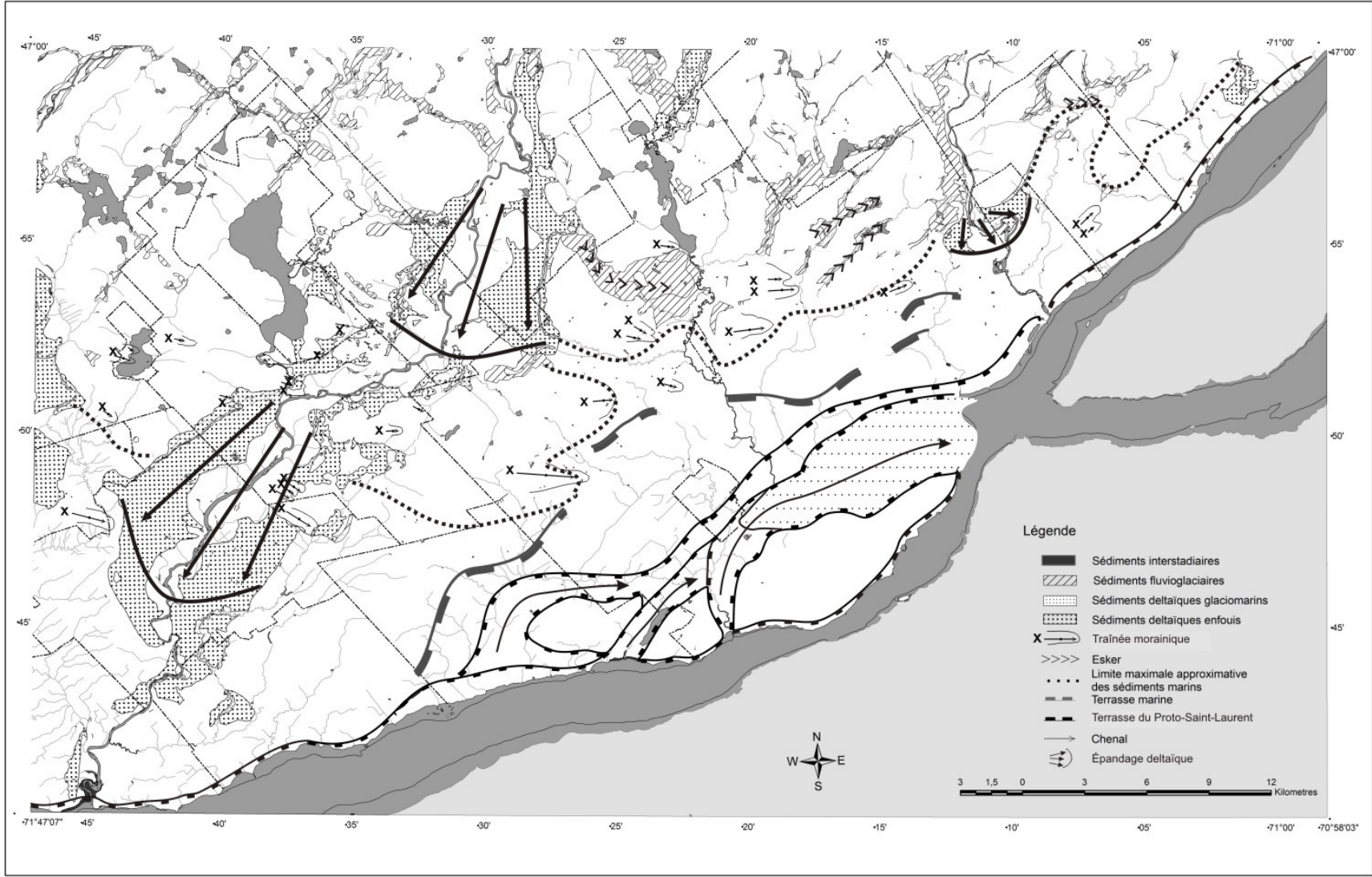


Figure 2.1 Principaux dépôts et formes quaternaires de la rive nord de la région de Québec

Dans un autre registre, une grande partie de la dépression Cap-Rouge/Limoilou est recouverte d'une couche presque continue de silts estuariens, âgés de 5000 à 6000 ans BP et corrélatifs de la Transgression laurentienne (Dionne, 2001). Ces quelques mètres de sédiments estuariens qui recouvrent un vaste delta enfoui sous la basse ville de Québec sont justement ce qui avait permis à ce dernier de passer inaperçu lors des levés antérieurs. Ces matériaux silto-argileux contiennent d'abondants fragments de plantes aquatiques ripariennes, ce qui est incompatible avec l'origine marine (Ma) indiquée sur la précédente carte des formations superficielles (Bolduc et al., 2003). Ainsi une nouvelle unité estuarienne (Ae) a été identifiée dans ce secteur en plus des alluvions de terrasses anciennes (Ax) représentant les hauts niveaux associés au Proto-Saint-Laurent. Dans le secteur de Québec, la limite entre les dépôts marins et ceux du Proto-Saint-Laurent a été établie à 65 m, altitude approximative à laquelle s'amorce la chenalisation du bras de mer séparant la Mer de Goldthwait et le Lac à *Lampsilis*.

D'autres amendements sont de nature beaucoup plus locale. Par exemple au sud de Valcartier, une nouvelle unité fluvioglaciaire (Gx), qui avait précédemment été cartographiée à titre de sédiments marins littoraux (Mb), a été identifiée. La présence de nouvelles coupes sur le chemin Montolieu (71°28'29'', 46°51'35''; 311 297E, 5 192 510N; UTM NAD 83 zone 19) montrant des faciès sablo-graveleux grossiers comportant des blocs granoclassés a permis de reconnaître cette unité. Cette réinterprétation modifie sensiblement le contexte hydrostratigraphique local. Une nouvelle interprétation des photos aériennes dans le cadre de cette thèse a permis de compléter la couverture cartographique régionale réalisée préalablement par Bolduc et al. (2003) et par F. Hardy (dans Martel et al., 2000). Une grande zone de till d'ablation (Tf) a également été identifiée au nord et au sud de la vallée de la rivière Nelson dans ce secteur. En périphérie du lac St-Charles, des sédiments silteux plutôt massifs, identifiés précédemment à titre de sédiments marins d'eau profonde (Ma), sont réinterprétés comme étant plutôt par des sédiments marins intertidaux (Mi), puisqu'ils ont été déposés dans une baie abritée peu profonde et adjacente au delta glaciomarin de la rivière Jacques-Cartier.

## 2.2 Stratigraphie

La réalisation d'un modèle stratigraphique en milieu urbain s'avère particulièrement difficile, puisque les dépôts meubles sont dans la majorité des cas inaccessibles directement. Ainsi, la plupart des travaux ont été réalisés dans la basse ville dans le but de mieux caractériser les sédiments estuariens et deltaïques tardifs nouvellement identifiés. Malgré l'accès limité par la propriété privée et les infrastructures urbaines, 24 sites d'intérêt ont pu être visités et décrits afin d'établir une stratigraphie plus complète du secteur d'étude, soit seulement 5 coupes naturelles localisées en périphérie de la zone urbaine, 7 excavations dont 6 réalisées pour la construction de bassins de rétention des eaux pluviales et l'autre pour celle d'un nouveau développement résidentiel, ainsi que 12 forages effectués dans le cadre de cette thèse. Leur localisation est présentée à la figure 2.2 et au tableau 2.1. Chaque site montre une spécificité stratigraphique de la zone d'étude. La vaste superficie couverte par cette thèse recoupe plusieurs unités, elles-mêmes caractérisées par des variations latérales de faciès complexes. Ainsi, le choix des sites de forage a été déterminé dans le but de traverser le plus d'unités possible. Les levés ont également permis d'accéder à 2 sites montrant des sédiments anciens (Q) : une séquence fluvioglaciaire; et un faciès deltaïque marin déformé. Une attention particulière a été accordée à la séquence deltaïque et estuarienne de la basse ville où elle a pu être caractérisée sur l'ensemble de sa superficie à l'aide des différents forages et excavations. Finalement, 2 sites montrent

Tableau 2.1 Localisation des sites d'intérêts

Sites d'intérêt	Localisation			Commentaires
	X (m)	Y (m)	Z (m)	
Sablère de Saint-Augustin (DL20.5)	315 662	5 178 733	50	Gravière, sablière
Rivière Beauport (DL18.1)	332 393	5 191 616	25	Coupe géologique naturelle
Gravières de Valcartier (DL16.3)	317 707	5 197 326	190	Gravière, sablière
Sablères de la rivière Montmorency (DL7.5)	334 553	5 198 725	160	Gravière, sablière
Cap-Rouge (DL20.2)	321 309	5 182 214	13	Développement résidentiel
Bassin de rétention du IGA (DL19.3)	327 715	5 186 444	5	Excavation pour les bassins de rétention
Bassin de rétention de l'hôpital Sacré-Cœur (DL3.5)	328 432	5 186 838	5	Excavation pour les bassins de rétention
Bassin de rétention de Parc Victoria (DL20.1)	329 160	5 187 133	5	Excavation pour les bassins de rétention
Bassin de rétention du Parc Cartier-Bréboeuf (DL19.1)	329 440	5 188 168	5	Excavation pour les bassins de rétention
Bassin de rétention du Colisée (DL18.3)	328 772	5 189 027	13	Excavation pour les bassins de rétention
Bassin de rétention de l'usine de traitement des eaux (DL19.2)	330 675	5 187 692	5	Excavation pour les bassins de rétention
CPT FL07-02	320 812	5 183 948	16	Piézocône
CPT FL07-03	323 062	5 184 971	15	Piézocône
CPT FL07-04	322 477	5 185 930	16	Piézocône
CPT FL07-06	325 197	5 185 981	14	Piézocône
CPT FL07-09	326 346	5 186 529	12	Piézocône
CPT FL07-13	329 279	5 187 507	6	Piézocône
CPT FL07-15	327 900	5 188 100	11	Piézocône
CPT FL07-17	330 819	5 187 756	6	Piézocône
CPT FL07-19	330 150	5 188 875	11	Piézocône
CPT FL07-24	321 116	5 188 909	63	Piézocône
CPT FL07-25	329 800	5 189 446	14	Piézocône
Parc Chauveau (DL12.3)	321 081	5 189 339	63	Coupe géologique naturelle
Forages FL06-01 et FL07-01	330 868	5 187 782	6	Forage rotasonic
Levé de sismique réflexion	De 330 692 À 328 951	De 5 187 848 À 5 190 509	-	Levé réalisé le long de la 4 <sup>e</sup> avenue

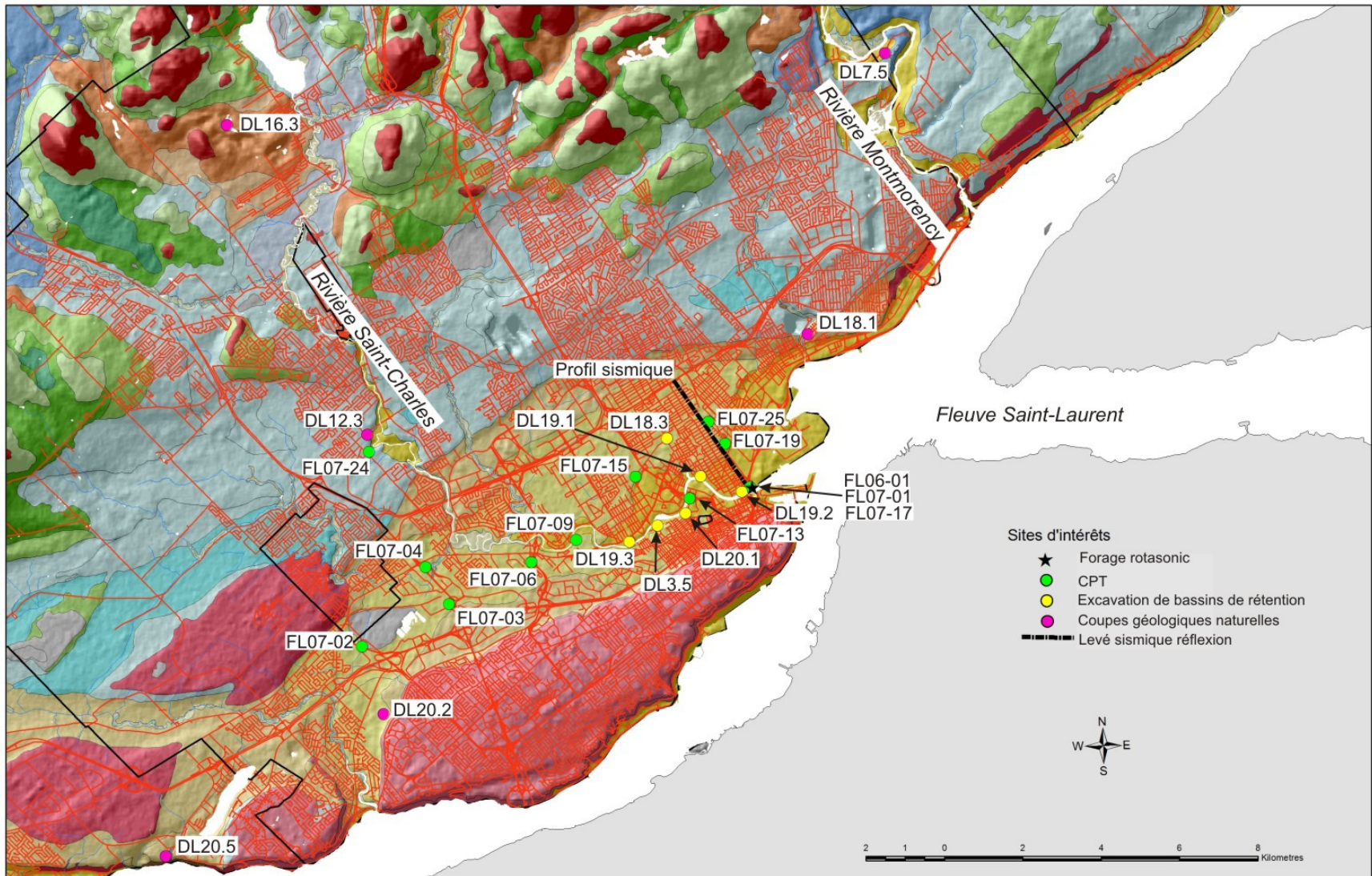


Figure 2.2 Localisation des différents sites d'intérêt



l'entière séquence stratigraphique surmontant le roc, dont l'un a permis d'interpréter le profil sismique réalisé le long de la 4<sup>e</sup> avenue.

### 2.2.1 Site de la sablière de Saint-Augustin (DL20.5)

Le site de la sablière de St-Augustin a été très sommairement décrit par LaSalle (dans Lamothe, 1987) et a été revisité dans le cadre de cette thèse. Le site n'étant plus en exploitation et servant présentement à l'enfouissement de déchets solides, seule la portion sommitale demeure visible. Il est possible d'y observer l'unité graveleuse à blocs décrite par Lasalle (dans Lamothe, 1987), de même que les sables lités sous jacents (Figure 2.3). Toutefois, les dépôts diamictiques n'ont pas pu être observés. Localisé à une élévation de 50 m au sud-ouest du Lac Saint-Augustin, ce site représente des alluvions de terrasse ancienne (Ax) recouvrant des dépôts antérieurs à la dernière glaciation (Q). On y trouve des blocs métriques jointifs avec une matrice sablo-graveleuse grossière en contact érosif dans un paléo-chenal et surmontant des sables moyens à graviers lités.



Figure 2.3 Unité sommitale chenalisée graveleuse à blocs sur des sables moyens à grossiers lités de la sablière St-Augustin (DL20.5)

### 2.2.2 Site de la Rivière Beauport (DL18.1)

Les différentes coupes le long de la rivière Beauport ont également fait l'objet d'une étude par Lasalle et al. (1972). On y trouve à la base des argiles litées déformées (Figure 2.4A); celles-ci passent latéralement à des silts sableux lités (Figure 2.4B) indiquant la présence d'un lac proglaciaire dans la vallée lors de l'englaciation. Une terrasse d'érosion récente marque de façon générale le contact entre ces unités anciennes et le till sus-jacent. Un pavage de blocs est parfois observé le long des sentiers du parc au niveau de la terrasse. Au sommet, une unité sableuse contenant localement des coquilles de *Hiatella artica* en thanatocénose (Figure 2.4C) est observée. En amont, la rivière coule directement sur le roc de la plate forme du Saint-Laurent et forme une chute.

### 2.2.3 Site des gravières de Valcartier (DL16.3)

Le site des gravières de Valcartier (Figure 2.5) représente un complexe fluvioglaciaire dont le cœur est constitué de graviers à blocs jointifs avec matrice de sable grossier (Gx). Il s'agit d'un esker partiellement recouvert par un épandage sous-aquatique (Gs) plus sableux avec la présence de rides de courant. L'écoulement s'effectuait vers le sud-est. Ce complexe repose sur le roc précambrien qui affleure de part et d'autre de l'exploitation.

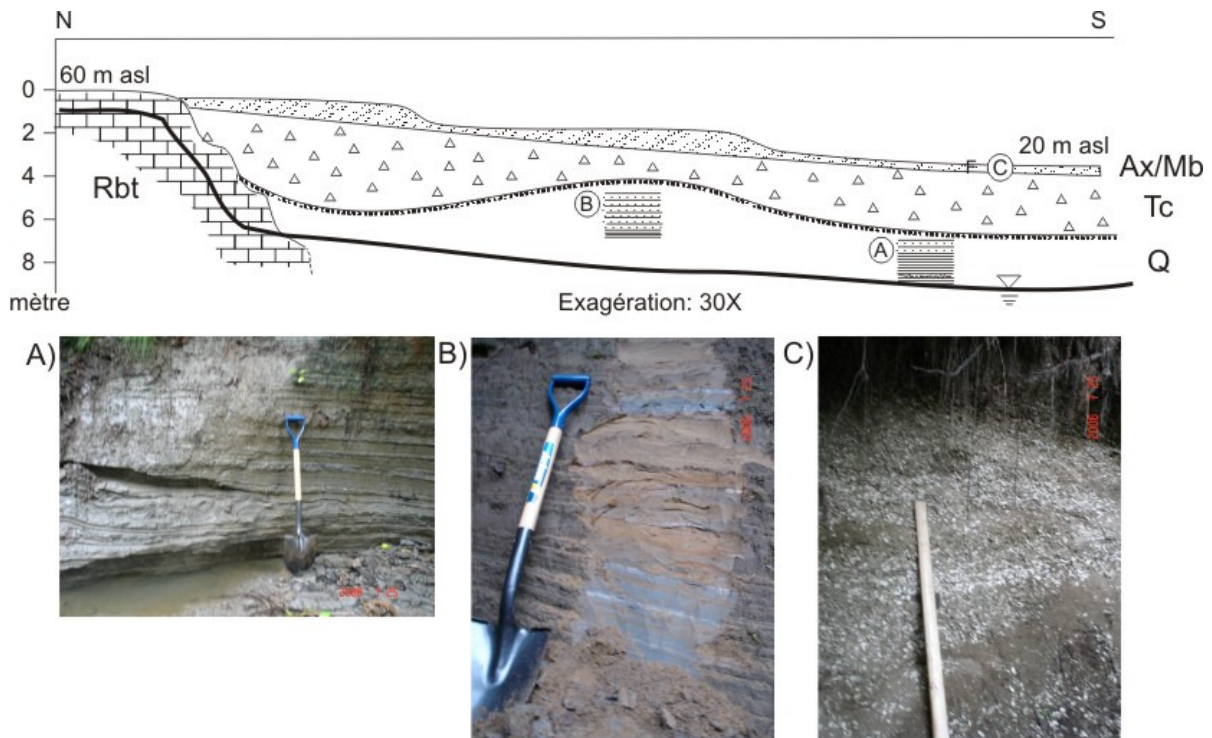


Figure 2.4 Schéma simplifié de la stratigraphie dans la vallée de la rivière Beauport. A) argile compacte déformée surmontée de till et donc associée aux formations quaternaires anciennes (Q), B) Rythmites silto-argileuses associées aux formations quaternaires anciennes (Q), C) Thanatocénose de *Hiatella artica* au sein de sédiments littoraux et pré-littoraux (Mb).



Figure 2.5 Complexe fluvioglaciaire au nord de Valcartier (DL16.3)

#### 2.2.4 Site des sablières de la rivière Montmorency (DL7.5)

Le delta de la rivière Montmorency est de moindre importance en superficie que le delta de la rivière Jacques-Cartier, ce qui reflète l'importance relative des deux rivières ainsi qu'un contexte distinct de déglaciation. En effet, la présence d'un delta perché plus en amont (LGd) signale la présence d'un lac barré dans la vallée de la Montmorency, lequel a perduré tardivement lors de la déglaciation, ce qui limité les apports de sédiments sablo-graveleux au delta marin en aval. Localisé à une élévation entre 200 et 170 m, ce delta (Figure 2.6) montre dans sa partie nord des failles inverses à fort pendage, indices d'une mise en place sur un lambeau ou plancher de glace enfouie (McDonald et Shilts, 1975). Une grande partie du delta de la Montmorency est actuellement en exploitation. La totalité des coupes observées montrent une alternance de lits obliques sableux à graveleux. Au sommet, des chenaux d'orientations diverses (du sud-ouest au sud-est) recoupent en discordance les lits frontaux. En aval, les faciès deltaïques deviennent plus fins et progradent sur des faciès marins francs (Ma). Dans sa portion distale, le delta repose sur le roc des Basses-Terres du Saint-Laurent.



Figure 2.6 Déformations glaciectoniques passives du delta de la Montmorency (DL7.5)

### 2.2.5 Site du nouveau développement résidentiel de Cap-Rouge (DL20.2)

À l'été 2006, un nouveau développement résidentiel s'effectuait au pied de la falaise à l'est de la rivière Cap-rouge dans l'arrondissement de Cap-Rouge. Situé à une élévation de 18 m asl ( $46^{\circ}45,76'$ ,  $71^{\circ}20,51'$ ; 321 100 N, 5 181 720 W; UTM NAD 83 zone 19), la superposition des unités stratigraphiques montre l'influence du système d'érosion-sédimentation du Proto-Saint-Laurent. Ainsi, il est possible d'y observer divers chenaux enfouis comblés par des silts intertidaux et des sables massifs (Figure 2.7). Le till y est remanié par les vagues et les courants et est localement surmonté par un pavage de blocs. Des dépôts de versant, caractérisés par des sables et graviers lités avec un contact érosif à la base, sont observés au pied de la falaise de la haute ville.

### 2.2.6 Sites des bassins de rétention d'eau de la ville de Québec

Les dépôts associés à la phase finale d'exondation de la vallée dans la basse ville de Québec ont pu être observés dans les diverses coupes et excavations réalisées lors de la construction de bassins de rétention par la ville. 6 excavations ont pu ainsi être décrites dans le secteur aval de la rivière Saint-Charles. Les différentes coupes schématisées sont présentées d'ouest en est dans les figures suivantes. Les coupes du IGA (DL19.3; figure 2.8), de l'hôpital Sacré-Cœur (DL3.5; figure 2.9) et du Parc

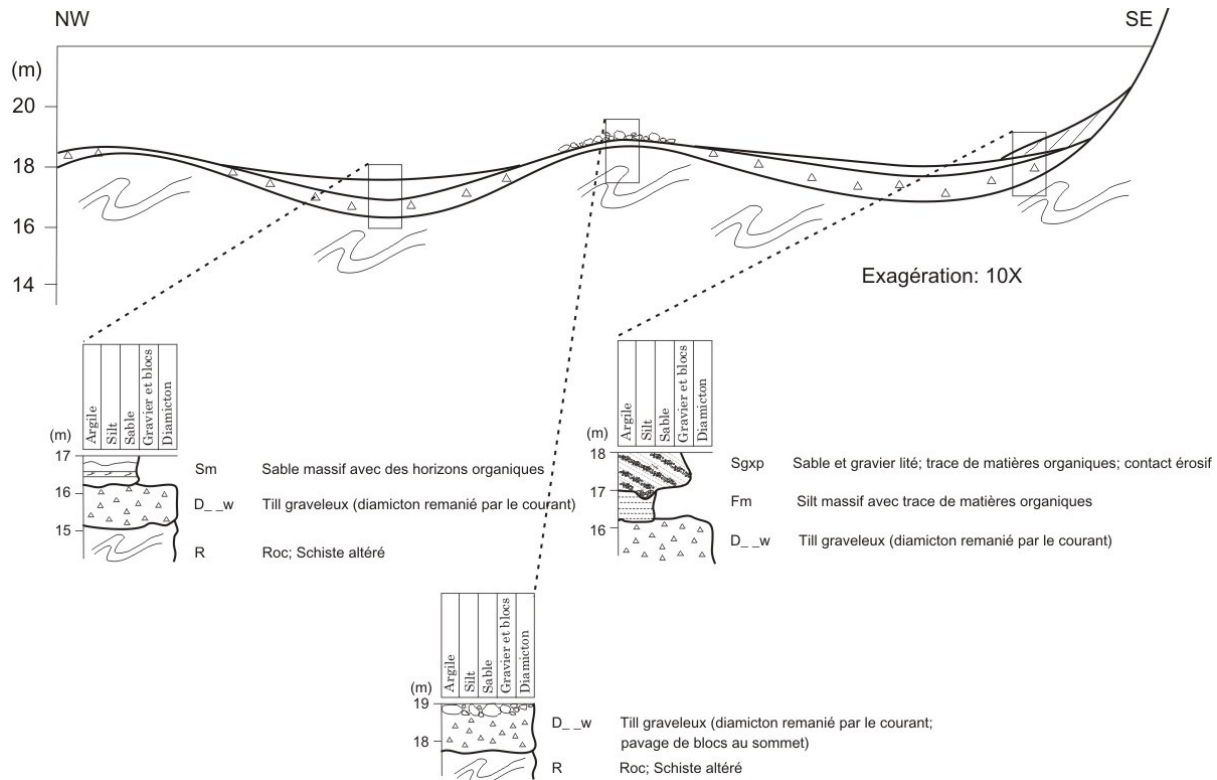


Figure 2.7 Coupe schématique du site du nouveau développement de l'arrondissement de Cap-Rouge (DL20.2)

Victoria (DL20.1A, DL20.1B; figures 2.10 et 2.11) sont localisées à l'extérieur des limites de l'unité deltaïque tardive. La coupe du IGA (DL19.3) montre 2 unités de graviers jointifs grossiers à blocs, avec un contact basal érosif. Un morceau de bois récolté à ce contact a pu être daté (voir chapitre 4). Les coupes de l'hôpital Sacré-Cœur (DL3.5) et du Parc Victoria (DL20.1A et DL20.1B) reposent à la base sur le roc des Basses-Terres du Saint-Laurent. Un till a été identifié à leur base. Toutefois, le contact avec l'unité sus-jacente n'a pas pu être observé au Parc Victoria (DL20.1 A et DL20.1B) à cause de matériel éboulé. Une unité silto-sableuse recouvre le till au site de l'hôpital Sacré-Cœur (DL3.5) et est surmontée par du matériel remblayé. La paroi sud de l'excavation du Parc Victoria (DL20.1B) présente la même succession stratigraphique. La paroi nord (DL20.1A), quant à elle, montre une unité de sables et de graviers grossiers lités à granulométrie décroissante, surmontée par des sables moyens à fins avec des rides de courants et des lits obliques. Au sommet, on observe une unité de matériel remanié. Les coupes du Parc Cartier-Brébeuf (DL19.1; figure 2.12), du Colisée (DL18.3; figure 2.13) et de l'usine de traitement (DL19.2; figure 2.14) comportent une unité basale de sables deltaïques à stratification oblique et localement fossilifères. Le contact entre l'unité sableuse deltaïque et l'unité silteuse estuarienne sus-jacente est marqué par un lit graveleux érosif avec clastes jointifs. De la matière organique est observée dans les silts supérieurs et ce, dans toutes les coupes. Au Colisée (DL18.3), le sommet de la coupe est constitué de matériaux de remblai, tandis que le sommet de la coupe de l'usine de traitement (DL19.2) est constitué d'une unité sableuse récente avec des rides de courant et des lits obliques. Un tesson de verre, retrouvé dans un lit organique à la base de l'unité sableuse récente, démontre qu'il s'agit d'alluvions très récentes.

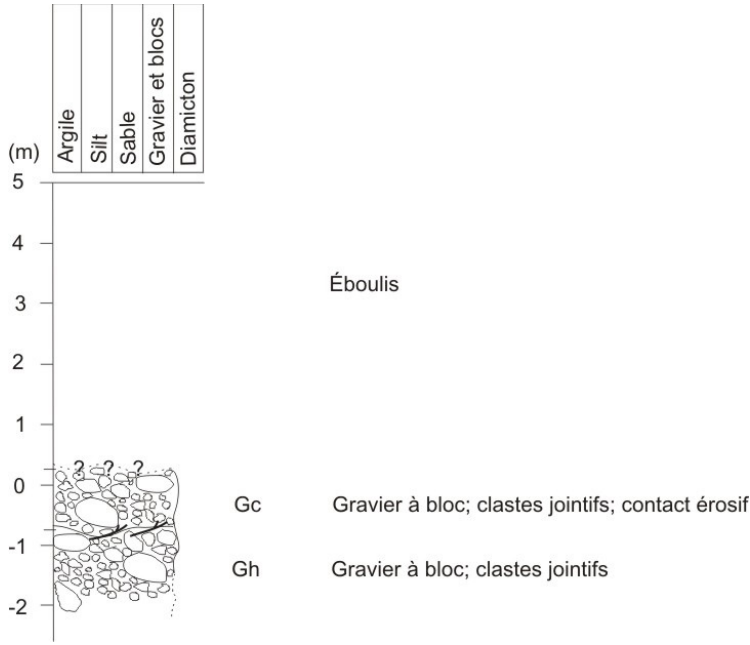


Figure 2.8 Coupe schématisée du bassin de rétention du IGA (DL19.3)

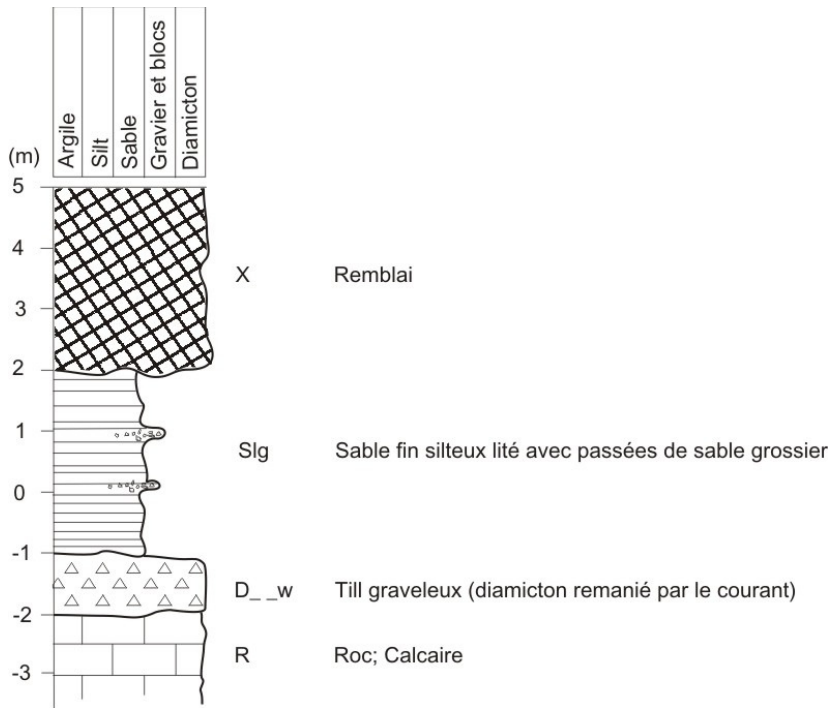


Figure 2.9 Coupe schématisée du bassin de rétention de l'hôpital Sacré-Cœur (DL3.5)

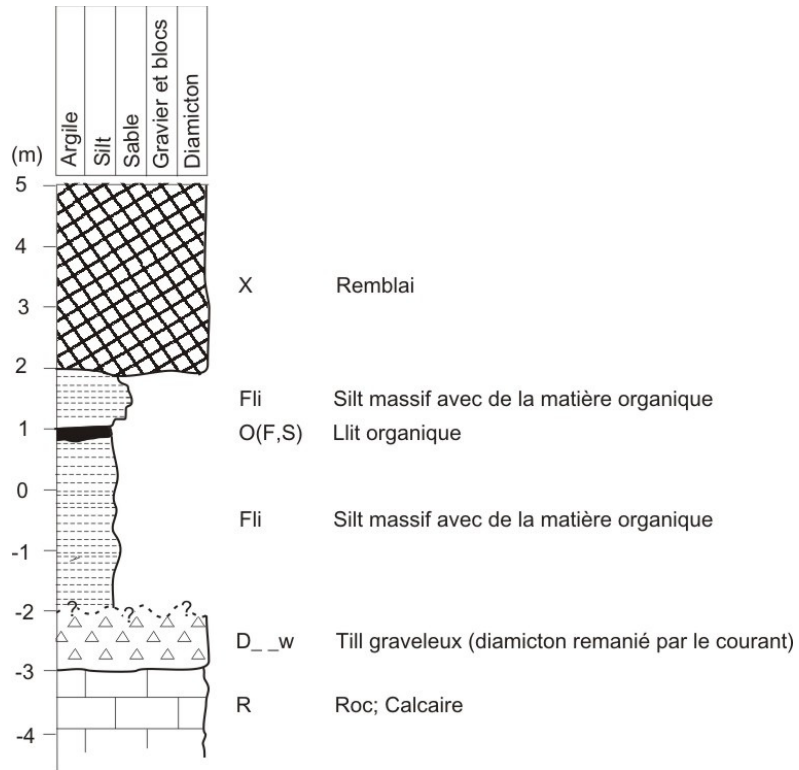


Figure 2.10 Coupe schématisée du bassin de rétention du Parc Victoria, paroi nord (DL20.1A)

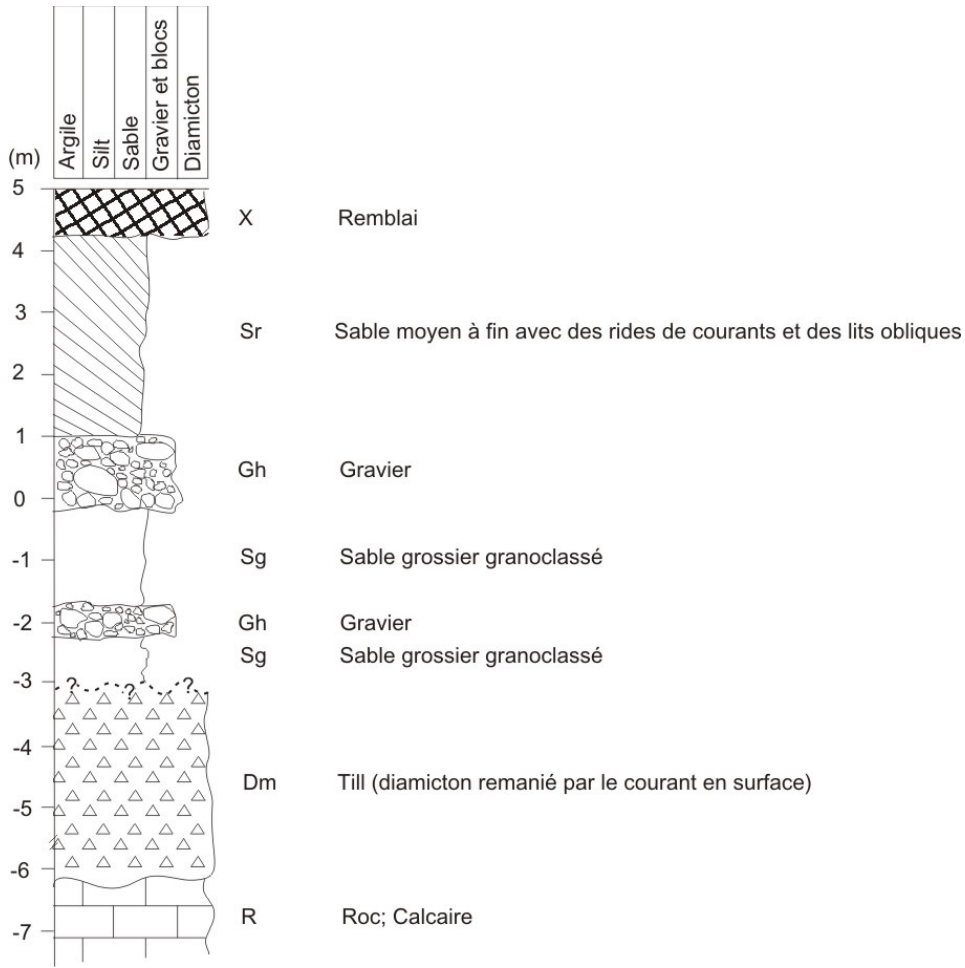


Figure 2.11 Coupe schématisée du bassin de rétention du Parc Victoria, paroi sud (DL20.1B)

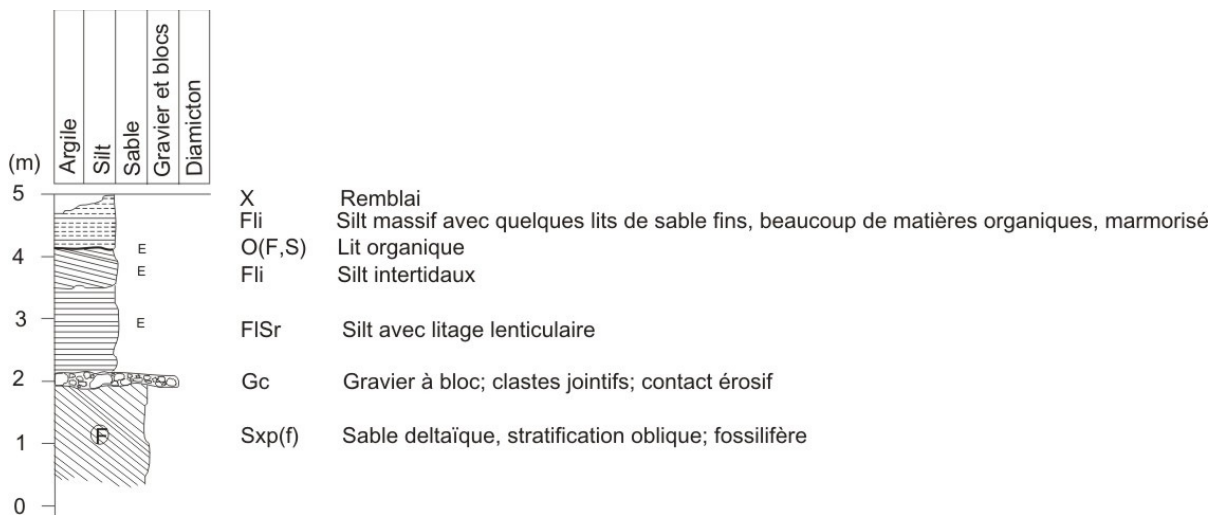


Figure 2.12 Coupe schématisée du bassin de rétention du Parc Cartier-Brébeuf (DL19.1)



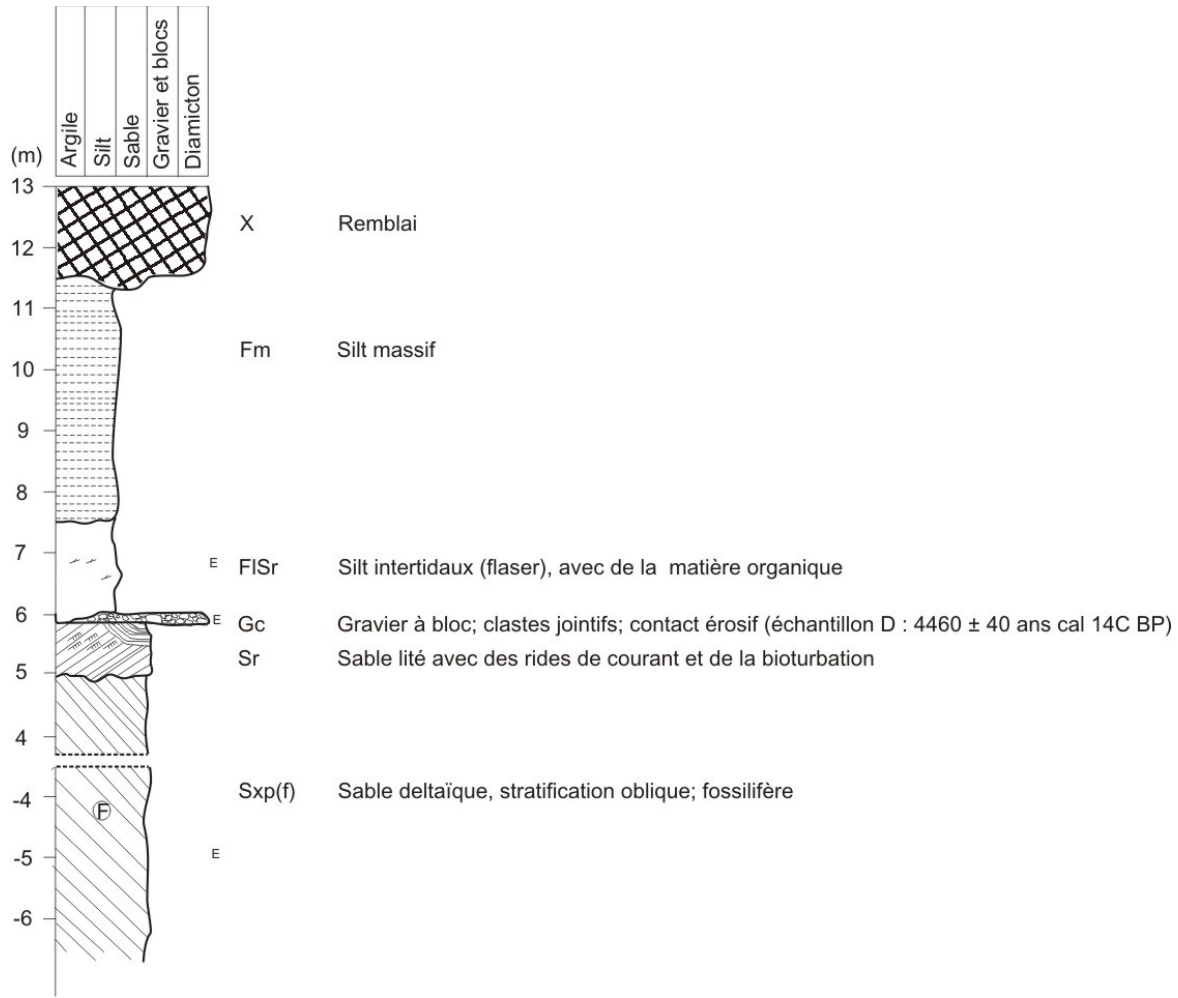


Figure 2.13 Coupe schématisée du bassin de rétention du Colisée (DL18.3)

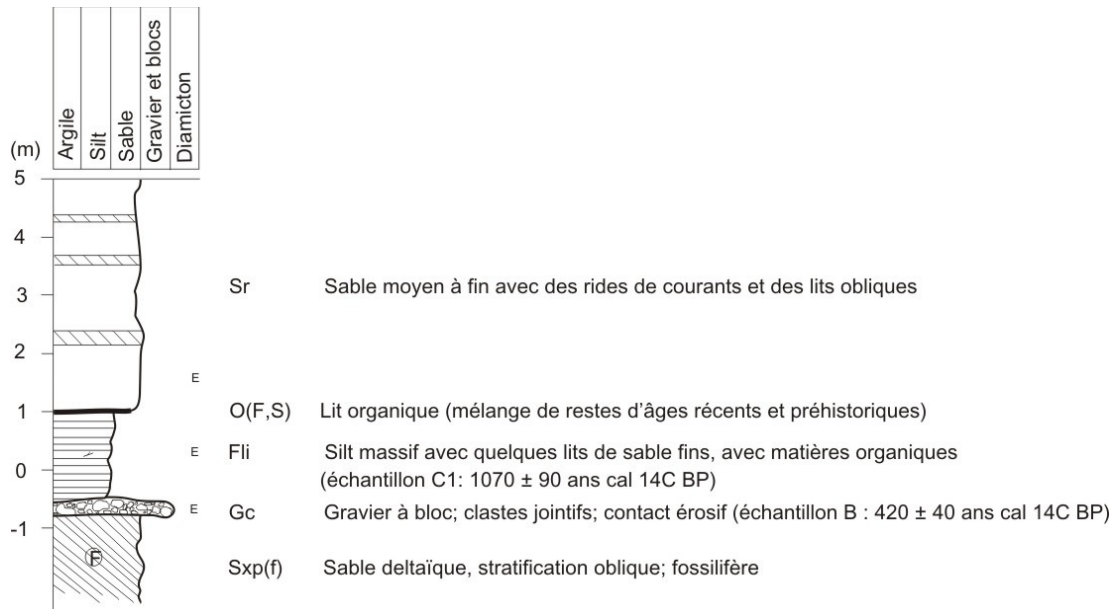


Figure 2.14 Coupe schématisée du bassin de rétention de l'usine de traitement (DL19.2)

#### **2.4.7 Piézocônes (CPT : Cone Penetrometer Test)**

Réalisés dans le cadre d'une étude préliminaire de caractérisation hydrogéologique de l'unité deltaïque de la basse ville de Québec, 11 sondages CPT sont présentés dans les figures qui suivent (figures 2.15 à 2.25). Il est à noter que le site FL07-24 (figure 2.24) a été positionné à l'extérieur de la zone d'intérêt afin de caractériser l'unité glaciaire localisée à une trop grande profondeur dans la basse ville. Les 10 sondages de la basse ville montrent une unité silteuse sommitale dont l'épaisseur varie de 2 à 10 mètres et qui surmonte une unité sableuse pouvant atteindre une épaisseur de plus de 30 mètres. Au sondage FL07-13 (figure 2.20), l'unité sableuse n'est cependant pas représentée en raison d'un refus au contact de l'unité graveleuse sous-jacente au silt sommital, tandis que les sondages FL07-15 (figure 2.21) et FL07-25 (figure 2.25) montrent également une unité sableuse sommitale associée aux alluvions de terrasses anciennes qui y surmontent les silts intertidaux. Les sondages FL07-13 (figure 2.20) et FL07-17 (figure 2.22) ont été préalablement forés sur les premiers mètres afin de ne pas endommager la pointe du piézocône, puisque cette portion du forage est constituée de matériaux de remblai. Le sondage FL07-24 (figure 2.24) est localisé plus au nord de la basse ville au sommet de la coupe du parc Chauveau. Sa stratigraphie montre une unité de sédiments fins à la base surmontée par des sables lités. Au sommet, une unité silteuse est également présente.

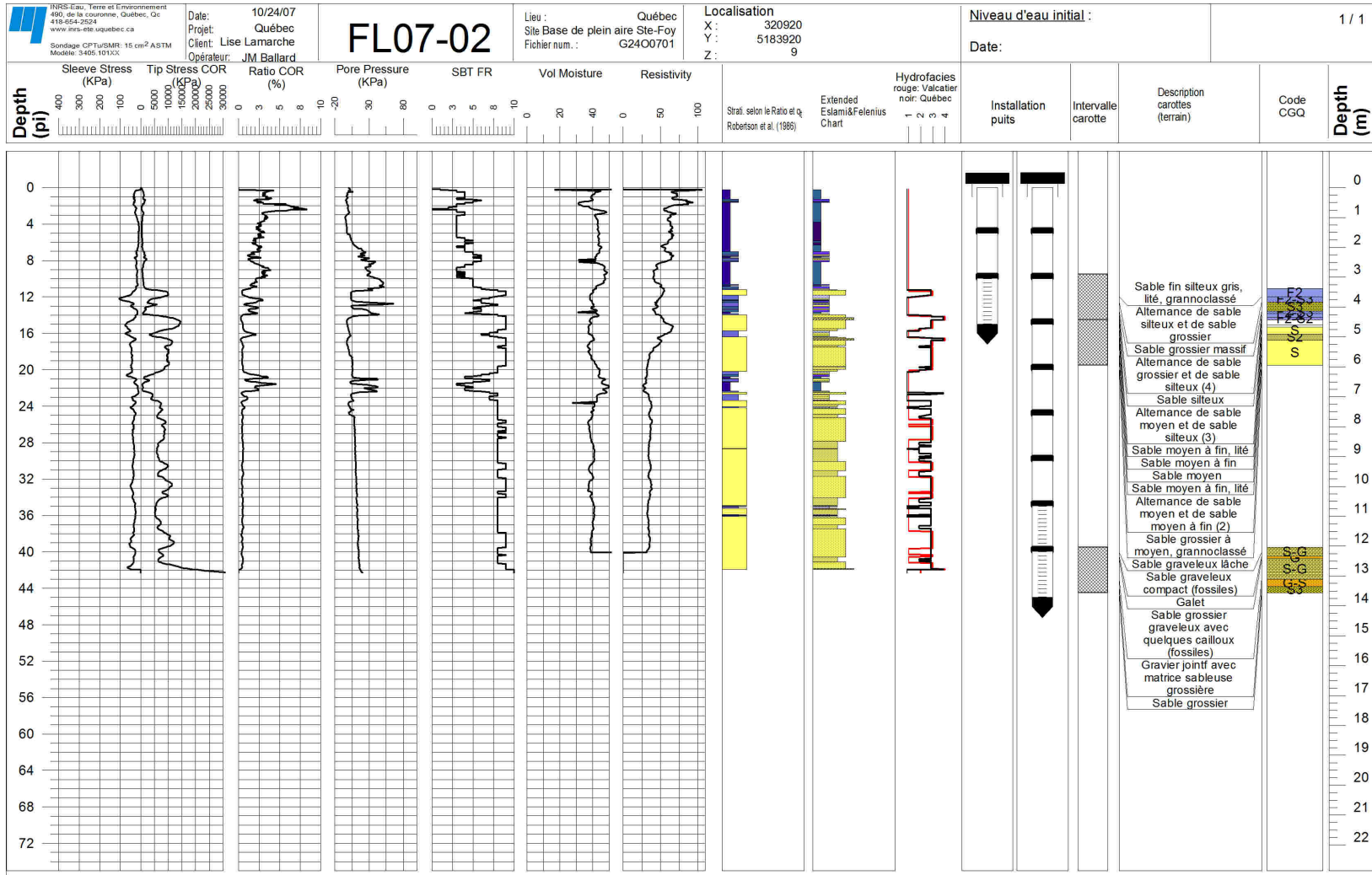


Figure 2.15 Sondage au piézocône (CPT) de la base de plein air de Ste-Foy (FL07-02)

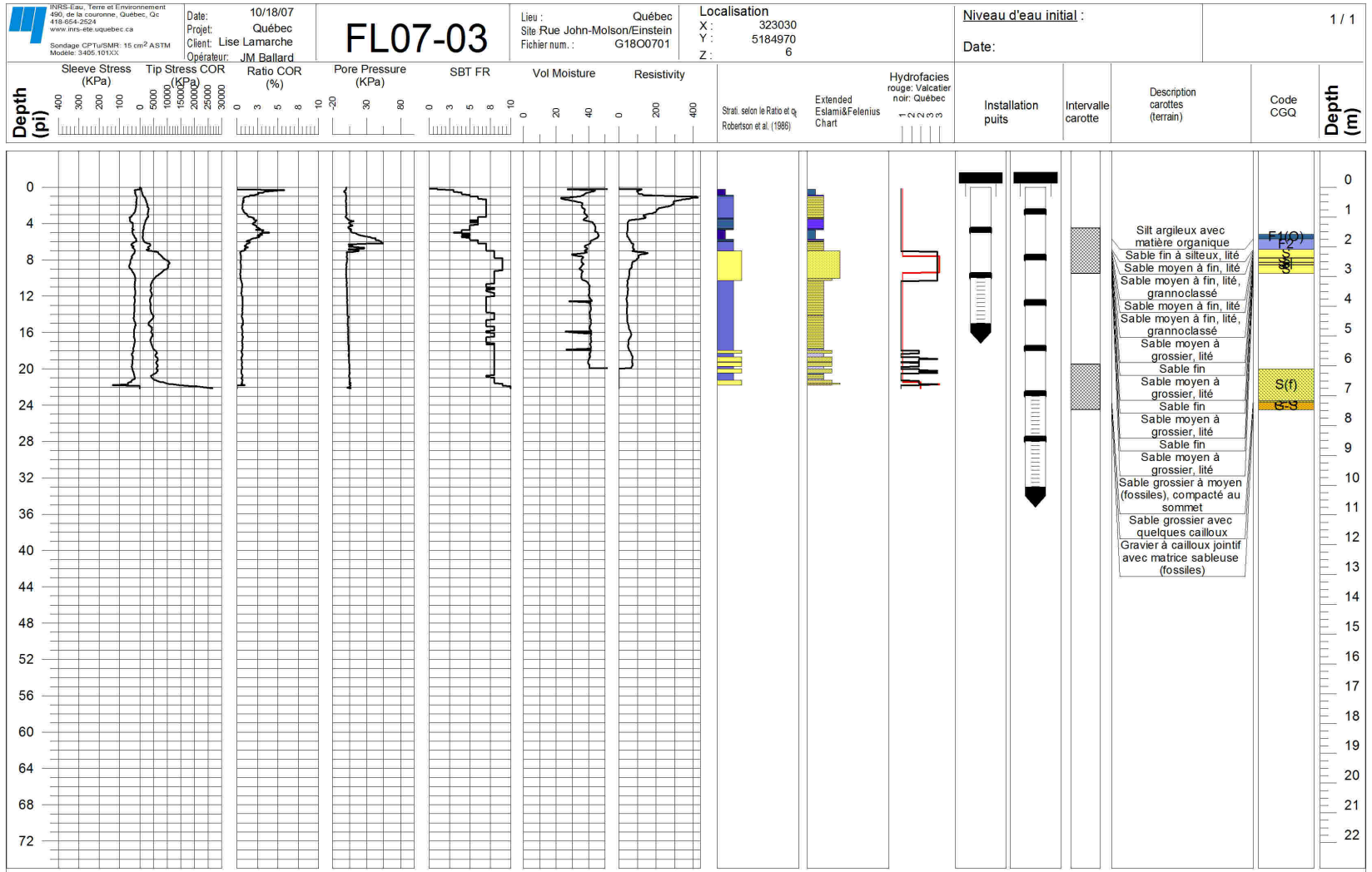


Figure 2.16 Sondage au piézocône (CPT) au coin des rues John-Molson et Einstein (FL07-03)



Figure 2.17 Sondage au piézocône (CPT) au site de Aeterna (FL07-04)

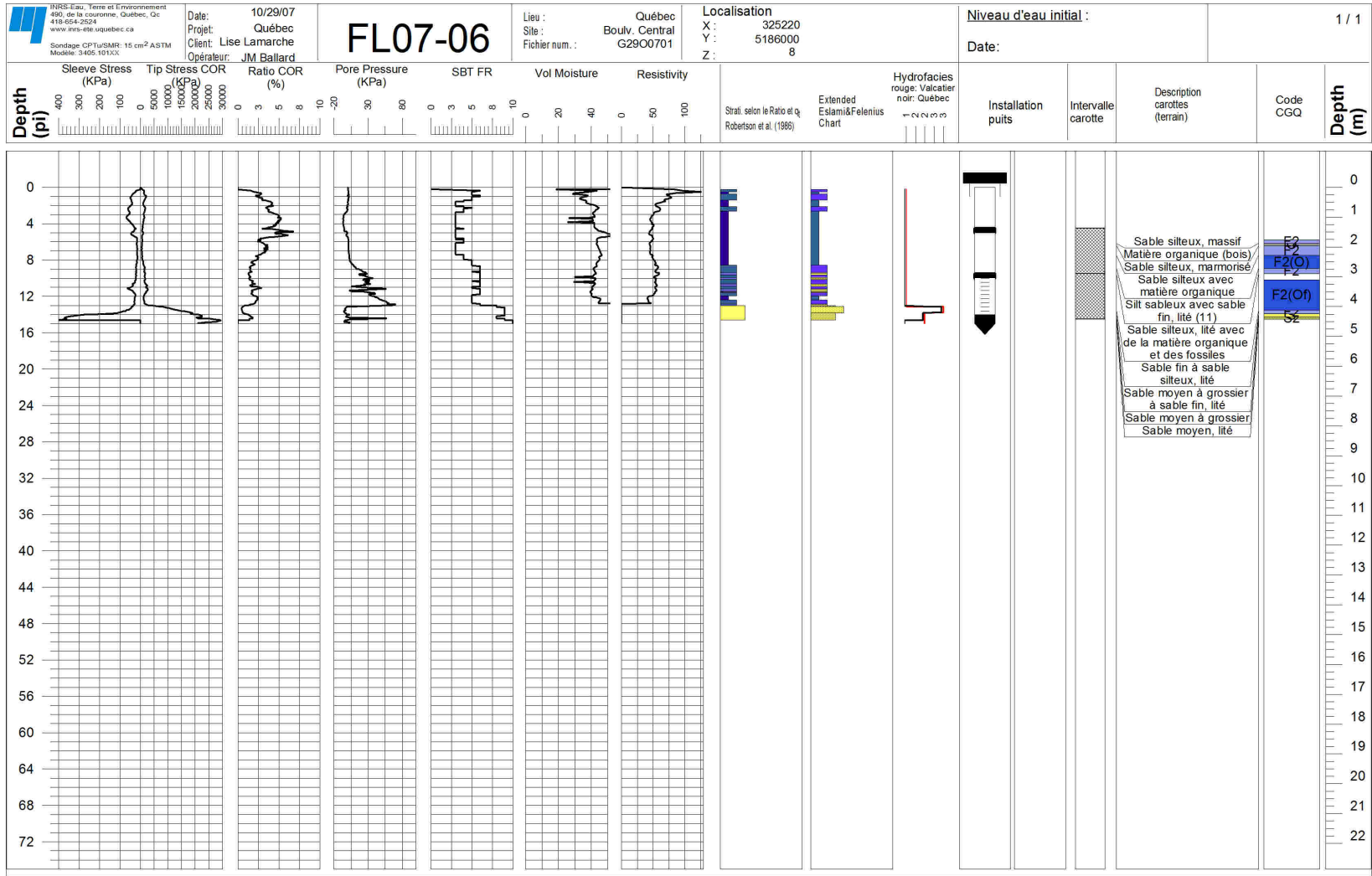


Figure 2.18 Sondage au piézocône (CPT) sur le Boulevard Central (FL07-06)

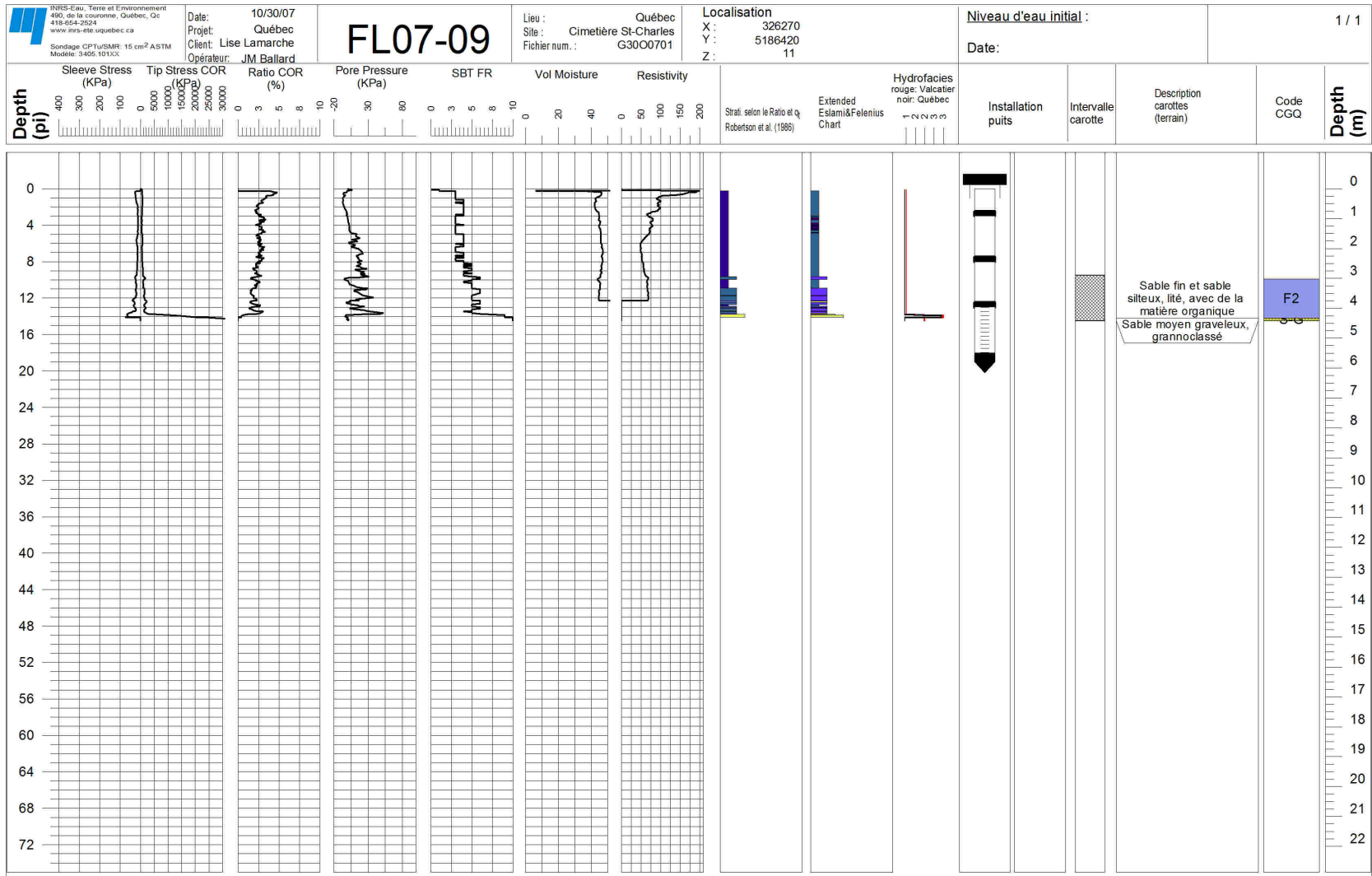


Figure 2.19 Sondage au piézocône (CPT) au cimetière Saint-Charles (FL07-09)

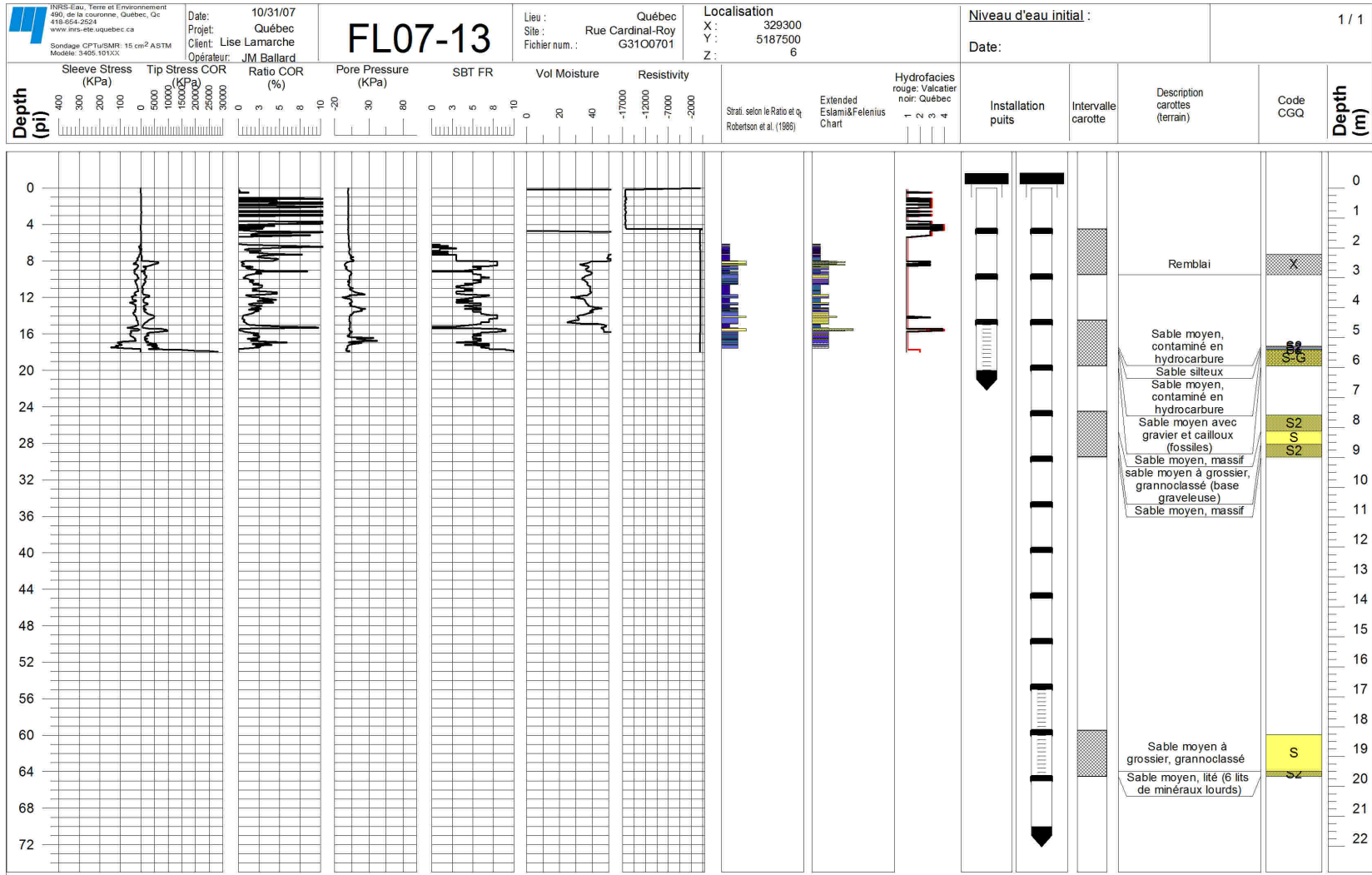


Figure 2.20 Sondage au piézocône (CPT) sur la rue Cardinal-Roy (FL07-13)



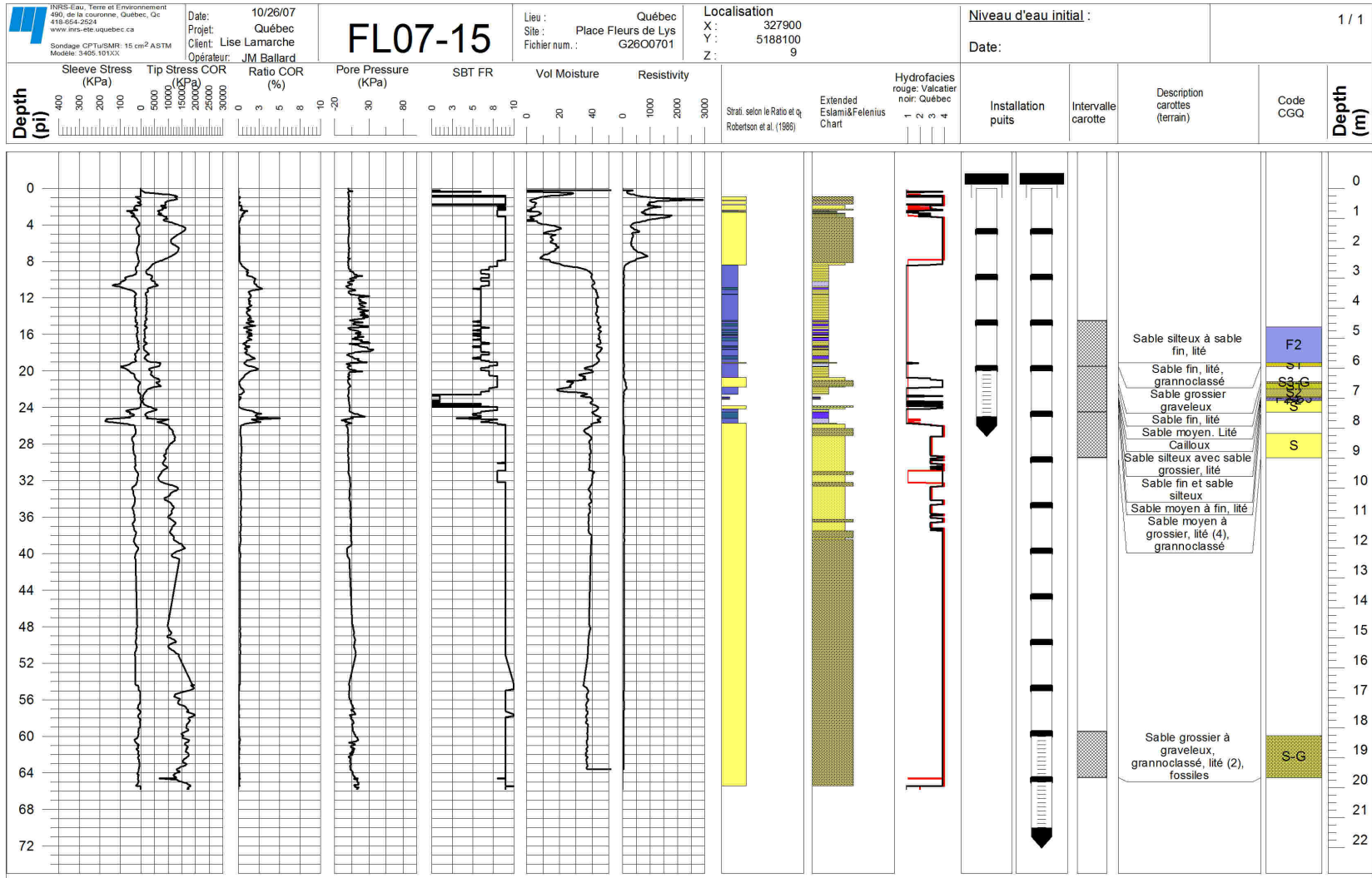


Figure 2.21 Sondage au piézocône (CPT) à la Place Fleurs de Lys (FL07-15)

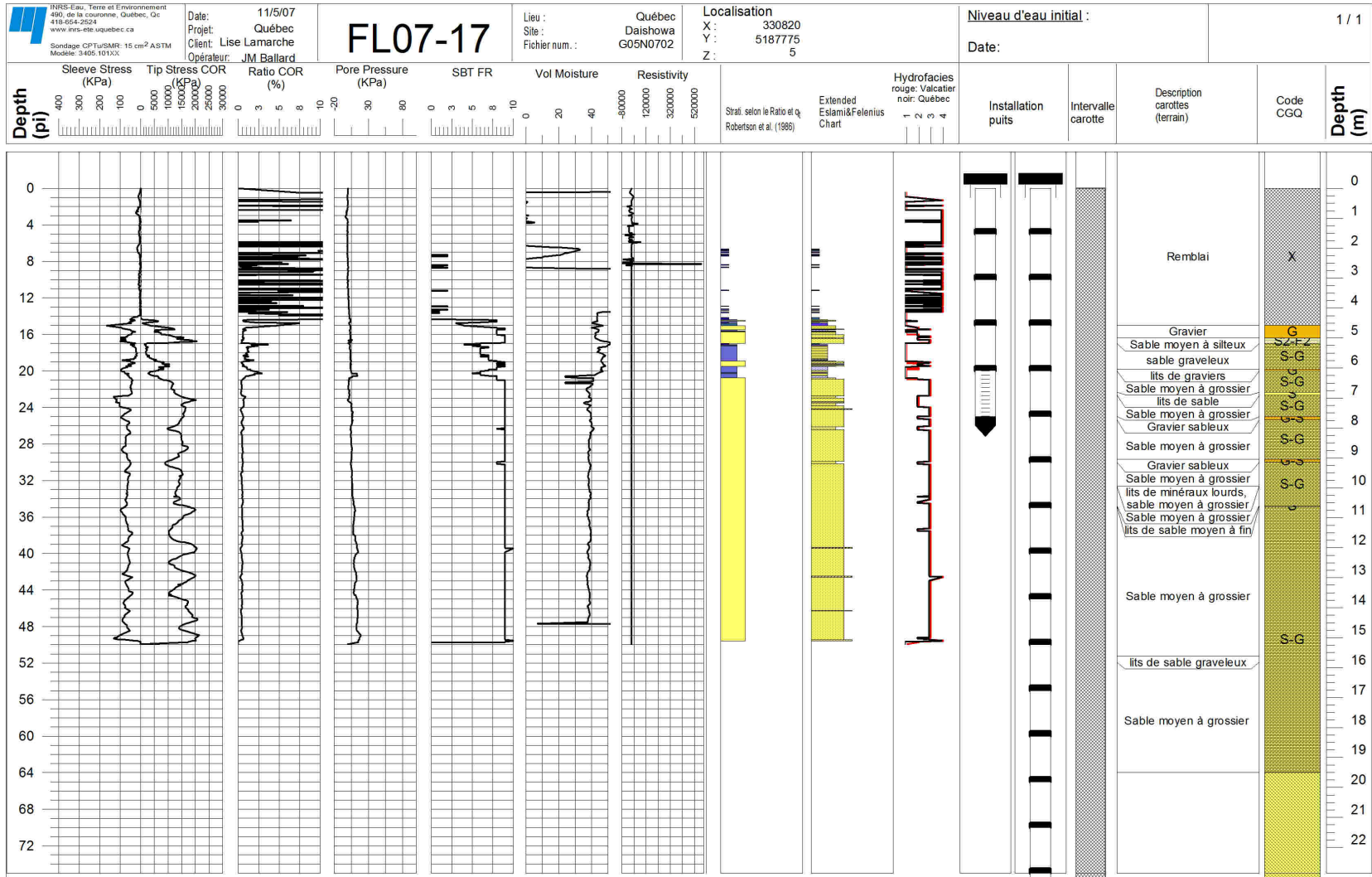


Figure 2.22 Sondage au piézocône (CPT) au site de la papeterie Daishowa (FL07-17)

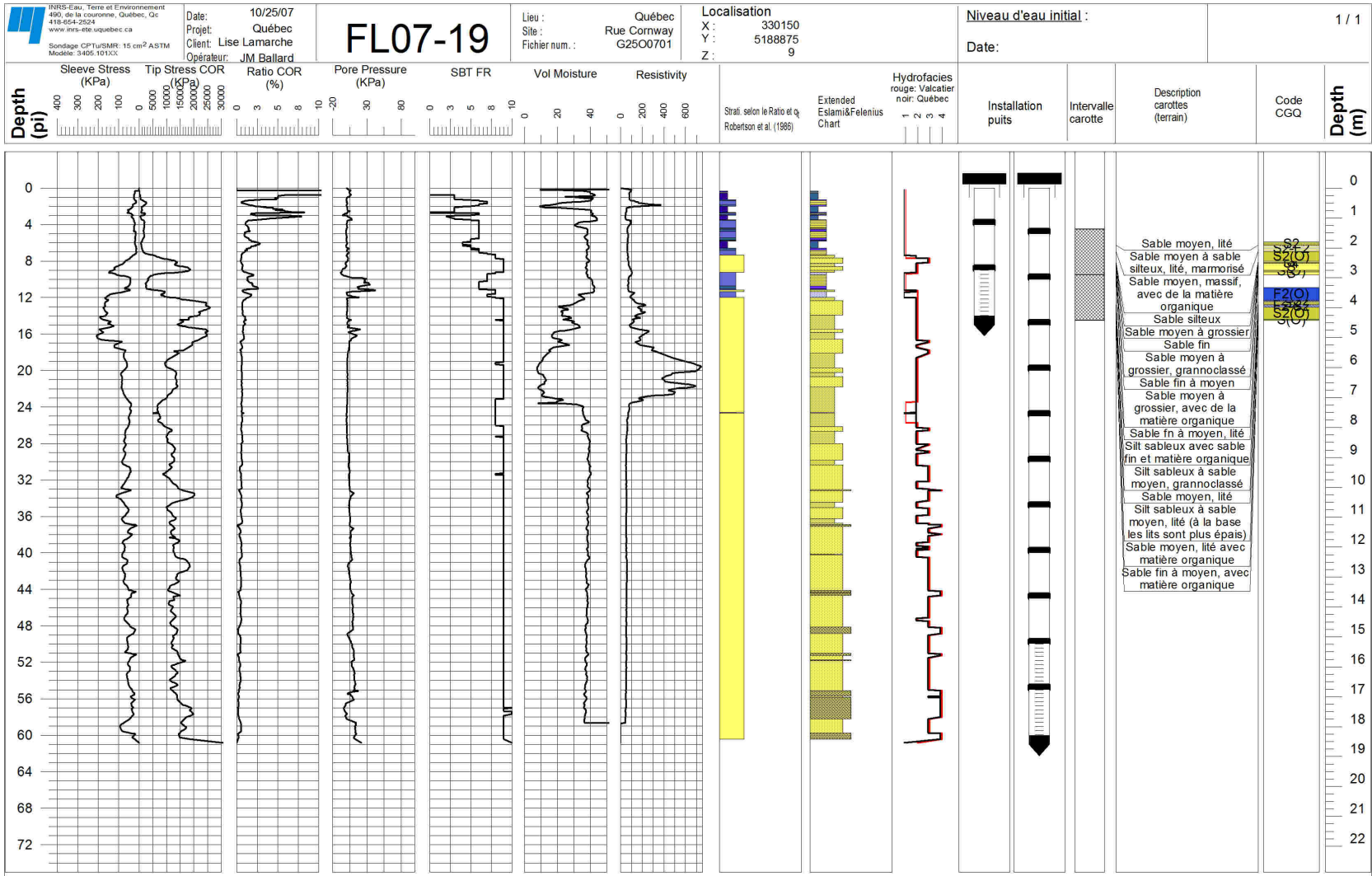


Figure 2.23 Sondage au piézocône (CPT) sur la rue Cornway (FL07-19)

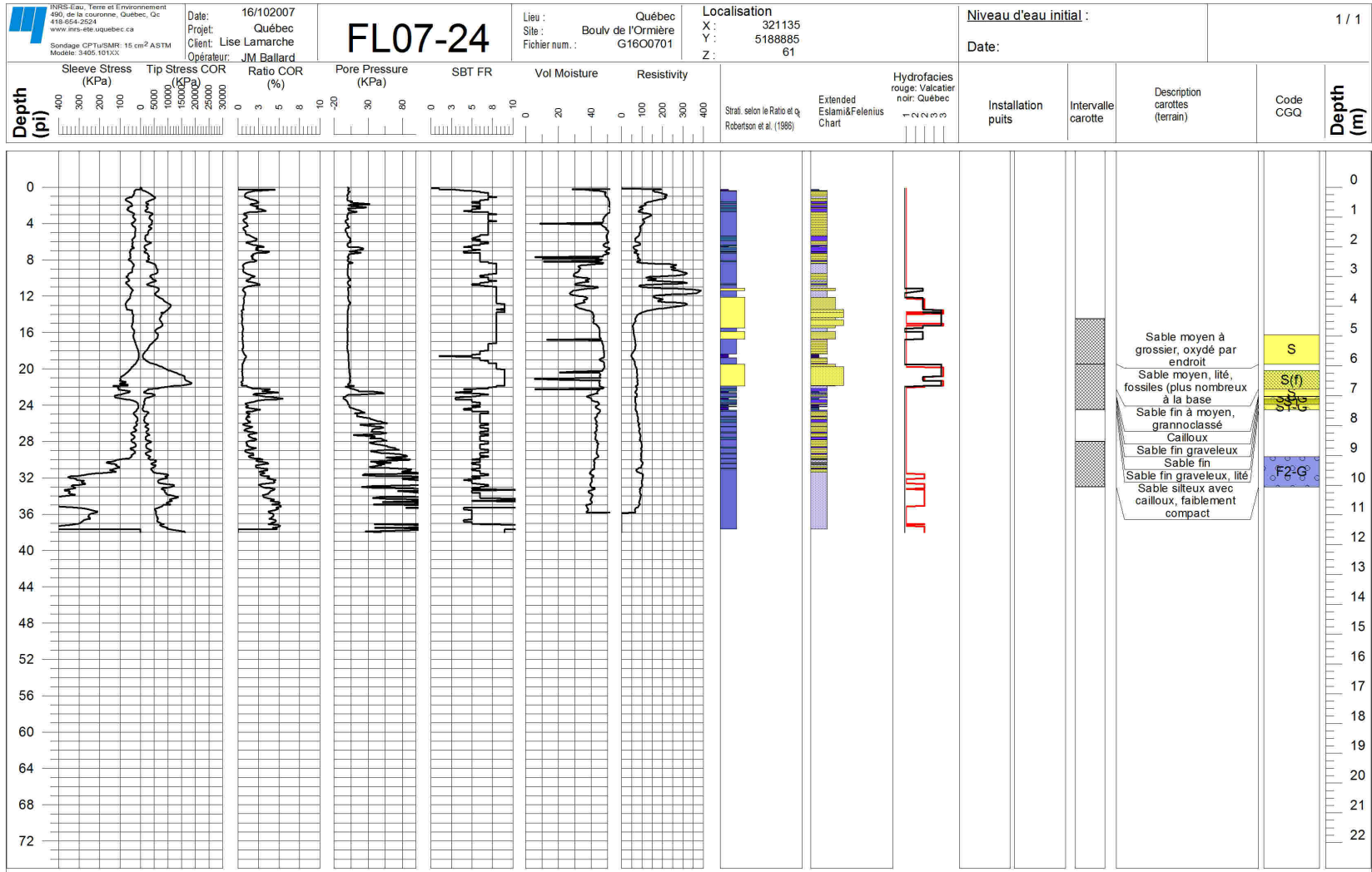


Figure 2.24 Sondage au piézocône (CPT) sur le Boulevard de l'Ornière (FL07-24)

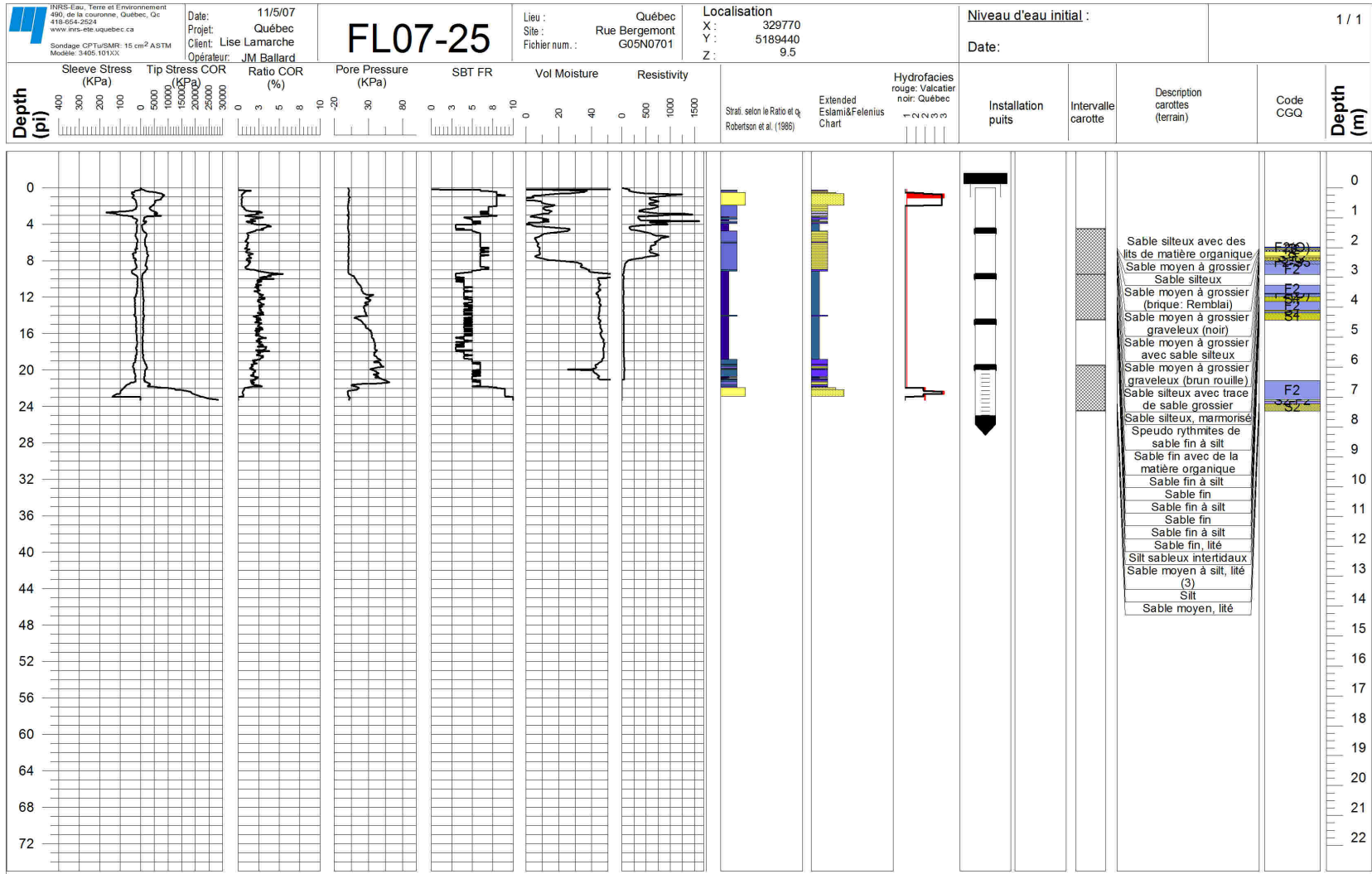


Figure 2.25 Sondage au piézocône (CPT) sur la rue Bergemont (FL07-25)

### 2.2.8 Site du Parc Chauveau (DL12.3)

Au niveau du Parc Chauveau, la rivière Saint-Charles coule sur la plate forme carbonatée des Basses-Terres du Saint-Laurent. On y trouve à la base un till de fond compact gris à matrice silto-argileuse. Localement, le faciès glaciaire devient graveleux avec des clastes jointifs à proximité d'un affleurement de roc (photo; figure 2.26). Au sommet, des plans de cisaillement sont visibles. Dans les petites dépressions à la surface du till, il est possible d'observer des rythmites argileuses marines fossilifères d'une épaisseur variant entre 1 et 3 m. Au sommet de la coupe, une unité sableuse d'exondation est présente. Ces sables sont lités, triés et en contact graduel à la base avec les argiles. Leur épaisseur varie entre 1 et 3 m. Des terrasses d'érosion marquent le paysage dans le secteur.

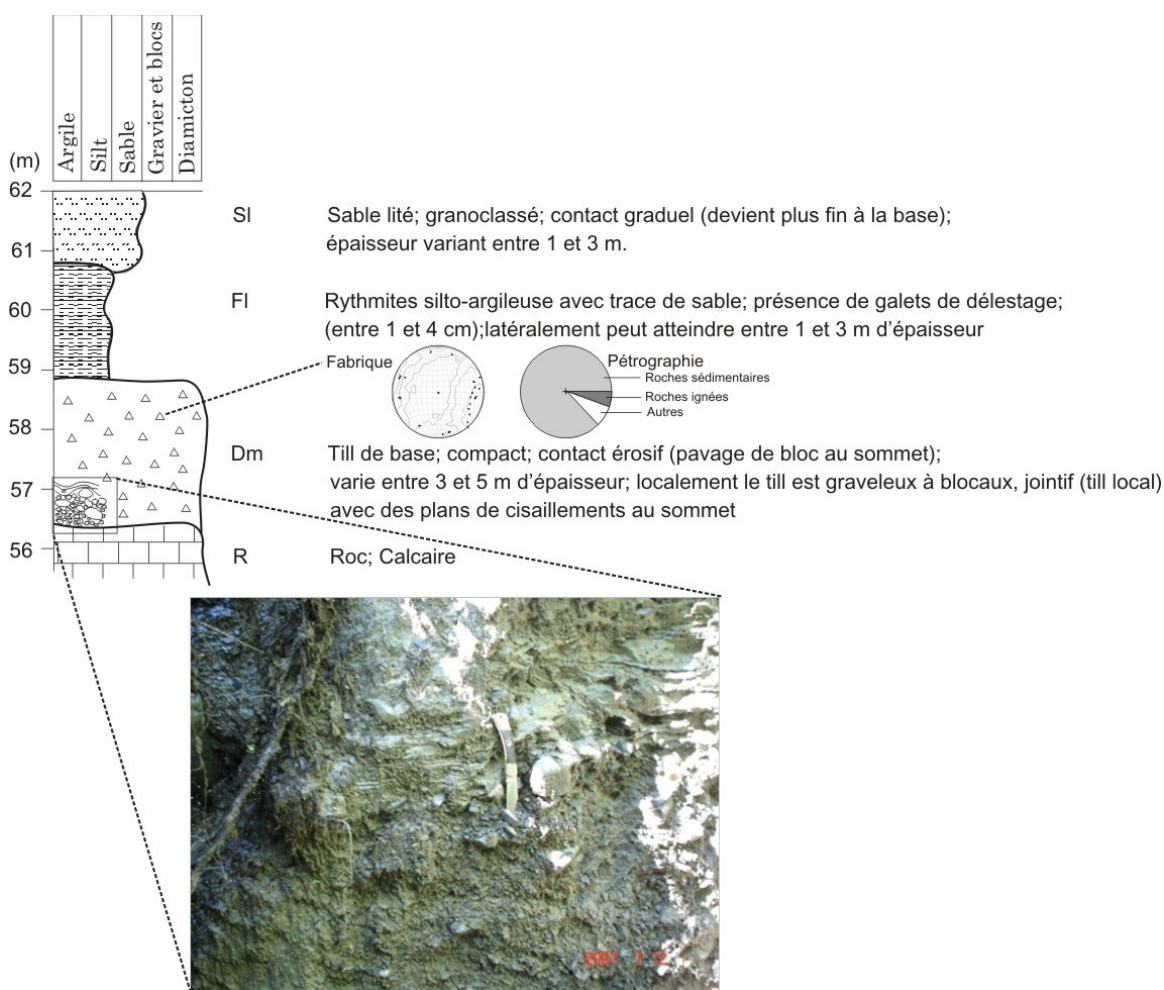


Figure 2.26 Coupe schématisée du Parc Chauveau (DL12.3)

### 2.2.9 Forages FL06-01 et FL07-01

Dans le cadre du projet de microzonage sismique de la CGC, un forage rotosonic à récupération continue a été réalisé à l'automne 2006 (FL06-01); en raison d'une récupération insuffisante lors du forage original, une seconde phase de forage au printemps 2007 (FL07-01) a permis de récupérer les sables silteux marins manquants. Localisé dans le secteur de plus grande épaisseur des formations quaternaires dans la basse ville à proximité du CPT FL07-17, ce forage fournit l'information stratigraphique la plus complète du secteur d'étude. La description géologique est présentée à la figure 2.27, tandis que les données géophysiques associées sont compilées en annexe B. La séquence quaternaire repose sur la plate-forme carbonatée des Basses-Terres du Saint-Laurent à 78 m de profondeur. À la base se trouve un diamicton d'une épaisseur de 2 m et identifié simplement comme étant le till inférieur, soit l'unité la plus ancienne observée dans le secteur d'étude. Ce till est surmonté par une unité, considérée à ce stade comme interstadiaire. Celle-ci est constituée de sable fin à silteux sur une épaisseur de 13 m et son contenu microfaunique sera présenté et discuté dans le chapitre suivant. Une unité glaciaire, composée d'un diamicton compact à matrice sablo-silteuse, surmonte cette unité interstadiaire. Ce till supérieur d'une épaisseur de 12 m est associé au Wisconsinien supérieur, dernière grande phase de la dernière glaciation. Les dépôts composant le reste de la colonne stratigraphique sont associés à la déglaciation subséquente. À la base de cette séquence, sur une épaisseur d'un peu plus de 15 m, on observe les silts argileux à sableux de la phase glaciomarine profonde qui a suivi le recul des glaces. Une séquence deltaïque occupe la partie supérieure du forage entre les profondeurs de 5 à 34 m. Cette séquence est constituée à la base d'une unité grossière de graviers sableux d'une épaisseur de moins de 1 m, surmontée par des sables moyens à grossiers sur une épaisseur de près de 30 m. Les 5 mètres supérieurs du forage sont constitués de matériaux de remblai hétérogènes.

Des analyses granulométriques ont été réalisées dans les laboratoires de l'INRS selon un intervalle approximatif de 2 m avec une résolution plus fine au niveau des contacts géologiques. Ces résultats sont présentés à la figure 2.28. Il est possible d'y observer la succession de faciès glaciaires, interglaciaires et deltaïques présentés précédemment. Plus particulièrement, on distingue 4 sous-unités interstadiaires, soit l'une grossière à la base sur une épaisseur inférieure à 1 m surmontée par une sous-unité sableuse entre 71 et 76 m de profondeur. Une sous-unité argileuse est intercalée sous une seconde sous-unité sableuse qui constitue le sommet des sédiments interstadiaires. Il est également possible de reconnaître une sous-unité graveleuse à la base des sables deltaïques au sommet de la séquence.

### 2.4.10 Levé de sismique réflexion

Un levé de sismique réflexion été réalisé par l'équipe de géophysique de surface de la CGC-division Nord à l'automne 2008 au niveau de la 4<sup>e</sup> avenue et est présenté à l'annexe C. Ce levé montre les variations latérales des différentes unités observées au forage FL06-01. À la base, le contact entre les dépôts meubles et le roc est très bien marqué. Il est possible d'observer une remontée du roc au centre du profil. L'unité 1 correspond à l'unité marine profonde et aux unités antérieures qui n'ont pu être différenciées en raison de leur faible contraste de vitesse sismique. L'unité 2, quand à elle, représente l'unité grossière à la base de la séquence deltaïque. Cette dernière est observée dans les dépressions de l'unité argileuse sous-jacente au nord et au sud du

profil. Finalement au sommet, l'unité 3 regroupe les sables deltaïques et l'unité intertidale identifiée en surface.

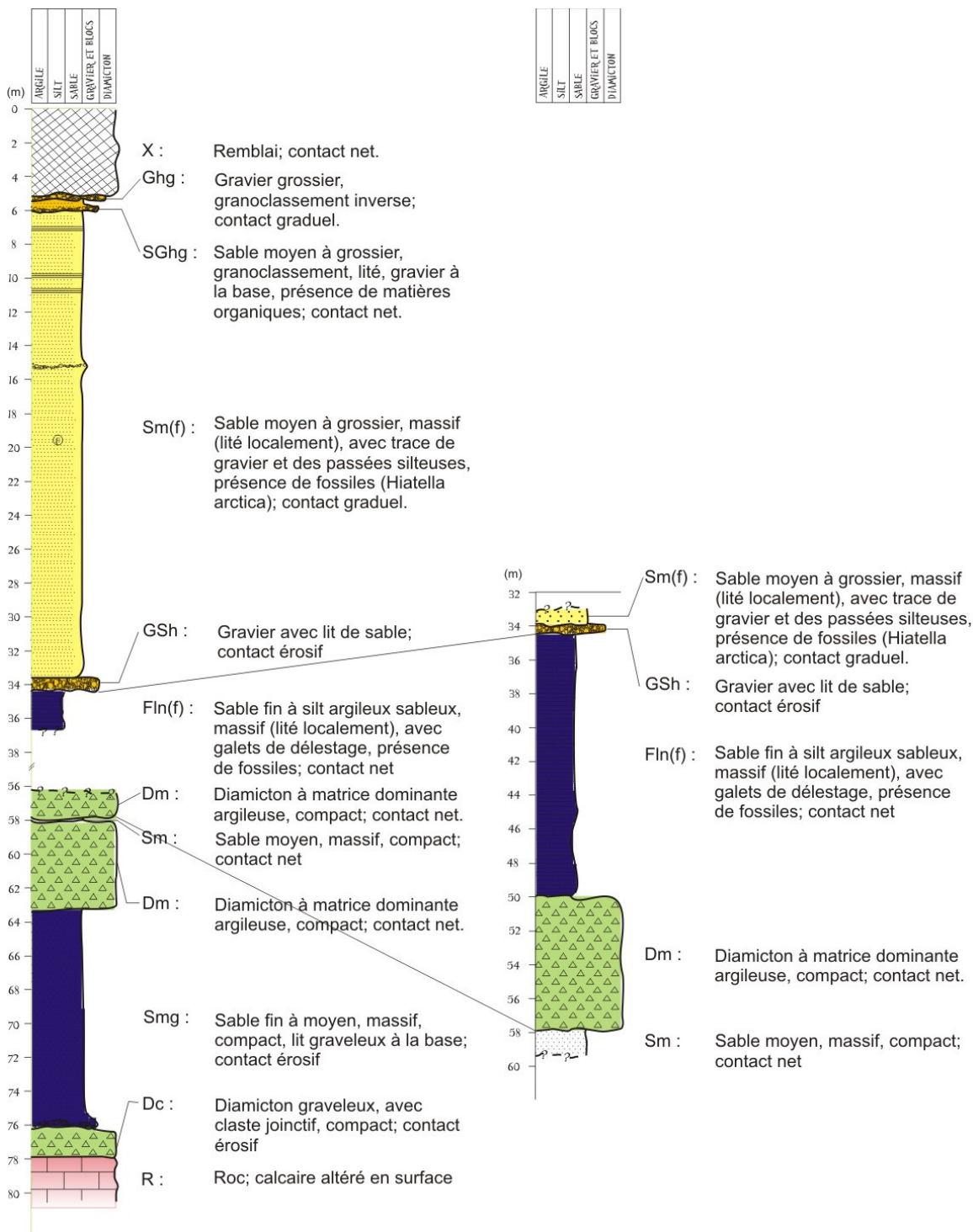


Figure 2.27 Coupe schématisée aux forages FL06-01 et FL07-01



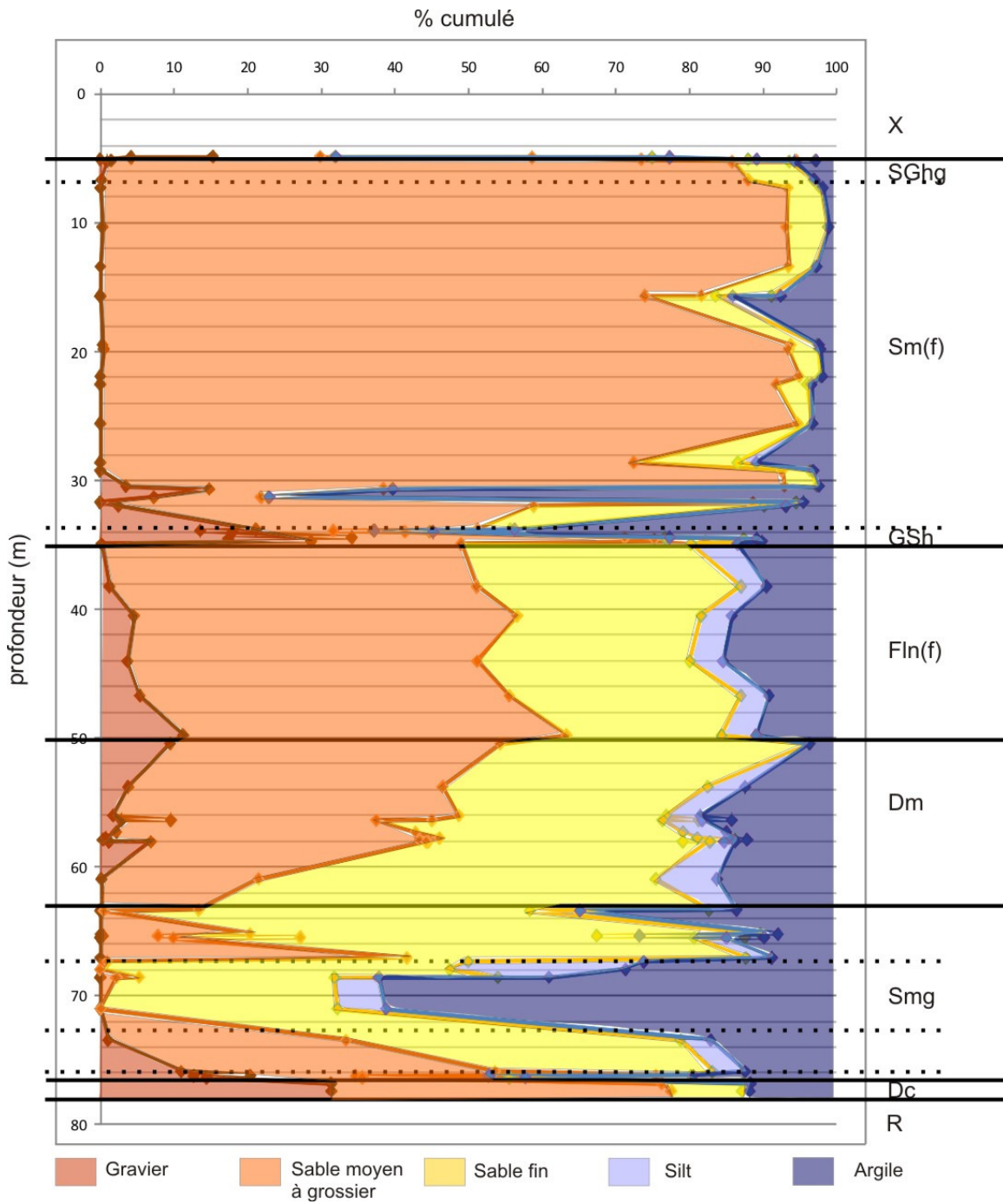


Figure 2.28 Profil granulométrique des forages FL06-01 et FL07-01

## **2.3 Géologie tridimensionnelle du secteur à l'étude**

### **2.3.1 Substratum rocheux**

Le secteur de la ville de Québec se situe à l'intersection des trois grands ensembles géologiques, soit le Bouclier Canadien, les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches (Figure 2.29). Au-dessus de la limite marine, les surfaces rocheuses affleurantes sont généralement recouvertes d'un mince placage discontinu de till et sont parsemées de blocs plutôt épars; sous la limite marine, ces surfaces sont généralement délavées de sédiments quaternaires. Un ensemble de failles parcourt le terrain modifiant la topographie du socle rocheux. La ligne de Logan longe le versant nord-ouest du promontoire de Québec marquant la limite nord des Appalaches dans la région d'étude. Cette crête rocheuse marque la dernière écaille appalachienne dans le secteur. La basse ville de Québec est ceinturée de part et d'autre par la faille de Duberger au nord et celle de Cap Rouge au sud. Ces failles sont marquées par des ressauts topographiques de la surface du roc. Des failles en échelon (Failles de Charlesbourg, de Loretteville et de Neuville) limitent les roches des Basses-Terres du Saint-Laurent et celle du Bouclier canadien. Les contacts géologiques non faillés délimitant les Basses-Terres du Saint-Laurent et du Bouclier Canadien sont caractérisés par un changement de rugosité de la surface du roc. Les roches sédimentaires des Basses-Terres montrent une surface plus lisse que celles du Bouclier qui montrent un relief plus rugueux de collines de diverses tailles. Les roches de la plate-forme sédimentaire, principalement des calcaires (Groupe de Trenton) et des shales (Groupes d'Utica, de Lorraine et de Sainte-Rosalie), sont toutes sises sous la limite marine. Localement, elles sont recouvertes d'une mince couche détritique entre 0,5 et 1 m de shale altéré, mais dont les éléments figurés demeurent généralement visibles. Les roches sédimentaires et métavolcaniques appalachiennes sont constituées de schistes ardoisiers, de calcaires, de grès, de conglomérats et siltstones de la Zone de Humber (Castonguay et al., 2002) et elles sont également sises sous la limite marine où elles sont recouvertes localement par une mince couche détritique similaire aux dépôts de la plate-forme. Les roches métamorphiques et magmatiques grenvilliennes du Bouclier canadien sont composées principalement de gneiss charnokitiques, de migmatites, de mangérites, d'anorthosites et de granites, et forment des collines et des buttes très irrégulières, partiellement masquées par des formations quaternaires, principalement du till.

### **2.3.2 Géologie des formations quaternaires**

#### **2.3.2.1 Séquence pré-wisconsinienne**

##### **2.3.2.1.1 Sédiments glaciaires inférieurs**

Une unité glaciaire (Figure 2.30; till inférieur), sous-jacente à l'unité présumée interstadaire, n'a pu être identifiée qu'en forage dans la partie la plus profonde du bassin sous la basse ville de Québec. L'âge de cette unité n'a pas pu être établi de façon précise, puisqu'aucune datation n'est disponible actuellement. Caractérisé par un diamicton graveleux avec clastes jointifs, ce till d'une épaisseur variant entre 1 et 5 m et compact sous-tend une surface érosive.

### **2.3.2.1.2 Sédiments interstadiaires**

Antérieurs au Wisconsinien supérieur, des sédiments interstadiaires (figure 2.31) ont été préservés dans plusieurs vallées affluentes du Saint-Laurent, soit les rivières Jacques-Cartier et Beauport, ainsi que dans la dépression de Cap-Rouge et la partie profonde du bassin de la basse ville. Leur composition est diverse, allant de blocs métriques jointifs à Cap-Rouge à un sable fin à moyen, massif, compact, avec des lits graveleux à la base en forage, et jusqu'aux varves identifiées à la rivière Beauport. Les sédiments interstadiaires peuvent atteindre une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres.

### **2.3.2.2 Séquences glaciaires et fluvioglaciaires**

#### **2.3.2.2.1 Sédiments glaciaires supérieurs**

La dernière glaciation a laissé dans le paysage un till en couverture quasi-continue sur l'ensemble du secteur à l'étude (figure 2.32). Cette unité peut dépasser les 30 m d'épaisseur par endroits au niveau des trainées morainiques sous abri identifiées à l'est des collines rocheuses. Cette unité est caractérisée par un diamicton à matrice sablo-silteuse à silto-argileuse mis en place directement par le glacier, de couleur gris olive sur le Bouclier, à gris moyen ou brunâtre sur la plate-forme paléozoïque. Le remaniement par les vagues et les courants peut être localement important sous la limite marine, mais il est généralement superficiel, de l'ordre de 50 cm et moins. Par contre, la surface délavée est souvent caractérisée par des concentrations de blocs métriques. La teneur en cailloux cristallins précambriens varie de 100% sur le Bouclier à moins de 10% sur la plate-forme paléozoïque. Sur la plate-forme, la matrice du till peut être carbonatée selon la nature du substratum traversé, par exemple le Groupe de Trenton.

#### **2.3.2.2.2 Sédiments fluvioglaciaires non-différenciés**

La séquence fluvioglaciaire regroupe l'ensemble des faciès d'épandage proglaciaire subaérien, d'épandage proglaciaire subaquatique et juxtaglaciaire mis en place par les eaux de fonte au contact ou à proximité du glacier (figure 2.33). Les unités observées sous la limite marine ont généralement été remaniées par les vagues et les courants lors de la submersion marine et de l'exondation. Constitués d'un mélange généralement hétérogène de sables et graviers avec des passées de sable silteux ou même de diamicton, ces 3 types de sédiments ne peuvent pas être distingués les uns des autres en forage, de sorte qu'ils ont été regroupés lors de la modélisation géologique 3D. Principalement localisés dans les vallées du Bouclier canadien, ils ont également été identifiés en coupe au sud-ouest du Mont Bélair. Leur épaisseur peut atteindre 40 m au niveau de l'esker au nord de Valcatier.

### **2.3.2.3 Séquences glaciolacustres et glaciomarines**

#### **2.3.2.3.1 Sédiments deltaïques glaciolacustres**

Un lac barré lors de la déglaciation dans la vallée de la rivière Montmorency a permis la construction d'un delta glaciolacustre au nord du secteur à l'étude, de même que dans la vallée à l'est de cette dernière (figure 2.34). Le niveau le plus haut atteint par ce lac se situe à 335 m.

Plusieurs exutoires ont été utilisés au fur et à mesure du retrait de la marge glaciaire, soit celui de 335 m à Sainte-Brigitte-de-Laval, celui de 295 m vers le lac Beauport, ceux de 275 m, de 245 m et de 235 m, vers le lac de la Retenue, puis celui juxtaposé au delta associé à la Mer de Goldthwait. Seuls de petits deltas sont associés à ces lacs éphémères; toutefois des sédiments d'eau profonde associés à cet épisode glaciolacustre ont également été observés en coupe. D'une épaisseur de moins de 20 m, ces sédiments reposent sur la séquence fluvioglaciaire dans le secteur.

### **2.3.2.3.2 Sédiments glaciomarins**

Mis en place lors de l'épisode marin qui a suivi la glaciation, ces sédiments généralement fossilifères comprennent principalement des silts et argiles déposés en eau profonde ainsi que des sables et graviers littoraux, pré littoraux et deltaïques. Ils peuvent aussi inclure des diamictons glaciomarins et des sédiments remaniés à partir de diverses unités sous-jacentes. L'altitude maximale atteinte par l'épisode marin varie de 210 à 220 m dans cette partie du piémont laurentien (rive nord).

#### *Sédiments marins fins d'eau profonde*

Mis en place par décantation durant la phase d'inondation marine dans les dépressions topographiques, les sédiments marins d'eau profonde sont surtout constitués de silt argileux ou d'argile silteuse, gris moyen à gris foncé, massifs, laminés ou stratifiés, comprenant localement des rythmites à proximité des grands complexes deltaïques (figure 2.35). D'une épaisseur pouvant atteindre 50 m en forage, ces argiles constituent un aquitard sous-jacent à l'aquifère de Québec.

#### *Sédiments marins intertidaux*

Les faciès intertidaux sont mis en place en zone intertidale ou infratidale dans des baies ou bras de mer abrités, souvent en marge de grands complexes deltaïques (figure 2.36). D'une épaisseur comparable aux argiles d'eau profonde, soit entre 0,5 et 15 m, ce faciès a tout d'abord été confondu avec les argiles. Toutefois, ces sédiments sont constitués de silts et silts sableux, généralement massifs ou mal stratifiés.

#### *Sédiments plénimarin deltaïques et prodeltaïques*

La fonte de l'inlandsis a fourni un apport considérable d'eau et de sédiments dans les réseaux fluviaux proglaciaires. Ainsi, d'immenses complexes deltaïques se sont formés à l'embouchure des principales rivières, telles que la Jacques-Cartier et la Montmorency (figure 2.37). D'une épaisseur pouvant atteindre 50 m, ces sables, sables graveleux et graviers, stratifiés et bien triés, possèdent toutes les caractéristiques sédimentologiques d'un delta classique. Localement des déformations glaciotectoniques passives peuvent être observées.

#### *Sédiments marins littoraux et pré littoraux*

L'abaissement du niveau marin relatif qui a suivi la déglaciation a permis le dépôt de sable, silt sableux, sable graveleux et gravier stratifiés et généralement bien triés, localement marqués par des crêtes de plage ou des terrasses littorales et remaniés par l'action éolienne (figure 2.38).

D'une épaisseur variant de 0,5 à 5 m, ces sédiments forment généralement une couverture mince sur les sédiments d'eau profonde, entre la limite marine maximale (210-220 m sur la rive nord dans le secteur de Québec) et le début du Proto-Saint-Laurent (65 m) dans le secteur d'étude.

#### *Sédiments marins deltaïques grossiers tardifs*

Une unité de sous-surface grossière a été identifiée en discordance sur l'unité marine au sud de la zone d'étude dans la basse ville de Québec (figure 2.39). Localisée dans les dépressions argileuses, cette unité est caractérisée par des sables graveleux d'une épaisseur variant entre 1 à 5 m.

#### *Sédiments marins deltaïques tardifs*

Une séquence deltaïque à basse altitude a été identifiée en forage et dans les excavations dans la dépression de la basse ville de Québec sous le niveau actuel de la mer (figure 2.40). Ces sables moyens, triés, beiges peuvent atteindre une épaisseur de plus de 30 m en amont de la rivière Saint-Charles.

### **2.3.2.4 Séquence fluviale précoce**

#### **2.3.2.4.1 Sédiments du Proto-Saint-Laurent**

Les sédiments fluviaux anciens sont mis en place le long d'anciens cours d'eau et lors de leur incision dans les formations quaternaires antérieures. Ces sédiments incluent notamment des alluvions mises en place dans les anciens chenaux du Proto-Saint-Laurent et de minces placages sur le roc paléozoïque et appalachien souvent sub-affleurant en bordure du fleuve Saint-Laurent. La transition entre les sédiments marins et ceux du Proto-Saint-Laurent est placée à une altitude d'environ 65 m, car c'est à ce niveau que la chenalisation fluviale s'est amorcée au droit du seuil de Québec, ce qui correspond au niveau supérieur où l'unité Ax est cartographiée.

#### *Alluvions de terrasses fluviales précoces*

Associés principalement au remaniement des sédiments sous-jacents, les faciès des terrasses fluviales précoces sont constitués d'une variété d'assemblages de faciès (figure 2.41). D'une épaisseur variant entre 1 et 5 m, cette unité peut être composée de sable, de silt sableux ou de gravier contenant parfois des fragments de végétaux et déposée dans des zones débordant des couloirs fluviaux actuels. Les faciès estuariens sont fréquents dans cette unité. Elle représente une unité d'exondation associée au Proto-Saint-Laurent. Sa surface est généralement marquée par des levées et barres alluviales. L'abaissement du niveau de base est enregistré par l'étagement des terrasses.

#### *Sédiments estuariens précoces*

Une réinterprétation de l'unité silteuse en basse ville de Québec a permis d'identifier une nouvelle unité stratigraphique dans le secteur d'étude (figure 2.42). Ces sédiments, reposant en discordance sur les sédiments sous-jacents ou sur le roc, ont été déposés en zone de marnage lors d'épisodes transgressifs dans l'estuaire fluvial. Constituée de silt, silt sableux, sable contenant

généralement des fragments de végétaux terrestres et aquatiques, cette unité présente une structure massive, faiblement laminée ou rythmique et a une épaisseur moyenne de 3 ou 4 m, mais variant de 2 à 10 m.

### **2.3.2.5 Séquence fluviale récente**

Les séquences récentes sont directement associées aux réseaux hydrographiques actuels; elles ont donc été mises en place le long des cours d'eau du système fluvial actuel et lors de leur incision dans les formations quaternaires antérieures.

#### **2.3.2.5.1 Alluvions de terrasses fluviales**

Associées aux terrasses élevées du système fluvial actuel, les alluvions de terrasses fluviales sont constituées d'un ensemble varié de faciès de sable, silt sableux, sable graveleux et gravier contenant fréquemment des fragments végétaux (figure 2.43). Généralement de faible épaisseur (moins de 3 m), cette unité est située à proximité des cours d'eau actuels et est généralement marquée par des levées ou des barres alluviales. L'abaissement du niveau de base se manifeste par l'étagement des terrasses.

#### **2.3.2.5.2 Sédiments organiques**

Les sédiments organiques se retrouvent dans les dépressions mal drainées dispersées sur l'ensemble du secteur (figure 2.44). Généralement de faible épaisseur, ils peuvent toutefois atteindre une épaisseur de 4 m. Caractérisée par un sol tourbeux, cette unité est souvent située en bordure d'un plan d'eau.

#### **2.3.2.5.3 Alluvions actuelles**

Les alluvions actuelles représentent les dépôts récents des différents cours d'eau. Situés dans la plaine inondable actuelle des différentes rivières, elles sont caractérisées par un mélange hétérogène de faciès (figure 2.45). D'une épaisseur inférieure à 3 m, ces sables, silts sableux, sables graveleux et graviers contenant fréquemment des fragments de végétaux sont parfois marqués par des levées ou des barres alluviales.

#### **2.3.2.5.4 Remblai, sédiments anthropiques**

La présence d'importantes activités anthropiques dans le secteur d'étude a altéré de façon significative le paysage naturel. Ainsi, les rives de la rivière St-Charles, de même que celles du fleuve ont été grandement modifiées et leurs berges ont été largement artificialisées. Par exemple, l'un des méandres de la rivière Saint-Charles a été complètement reprofilé. Il est possible d'observer des dépôts hétérogènes de remblai sur une épaisseur de plus de 20 m dans le secteur du port de Québec (figure 2.46).

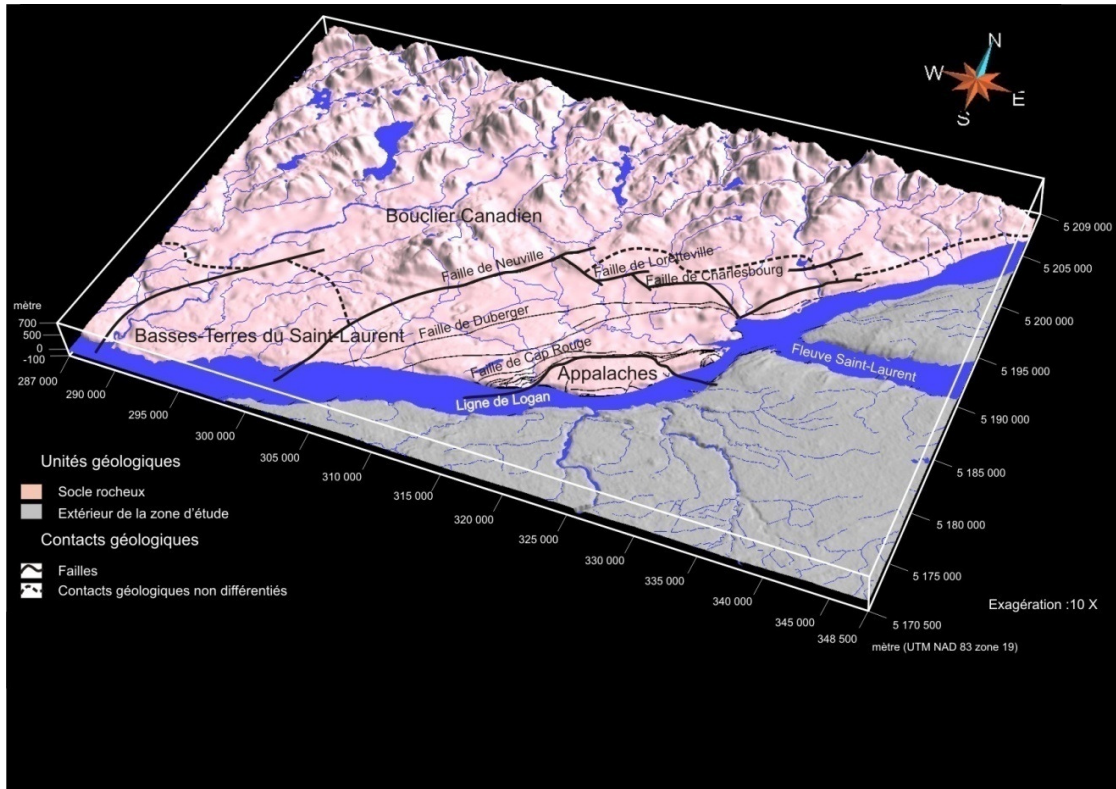


Figure 2.29 Substratum rocheux modélisé

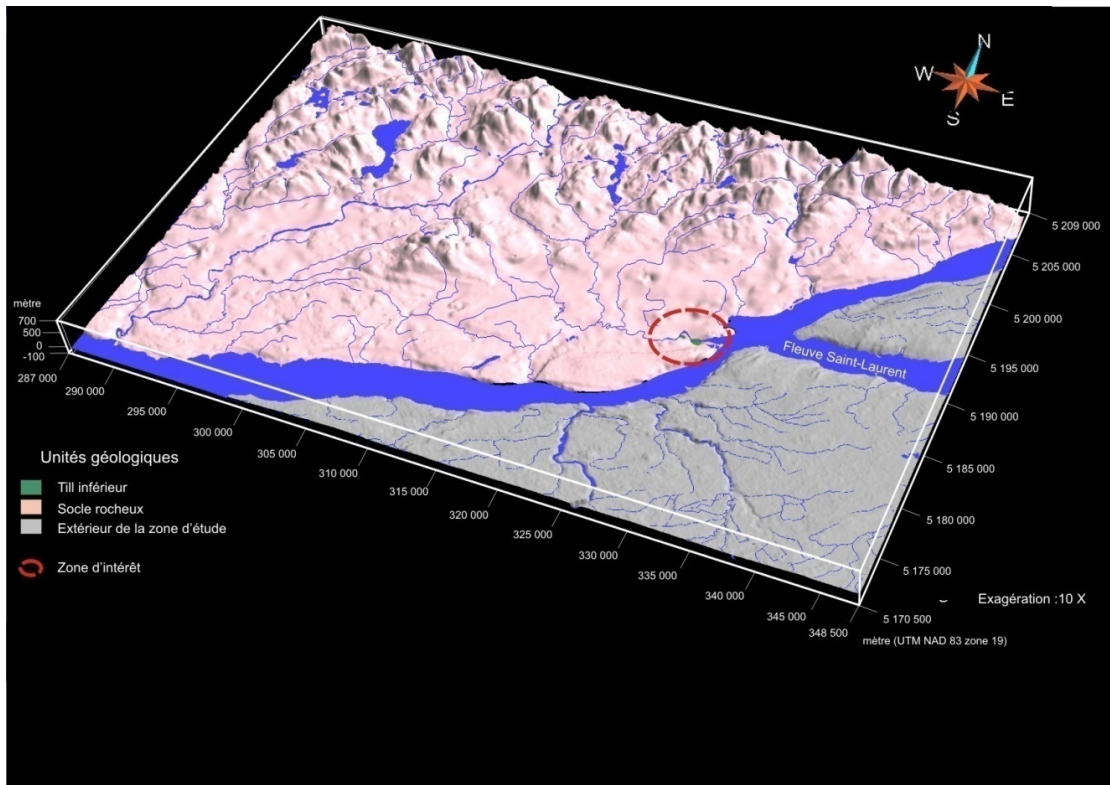


Figure 2.30 Sédiments glaciaires inférieurs modélisés

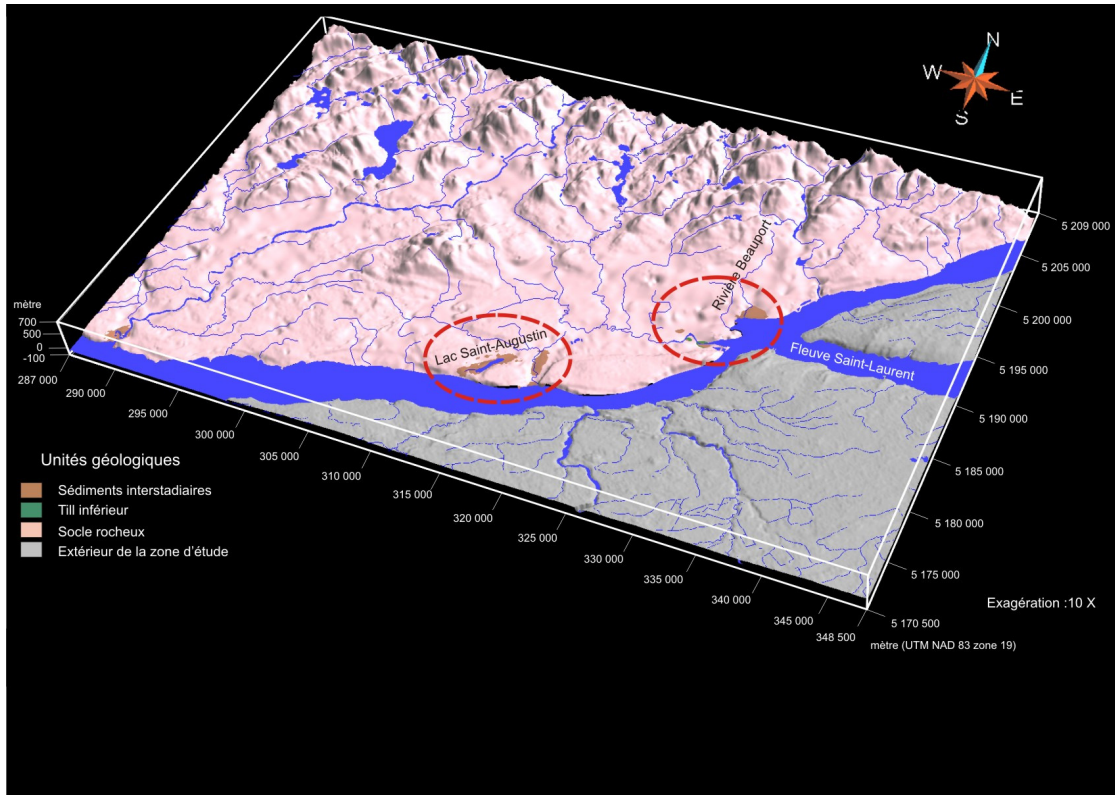


Figure 2.31 Formations quaternaires anciennes modélisées non-différenciées

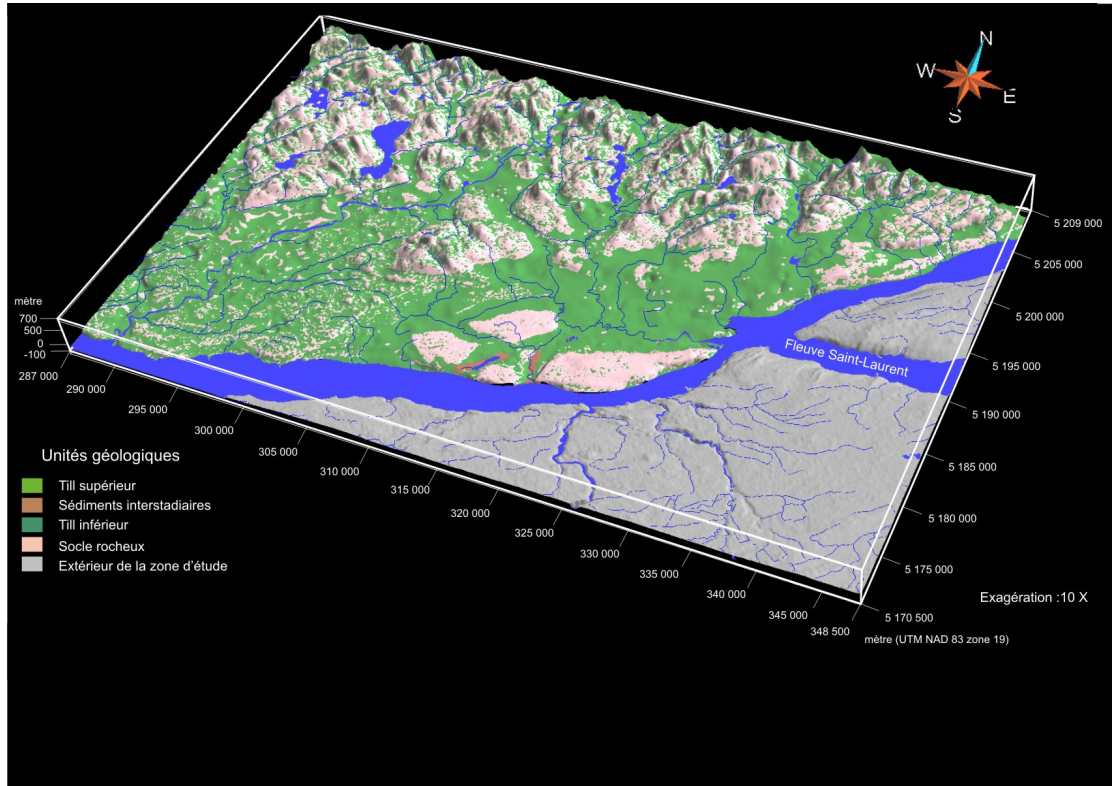


Figure 2.32 Sédiments glaciaires supérieurs modélisés



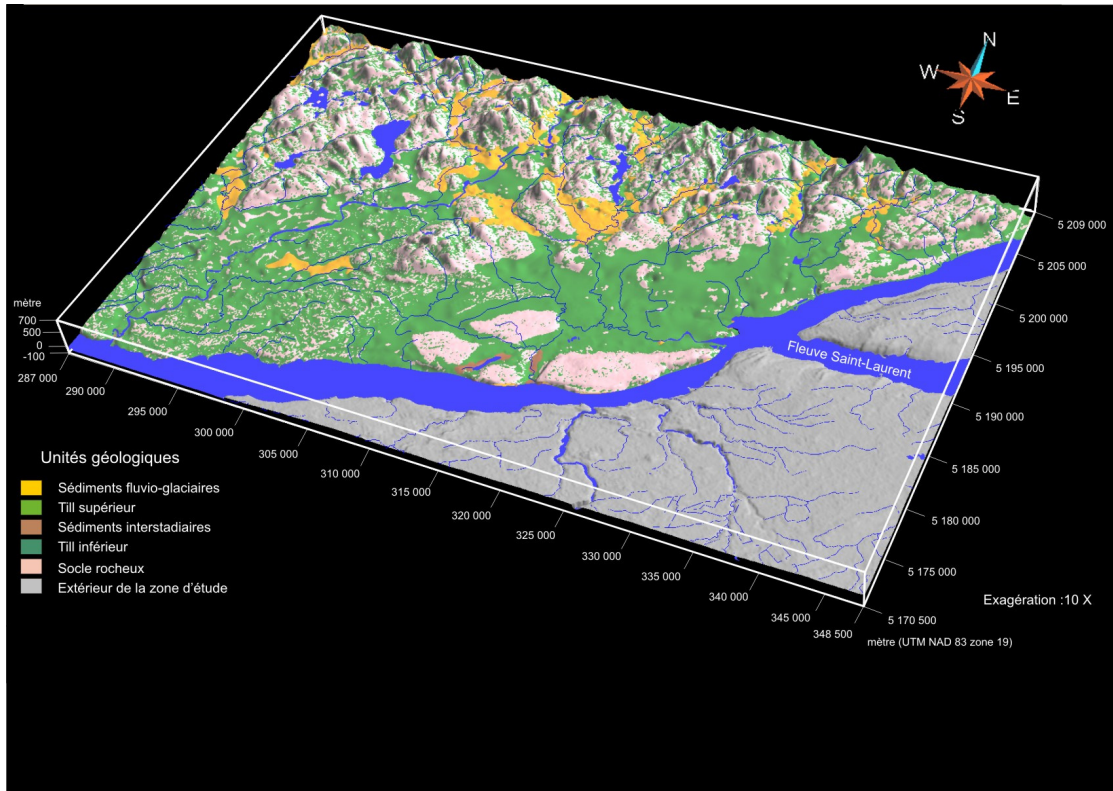


Figure 2.33 Sédiments fluvioglaciers modélisés non-différenciés

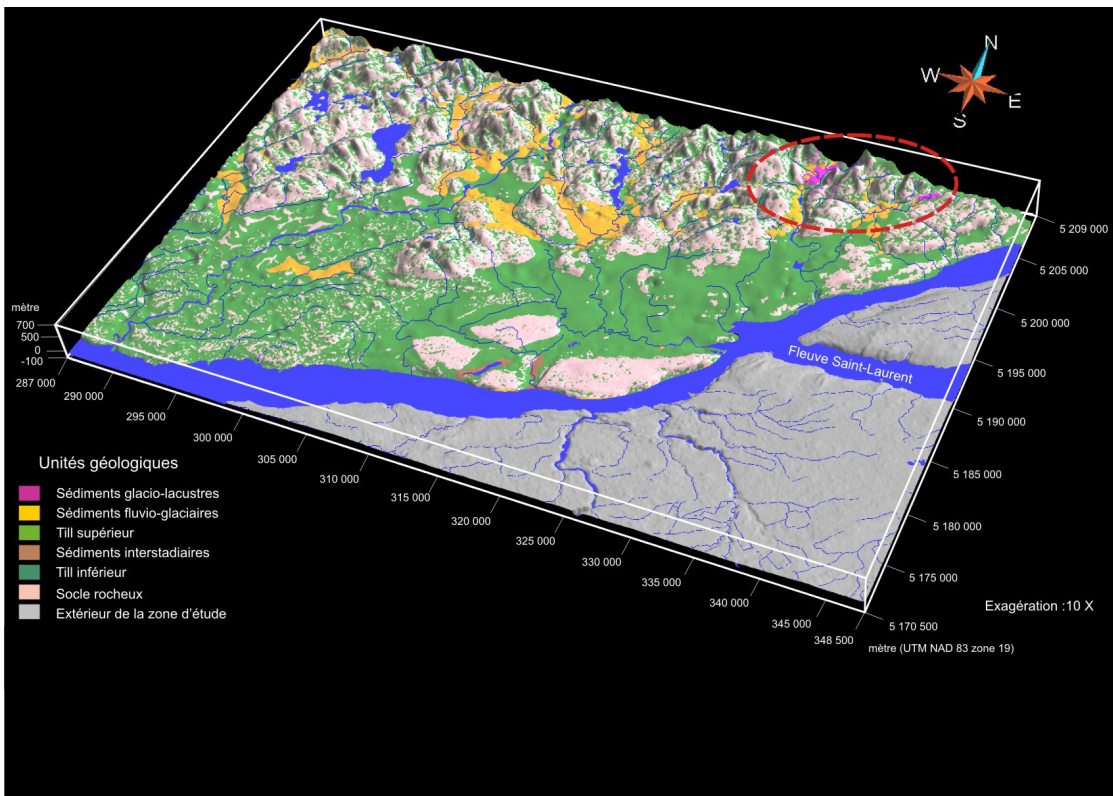


Figure 2.34 Sédiments glaciolacustres modélisés

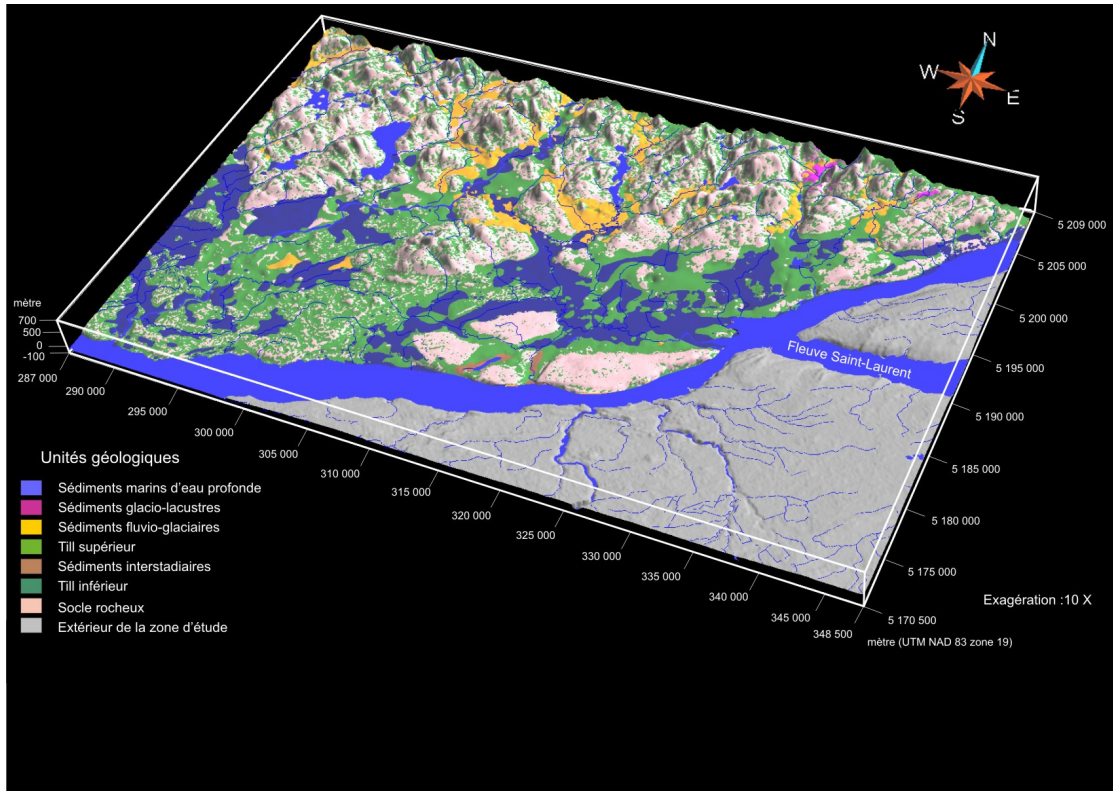


Figure 2.35 Sédiments marins d'eau profonde modélisés

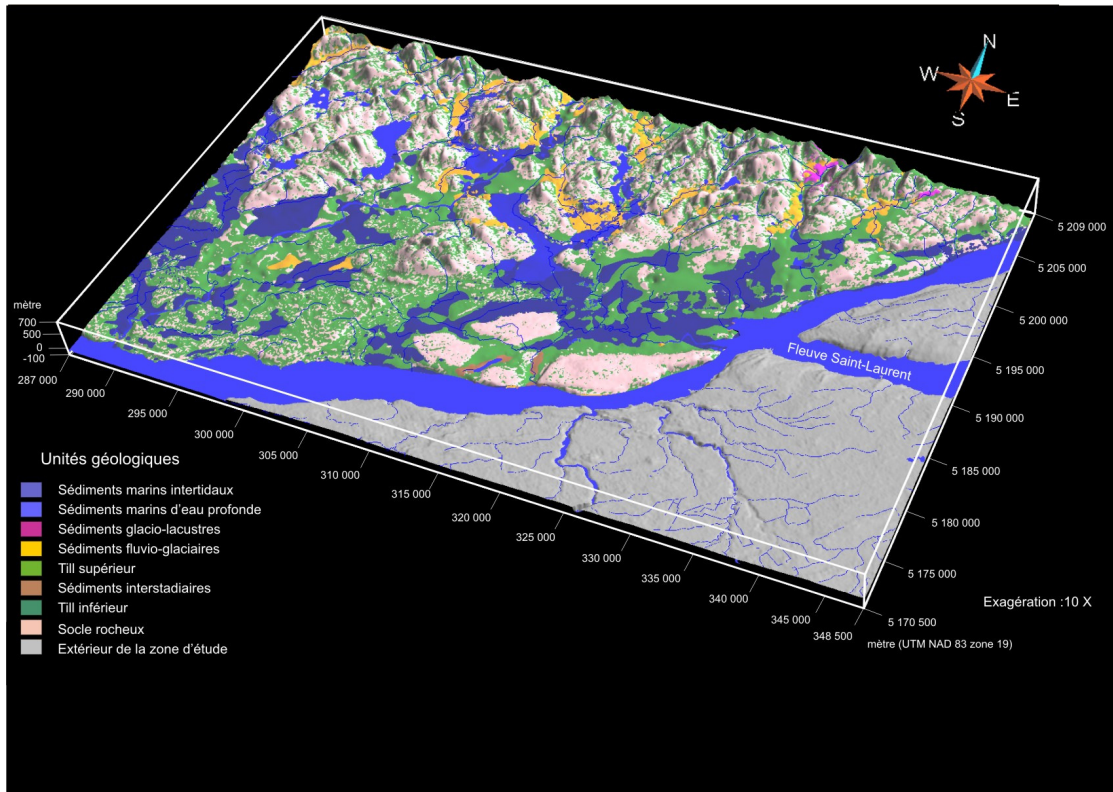


Figure 2.36 Sédiments marins intertidaux modélisés

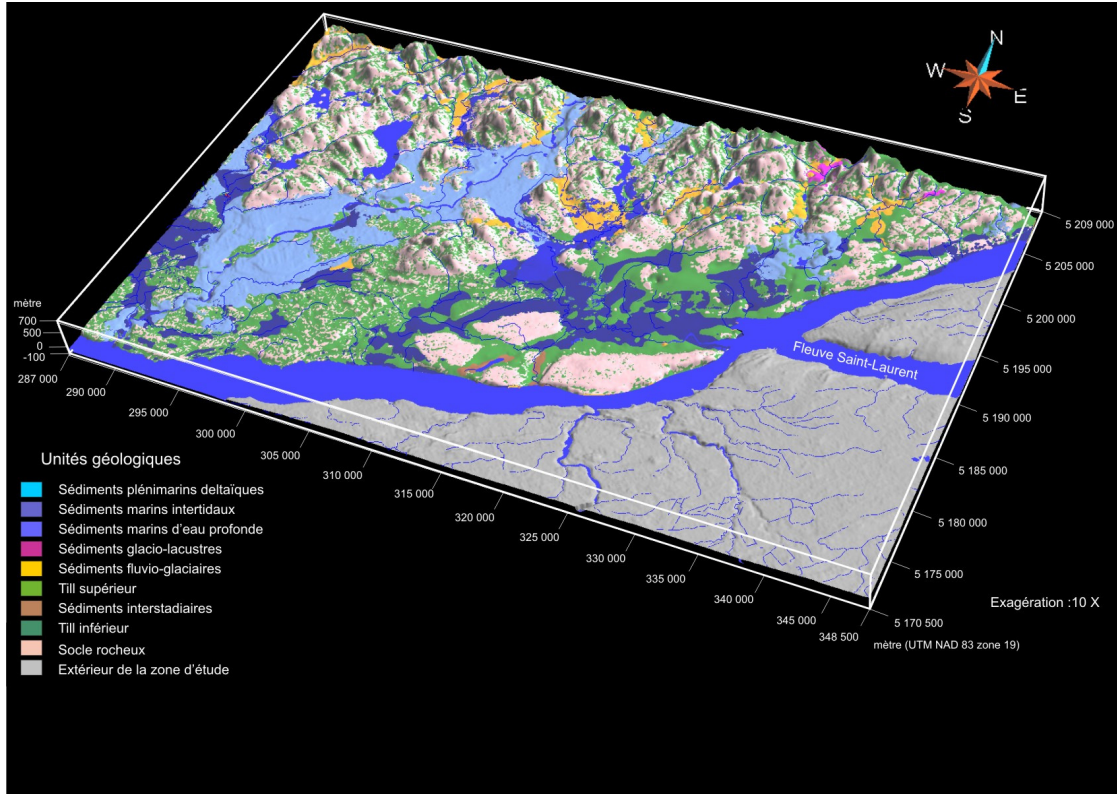


Figure 2.37 Sédiments plénimarin deltaïques et prodeltaïques modélisés

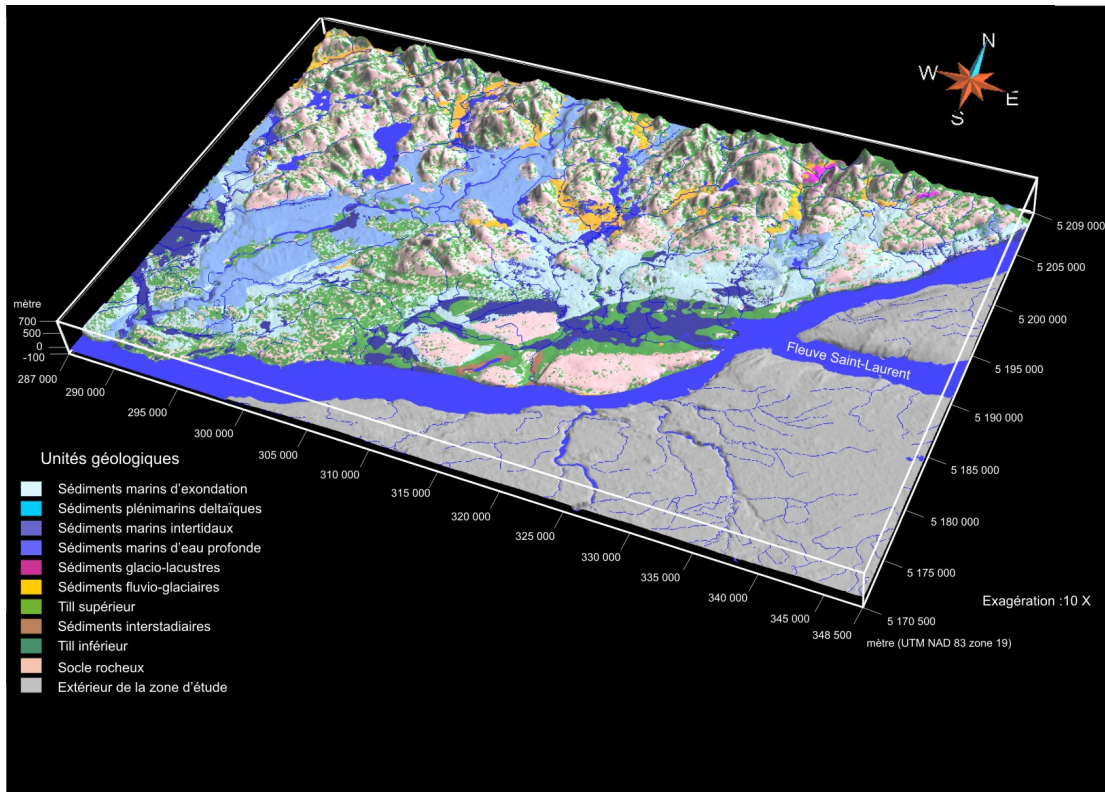


Figure 2.38 Sédiments marins littoraux et pré-littoraux modélisés

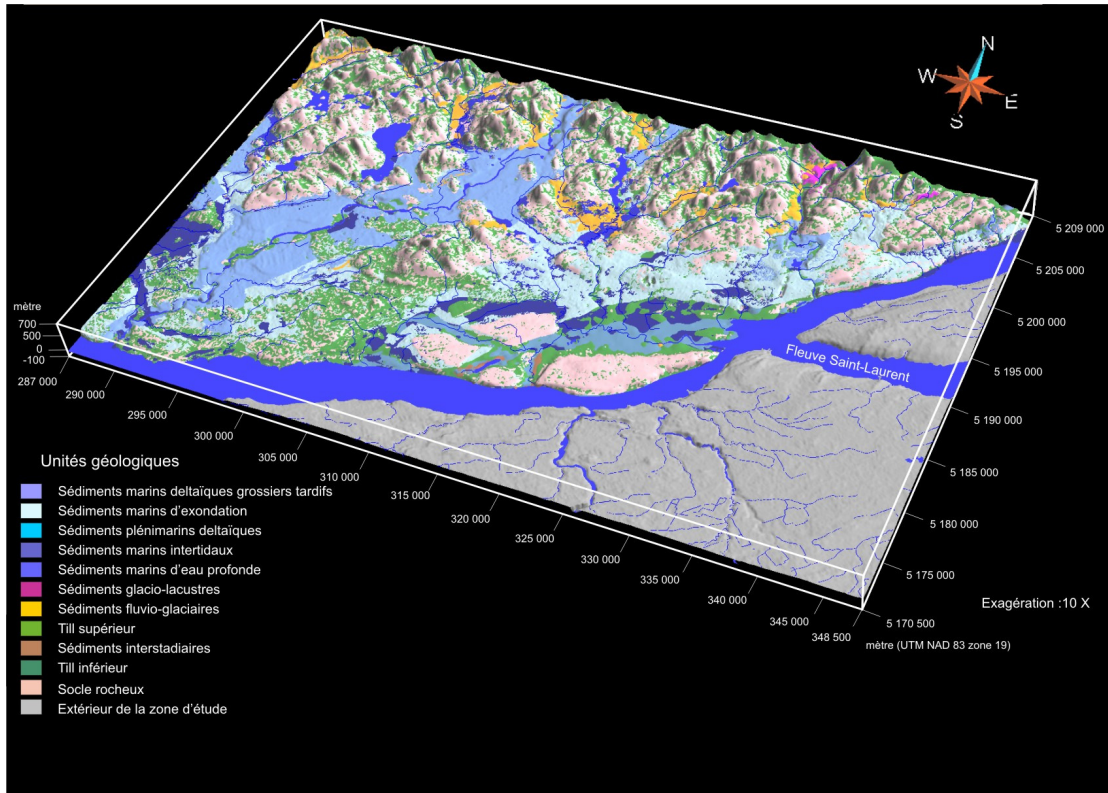


Figure 2.39 Sédiments deltaïques grossiers tardifs modélisés

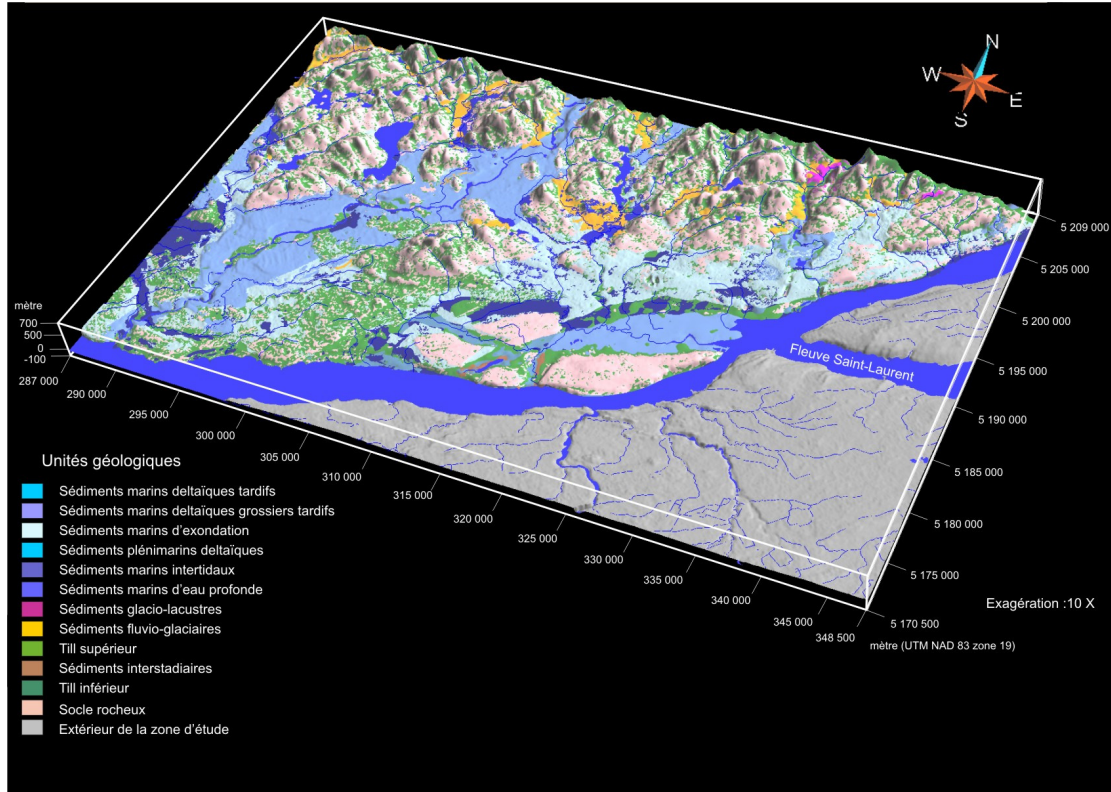


Figure 2.40 Sédiments deltaïques tardifs modélisés

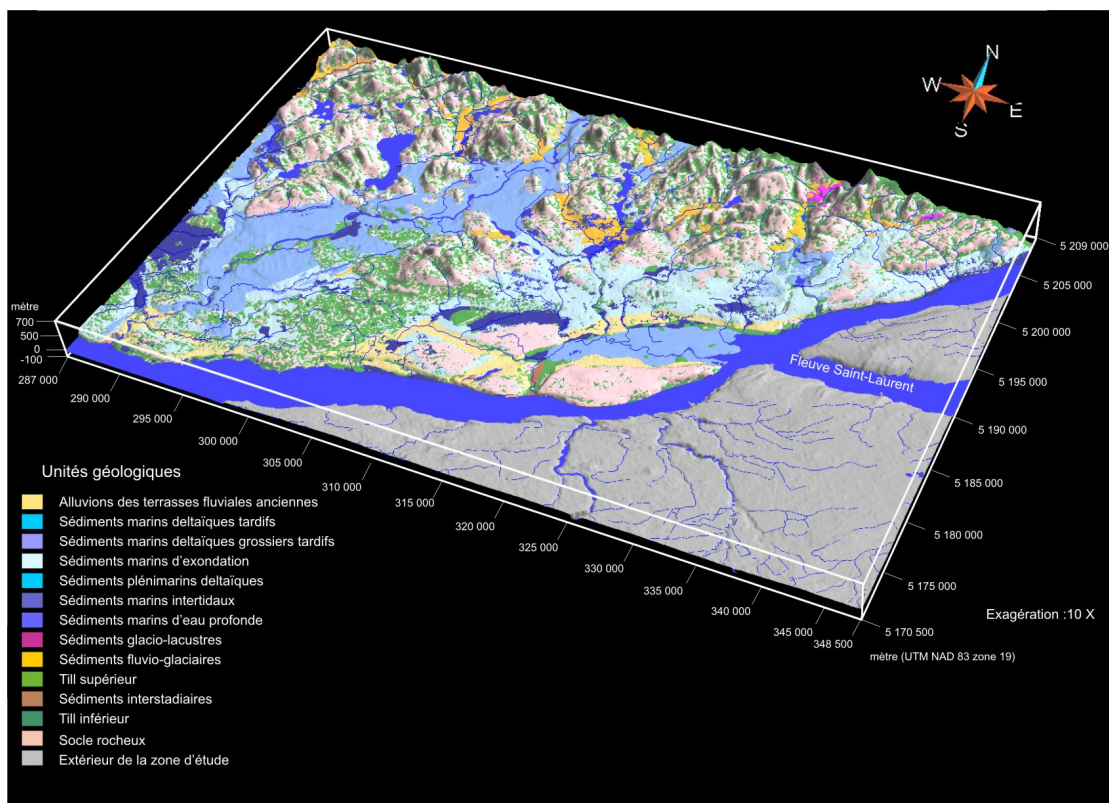


Figure 2.41 Alluvions de terrasses fluviales précoces modélisées

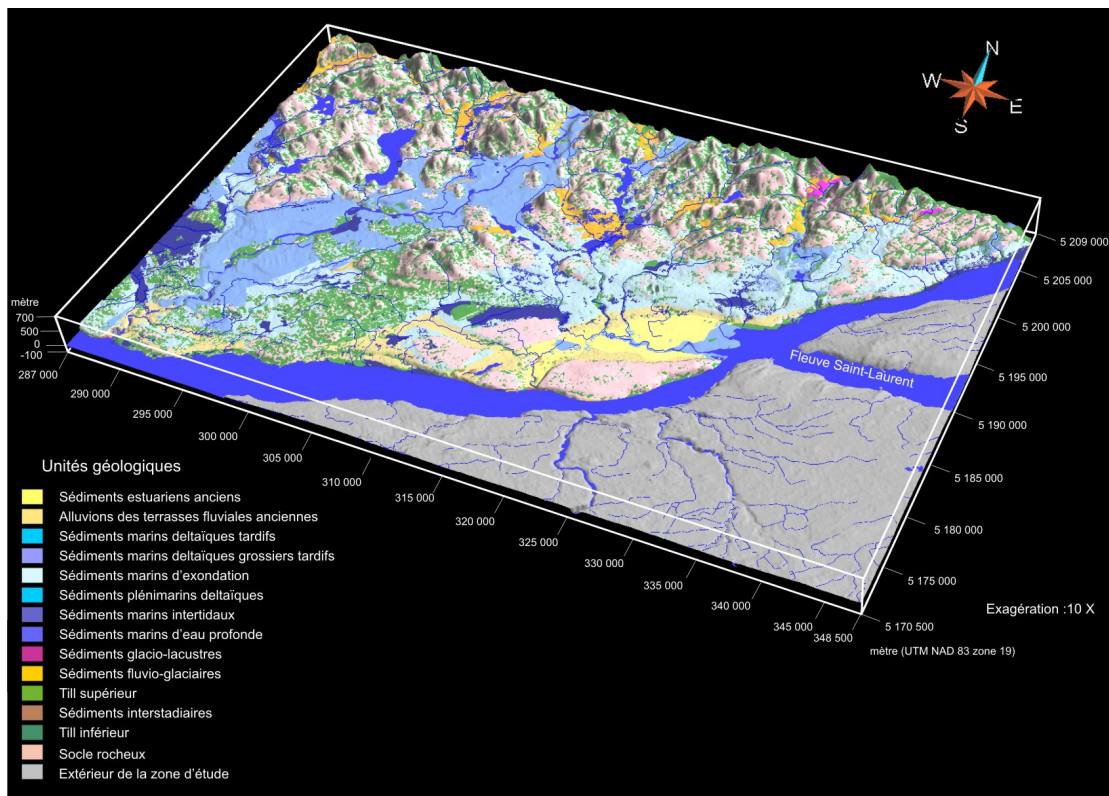


Figure 2.42 Sédiments estuariens précoces modélisés

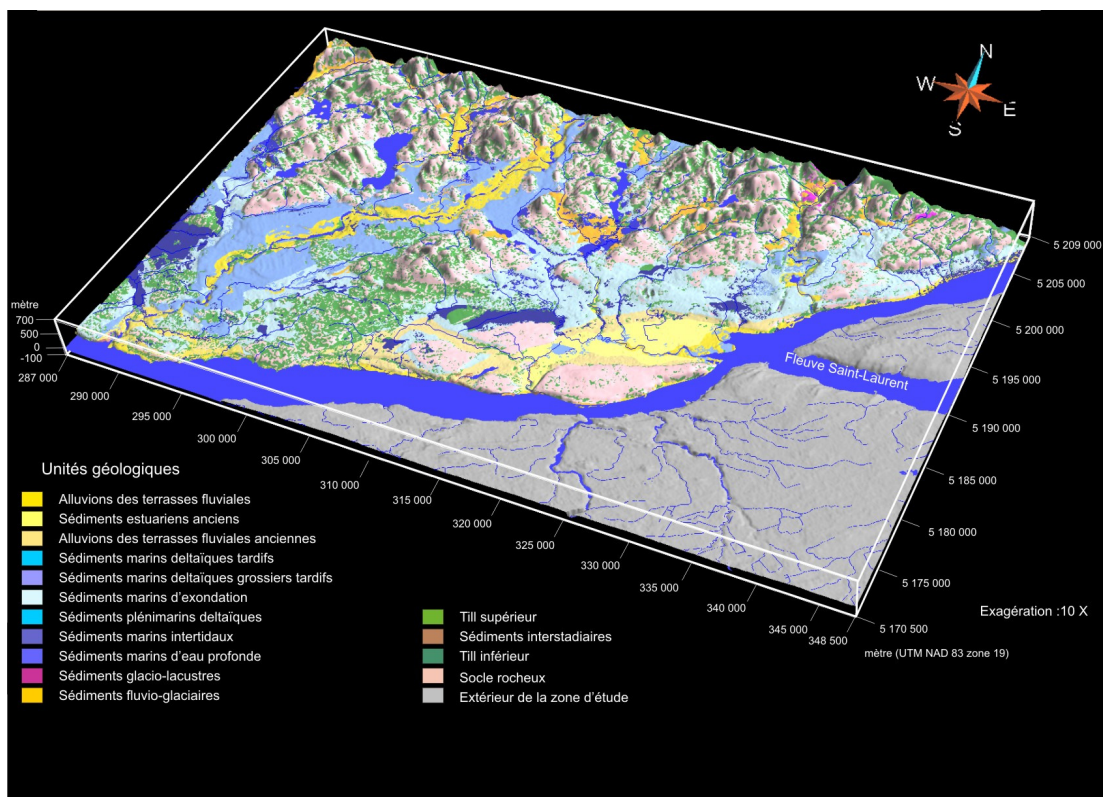


Figure 2.43 Alluvions de terrasses fluviales modélisées

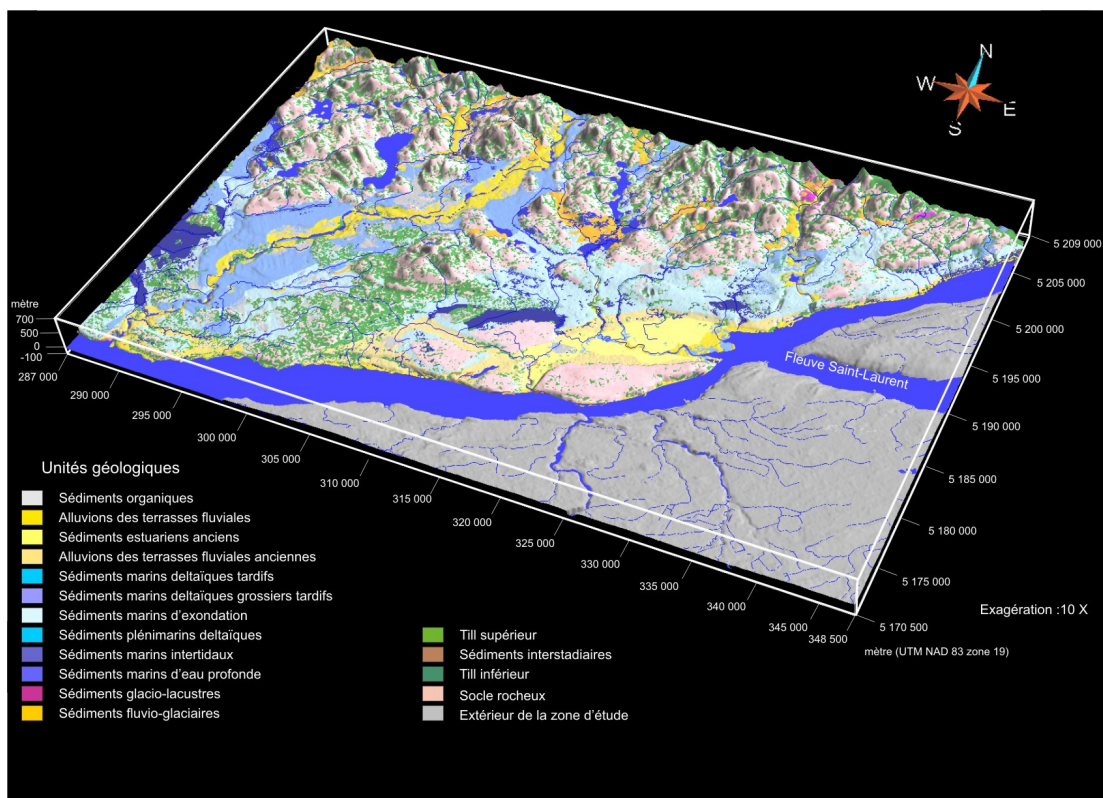


Figure 2.44 Sédiments organiques modélisés

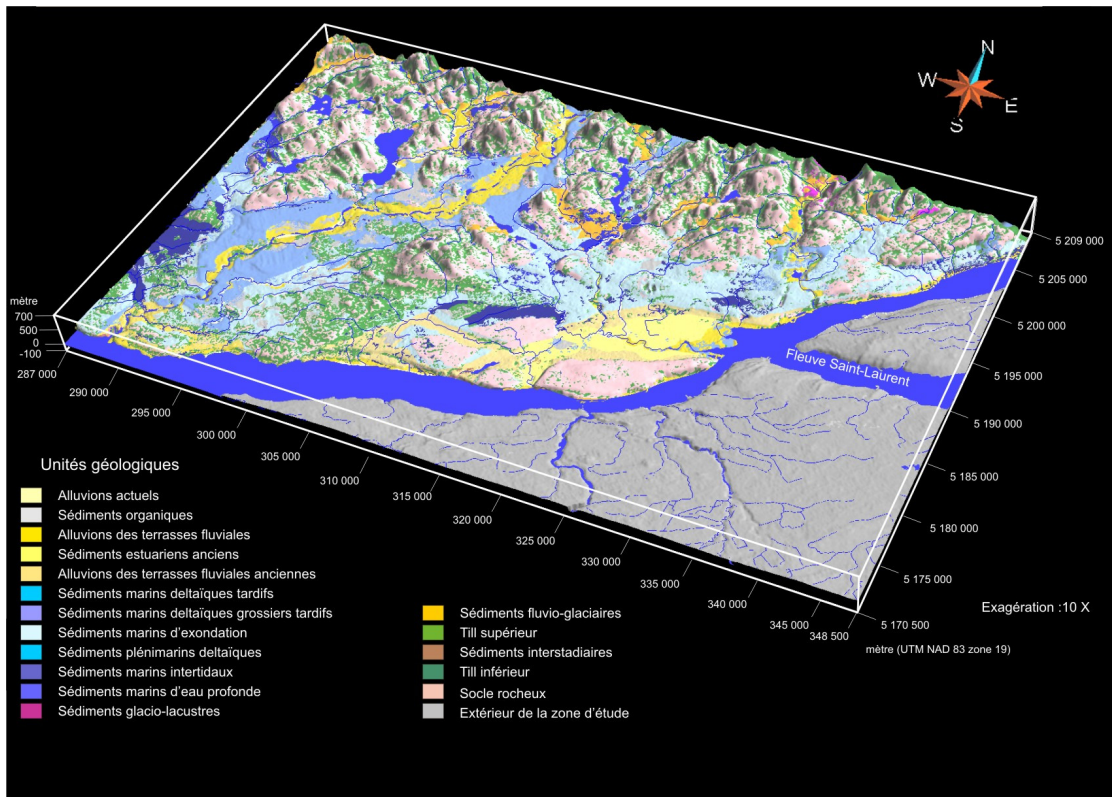


Figure 2.45 Alluvions actuelles modélisées

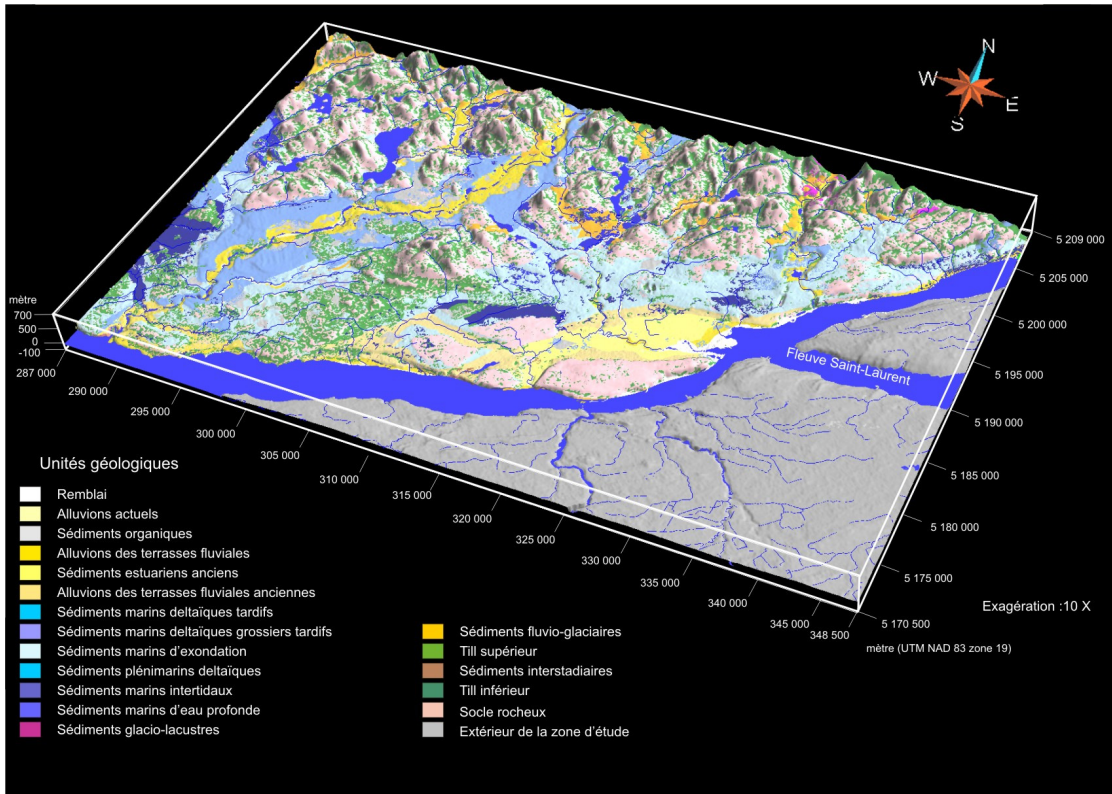


Figure 2.46 Remblai, sédiments anthropiques modélisés

## **Chapitre 3**

### **Paléoenvironnements et géochronologie**

L'évolution de la faune dans le contexte d'une incursion marine postglaciaire telle que les mers de Champlain et de Goldthwait nous renseigne sur les conditions paléoenvironnementales et ce, dès le début de l'épisode marin alors que les eaux sont encore très froides et très turbides. Les changements environnementaux, climatiques et hydriques qui suivront sont généralement marqués par l'apparition d'espèces thermohalines ou mésohalines, de littoral ou de milieu profond, de même que celle de divers végétaux terrestres susceptibles d'être incorporés aux sédiments marins. L'analyse détaillée de ces différents assemblages fauniques est un indicateur paléoenvironnemental dans l'évolution sédimentaire du secteur d'étude. De plus, l'analyse des faunes et de la flore de même que le moment de leur apparition permet de reconstituer l'évolution du niveau marin relatif ainsi que les conditions de température et de salinité des différentes masses d'eau qui ont caractérisé le détroit de Québec suite à la dernière déglaciation. Ce chapitre présente les différentes analyses réalisées dans le cadre de cette thèse sur les organismes retrouvés lors des différentes campagnes de terrain, de même qu'une compilation des datations publiées dans la littérature.

#### **3.1 Analyses microfauniques**

Un groupe de cinquante-cinq échantillons provenant des forages FL06-01 et FL07-01 ont été examinés par le laboratoire BRAQ-Stratigraphie afin d'identifier la microfaune (Guilbault, 2008, 2009). Vingt-cinq des échantillons ont été prélevés dans des sédiments marins profonds localisés dans la basse ville de Québec, tandis que trente autres proviennent de silts et de sables situés sous un diamicton et sont donc antérieurs à la dernière avancée glaciaire régionale (voir chapitre 2; section 2.2.9). Les échantillons ont été désagrégés par agitation sur un plateau rotatif, sans séchage préalable. Ils ont ensuite été tamisés de façon à isoler la fraction 63-1000  $\mu\text{m}$ . Le tamis de 1000  $\mu\text{m}$  sert à intercepter les résidus grossiers (dans ce cas-ci, une grande quantité de cailloux). Le matériel retenu sur le tamis de 63  $\mu\text{m}$  a été passé à la liqueur dense (densité 1.95) afin d'extraire un concentré de foraminifères. La quantité de sable extrait étant dans certains cas un peu trop grande, quelques échantillons ont été reconcentrés à une densité légèrement inférieure (1.85). Les concentrés ont été examinés, identifiés et dénombrés sous la loupe binoculaire.

Malgré l'apparence de richesse suggérée par les différents résultats, le contenu faunique est très épars. Les spécimens, bien que généralement petits, ne montrent que peu ou pas de dissolution et leur nombre doit refléter la population originale. Toutefois, la présence d'espèces du Pacifique a été remarquée dans certains échantillons en raison d'une contamination des tamis suite à divers projets antérieurs traités dans le laboratoire; ceci doit servir de rappel quant à l'importance à



donner aux espèces présentes à seulement quelques exemplaires. Vu le nombre limité de ces contaminations, leur impact sur l'interprétation est minime. Des précautions supplémentaires, telles que l'achat de nouveaux tamis, ont été apportées pour les échantillons situés sous le till.

### 3.1.1 Sédiments de la dernière phase glaciomarine

La microfaune des sédiments fins de l'unité marine tardi- et postglaciaire peut être sous-divisée en 3 ensembles (figure 3.1). Les résultats complets sont présentés en annexe E :

- Biofaciès C: au sommet (de 32 à 39 m), on observe une forte dominance de *Cassidulina reniforme* accompagnée d'une présence d'*Elphidium excavatum* et de miliolles juvéniles, pour la plupart indéterminables. La composition est assez uniforme et le nombre de spécimens est de l'ordre de quelques dizaines, ce qui est très peu, même pour la Mer de Champlain. L'ostracode *Cytheropteron pseudomontrosiense* est présent mais en petit nombre. Des fragments d'échinodermes sont présents presque dans tous les échantillons.

- Biofaciès B: (de 39 à 44 m), il n'y a qu'un nombre très limité de foraminifères glaciomarins communs, pas d'ostracodes.

- Biofaciès A: (de 44 à 50 m), il y a un assemblage de foraminifères semblable de par sa composition et sa richesse à ce qu'on observe dans le biofaciès C. Il y a toutefois de légères différences. Les miliolles sont un peu plus rares en A qu'en C, les *Elphidium excavatum* sont un peu plus fréquents et leur pourtour est un peu plus lobé, enfin les espèces mineures sont plus fréquentes. Les ostracodes sont un peu plus dispersés, de même que les échinodermes, mais les diatomées centrales (toutes planctoniques) sont plus fréquentes. Le nombre de spécimens observés est si faible que l'interprétation paléocéologique de ce faciès n'est guère possible.

L'interprétation des faunes glaciomarines proximales a fait un progrès décisif grâce aux travaux de Korsun et Hald (1998, 2000) en Nouvelle-Zemble et au Spitzberg. On soupçonnait déjà (Scott, 1989) que la diminution de diversité et la dominance d'espèces tolérantes dans des milieux glaciaires proximaux n'était pas due à des salinités réduites. Le front d'un glacier en fusion rapide rejette beaucoup de sédiments fins, ce qui empêche la pénétration de la lumière et conséquemment la productivité primaire (algues) y est très faible. Il en découle que seulement les espèces les moins exigeantes en matière de nourriture peuvent y survivre. Les moins exigeantes sont, dans l'ordre: *Elphidium excavatum*, *Cassidulina reniforme*, et à égalité, *Islandiella helenae* et *Nonionellina labradorica*. Il en résulte une "zonation" à partir du front glaciaire qui reproduit exactement cette succession. D'autres espèces peuvent être présentes en petit nombre, mais les biofaciès (écofaciès) à foraminifères sont établis sur la base des espèces majeures. Pour compléter, on doit ajouter que certaines espèces à test procellané (miliolles) peuvent vivre très près du front glaciaire parce qu'elles se nourrissent de bactéries et sont donc indépendantes du flux de lumière. La salinité doit cependant être prise en considération. Pour connaître la tolérance à la dessalure des principales espèces présentes dans notre matériel, la meilleure référence est Polyak et al. (2002) (Mer de Kara). La salinité minimum pour *I. helenae* et *N. labradorica* se situe aux environs de 28-30‰, celle de *C. reniforme* de 26‰ et celle de *E. excavatum* est à la limite des eaux douces.

La composition microfaunique est typique de sédiments glaciomarins. De plus, l'abondance de la fraction sable grossier dans ces sédiments d'eau profonde suggère un important délestage glaciaire, typique des milieux glaciomarins proximaux. Toutefois, très près du glacier, aucun foraminifère ne devrait être retrouvé. En s'éloignant du glacier apparaissent quelques *E. excavatum*, puis des *C. reniforme* en plus des *E. excavatum* et enfin, *I. helenae* ou *N. labradorica* viennent s'ajouter, le tout sous des conditions de salinité normale (32‰ ou plus). Cependant, la salinité pourrait avoir été un peu plus faible en raison des eaux de fonte à l'origine de la dominance de *C. reniforme* et de la quasi absence de *I. helenae*. Il est probable que les deux facteurs ont joué, mais leur importance relative est impossible à déterminer. Étant donné l'abondance de sédiments grossiers dans l'argile, la quasi absence d'elphidiidés autres qu'*E. excavatum*, la présence consistante de l'ostracode *Cytheropteron pseudomontrosiense* et l'absence d'ostracodes typiques d'eaux saumâtres, le facteur glaciomarin semble dominant.

En résumé, ces sédiments marins profonds sont un bon exemple de faune glaciomarine proximale. Le nombre réduit de spécimens fait en sorte qu'on ne peut donner d'importance statistique aux espèces peu abondantes. Quelques spécimens très usés peuvent aussi avoir été remaniés d'un niveau stratigraphique antérieur. Néanmoins, la relative uniformité dans la composition et la dominance marquée de certaines formes montrent qu'il y a ici un signal clair indiquant une déglaciation très récente. À part *C. reniforme* et *E. excavatum*, les autres espèces sont représentées presque entièrement par de très petits spécimens incomplètement développés; même les représentants d'*E. excavatum* et de *C. reniforme* sont souvent petits et rabougris. Ceci semble indiquer un milieu plutôt hostile où les organismes n'ont que des périodes de temps très courtes pour se développer.

Il est à noter que l'échantillon localisé à une profondeur de 44 m montre une particularité. En effet, un spécimen d'*Elphidium groenlandicum* y est observé. Cette forme est présente dans le Golfe du Saint-Laurent en très petit nombre, soit dans le till, soit tout de suite au-dessus, toujours mal préservée. Il semble qu'elle soit éteinte depuis assez longtemps (mais néanmoins quaternaire) et que les rares spécimens que l'on voit soient redéposés.

Les intervalles ne comptant que quelques spécimens sont plus difficiles à interpréter. Les foraminifères peuvent avoir été érodés par des cours d'eau à partir d'une foration marine antérieure puis resédimentés dans un bassin marin subséquent. Certains spicules observés sont des formes tridimensionnelles qui n'ont jamais été reconnues dans la Mer de Champlain, mais qui sont régulièrement rencontrés en mer ouverte. Ainsi, l'absence de foraminifère dans le faciès B ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'un milieu marin ouvert, puisqu'il se peut que cet intervalle représente un milieu si proximal que presque aucun foraminifère ne pouvait y vivre.

### 3.1.2 Sédiments interstadiaires

L'intervalle sédimentaire marin compris entre les deux tills à la base du forage FL06-01 (figure 2.26) ne contient qu'un nombre restreint de spécimens, de sorte qu'il n'est pas possible d'y définir des assemblages qui soient statistiquement significatifs. Toutefois il est possible d'identifier cinq biofaciès (figure 3.2). Les résultats complets sont présentés en annexe F.

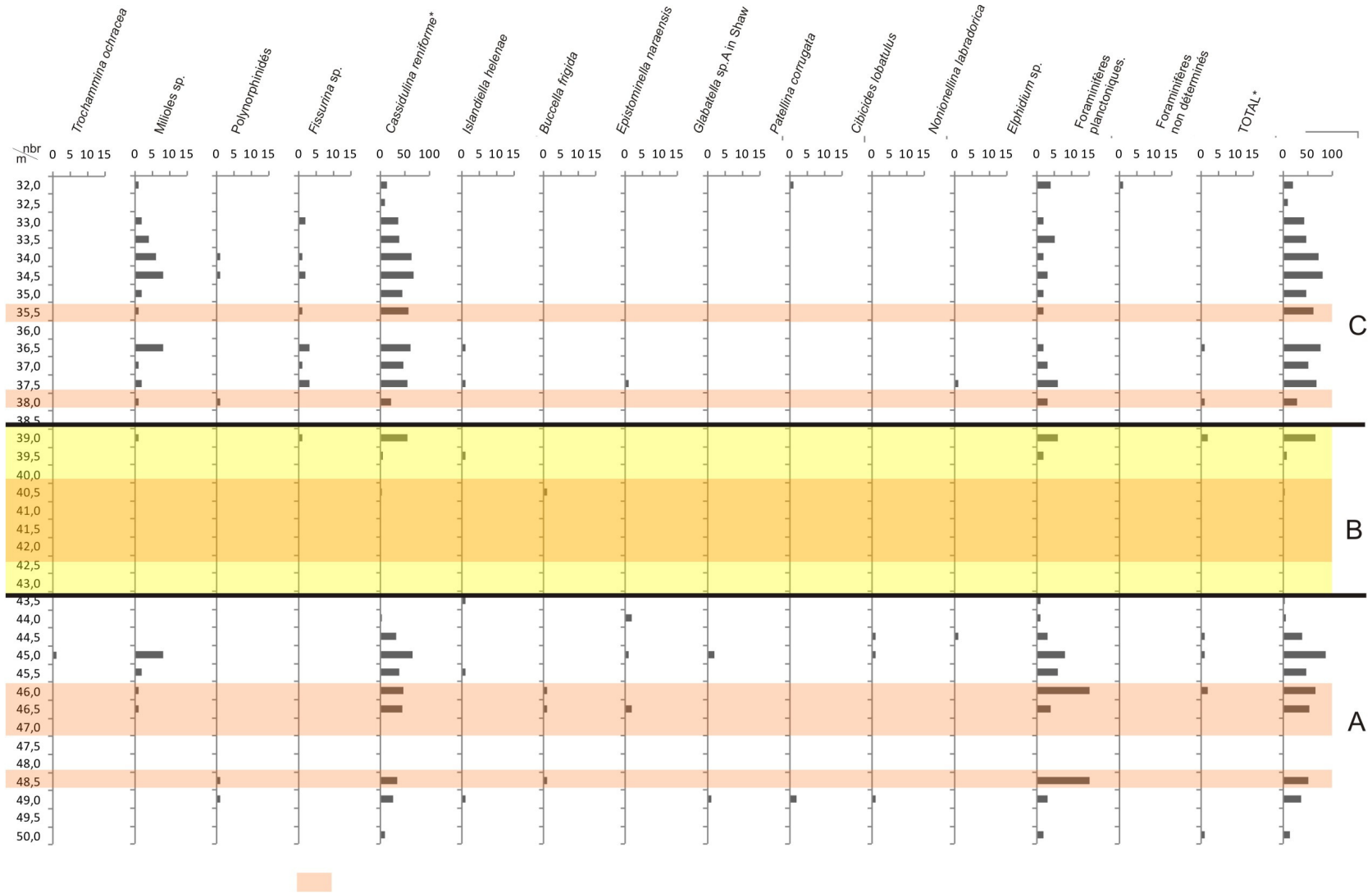


Figure 3.1 Analyses des foraminifères de l'unité glaciomarine d'eau profonde aux forages FL06-01 et FL07-01

Du sommet vers la base on observe (figure 3.2):

- Biofaciès D : (de 63 à 65 m) le sédiment est un sable fin silteux (cf. figure 2.27) contenant quelques foraminifères et quelques ostracodes. Cet intervalle contient aussi quelques fragments végétaux, mais il y a quasi absence d'autres organismes.
- Biofaciès E : (de 65 à 67 m) le sédiment est un sable moyen à fin contenant de rares macrorestes végétaux, mais pas d'ostracodes ni de fragments d'échinodermes. Par contre il contient quelques spicules d'éponge et des diatomées réapparaissent, ainsi que quelques cladocères et foraminifères.
- Biofaciès F : (de 67 à 69 m) le sédiment est un sable fin silteux où l'on observe un maximum d'ostracodes et un minimum de foraminifères. Les échinodermes sont également à leur maximum, tout comme les débris végétaux. Les spicules sont rares et les diatomées, absentes. Les cladocères sont présents à 68,5 m seulement.
- Biofaciès G : (de 69 à 72 m) le silt argileux se poursuit mais il contient davantage d'ostracodes. L'intervalle contient des diatomées ainsi que des spicules et des foraminifères. Les cladocères sont présents de façon dispersée.
- Biofaciès H : (de 72 à 76 m), le sédiment est un sable moyen à fin où les foraminifères, souvent mal préservés, sont moins rares que plus haut et où les ostracodes sont presque absents. Les spicules et les diatomées sont présents presque partout à l'inverse des échinodermes qui sont généralement absents. Les débris végétaux sont peu abondants.

Le nombre de spécimen par échantillon étant très réduit, l'interprétation est très difficile. Tous les assemblages sont pauvres et leur contenu en foraminifères varie peu. Il y a clairement une occurrence systématique de *E. excavatum* et *C. reniforme*. Ces espèces sont globalement typiques d'un milieu glaciomarin, tel que celui de la Mer de Champlain. Avec une représentativité statistique aussi limitée, il n'est cependant pas possible d'en connaître davantage sur le paléoenvironnement. Le problème ici est de savoir si ces spécimens sont bien *in situ* ou s'ils sont le produit d'une resédimentation. Avec un nombre aussi réduit, la conclusion ne va pas de soi.

En plus des foraminifères, le matériel a fourni des ostracodes marins, des spicules d'éponges, des osselets d'échinodermes de différents types (surtout oursins et ophiures) et des diatomées centrales. D'autre part, un certain nombre de fragments organiques, essentiellement végétaux, ont également été identifiés. La quantité de matière végétale extraite est, dans presque tous les cas, inférieure à 1% du volume de sédiment traité, mais c'est tout de même beaucoup plus que dans les sédiments de la Mer de Champlain. Des cladocères d'eau douce à saumâtre ont également été observés.

Il y a donc des évidences en apparence contradictoires. À première vue, sur la base de leur mauvaise préservation, on peut supposer que les fragments végétaux ont été transportés vers le milieu marin. Certains fragments sont quasi frais, mais beaucoup sont plus ou moins sinon très carbonisés et usés. Toutefois, la présence de cladocères qui sont fragiles et peu transportables suppose que le matériel ne soit pas remobilisé. Ils pourraient cependant avoir été transportés *postmortem* en milieu marin, mais ne seraient probablement pas remaniés d'une formation plus ancienne comme la matière végétale semble l'avoir été.

En ce qui concerne les espèces marines, les spicules d'éponges supportent assez bien le remaniement, mais cela peut les éroder ou les briser. Certains des spécimens présents sont effectivement brisés et dépolis, mais il y a autant de spécimens très fins avec des pointes très bien préservées. Les fragments d'oursins et d'ophiures ne sont pas très frais et pourraient avoir été légèrement remaniés. Les épines d'oursins semblent avoir subi un peu de dissolution plutôt que de l'abrasion. Il est à noter que les échinodermes exigent en général une salinité assez élevée. Les diatomées peuvent être transportées avec peu de dommage, surtout les plus petites. Les spécimens observés sont trop bien préservés pour avoir subi autre chose qu'un déplacement mineur. Les gastéropodes juvéniles et pélécy-podes juvéniles sont fragiles et donc peu remaniables, toutefois il n'est pas possible de distinguer les formes marines ou dulcicoles. Les ostracodes sont peu remaniables. Or les spécimens sont en général bien préservés et tous sont marins. En fait tous, sauf un spécimen, appartiennent à *Cytheropteron pseudomontrosiense*, une espèce typiquement associée à des milieux glaciomarins ou à des dépôts formés à proximité de paléo-fronts glaciaires (Gregory, 1980). Finalement, le faible nombre de foraminifères et leur distribution disparate ne permet pas de poser un diagnostic clair sur leur provenance.

Deux échantillons montrent une composition divergeant sensiblement des milieux glaciomarins typiquement associés à la Mer de Champlain, soit 222' (68 m) et 248' (75,5 m). De plus, deux espèces de foraminifères jusqu'ici mal reconnues sur la côte est de l'Amérique du Nord : *Bolivina decussata* et *Globocassidulina bradshawi* y ont été identifiées et cela, malgré des mesures strictes pour éviter toute possibilité de contamination. Ces deux espèces sont très répandues sur la plate-forme continentale de la Colombie-Britannique actuelle et sont plutôt intolérantes aux eaux très froides. Elles ne sont pas rapportées sur la plate-forme atlantique, peut-être parce qu'elles ont été confondues avec d'autres espèces. D'autre part, ces échantillons ne contiennent pas d'ostracodes, mais ils contiennent les mêmes spicules, diatomées, échinodermes, cladocères et la même matière végétale que les échantillons avoisinants.

L'âge de l'unité au niveau 222' et 248' ne peut être précisé sur la base du contenu en foraminifères puisque la distribution temporelle des foraminifères dans les sédiments quaternaires de la plate-forme continentale sur la côte est du Canada est mal connue. Si on se base sur les résultats de Feyling-Hanssen (1991) en Terre de Baffin, l'âge pourrait être aussi vieux que Wisconsinien inférieur. Toutefois, dans le contexte sédimentaire du bassin, une resédimentation à partir de sédiments marins plus anciens dont il ne reste peut-être plus d'évidence n'est pas à négliger. Le transport glaciaire ne peut être écarté non plus.

En conclusion, deux hypothèses sur le contexte paléoenvironnemental de ces sédiments sur la foi des analyses microfauniques semblent plausibles, soit qu'il s'agisse d'un sédiment glaciomarins ou d'un sédiment marin interglaciaire.

1- Un sédiment glaciomarins : c'est l'hypothèse la plus vraisemblable. La dernière déglaciation montre bien que ce type d'environnement est plausible au site de Québec. La base montre une unité sableuse pouvant être associée à un faciès proximal et est surmonté de faciès plus fins de 72 à 67 m, donc un intervalle plus distal. L'extrême pauvreté faunique indiquerait des conditions instables, un fort influx d'eau douce sur une base annuelle (ou autre), ou la proximité d'un front glaciaire. Un apport d'eau douce non glaciaire pourrait expliquer la présence de fragments végétaux et de puces d'eau (cladocères). Ce qui appuie cette hypothèse, c'est que le contenu

fossilifère observé est très largement marin bien qu'une partie soit probablement redéposée, soit à l'intérieur même du bassin ou d'une formation antérieure. De plus, les formes les plus sensibles, soit les ostracodes, sont bien préservées et sont marines, plus précisément glaciomarines. Fait à noter, les conditions paléo-océanographiques seraient toutefois très différentes de celles observées dans la Mer de Champlain, notamment avec une salinité nettement moindre comme en témoigne la microfaune observée. Quant aux faunes des niveaux 222 et 248 m, ils peuvent être le résultat d'un remaniement, mais leur préservation relativement bonne pourrait s'accorder tout aussi bien avec une brève incursion d'eau salée dans le bassin.

2- Un dépôt marin interglaciaire : étant donné l'altitude très basse du dépôt, 58 m sous le niveau marin actuel, il pourrait témoigner d'un environnement marin interglaciaire. Le premier problème réside dans le taux de sédimentation. À la limite Pléistocène-Holocène, les sédiments riches en silt/argile se sont déposés rapidement, dans les quelques milliers d'années suivant la déglaciation. Aujourd'hui, de grandes étendues du Golfe du St-Laurent sont des zones de non-sédimentation et une importante proportion des foraminifères sont des formes arénacées. Ce n'est pas ce qu'on observe ici. Il faudrait donc que ce dépôt représente la période, assez courte, pendant laquelle l'eau est moins froide, mais la sédimentation fine n'est pas encore terminée. Il faudrait également que les faunes tempérées du chenal Laurentien ne puissent se rendre à Québec bien que les profondeurs d'eau soient faibles et que les salinités soient si basses qu'on n'y trouve que quelques foraminifères, une partie étant remaniée. Ici, on s'approche de l'hypothèse 1 au point de ne plus pouvoir la distinguer. Le seul avantage de l'hypothèse 2 est qu'elle faciliterait l'existence de courtes périodes pendant lesquelles les faunes des niveaux 222 et 248 m auraient pu se développer *in situ*.

### 3.2 Analyses macrofauniques

Plusieurs sites dans la région de Québec ont montré différents assemblages de macrofaunes marines. Le plus connu reste le site de Saint-Nicolas (Occhietti et al., 2001). Avec une biodiversité de 34 invertébrés, 3 mammifères, 3 oiseaux et 5 poissons, ce site est un trésor paléontologique de l'incursion marine postglaciaire dans les Basses-Terres. Sur la rive nord, l'espèce la plus souvent observée est *Hiatella arctica*. Une importante thanatocénose de cette espèce a été observée sur la rive gauche de la rivière Beauport au sommet de la coupe (section 2.2.2). Elle est également présente dans la majorité des sites fossilifères rencontrés dans la zone d'étude. Généralement caractérisés par un remaniement par les courants et les vagues, ces sites sont souvent associés aux sédiments marins régressifs ainsi qu'aux sédiments glaciomarins dans le secteur de Valcartier. Ainsi, il est possible d'observer un assemblage thanatocénotique de bivalves et de cirripèdes au site DL11.11 (5 189 486N; 323 460E UTM NAD 83 zone 19) au contact des sables régressifs et des argiles marines profondes. Plusieurs espèces y sont reconnues telles que *Hiatella arctica*, *Balanus hameri*, *Macoma calcarea*, *Clamys islandicus*. Cette biodiversité à une élévation de 47 m indique que la salinité était encore élevée dans la région de Québec durant cette phase tardive de la régression marine.

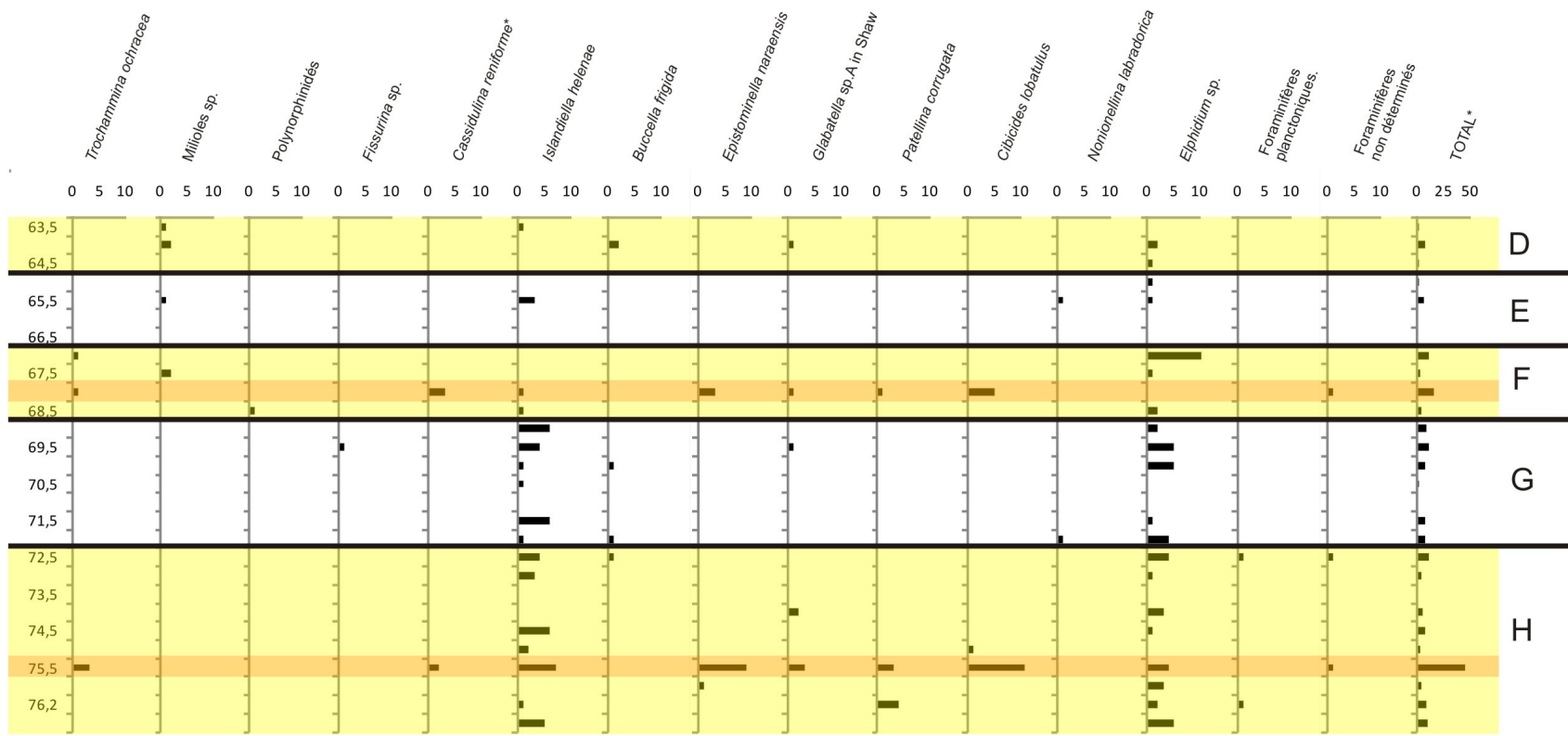


Figure 3.2 Analyses des foraminifères de l'unité interglaciaire au forage FL06-01

### 3.3 Datation

#### 3.3.1 Luminescence

La luminescence est le phénomène par lequel certains minéraux émettent de la lumière suite à une stimulation thermique ou optique. La datation par luminescence a fait ses preuves en archéologie, plus spécifiquement sur l'enfouissement des sédiments inorganiques. Dans le modèle théorique, l'horloge dosimétrique est remise à zéro lors de la dernière exposition du minéral à la lumière solaire ou à la chaleur intense. Les minéraux les plus utilisés sont le quartz et les feldspaths (Aitken, 1998; Lamothe, 1996; Huot, 2003). Les principes de la méthode de luminescence optique ont été présentés *in extenso* par Huntley et al. (1985), Wintle (1993) et Aitken (1998). Toutefois, l'utilisation de cette méthode sur les feldspaths implique des corrections sur la décroissance anormale du signal (anomalous fading) (Huntley et Lamothe, 2001; Lamothe et Auclair, 1999). De plus, la qualité de remise à zéro doit être évaluée puisque celle-ci est déterminante pour la qualité de l'âge obtenu ainsi que pour son interprétation géologique (Lamothe, 1996). Pour dater un échantillon par luminescence optique, une aliquote est soumise à une stimulation lumineuse qui vide ses pièges. La quantité de lumière émise suite à la stimulation est proportionnelle à la dose totale que l'échantillon a accumulée depuis sa dernière remise à zéro. Par la méthode par régénération d'aliquote unique (SAR : Single Aliquot Regeneration dose protocol), on obtient l'intensité lumineuse naturelle produite à partir de dose connue. Ainsi, l'âge calendrier correspond à la paléodose divisée par la dose annuelle ambiante. Cependant, il faut corriger pour tenir compte de l'humidité dans le sol car celle-ci atténue l'impact des radiations.

Un échantillon provenant du forage FL06-01 à une profondeur de 63.5 m a été analysé au laboratoire de luminescence LUX à l'UQAM. Le cœur de la carotte a été sous-échantillonné en laboratoire afin d'éviter toute exposition à la lumière; ensuite des séparations granulométriques et densimétriques ont été faites de façon à isoler les feldspaths compris entre 150  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$  de diamètre. Par la suite, des grains individuels ont été sélectionnés puis déposés sur des disques pour l'analyse dosimétrique naturelle. La dose naturelle a été mesurée sur 50 aliquotes, tandis que la courbe de croissance lumineuse a été mesurée sur 3 aliquotes et une moyenne a pu être établie afin d'obtenir la dose annuelle équivalente sur l'ensemble des aliquotes (figure 3.3). La teneur en eau a été mesurée et la dose annuelle a été établie (3 Gy/ka). La décroissance lumineuse anormale a été déduite d'après les mesures réalisées sur des dépôts similaires. La distribution de la probabilité des âges est présentée à la figure 3.4, tandis que le diagramme radial des probabilités est présenté à la figure 3.5.

Les résultats montrent, malgré certaines approximations concernant la décroissance lumineuse anormale ainsi que le faible taux de remise à zéro, que l'âge de l'échantillon semble se situer entre 30 ka et 80 ka. Cette hypothèse est préliminaire et d'autres mesures devront être réalisées afin de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. La probabilité que l'unité marine inférieure soit d'âge Wisconsinien moyen ou inférieur est à considérer, toutefois il n'est pas possible d'exclure la possibilité d'un âge plus ancien.



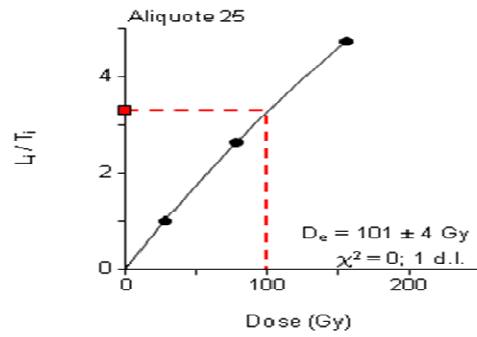


Figure 3.3 Exemple d'une courbe de croissance lumineuse en fonction de la dose reçue (aliquote FL06-01-208 #25)

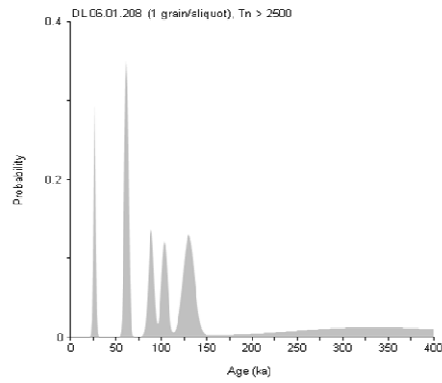


Figure 3.4 Distribution des probabilités des âges obtenus pour chacune des aliquotes de l'échantillon FL06-01-208.

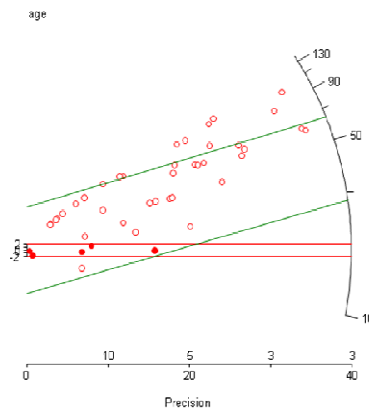


Figure 3.5 Diagramme radial de la probabilité des âges de l'échantillon FL06-01-208

### 3.3.2 Radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ )

Jusqu'à ce jour, il existe toujours une disparité entre les différentes datations au radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ) publiées. En effet, les divers laboratoires n'utilisaient pas toujours le même référentiel à ce qui a trait à la correction relative au  $\delta^{13}\text{C}$ . Pour résumer, on retrouve dans la littérature des âges conventionnels ( $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$ ; BP), des âges normalisés ( $\delta^{13}\text{C} = 0\text{‰}$ ; BP) et des âges non corrigés (mesurés en laboratoire). D'autre part, les échantillons provenant du milieu marin sont affectés par un effet réservoir local dont la correction s'ajoute à celle due au  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\sim 0\text{‰}$ ). La dissolution de carbone provenant des carbonates du socle rocheux environnant ainsi que le temps de résidence de l'eau dans le bassin entraînent un apport de carbone « mort » et par le fait même un vieillissement des âges associés aux coquilles marines. La magnitude de cet écart dépend de la localisation de l'échantillon dans le bassin. Dans le secteur à l'étude, une datation croisée entre du matériel terrestre et marin a été réalisée au site du Colisée (DL18.3), soit entre des fragments végétaux terrestres et une coquille de *H. arctica* provenant du même niveau stratigraphique (tableau 3.1). Un âge réservoir local ( $\Delta R$ ) de 1300 ans a pu ainsi être calculé; il a été appliqué sur toutes les datations provenant de matériel marin de la région de Québec. Le site de St-Nicolas montre une correction similaire (Occhietti et al., 2001). Toutefois les diverses datations ne viennent pas strictement du même niveau stratigraphique. Seule la correction du Colisée a été appliquée dans le cadre de cette étude. Ainsi, une réévaluation des datations a pu être réalisée pour le secteur de la ville de Québec. La calibration des âges  $^{14}\text{C}$  en âges « calendrier » a été effectuée à l'aide du logiciel « Calib 5.1 » (Reimer et al. 2004, Hughen et al. 2004, Stuiver et al., 1998); ces âges sont exprimés par l'annotation :CAL BP.

#### 3.3.2.1 Datations réalisées dans le cadre de cette thèse

Divers matériaux datables au  $^{14}\text{C}$  ont été récoltés lors des différentes campagnes de terrain et ce sur l'ensemble du territoire à l'étude. Afin de maximiser les analyses, une identification des macrorestes végétaux a été réalisée dans le laboratoire de paléobiogéographie et de palynologie de l'Université de Montréal (Laboratoire Jacques-Rousseau) par Alayn C. Larouche. Dix-sept échantillons ont été sélectionnés et envoyés à deux laboratoires de datation soit le laboratoire « IsoTrace Radiocarbon Laboratory » (échantillons TO) et le laboratoire « Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory » (échantillons Beta). Les différentes dates  $^{14}\text{C}$  ainsi qu'un bref descriptif sont présentés au tableau 3.1.

L'échantillon TO-13301 localisé dans les sables deltaïques de la rivière Montmorency a toutefois été rejeté en raison de sa contamination par du carbone récent. L'échantillon Beta-242589, localisé dans l'unité grossière à la coupe du IGA montre un âge dépassant la limite de la méthode  $^{14}\text{C}$ . La provenance de cet échantillon semble être l'unité interglaciaire localisée à l'ouest (amont) du site, soit dans le secteur du lac Saint-Augustin. Il aurait été érodé, puis transporté par de forts courants dans les sédiments sous-jacents au secteur de la basse ville de Québec. Huit échantillons proviennent de l'unité deltaïque tardive, dont trois dans l'unité grossière sommitale et cinq de l'unité sableuse. L'âge de l'unité sableuse est compris entre 9 ka CAL BP et 10,5 ka CAL BP, tandis que l'unité grossière représente une phase transgressive précédant l'invasion marine qui a mené au dépôt des silts estuariens qui coiffent la séquence. Une phase très récente dans la basse ville est identifiée au sommet du forage FL06-01, de même qu'à la coupe de l'usine de

traitement d'eau. Il est à noter qu'une inversion d'âges a été identifiée entre l'unité grossière au sommet du delta et l'unité estuarienne. Cette inversion semble attribuable à la circulation préférentielle des eaux souterraines dans l'unité grossière, ce qui aurait entraîné un échange de carbone récent atmosphérique avec le carbone interne de l'échantillon et aurait causé le rajeunissement des âges  $^{14}\text{C}$  apparents.

Des corrélations stratigraphiques entre les différents forages et excavations dans le secteur de la basse ville de Québec sont proposées à la figure 3.6. Ainsi, la mise en place du delta de Québec aurait duré de 10,5 ka CAL BP, ou un peu avant, à 9 ka CAL BP. Une phase érosive, associée à un bas niveau marin, a suivi de 9 ka CAL BP à 6,5 ka CAL BP. Au sommet de la séquence deltaïque est observée une unité plus fine, qui marque une phase de transition âgée d'environ 6,5 ka CAL BP. L'unité grossière présente au sommet des sables deltaïques origine d'un système fluvial dont l'âge varie de 5,7 ka CAL BP à 6 ka CAL BP. Trois épisodes transgressifs distincts seraient à l'origine des silts estuariens, soit vers 5,5 ka CAL BP, vers 2,5 ka CAL BP et vers 1000 ans CAL BP. Un étagement des datations vers le lit actuel de la rivière Saint-Charles est observé. Une séquence très récente associée à l'anthropisation de la rivière Saint-Charles est enregistrée au sommet de la coupe de l'usine de traitement. En effet, un morceau de verre moderne a été récolté dans l'unité tourbeuse à environ 3 m du sommet sous une unité sableuse litée.

### 3.3.2.2 Datations antérieures

Diverses études ont apporté une contribution majeure en ce qui concerne l'âge des différents événements quaternaires du secteur de la ville de Québec, en particulier l'incursion marine qui a suivi la déglaciation. Dans un rayon de 100 km autour du secteur d'étude, plus de 90 datations ont été publiées, la majorité ayant été réalisées sur les coquilles de diverses espèces marines (figure 3.7). Les datations compilées proviennent de multiples sources, soit sous forme d'articles dont Parent et Occhietti (1988), Allard et Séguin (1992), Lasalle et Shilts (1993), Garneau (1997), Occhietti et al. (2001), ou de bases de données non publiées (Bolduc, comm. pers., Parent, comm. pers.), ou encore de compilations publiées par la Commission géologique du Canada et enfin de la présente étude. Toutefois, une révision des données de base est nécessaire afin de les incorporer dans un cadre de référence cohérent. Pour ce faire, le référentiel de chacun, de même que leur localisation exacte, ont tout d'abord été identifiés. Il est à noter qu'au début des datations au radiocarbone, le ratio  $\delta^{13}\text{C}$  n'était pas systématiquement mesuré. Conformément à la pratique établie, une valeur de  $\delta^{13}\text{C} = 0 \text{ ‰}$  a été retenue lorsque la donnée n'existait pas (Dyke et al., 2003). En effet dans la littérature, les mesures brutes sur coquilles marines avoisinent 0 ‰ (Stuiver et al., 1998). Toutefois un bémol sur ces datations a été apporté pour la réalisation de la courbe de niveau marin relatif. Tous les âges ont été par la suite convertis en âge conventionnel. Si tel n'était pas le cas, l'effet réservoir a été déduit pour les matériaux marins et une correction des fluctuations de l'activité  $^{14}\text{C}$  dans l'atmosphère a été effectuée afin d'obtenir des âges calendaires. La figure 3.8 montre les différents âges calendaires en fonction de leur élévation, tandis que les données complètes sont présentées en annexe G.

Seuls 39 âges ont été retenus pour l'établissement de la courbe de niveau marin relatif présentée à la figure 3.9. Certaines datations ont été rejetées en raison de l'incertitude résultant de la datation elle-même (âge incohérent, absence de la mesure du ratio  $\delta^{13}\text{C}$ ) ou du milieu de vie des espèces datées, *B. hameri* par exemple, lequel n'était pas propice à l'établissement de la ligne de rivage

associée. D'autre part, certains âges ne correspondent pas à un événement lié au niveau marin. Par exemple, les datations de matière organique localisée à une élévation supérieure à 100 m asl correspondent à des niveaux fluviaux et non marins.

Les coquilles marines observées dans la période qui a suivi la déglaciation disparaissent vers 9 ka CAL BP, ce qui confirme la présence d'eau salée dans le secteur de Québec jusqu'à tard dans l'émersion du détroit. Ainsi, le Lac à *Lampsilis* ne se serait pas étendu jusque dans le secteur à l'étude où l'on est passé directement d'un milieu marin à un milieu fluvial. Entre 60 et 70 m, les âges sont brusquement plus jeunes, ce qui correspondrait à un événement qui serait survenu entre 10 ka CAL BP et 10,5 ka CAL BP, soit le Dryas récent. Dans le paysage régional, cet événement est souligné par de nombreuses terrasses fluviales. À une altitude supérieure à 140 m, les espèces retrouvées sont moins diversifiées et les datations sont difficiles à relier à diverses lignes de rivage. Toutefois, ces dernières datations nous renseignent quelque peu sur la dynamique de la régression qui a suivi l'incursion marine. La baisse des niveaux d'eau à cette époque semble être survenue de façon plus lente qu'à la fin du Wisconsinien et au début de l'Holocène. L'important apport en eaux de fonte pourrait en être la cause. Les fluctuations récentes du niveau relatif marin ont préalablement été reconnues dans l'axe du fleuve St-Laurent (Dionne, 2001; Lamarche, 2005). Il est possible d'observer les deux fluctuations significatives. Le premier bas niveau correspond à l'arrêt de la sédimentation deltaïque dans la basse ville, tandis que les hauts niveaux sont associés à la sédimentation estuarienne lors de l'épisode de la terrasse Mitis et aux événements tardifs de 2,5 ka CAL BP et 1000 ans CAL BP.

Tableau 3.1 Nouvelles datations au radiocarbone dans la région de Québec

Nom du site	Nom du laboratoire	Localisation (UTM NAD 83 zone 19)			Description	Âge conventionnel (année BP; $^{13}\delta\text{C} = -25\text{‰}$ )	CAL min 1 sigma	CAL max 1 sigma	Commentaires
		X	Y	Z					
DL19.2B	TO-13297	330 675	5 187 692	-1	Cône de <i>Pinus strobus</i>	420 ± 40	339	517	Remanié; unité grossière sommet des sables deltaïques
DL07.2C2	TO-13301	334 492	5 198 525	155	Bois de conifère	190 ± 50	-	-	Remanié; delta de da Monmorency
FL06-01-17'10''	Beta-228275	330 868	5 187 782	-0.5	Bois non identifié	130 ± 40	0	269	Sables alluviaux récents
DL19.2C1	TO-13298	330 675	5 187 692	0	<i>Equisetum</i> sp. (racine)	1070 ± 90	933	1051	Silts intertidaux
FL07-15 186'-188'	Beta-242590	327 900	5 188 100	4	Plante non identifiée	5460 ± 40	6213	6298	Silts intertidaux
FL07-15 196'-198'	Beta-242591	327 900	5 188 100	5	Plante non identifiée	5690 ± 40	6409	6501	Silts intertidaux
DL19.1A	Beta-228614	329 440	5 188 168	3.5	Bois non identifié	2510 ± 40	2497	2720	Silts intertidaux
FL07-19 172'-174'	Beta-242592	330 150	5 188 875	6	Plante non identifiée	6460 ± 40	7327	7426	Unité silteuse au sommet du delta
DL8.1C 650 cm	Beta-228277	328 772	5 189 027	-4	Plante non identifiée	6090 ± 40	6891	7137	Base des silts intertidaux
DL19.3A	Beta-242589	327 715	5 186 444	-1	Bois non identifié	43 390	-	-	Unité grossière
DL8.1D 700 cm	Beta-228278	328 772	5 189 027	-4	Plante non identifiée	4460 ± 40	4977	5276	Remanié; unité grossière sommet des sables deltaïques
DL19.1B	Beta-228615	329 440	5 188 168	2	Bois non identifié	5720 ± 40	6446	6560	Unité grossière sommet des sables deltaïques
DL18.3W	TO-13299	328 772	5 189 027	-4	Brindilles de <i>Salix</i> sp.	8750 ± 60	9627	9888	Sables deltaïques
DL18.3S	TO-13300	328 772	5 189 027	-4	<i>Hiatella arctica</i>	10 050 ± 80	9544	10146	Sables deltaïques
FL06-01-33'06''	Beta-228276	330 868	5 187 782	-4	Bois non identifié	8600 ± 40	9528	9595	Sables deltaïques
FL06-01-111'4''	Beta-242587	330 868	5 187 782	-34	Coquille non identifiée	10 090 ± 60	9599	10149	Sables deltaïques
FL06-01-113'4''	Beta-242588	330 868	5 187 782	-34.5	Coquille non identifiée	10 210 ± 60	9705	10229	Sables deltaïques

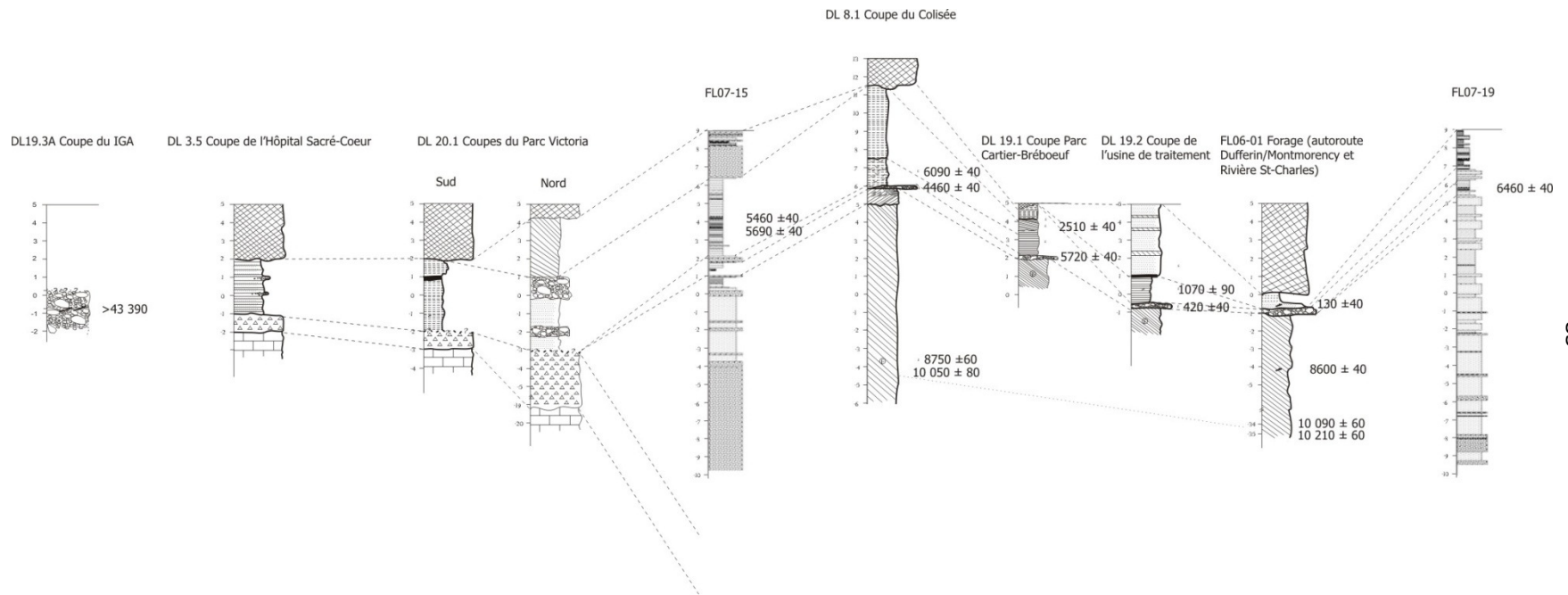


Figure 3.6 Corrélations stratigraphiques dans les coupes et forages de la basse ville de Québec réalisés dans le cadre de cette thèse.

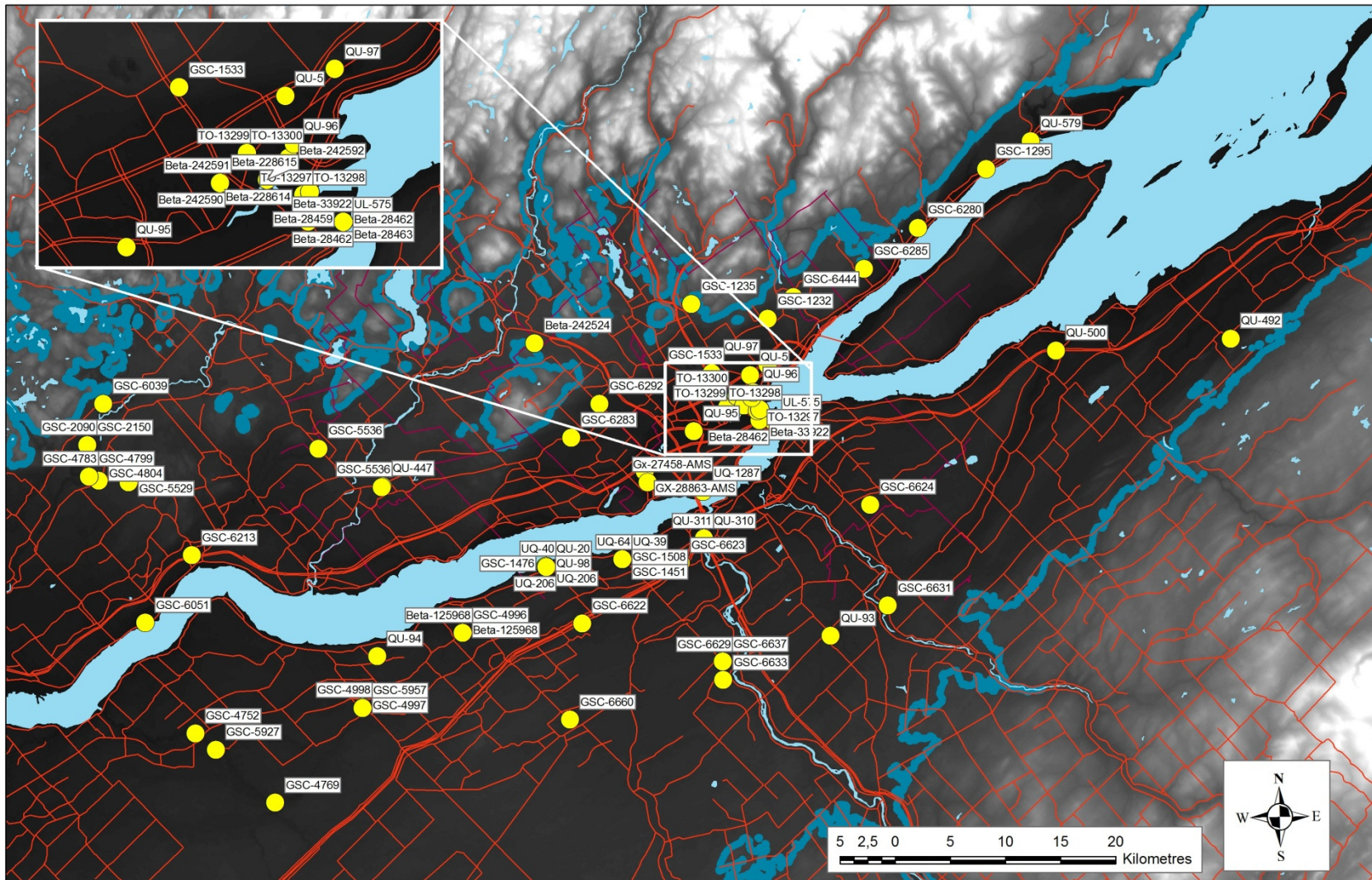


Figure 3.7 Localisation des datations dans la région environnante de Québec (la ligne bleu représente la limite marine maximale)

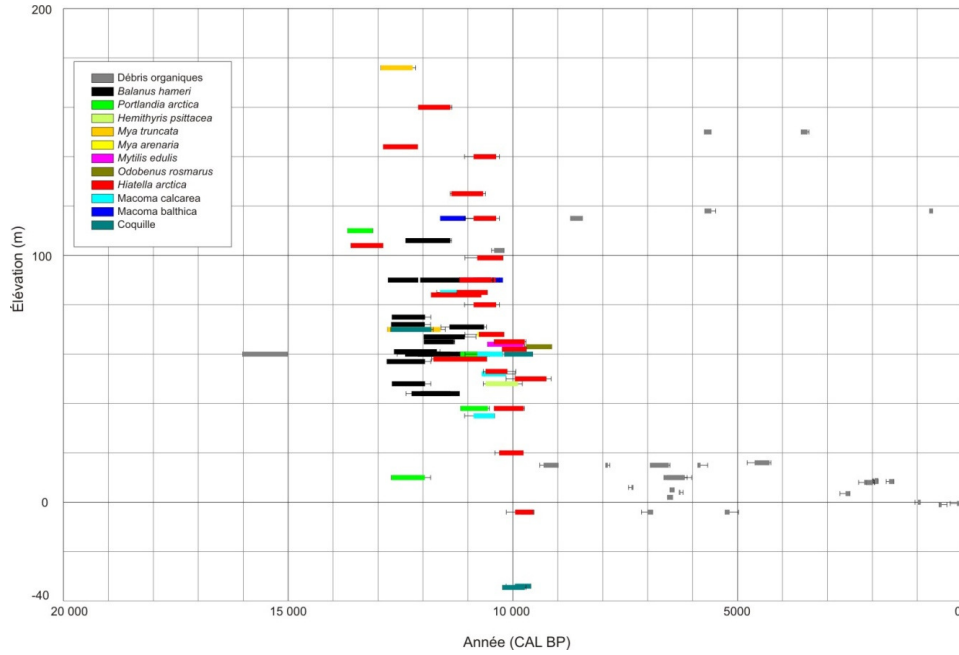


Figure 3.8 Datations au radiocarbone publiées pour la région de Québec en fonction de l'élévation.

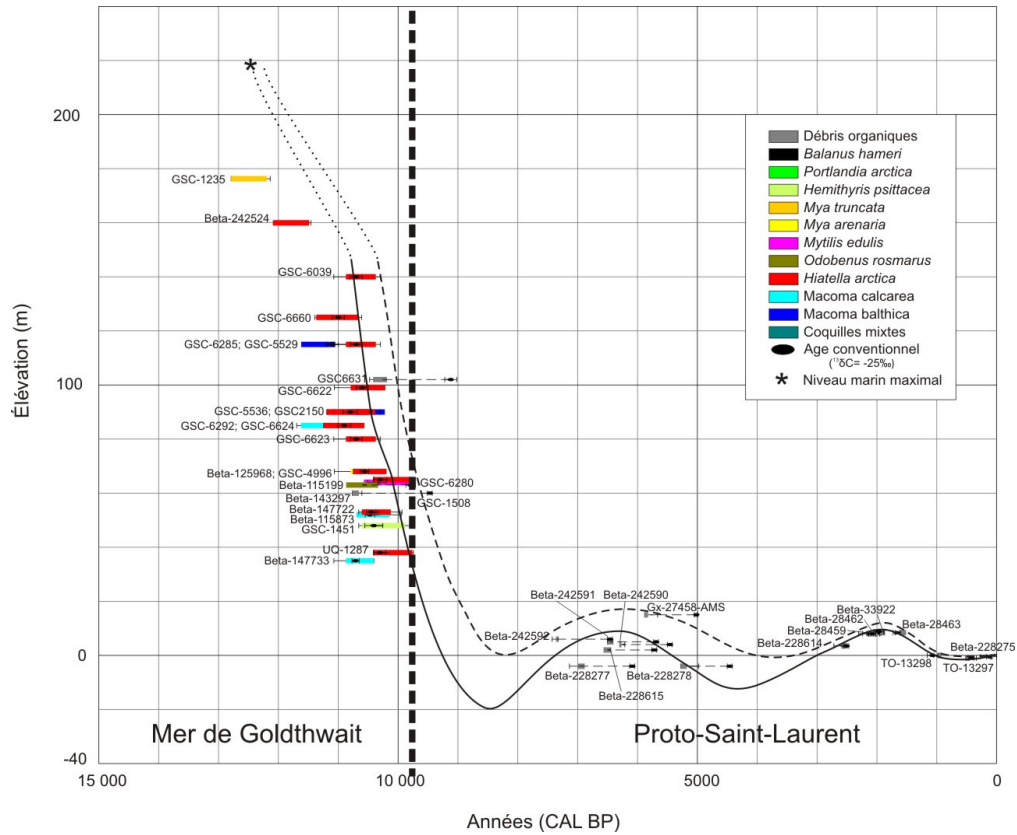


Figure 3.9 Courbe de niveau marin relatif de la région de Québec, de la dernière déglaciation à aujourd'hui. Le trait plein correspond au niveau le plus probable, le trait pointillé indique l'enveloppe de confiance.



## **Chapitre 4**

### **Modélisation géologique 3D dans un environnement urbain: le cas de l'aquifère de la ville de Québec**

Lamarche, L.<sup>1</sup>, Parent, M.<sup>2</sup>, Lefebvre, R.<sup>1</sup> et Perret, D.<sup>2</sup>

1. Institut National de Recherche Scientifique, INRS-Été

2. Commission géologique du Canada, Division Québec

#### **4.1 Contribution de la première auteure**

Le chapitre 4 est présenté sous forme d'article et répond à l'objectif de la thèse concernant la caractérisation préliminaire de l'aquifère sableux de la basse ville de Québec, ainsi que sa distribution 3D. Cet article représente donc une étude de cas sur l'intégration des multiples sources de données dans un environnement quaternaire complexe. Ces travaux permettent aussi la caractérisation préliminaire du potentiel d'un système aquifère en milieu urbain grâce à l'élaboration d'un modèle conceptuel hydrostratigraphique. La contribution de la première auteure réside dans la rédaction de l'article, de même que dans l'acquisition des données et la réalisation du modèle géologique 3D. Le second volet de l'article comprend une intégration des paramètres hydrogéologiques dans le modèle géologique 3D. La première auteure a comparé les données obtenues par CPT dans la basse ville de Québec aux données déjà compilées dans le secteur de la garnison de Valcartier (Ouillon et al., 2008). De ce fait, les limites entre les différents hydrofaciès ont pu être redéfinis sur la base de la charte des matériaux d'Eslami et Fellenius (2004). Ainsi, il a été possible de spécifier l'architecture du système deltaïque enfoui de même que la distribution des hydrofaciès.

#### **4.2 Abstract**

Quaternary sediments in the area of Quebec City are the result of a complex erosional and depositional system. The recent discovery of a deltaic aquifer system covered by estuarine silts (aquitard) in a buried channel of the Proto St. Lawrence River illustrates the importance of understanding the rapid paleoenvironmental changes induced by late- and postglacial relative sea level changes. These have a direct bearing on deltaic sediment architecture and hence on the distribution of hydraulic properties in the buried valley aquifer. A 3D geological model was developed to define the subsurface distribution of the hydrostratigraphic units. This model allows the interpolation of hydraulic properties in a regional framework incorporating the observed

hydrofacies distribution. Multiple applications of the 3D model can also be considered, such as geothermal potential evaluation or seismic hazard assessment.

### 4.3 Résumé

L'architecture des sédiments quaternaires dans la région de la ville de Québec résulte de l'évolution complexe d'un système d'érosion-sédimentation marine, estuarienne et fluviale. La découverte récente d'un delta enfoui sous la basse ville de Québec illustre l'importance de bien comprendre les changements rapides des conditions paléoenvironnementales. Ces conditions ont une influence directe sur la structure sédimentaire de même que sur la distribution des propriétés hydrauliques. Un modèle géologique 3D a été développé afin de définir les limites spatiales des différentes unités hydrostatigraphiques. Ce modèle permet de contraindre l'interpolation des propriétés hydrauliques à l'intérieur des différents hydrofaciès. De plus, ce modèle géologique 3D peut avoir de multiples autres applications, telles que l'évaluation du potentiel géothermique ou des risques sismiques.

---

### 4.4 Introduction

Depuis les années 1980, les logiciels de design assistés par ordinateur (CAD) ont permis de représenter des structures tridimensionnelles de plus en plus complexes. Dans le domaine des sciences de la Terre, la construction de modèles géologiques 3D cohérents est devenue une avenue prometteuse dans la compréhension des différents événements liés aux systèmes sédimentaires, particulièrement dans la caractérisation des réservoirs pétroliers, des gisements miniers ou dans la définition de l'architecture d'édifices géologiques, par exemple. Plus récemment, la modélisation géologique 3D a été développée afin d'obtenir une meilleure compréhension des systèmes aquifères pour mieux évaluer les ressources en eaux souterraines, ainsi que d'assurer leur protection. Ces développements ont été réalisés plus spécifiquement dans les aquifères en milieu sédimentaire quaternaire (Ross et al., 2005; Ouellon et al., 2008). Ce type d'aquifère présente généralement une forte hétérogénéité et des changements de faciès sur de courtes distances. La modélisation géologique 3D permet ainsi de mieux définir les limites structurelles entre les divers hydrofaciès. On définit un hydrofaciès comme étant un ensemble des matériaux géologiques déposés par un même processus géologique et qui ont des propriétés hydrauliques distinctes.

La géomodélisation est l'ensemble des méthodes mathématiques utilisée afin de modéliser de façon coordonnée la topologie, la géométrie et les paramètres physiques d'objets géologiques en tenant compte de tous les types de données liées à l'objet (Mallet, 2002). Ainsi, la modélisation géologique consiste en la représentation tridimensionnelle de la complexité d'un objet géologique, et ce malgré le peu d'information disponible (Calcagno et al., 2008). Le défi de la géomodélisation réside dans le fait que les données sont éparses, souvent de qualité médiocre et proviennent de sources multiples. Ainsi, la standardisation de la structure des bases de données favorise l'intégration des différentes sources de données dans un modèle géologique intégré.

Une compréhension des environnements sédimentaires s'avère également un atout pour la géomodélisation, dans le but de représenter de façon plausible l'architecture des sédiments de sous-surface. La succession des environnements sédimentaires de même que les fluctuations rapides du niveau marin qui caractérisent le système urbain de Québec représentent un grand défi pour la géomodélisation. La modélisation géologique 3D du secteur d'étude a été réalisée afin de définir la distribution des unités stratigraphiques de sous-surface pour établir un cadre à la modélisation hydrostratigraphique. Cet article représente donc une étude de cas sur l'intégration des multiples sources de données dans un environnement quaternaire complexe. Ces travaux permettent aussi la caractérisation préliminaire du potentiel d'un système aquifère en milieu urbain grâce à l'élaboration d'un modèle conceptuel hydrostratigraphique.

## 4.2 Région d'étude

La ville de Québec est localisée sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent à la convergence des Appalaches, des Basses-Terres du Saint-Laurent et du Bouclier canadien (Figure 4.1). La zone d'étude couvre la ville de Québec et ses environs. Le rétrécissement et la remontée du socle rocheux de la vallée du Saint-Laurent dans le secteur de Québec jouent un rôle prépondérant dans le patron de déglaciation et l'invasion marine qui s'en est suivi dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (Parent et Occhietti, 1988; 1999).

La dernière glaciation dans les environs de Québec a été marquée par des changements brusques dans la dynamique glaciaire, qu'il s'agisse de la formation d'un courant glaciaire (Parent et Occhietti, 1999) et de la réorientation de l'écoulement glaciaire (Paradis et Bolduc, 1999), ainsi que des fluctuations du niveau marin relatif (Dionne, 2001). Les hauts plateaux rocheux, surtout en bordure de la vallée du Saint-Laurent, sont recouverts par une mince couche discontinue de sédiments glaciaires, qui sont localement remaniés par l'action des vagues et des courants sous la limite marine (180-210 m ASL). Des sédiments fluvioglaciaires sont localement observés dans le secteur nord. Au fond de différentes vallées enfouies, il est possible d'observer des dépôts antérieurs à la dernière glaciation. Constitués de sable ou de silt sableux compact, ces dépôts ont vraisemblablement été mis en place lors du dernier épisode non glaciaire. (Bolduc et al., 2003)

Le centre de la vallée du fleuve, sous l'élévation de 210 m ASL sur la rive nord et 180 m ASL sur la rive sud, est recouvert par des dépôts marins, fluviaux et estuariens qui ont été déposés par une succession d'événements d'érosion et de déposition complexe durant le Wisconsinien supérieur et l'Holocène. Initialement, le système sédimentaire est contrôlé par le relèvement glacio-isostatique, lequel a mené à l'émergence du détroit séparant le bassin de la Mer de Champlain de celui de la Mer de Goldthwait. Subséquemment, à l'Holocène, le système est contrôlé par les fluctuations du niveau marin relatif (Dionne, 2001). Cinq cours d'eau majeurs ont contribué aux apports sédimentaires et à la redistribution des sédiments marins dans le secteur de Québec, soit le Proto-Saint-Laurent (ancêtre du fleuve Saint-Laurent actuel) et les rivières Jacques-Cartier, Montmorency, Beauport et Saint-Charles ; leur localisation est montrée à la figure 4.1.

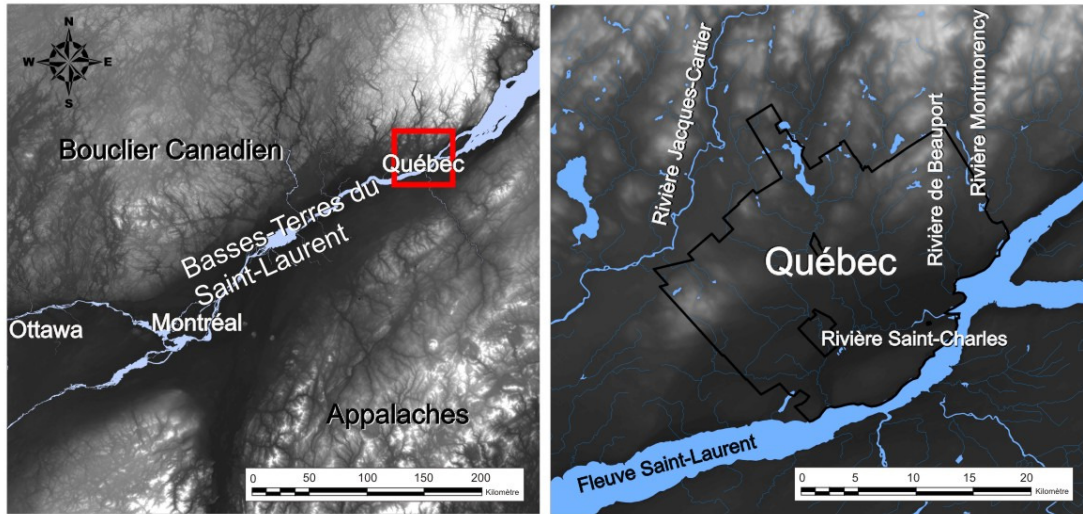


Figure 4.1. Localisation de la zone d'étude dans les environs de la ville de Québec (limite représentée par le trait noir).

## 4.6 Méthodologie

### 4.6.1 Méthode d'acquisition de données

L'élaboration d'un modèle géologique tridimensionnel repose sur la disponibilité et la qualité des données de sous-surface. Le type et la distribution des données sources peuvent différer selon les projets. Ainsi, une méthode intégrée a besoin de tenir compte des données primaires d'observation (descriptions de forage, coupes stratigraphiques, levés géophysiques, informations structurales et géométriques spécifiques, propriétés physiques du milieu) et du modèle géologique conceptuel de la région d'étude. (Appel, 2006) L'approche par coupe permet d'interpréter les données de sous-surface en respectant le modèle géologique conceptuel. Ces éléments comportent eux-mêmes un certain niveau d'incertitude. Une classification des données s'avère nécessaire afin de réduire l'incertitude liée aux données sources. Ainsi, seules les données avec un haut niveau de fiabilité sont utilisées dans la réalisation du modèle géologique 3D (Ross et al, 2005).

Le type et la distribution des données sources peuvent différer selon les projets. Les différents descriptifs des forages ont été compilés à partir des bases de données du Ministère de l'Environnement du Québec (rapports des puisatiers), du Ministère des Transports du Québec, Hydro-Québec, ainsi que des divers rapports de consultants et de firmes privées. Les données techniques du Ministère des Transports du Québec, Hydro-Québec, ainsi que des divers rapports de consultants et de firmes privées sont considérées comme étant de fiabilité moyenne à élevée, tandis que la base de données du Ministère de l'Environnement du Québec est de fiabilité moyenne à faible. En plus des 8990 forages déjà archivés dans les différentes bases de données disponibles, cette étude a permis la réalisation de 11 sondages au piézocône (CPT), d'un forage profond à récupération complète des sédiments forés par la méthode Rotosonic, d'un levé de sismique réflexion à haute résolution et de plus de 376 mesures de bruit ambiant afin de pallier aux lacunes dans les données sur les profondeurs au roc dans le secteur névralgique du modèle 3D.

Tableau 4.1 Caractéristiques des sources de données utilisées dans la réalisation du modèle géologique 3D

Type de données		Quantité	Superficie ou longueur	Commentaires
Forages archivés	Ministère de l'Environnement du Québec (MDDEP)	7322	323,5 km	Données linéaires
	Ministère des Transports du Québec (MTQ)	949	10,7 km	Données linéaires
	Hydro-Québec	59	0,9 km	Données linéaires
	Firmes privées	660	11,5 km	Données linéaires
Nouveau forage (cette étude)		1	79 m	Données linéaires
Piézocône (CPT)		11	111 m	Données linéaires
Levé de sismique réflexion		1	3,5 km sur une profondeur de 90 m	Données en coupe
Mesures de bruit ambiant		376	-	Données ponctuelles
Données topographiques de l'organisme CGIAR-CSI ( <a href="http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp">http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp</a> )		1	1595 km <sup>2</sup>	Données de surface; résolution: 90X90 m
Carte géologique révisée des formations superficielles (Lamarche et al., 2010)		1	1595 km <sup>2</sup>	Données de surface divisées en 24 unités géologiques

Les cartes géologiques des formations superficielles (Lamarche et al., 2010; Bolduc et al., 2003; Bolduc, 2003; Martel et al., 2000; Cloutier et al., 1997), basées sur des levés de terrain et des travaux de photo-interprétation, ont également servi de base à l'élaboration du cadre stratigraphique. Des travaux de terrain à l'été 2006 ont été réalisés afin de valider les cartes déjà existantes. Deux secteurs ont suscité un intérêt particulier, soit la basse ville de Québec et le secteur de l'ancienne municipalité de Val-Bélair (maintenant l'arrondissement Laurentien de la ville de Québec). La présence d'une unité fluvio-glaciaire graveleuse au sud de Val-Bélair a été identifiée, tandis que les silts retrouvés dans la basse ville, précédemment identifiés comme sédiments marins d'eau profonde (Bolduc et al., 2003) ont été réinterprétés. En effet, ces silts contiennent des débris végétaux d'origine estuarienne et sont beaucoup plus jeunes que les sédiments marins de la région. La carte géologique des formations superficielles a été rééditée afin d'intégrer ces nouvelles observations et interprétations (Lamarche et al., 2010). L'analyse stratigraphique en milieu urbain s'avère un défi de taille en ce qui concerne l'identification et la caractérisation des différentes unités. En effet, les bâtiments présents sur le territoire ainsi que la nature même des propriétés limitent l'accessibilité aux unités géologiques. De ce fait, il faut compter sur la construction de nouvelles infrastructures pour ainsi avoir accès à la sous-surface. Durant l'été 2006, la ville de Québec a construit sept bassins de rétention d'eau, ce qui nous a mené à une réinterprétation des unités géologiques récentes du secteur à l'étude. De nouveaux développements domiciliaires ont également permis de confirmer les données stratigraphiques et leur contexte dans différents secteurs de la ville.

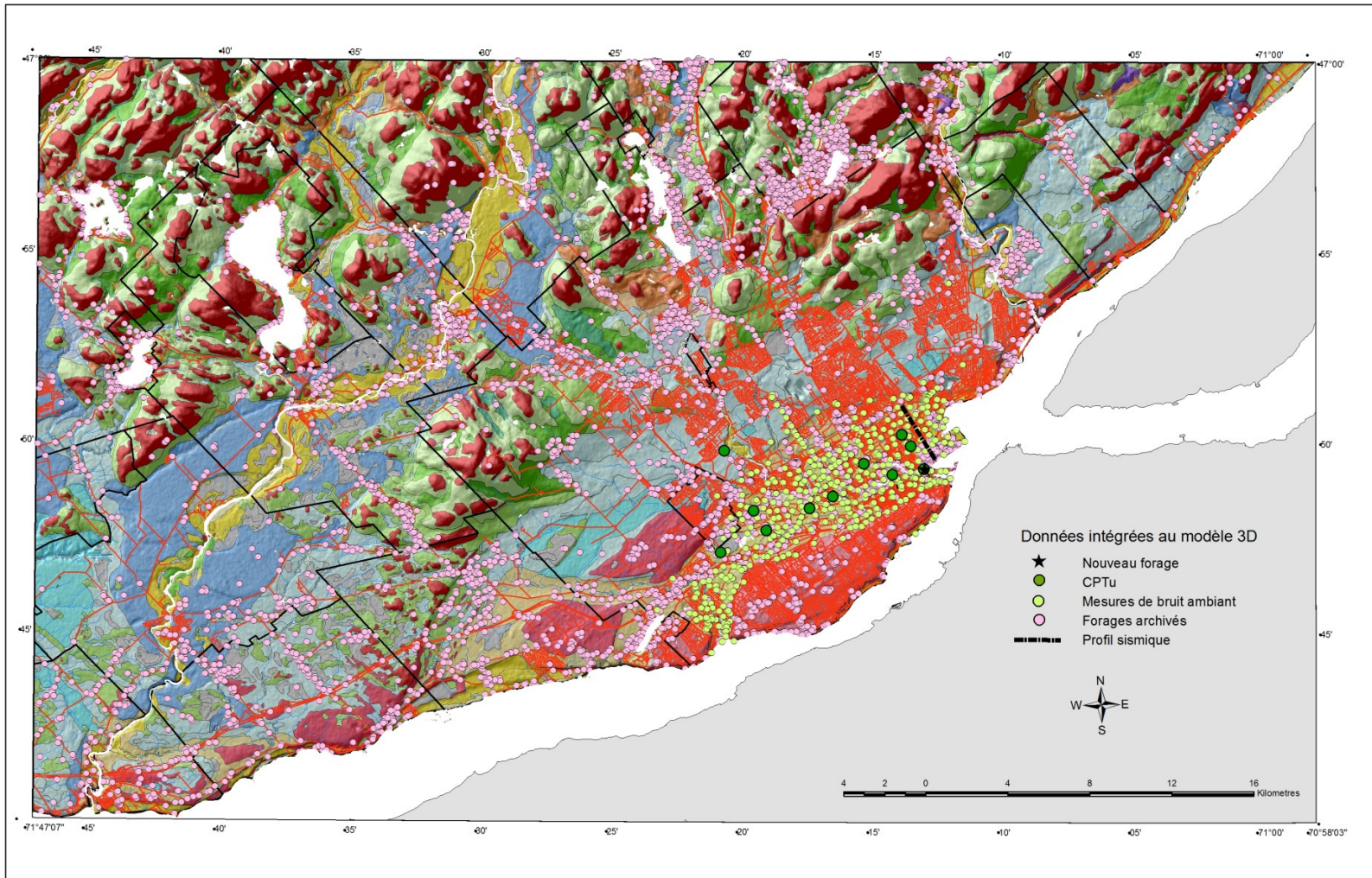


Figure 4.2. Localisation des données intégrées au modèle géologique 3D

Les données d'élévation du sol provenant de l'organisation CGIAR-CSI (<http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp>) ont été utilisées afin de contraindre le sommet du modèle. Le choix du modèle numérique de terrain a été basé sur sa résolution (90 m par 90 m) inférieure à celle du modèle produit.

Des levés géophysiques ont été réalisés dans les secteurs névralgiques de la zone d'étude, soit la vallée enfouie sous la basse ville de Québec. En effet dans ce secteur, les données directes sont peu nombreuses dans la partie profonde du bassin. La plupart des forages ne permettent pas l'identification des différentes unités jusqu'au roc. Afin de pallier à ce manque de données, un forage par la méthode Rotosonic avec récupération complète des formations meubles intersectées jusqu'à près de 80 m de profondeur a été réalisé dans la partie la plus profonde du bassin à l'automne 2006. Un nouvel échantillonnage de l'unité marine d'eau profonde a été complété au printemps 2007. L'installation d'un puits d'observation avec tubage en PVC a permis de réaliser des mesures géophysiques au moyen de diverses sondes. Ces données géophysiques ont été par la suite comparées aux descriptions lithologiques et analyses granulométriques effectuées en laboratoire (Lamarche, 2011).

Par la suite, 11 sondages au piézocône ont été réalisés à l'automne 2007. Le piézocône utilisé permet de mesurer des paramètres mécaniques (résistance en pointe, frottement latéral et pression interstitielle) et physiques (résistivité électrique et teneur en eau). À l'aide d'une étude comparative entre ces caractéristiques mécaniques et les caractéristiques hydrauliques du milieu (Eslami et Fellenius, 2004), divers hydrofaciès peuvent être identifiés (Fauveau, 2006; Ouellon, 2006; Ouellon et al., 2008). Dans un milieu deltaïque du secteur Valcartier au nord de la région d'étude, de nombreux tests hydrauliques ont permis d'identifier quatre hydrofaciès dont les caractéristiques hydrauliques sont distinctes (Ouellon et al, 2008). En se fondant principalement sur la composition granulométrique des échantillons, ces hydrofaciès ont pu être associés aux propriétés physiques mesurées à l'aide du piézocône (Fauveau, 2006). Cette étude confirme l'efficacité de cette méthode dans le cadre de notre caractérisation hydrogéologique préliminaire dans le secteur de la basse ville de Québec. Une récupération partielle des sédiments pour les unités les plus significatives a été effectuée afin de valider la corrélation entre les paramètres de la sonde et la granulométrie des échantillons. Dans la majorité des sites de sondage, lorsque l'épaisseur de la formation aquifère le permettait, deux puits d'observation ont été installés par enfoncement (direct push), l'un au sommet et l'autre à la base de l'unité perméable. Au printemps 2008, les puits ont été développés et les paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine ont été mesurés *in-situ* à l'aide d'une sonde YSI modèle 556.

Des données additionnelles permettant d'estimer approximativement la profondeur au roc ont été obtenues à l'aide d'un appareil mesurant le bruit ambiant. L'analyse se faisant suivant la méthode proposée par Nakamura (1989). La corrélation entre la fréquence de vibration mesurée et l'épaisseur des dépôts est préétablie à l'aide de la formule :

$$h \approx \frac{V_s}{4f}$$

où  $h$  est l'épaisseur des dépôts meubles,  $V_s$  est la vitesse de propagation moyenne des ondes de cisaillement et  $f$  est la fréquence mesurée. Une validation de la vitesse de propagation des ondes sismiques dans le milieu d'étude a été effectuée aux endroits dont la profondeur au roc est connue.

Des levés sismiques ont été réalisés durant les étés 2007 et 2008. Dans un premier temps, certaines mesures préliminaires ponctuelles de  $V_s$  ont été analysées afin d'identifier les différentes unités géologiques. Toutefois, les résultats de cette campagne ont été plutôt mitigés. Un profil sismique perpendiculaire à l'axe de la vallée enfouie a été effectué en 2008 au niveau de la 4<sup>e</sup> avenue à l'aide d'un camion-vibreux (Pugin et al., 1999).

Diverses analyses paléontologiques, de même que des datations ont également été réalisées, afin d'établir et de documenter le cadre stratigraphique local et de l'inscrire dans un contexte plus régional (Lamarche, 2011). Dans un milieu de glaciation continentale suivie d'une incursion marine éphémère tel celui de la ville de Québec, l'étude chronologique des événements permet de mieux définir la succession stratigraphique des dépôts, notamment les nombreuses discontinuités qui caractérisent le Quaternaire régional. Bien cadrées dans leur contexte régional, ces unités stratigraphiques peuvent mieux être représentées dans le modèle géologique 3D.

#### **4.6.1.1 Standardisation et intégration des données**

L'intégration directe de données provenant de différentes sources n'est pas toujours possible dans les plateformes de modélisation 3D, telles que gOcad® version 2.8, le logiciel utilisé dans la présente étude, de sorte que certaines modifications doivent être apportées au préalable. Premièrement, les descriptifs des forages sont souvent trop longs et disparates pour être intégrés directement dans la construction d'un modèle; ceci s'explique par le fait que les données de forages proviennent de multiples sources. Il est donc nécessaire de simplifier et de standardiser la nomenclature. Ainsi, la base de données des forages doit être bonifiée afin d'associer les différents descriptifs des matériaux à un code d'abréviation associé à la composition granulométrique des dépôts meubles; celui utilisé ici est le code abrégé du Centre géoscientifique de Québec (tableau 4.2) (Parent et al., 2008). Lorsqu'une incertitude réside dans l'interprétation des diverses abréviations dans le contexte stratigraphique local lors de l'attribution de l'unité stratigraphique correspondante, le géologue doit se référer à la description complète de l'unité. En effet, une même abréviation peut correspondre à deux unités stratigraphiques distinctes.

Les informations géophysiques peuvent être transformées en données géologiques à l'aide de méthodes d'inversion ou via l'interprétation des structures observées dans les levés. Seules les limites géologiques interprétées ont été utilisées dans la réalisation du modèle géologique 3D. Les mesures de bruit ambiant ont été converties en élévation du roc avant leur importation dans gOcad® version 2.8.



Tableau 4.2 Code abrégé des descriptifs de forage du Centre géoscientifique de Québec (Parent et al., 2008)

Matériaux	Descriptif 1	Descriptif 2	Code	Exemple de combinaison
Cailloux	B	-----	B	
Gravier	G	3 (Grossier)	G3	G3-S2
		2 (Moyen)	G2	G2-S3
		1 (Fin)	G1	
Diamicton grossier / lâche	D	3	D3	
Diamicton fin / compact		1	D1	
Sable	S	3 (Grossier)	S3	S3-S2
		2 (Moyen)	S2	S2-F1
		1 (Fin)	S1	
Silt sableux	F	2	F2	
Silt et argile		1	F1	F1-S1
Matière organique	O	-----	O	
Remblai	X	-----	X	
Roc	R	-----	R	
Inconnu / non spécifié	IN	-----	IN	

#### 4.6.1.2 Modèle géologique conceptuel

Les cartes géologiques de surface fournissent d'importantes informations sur la distribution spatiale des unités stratigraphiques de même que sur la topographie du sol. Dans un contexte régional, le modèle géologique conceptuel (figure 4.3) permet d'intégrer de façon schématique l'architecture des différentes unités en sous-surface. Les dépôts quaternaires reposent sur un socle rocheux de trois origines, soit le Bouclier canadien, les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches. À Québec, ces ensembles rocheux sont délimités par des failles régionales; le contact Bouclier/Basses-Terres est marqué par des failles normales alors que celui des Basses-Terres/Appalaches est marqué par des failles de chevauchement. Les formations quaternaires d'âges divers sont classées et regroupées selon leur âge, leur genèse et leur environnement de dépôt. Ainsi, dans la partie inférieure de la séquence stratigraphique régionale, on observe deux unités de tills séparées par des sédiments marins d'âge interstadiaire ou interglaciaire. Des amas de dépôts fluvioglaciaires sont identifiés sur le piedmont et dans les vallées des Laurentides. Les sédiments marins recouvrent de façon presque continue les dépôts antérieurs jusqu'à une élévation de 210 m, niveau maximal atteint par l'incursion marine sur la rive nord dans la région de Québec. On y retrouve des silts, silts sableux et des argiles marines profondes dans les dépressions au centre du bassin sédimentaire. Ces dépôts fins sont recouverts localement par d'épaisses nappes de sables deltaïques au débouché des vallées majeures dans la vallée du Saint-Laurent. Dans les baies abritées à proximité des complexes deltaïques se sont déposés des silts intertidaux. Ailleurs la séquence marine est coiffée de sédiments littoraux et pré-littoraux associés

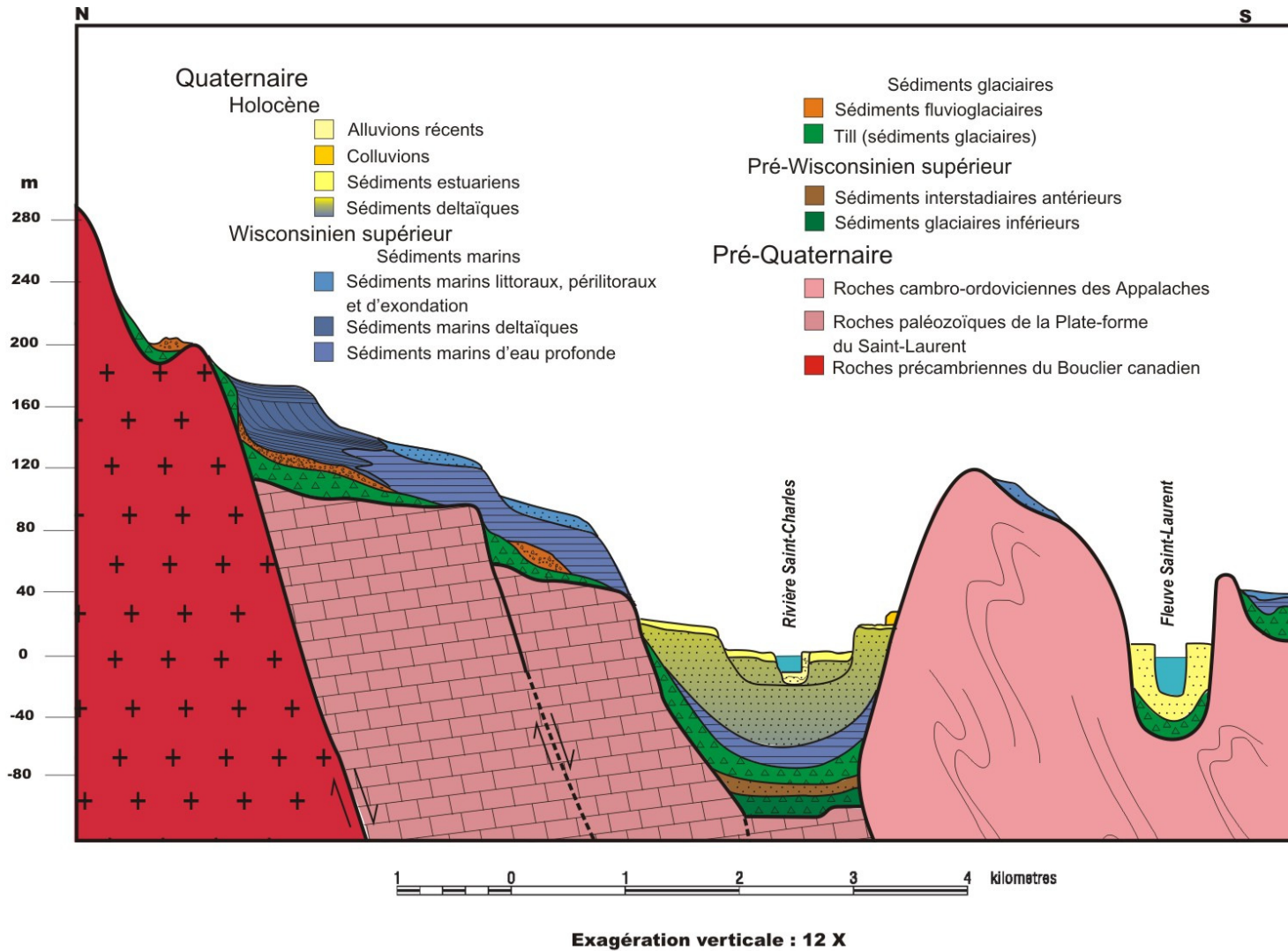


Figure 4.3 Modèle géologique conceptuel de la région de Québec.

à l'exondation marine. Les sédiments associés à l'épisode du Proto-Saint-Laurent sont concentrés dans la dépression Cap-Rouge-Limoilou parallèlement au chenal actuel du fleuve sous l'élévation de 65 m. Ils sont caractérisés par des silts estuariens recouvrant des alluvions généralement sablo-graveleuses, mais localement très grossières.

Cette succession des différentes unités quaternaires constitue la base de la réalisation d'un modèle géologique 3D cohérent. Toutefois, ce modèle géologique conceptuel doit être réévalué à chaque étape de la modélisation géologique 3D. En effet, de nouvelles données sont susceptibles d'invalider le modèle conceptuel.

Afin d'améliorer la compréhension des phénomènes géologiques dans la zone critique de l'étude et ainsi tenir compte de nombreuses données dans la basse ville de Québec (Lamarche, 2011), des coupes géologiques parallèles espacées d'un kilomètre ont également été générées. Ces coupes, réalisées à l'aide de l'utilitaire « traverse » développé par la Commission géologique du Canada, ont pour but de préciser les détails locaux non représentés dans le modèle géologique conceptuel régional.

## **4.6.2 Modélisation**

Suite à l'importation des données de différentes sources dans le logiciel de modélisation, cinq étapes sont nécessaires à la construction du modèle (figure 4.4). Tout d'abord, les données acquises dans le modèle, qu'il s'agisse de forages, de levés géophysiques ou de coupes interprétées, servent à contraindre le tracé des surfaces limites entre les unités stratigraphiques. L'intégration successive de plusieurs sources de données peut conduire à des contradictions entre les différentes contraintes, de sorte qu'une hiérarchisation des contraintes peut s'avérer nécessaire dans certains cas (Mallet, 2002). Ces deux premières étapes sont répétées itérativement jusqu'à ce que la surface soit jugée représentative du phénomène modélisé; ici ce sont les interfaces entre les différentes unités stratigraphiques. Par la suite, un maillage 3D peut être construit suivant les limites (surfaces) établies entre les différentes unités qui sont alors transformées en unités hydrostratigraphiques. Une propriété numérique d'identification est attribuée à chacune des unités délimitées par les surfaces. Une validation du modèle est réalisée à ce stade par la comparaison des coupes produites par le modèle avec les données de base. Ces cinq étapes sont répétées jusqu'à ce que le modèle soit considéré représentatif de l'architecture stratigraphique des unités sédimentaires.

### **4.6.2.1 Contraintes**

L'intégration des données dans le modèle permet l'application de contraintes sur les interfaces géologiques. Une surface est construite pour chaque unité stratigraphique présente dans la région d'étude. Dans le cas présent, ces surfaces représentent la limite supérieure de chacune des unités. Pour ce faire, il existe deux types de contraintes fréquemment utilisées, soit une contrainte souple ou stricte. Ainsi, il est possible d'obliger le modèle à se conformer de façon plus ou moins rigide aux données sources en fonction de leur degré d'incertitude. La classification adoptée pour la fiabilité des données de sous-surface est celle proposée par Ross et al. (2005). Les contraintes strictes sont utilisées dans le cas où les données sont localisées avec une précision acceptable, par exemple, les marqueurs de forages dont la fiabilité est maximale. Les contraintes souples sont

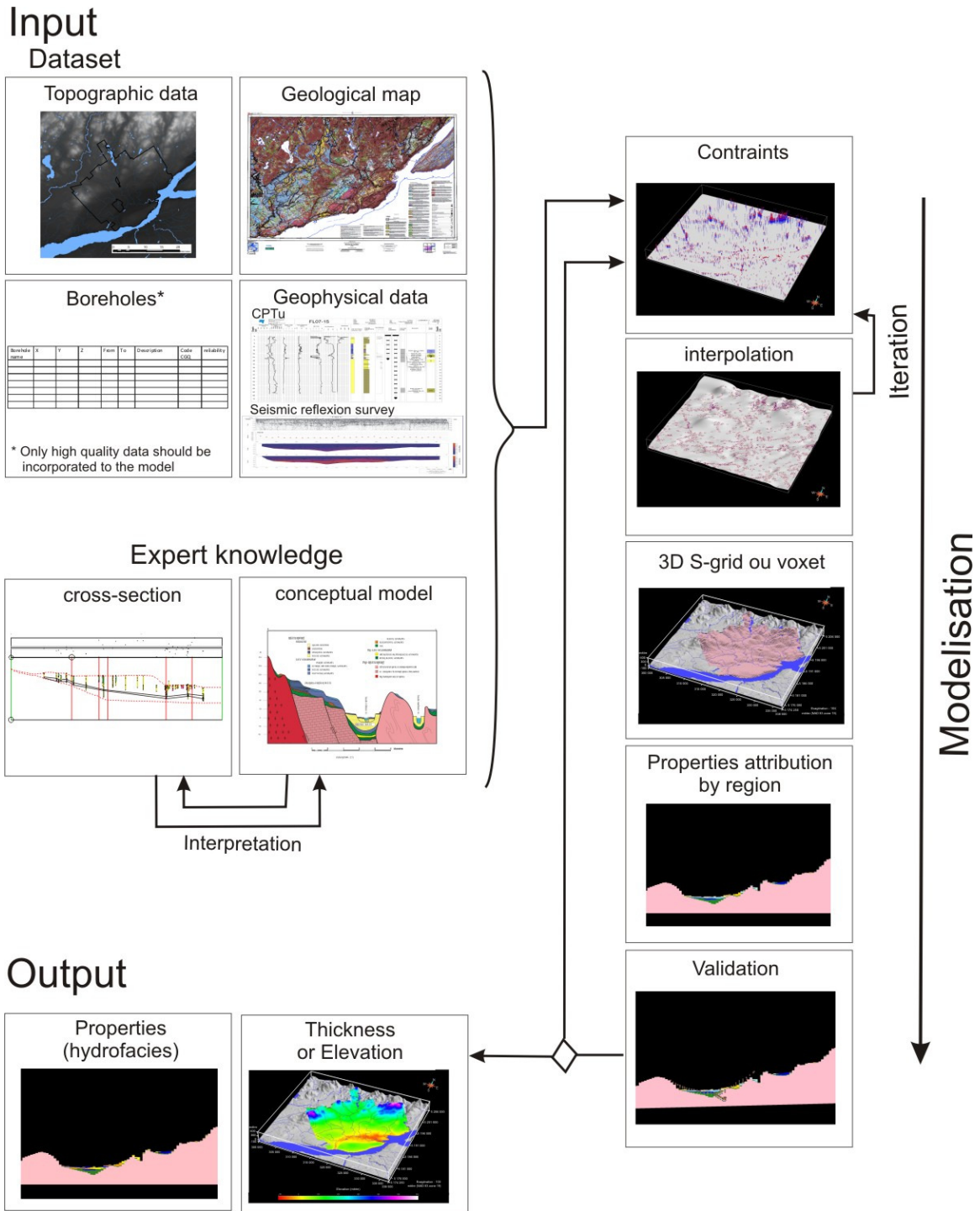


Figure 4.4 Schéma du processus de modélisation géologique 3D étape par étape (Modifié de Ross et al., 2005)

utilisées lorsqu'il existe une incertitude sur la localisation de la donnée; toutefois les renseignements liés à cette donnée fournissent une information supplémentaire sur la géométrie de sous-surface d'une unité. Par exemple, le levé de sismique réflexion montre l'allure topographique des unités, par contre leur vraie élévation peut varier selon la vitesse des ondes. De même, une unité mince sur la carte des formations superficielles nous indique évidemment que la seconde unité est à faible profondeur, de sorte qu'une contrainte d'épaisseur flexible peut être appliquée sur l'unité sous-jacente.

#### **4.6.2.2 Interpolation**

L'interpolation des données d'élévation des surfaces géologiques permet d'intégrer les différentes contraintes au modèle. La méthode DSI (Direct Smoothing Interpolation) se base sur la réduction de la rugosité de la surface en réduisant au maximum la violation des contraintes. À deux nœuds voisins, la différence entre la tangente de ces deux points est réduite au maximum en respectant le mieux possible les contraintes du modèle (Mallet, 2002). Lorsque nécessaire, des nœuds de contrôle supplémentaires sont ajoutés manuellement afin d'optimiser l'interpolation et le respect des données.

#### **4.6.2.3 Construction du modèle 3D**

La région d'étude a été discrétisée en un maillage tridimensionnel dont chaque cellule a une résolution de 250 m par 250 m par 1 m d'épaisseur. Chaque surface délimitant les unités stratigraphiques est subséquentement employée comme limite stratigraphique pour la construction des différentes régions associées aux unités stratigraphiques correspondantes dans le modèle. Ainsi, une cellule est attribuée à une région donnée, si elle se situe sous la surface limitant l'unité stratigraphique correspondante et au-dessus des surfaces associées aux unités stratigraphiques antérieures.

#### **4.6.2.4 Attribution des propriétés aux régions du modèle 3D**

Puisque gOcad ® version 2.8 ne permet pas d'attribuer un texte comme propriété, chacune des propriétés du modèle doit être associée à une valeur numérique (tableau 4.3). Cette étape est nécessaire afin de visualiser les différentes régions de façon à faciliter la validation et l'exportation des propriétés du modèle.

#### **4.6.2.5 Validation du modèle 3D**

Une validation visuelle entre les coupes géologiques générées par le modèle et les différentes bases de données s'avère généralement suffisante pour confirmer la validité du modèle. Si des incongruités sont détectées, le modèle géologique 3D doit être révisé et les contraintes appropriées doivent être appliquées.

### 4.6.3 Exportation du modèle 3D

Lorsque le modèle est considéré satisfaisant, il peut être exporté ou intégré à une plateforme de calcul appropriée. Ainsi, dans le secteur d'étude, l'interpolation des hydrofaciès pourra être réalisée dans un cadre stratigraphique prédéfini.

### 4.6.4 Incertitudes

Une incertitude est propagée à chacune des étapes de la modélisation géologique 3D. La qualité du modèle est à prime à bord contrôlée par la qualité des données disponibles ainsi que leur distribution spatiale (Kaufmann et Thierry, 2008). La standardisation et la hiérarchisation des données limite l'utilisation de données erronées lors de la construction du modèle (Ross et al., 2005). Localement, seules les données dont la fiabilité est la plus élevée devraient être considérées. De ce fait, dans les secteurs où les données sont disparates ou peu fiables, une connaissance des environnements de sédimentation peut également être considérée.

L'interpolateur utilisé entraîne en lui-même une distorsion dans la représentation tridimensionnelle des données. Ainsi, le DSI ne donnera pas exactement le même résultat que la méthode de l'inverse de la distance ou encore le krigeage. Ce problème a été solutionné par une validation stricte du modèle et l'application de contraintes supplémentaires.

Localement, une interprétation est nécessaire lorsque les données sont éparées et de faible qualité. Des hypothèses basées sur la connaissance des conditions paléoenvironnementales du géologue constituent des contraintes supplémentaires permettant d'éviter des incongruités stratigraphiques dans le modèle géologique 3D.

Par ailleurs, une validation croisée basée sur les propriétés hydrauliques (test de pompage) ou géophysiques de la sous-surface permet de tester la robustesse du modèle.

## 4.7 Résultats

### 4.7.1 Modèle géologique 3D

Le modèle géologique tridimensionnel de la ville de Québec se divise en 14 unités stratigraphiques, réparties en 8 types de matériel sur 4 âges distincts (tableau 4.3 et figure 4.5). Localisée à la charnière de trois ensembles géologiques d'envergure subcontinentale, la région de Québec se distingue par la variabilité géomorphologique qu'entraîne celle du socle rocheux (figure 4.5A a). En effet, le relief du Bouclier canadien de même que celui des Appalaches sont caractérisés par une rugosité bien supérieure à celle des roches sédimentaires subhorizontales des Basses-Terres du Saint-Laurent. La surface du roc est largement recouverte par une unité glaciaire représentée en vert sur la figure 4.5A b et caractérisée par un diamicton sableux à silto-sableux d'une épaisseur moyenne de 7 m et pouvant atteindre une épaisseur maximale de 30 m. Sous la limite marine, ce diamicton a été remanié plus ou moins intensément par l'action des courants et des vagues. Localement, on retrouve dans le nord du secteur d'étude des amas de

Tableau 4.3 Codification des unités et hydrofaciès du modèle 3D

Région	Unités	Type de matériel	Âge	Hydrofaciès
Roc (R)	1	1	1	5
Till et sédiments anciens (T;Q)	2	2	2	5
Sédiments fluvioglaciaires (G)	3	3	2	4
Sédiments marins silto-argileux (Ma)	4	6	3	1
Sédiments marins deltaïques plénimarin (Md)	5	4	3	2-3
Sédiments marins intertidaux (Mi)	6	5	3	1
Sédiments marins littoraux et pré-littoraux (Mb)	7	4	3	2-3
Sédiments marins deltaïques grossiers tardifs (Md_gBV)	8	3	3	4
Sédiments marins deltaïques tardifs (Md_BV)	9	4	3	2-3
Sédiments estuariens du Proto-Saint-Laurent (Ae)	10	5	3	1
Alluvions de terrasses anciennes du Proto-Saint-Laurent (Ax)	11	3	3	2-3
Alluvions actuelles (At;Ap)	12	4	4	2
Sédiments organiques (O)	13	7	4	1
Remblai (X)	14	8	4	5

Type de matériel

- 1: Roc
- 2: Diamicton
- 3: Gravier
- 4: Sable
- 5: Silt
- 6: Argile
- 7: Organique
- 8: Remblai

Âge

- 1: Pré-Quaternaire
- 2: Wisconsinien inférieur et moyen
- 3: Wisconsinien supérieur
- 4: Holocène, récent

Hydrofaciès

- 1: Perméabilité très faible (aquitard)
- 2: Perméabilité faible
- 3: Perméabilité moyenne
- 4: Perméabilité élevée
- 5: Perméabilité hétérogène

sables et graviers hétérogènes d'origine fluvioglaciaires d'une épaisseur maximale de 40 m (représentés en orange sur la figure 4.5B c).

Suite à la dernière déglaciation, les mers de Champlain et de Goldthwait ont laissé 4 principaux types de sédiments dans la région : (1) des silts argileux, parfois sableux, associés aux milieux profonds marins et représentés en bleu foncé sur la figure 4.5B d, (2) des sables et graviers deltaïques représentés en bleu moyen sur la figure 4.5C e, (3) des sédiments silteux associés aux environnements intertidaux et représentés en bleu-gris sur la figure 4.5C f et (4) des sédiments sableux ou sablo-graveleux d'origine littorale et représentés en bleu clair sur la figure 4.5D g.

L'unité marine profonde est localisée dans les dépressions au centre de la vallée. Cette unité peut atteindre une épaisseur de plus de 50 m en forage. Les sédiments deltaïques sont localisés au débouché des principaux affluents (rivières Jacques-Cartier et Montmorency) dans la vallée du Saint-Laurent et un maximum de 50 m de sable peut y être observé. Latéralement au pourtour du grand complexe deltaïque, des silts intertidaux, d'une épaisseur variant entre 0,5 m et 15 m, sont observés. Les sédiments littoraux, déposés lors de l'exondation, ont des épaisseurs variant entre 0,5 et 5 m et sont souvent associés à des terrasses ou des plages.

Un troisième complexe deltaïque associé à la dernière phase de la Mer de Goldthwait et au commencement du système fluviatile du Proto-Saint-Laurent a été identifié dans la basse ville de Québec. Cette unité localisée dans la dépression de Cap-Rouge-Limoilou est caractérisée par des faciès sablo-graveleux à la base (1 à 5 m) représenté en bleu moyen clair sur la figure 4.5D h, recouverts par des faciès sableux (1 à 30 m) représentés en bleu moyen sur la figure 4.5E i. En effet, les silts argileux estuariens sus-jacents au secteur de la basse ville sont généralement peu accessibles en coupe et avaient été interprétés comme silts argileux marins sur les cartes géologiques précédentes (Bolduc et al., 2003; Bolduc, 2003); cette couche presque continue de silts estuariens dissimule la présence de l'épaisse unité deltaïque sous-jacente au secteur de la basse ville. Ceci illustre l'importance de bien évaluer les faciès sédimentaires et de comprendre leur contexte paléoenvironnemental et les fluctuations rapides du niveau de base qui se sont produites lors de l'émersion des terres.

Plusieurs fluctuations des niveaux marins se sont produites depuis 6000 ans. Elles ont permis le dépôt d'une unité estuarienne, représentée en jaune à la figure 4.5E j, d'une épaisseur variant entre 2 et 10 m au dessus des sédiments marins deltaïques tardifs. Des alluvions de terrasses anciennes associées au Proto-Saint-Laurent, représentées en beige sur le figure 4.5F k, sont posés en discordance sur les sédiments des unités antérieures qu'ils ont également été remaniés jusqu'à l'élévation de 65 m.

Le remaniement anthropique des berges des différentes rivières a laissé dans le paysage divers remblais représentés en blanc sur la figure 4.5F l. Cette unité très hétérogène peut atteindre une épaisseur de 20 m près du port de Québec.



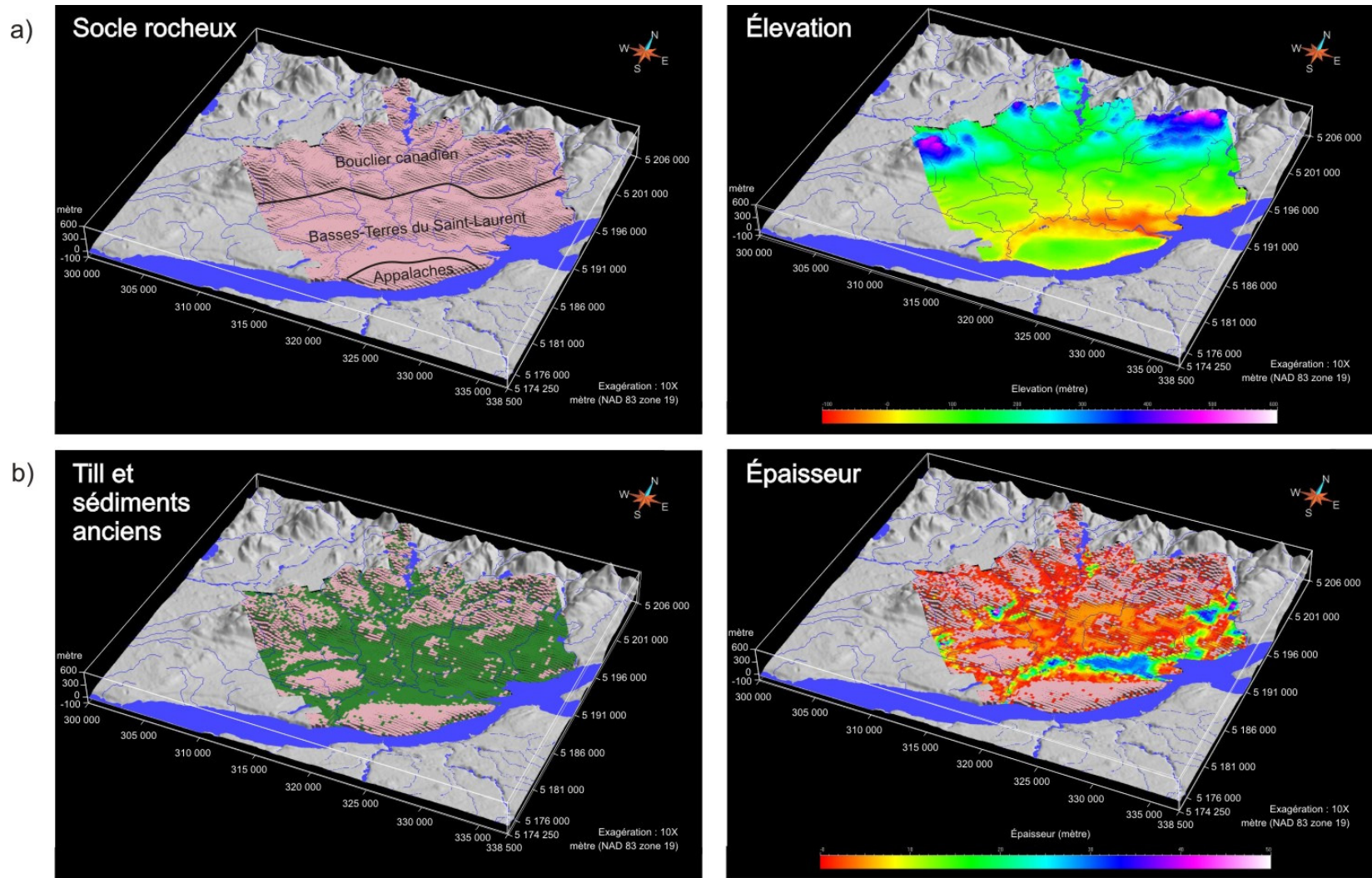


Figure 4.5A Modèle géologique 3D de la ville de Québec : a) socle rocheux et son élévation, b) Till supérieur et sédiments anciens et leur épaisseur.

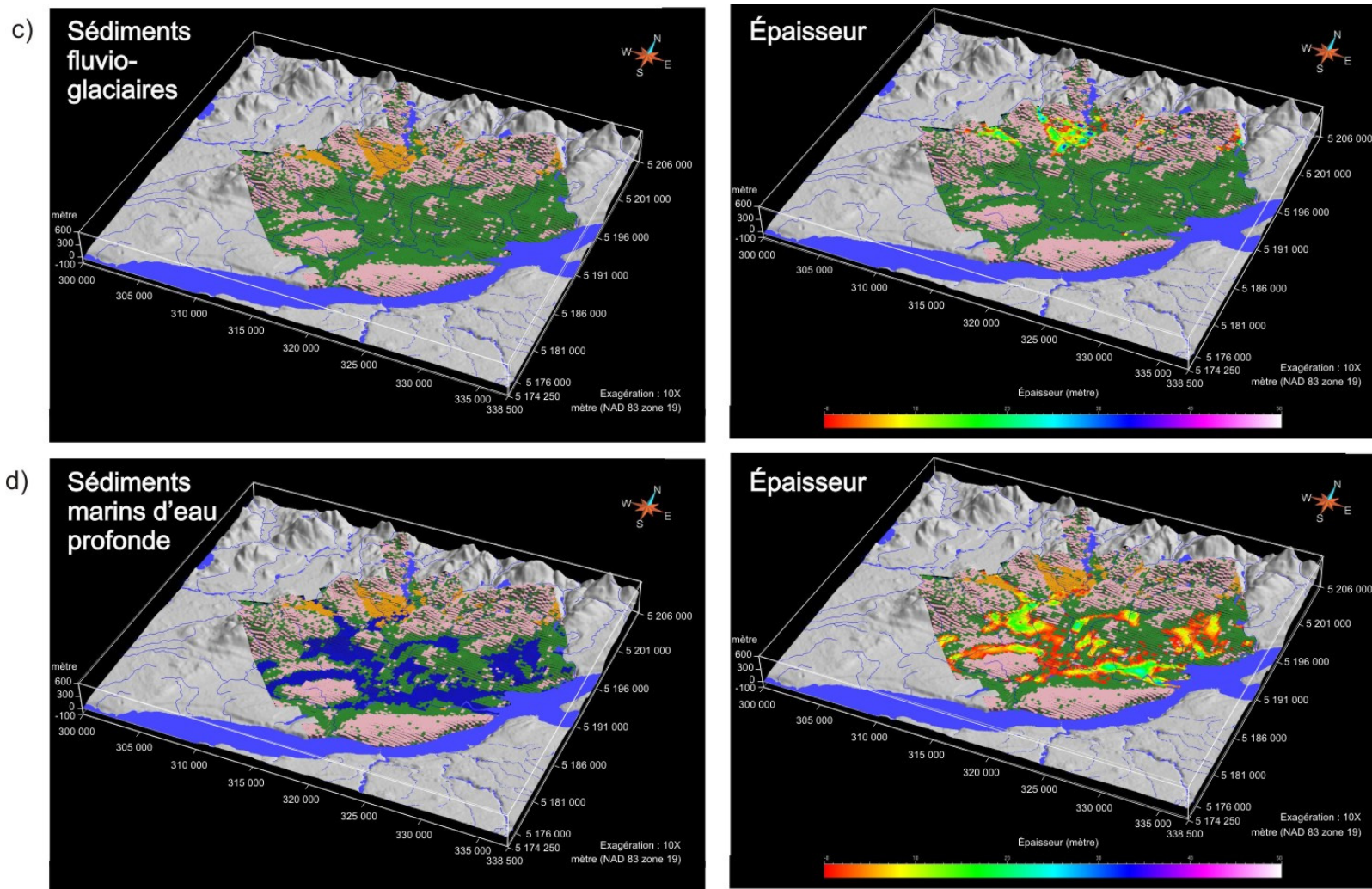


Figure 4.5B Modèle géologique 3D de la ville de Québec : c) sédiments fluvio-glaciaires et leur épaisseur, d) sédiments marins d’eau profonde et leur épaisseur.

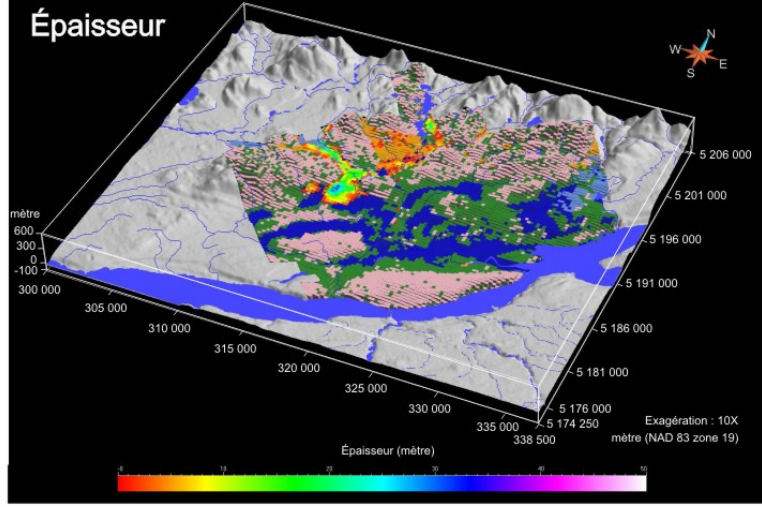
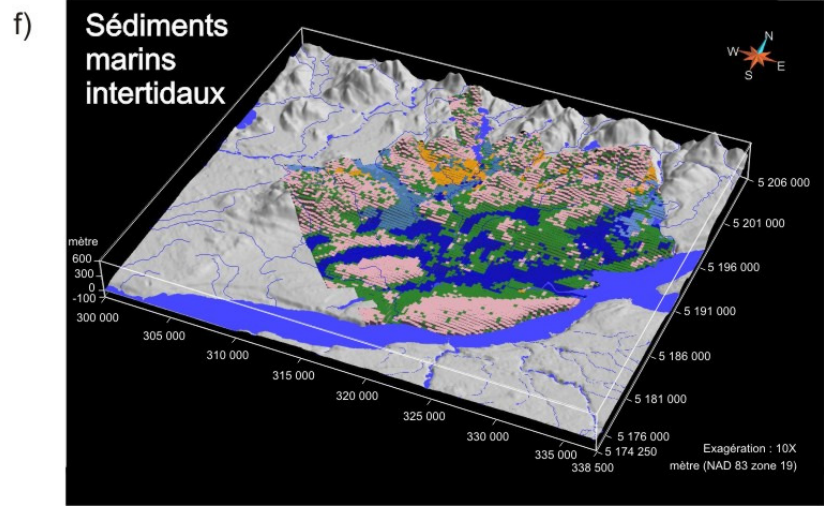
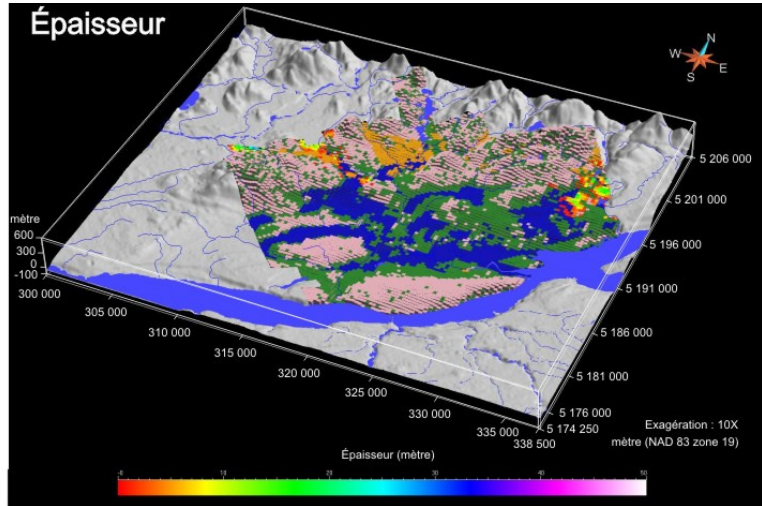
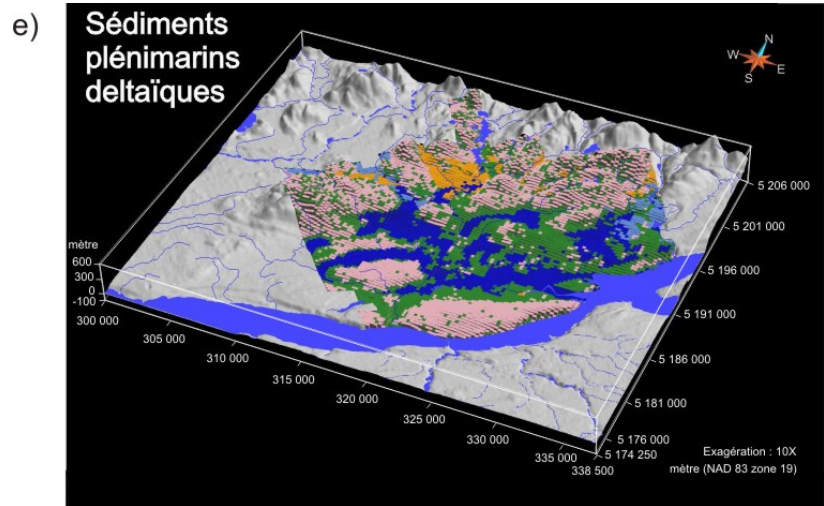


Figure 4.5C Modèle géologique 3D de la ville de Québec : e) sédiments marins deltaïques de haut niveau et leur épaisseur, f) sédiments marins intertidaux et leur épaisseur,

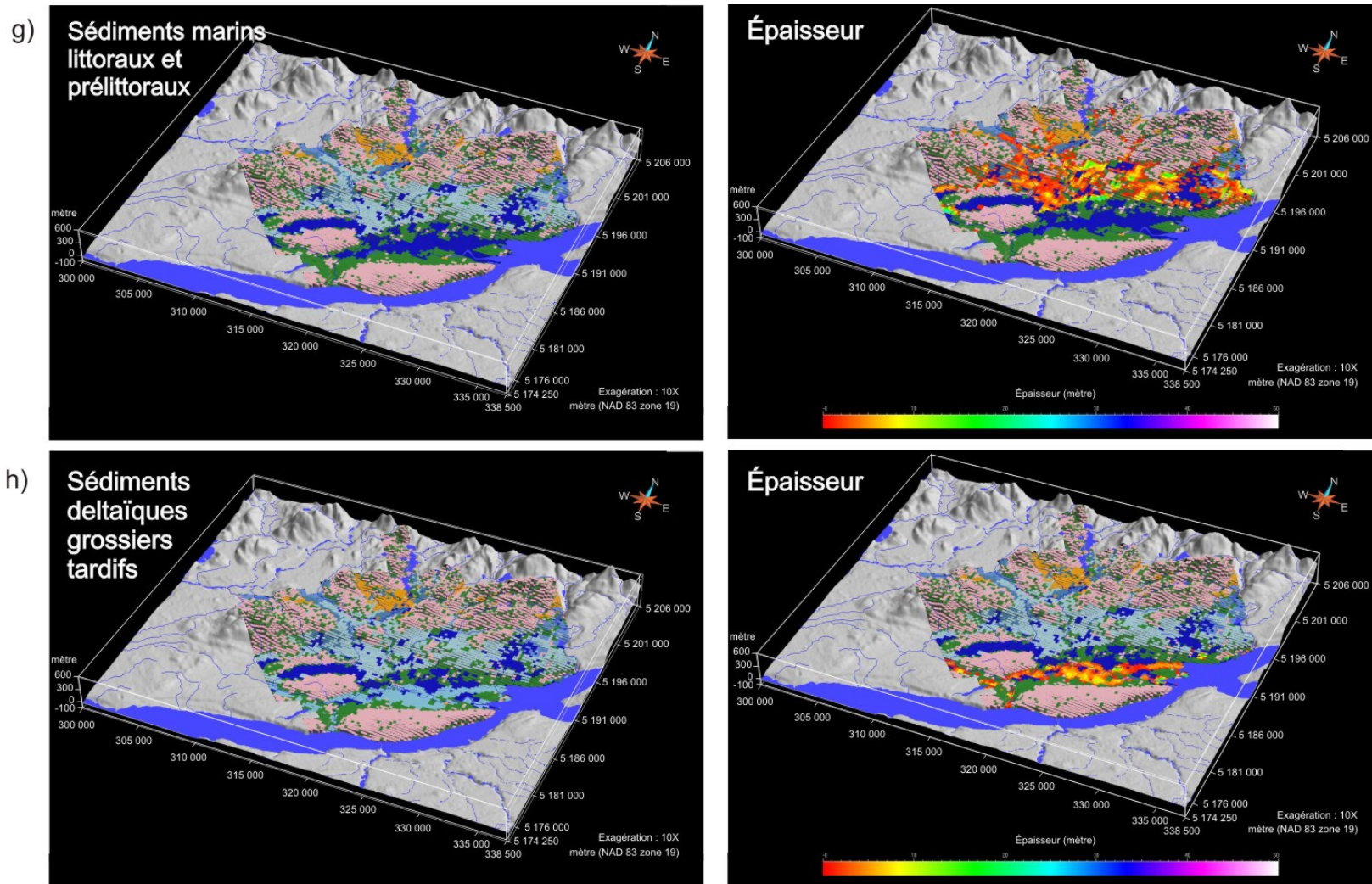


Figure 4.5D Modèle géologique 3D de la ville de Québec : g) sédiments marins littoraux et pré littoraux et leur épaisseur, h) sédiments marins deltaïques tardifs grossiers et leur épaisseur.

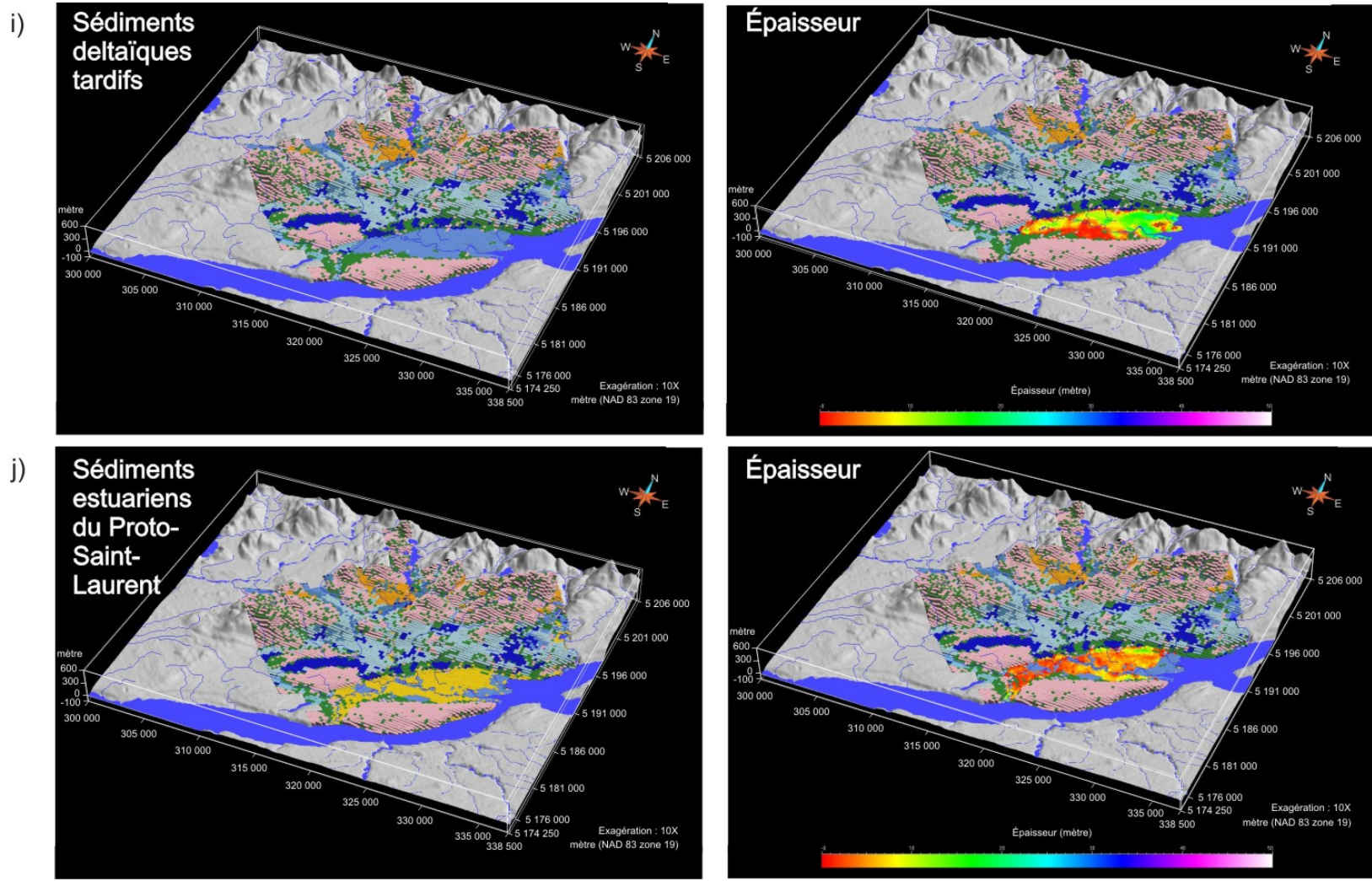


Figure 4.5E Modèle géologique 3D de la ville de Québec : i) sédiments marins deltaïques tardifs et leur épaisseur, j) sédiments estuariens du Proto-Saint-Laurent et leur épaisseur.

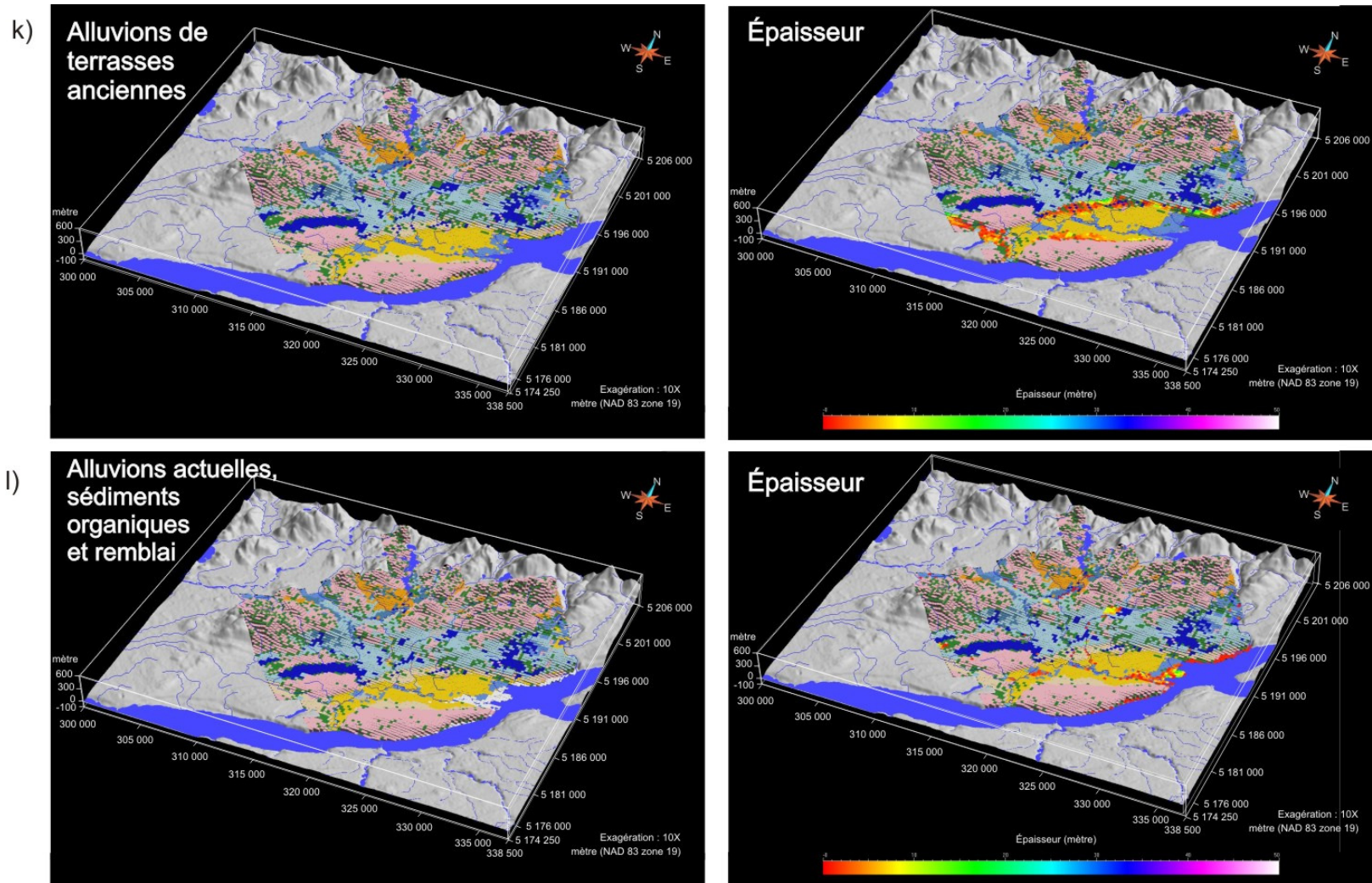


Figure 4.5F Modèle géologique 3D de la ville de Québec : k) Alluvions de terrasses anciennes du Proto-Saint-Laurent et leur épaisseur, l) alluvions actuelles, sédiments organiques et remblai et leur épaisseur.

## 4.7.2 Hydrofaciès

Le second volet du projet consiste à intégrer les données hydrogéologiques dans le modèle géologique 3D du secteur d'étude. La réalisation de forages dans le cadre d'étude hydrogéologiques étant très coûteuse, le développement de nouvelles techniques de caractérisation des aquifères devient un aspect de plus en plus important. La quantité et la qualité de données actuellement disponibles ainsi que leur distribution spatiale ne permettent pas de caractériser de façon quantitative le secteur d'étude. Toutefois, les ressources disponibles dans le cadre de l'étude de Valcartier ont permis d'approfondir diverses méthodes d'acquisition de données. Les méthodes par enfoncement (direct push) et de forage par rotoperçusion permettent d'acquérir une multitude de données dans un court laps de temps et à moindre coût (Fauveau et al., 2005). Même si les données disponibles ne sont pas suffisantes dans la région d'étude pour caractériser les propriétés hydrauliques en détail, une étude comparative des différents hydrofaciès entre la région d'étude et la Garnison de Valcartier peut toutefois être réalisée. En effet, ce site constitue un complexe deltaïque dont les caractéristiques sédimentologiques sont comparables à celles du delta de Québec.

Les hydrofaciès de Valcartier ont été préalablement définis par Ouellon et al. (2008) et peuvent être identifiés à partir des paramètres des sondages au piézocône (Fauveau, 2006; Ouellon et al., 2008). L'identification des hydrofaciès à l'aide de mesures au piézocône à Valcartier est basée sur la charte de matériaux d'Eslami et Fellenius (2004) modifiée afin de délimiter les groupes d'hydrofaciès à Valcartier possédant des propriétés hydrauliques comparables (Fauveau, 2006). Un changement a toutefois été apporté afin de représenter le mieux possible les caractéristiques particulière du delta de Québec. Ainsi, la limite entre l'hydrofaciès 1 a été repositionnée afin d'exclure l'unité de sable grossier retrouvée à la base du delta. Cette modification s'explique par le fait que la contrainte en pointe de cette unité est inférieure à 3,9 KPa (limite supérieure de l'hydrofaciès 1 dans Fauveau, 2006) et devrait plutôt apparaître dans l'hydrofaciès 4 plutôt que dans l'hydrofaciès 1. Cette nouvelle proposition de limites des hydrofaciès est présentée à la figure 4.6. La représentativité des hydrofaciès identifiés avec les sondages au piézocône a été vérifiée à l'aide d'échantillons de formations meubles prélevés dans les différents faciès (Lamarche, 2011).

Tableau 4.4 Description des hydrofaciès (modifié de Ouellon et al., 2008)

Hydrofaciès	Description
1	Argiles, silts et silt sableux
2	Sables fins à silts sableux
3	Sables fins à moyens
4	Sables moyens à grossiers, sables graveleux, graviers sableux, graviers
5	Diamictons, till : non distinguable sur la charte des matériaux d'Eslami et Fellenius (2004)

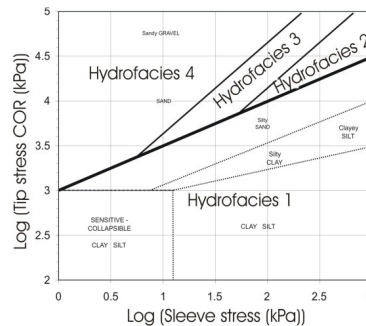


Figure 4.6 Interprétation des hydrofaciès des sédiments deltaïques de Québec basée sur la charte des matériaux d'Eslami et Fellenius (2004) (modifié de Ouellon et al., 2008).

Dans le présent contexte hydrostratigraphique, l'hydrofaciès 1 représente un aquitard tandis que les hydrofaciès 2 à 4 représentent l'aquifère deltaïque. Un cinquième hydrofaciès comprend les unités glaciaires et diverses autres unités hétérogènes, mais n'est pas représenté sur la charte des matériaux d'Eslami et Fellenius (2004). Par exemple, l'hydrofaciès 1 peut être associé à l'unité estuarienne qui recouvre les sables deltaïques dans le forage FL07-19, tandis que l'unité deltaïque est constituée d'une succession d'hydrofaciès 2 à 4 (figure 4.7).

#### 4.8 Discussion

La succession stratigraphique observée au niveau de Québec présente un défi au niveau de la compréhension des événements qui ont suivi la dernière déglaciation. De nombreuses études citent la ville de Québec comme un point tournant lors de la déglaciation des Basses-Terres du Saint-Laurent (MacPherson, 1966; Lasalle et Elson, 1975; Parent et al., 1985; Parent et Occhiatti, 1988, 1999; Richard et Occhiatti, 2004). Le détroit de Québec constitue en effet un seuil important pour l'incursion marine tardiglaciaire dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, de même que lors de sa régression. En effet, le retrait glaciaire dans la région de Québec a permis à l'eau salée de s'introduire dans les Basses-Terres qui étaient encore profondément déprimées par la surcharge glacioisostatique. Durant l'incursion marine postglaciaire, le seuil de Québec constitue une limite naturelle entre un milieu marin franc (Mer de Goldthwait) et un milieu glaciomarin (Mer de Champlain). Soumis à l'action des vagues, des courants et des marées lors de l'émersion des terres, ce seuil constitue un milieu dont la dynamique évolue rapidement avec les fluctuations du niveau de base. Ainsi, une variation de quelques mètres du niveau relatif marin peut entraîner une modification marquée des environnements sédimentaires. La réévaluation de l'architecture des dépôts dans le secteur et la réalisation d'un modèle géologique tridimensionnel dans le secteur de Québec ont mis en évidence diverses fluctuations récentes du niveau marin (Lamarche, 2011). Ces travaux ont notamment permis d'identifier une importante unité deltaïque sableuse recouverte par des silts estuariens dans la basse ville.

L'un des aspects hydrostratigraphiques les plus importants est la présence d'une unité sableuse deltaïque sous-jacente aux silts estuariens dans la vallée enfouie du Proto-Saint-Laurent; cette couche de sédiments deltaïques constitue un important aquifère précédemment inconnu, à tout le moins très mal connu, et en pleine zone urbaine. Ce delta couvre une superficie de près de 94 km<sup>2</sup> et avec une épaisseur moyenne de 4 m et une épaisseur maximale de 51 m, son volume est de 0,4 km<sup>3</sup>. Le développement d'un modèle géologique 3D a permis de délimiter cet aquifère et d'en définir la structure. La limite inférieure du delta est constituée des sédiments marins d'eau profonde très peu perméable (hydrofaciès 1) et localement, là où les argiles sont absentes, par des sédiments glaciaires (hydrofaciès 5). La surface topographique de la base du delta permet de différencier deux nappes distinctes, l'une à l'ouest se déchargeant dans la vallée de la rivière du Cap-Rouge et l'autre à l'est, beaucoup plus grande, se déchargeant principalement dans la vallée de la rivière Saint-Charles. Un relief positif du socle rocheux divise en deux bras l'écoulement vers l'est de l'eau souterraine (figure 4.8).



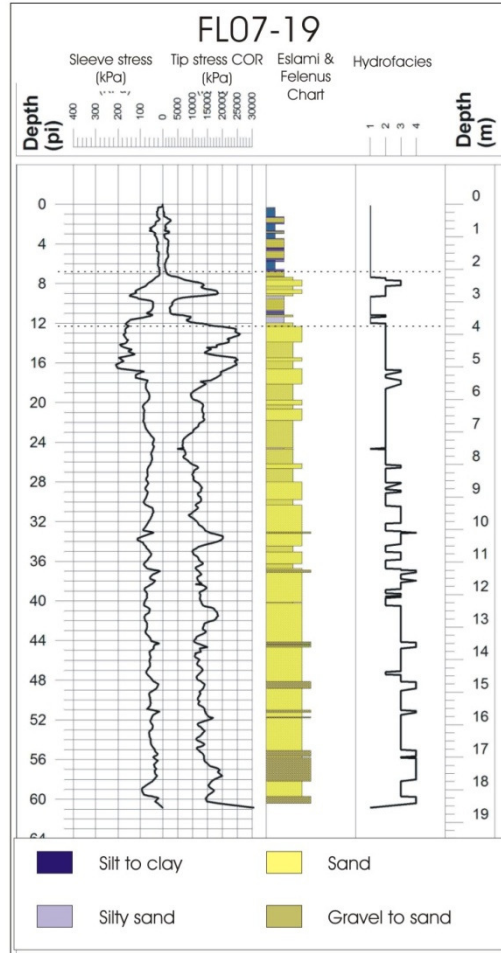


Figure 4.7 Exemple d'interprétation stratigraphique et des hydrofaciès du sondage par piézocône FL07-19 basé sur la charte des matériaux d'Eslami et Fellenius (2004). La largeur de la colonne stratigraphique est proportionnelle à la granulométrie de l'échantillon. Les lignes pointillées indiquent les limites des unités stratigraphiques.

Par ailleurs, les propriétés physico-chimiques de cet aquifère nous renseignent sur la dynamique interne de l'écoulement. Ces mesures, obtenues à l'automne 2008 après le développement de la totalité des puits, ont été prises *in-situ* à l'aide d'une cellule d'écoulement. Les données exhaustives sont présentées dans Lamarche (2011). Il est à noter que tous les échantillons sont faiblement acides. L'eau souterraine est caractérisée par une faible conductivité associée à une faible quantité de solides dissous. Une bonne oxygénation est également observée, ce qui est indicatif de conditions de nappe libre à semi-confiné. Comme l'unité deltaïque est recouverte de sédiments silteux estuariens peu perméables dans la partie centrale de la vallée, ce qui limite la connectivité de l'aquifère avec le réseau de drainage sus-jacent, en particulier la rivière Saint-Charles. De plus, le ruissellement est accentué par les infrastructures urbaines, ce qui limite également l'infiltration au centre de l'aquifère. Les caractéristiques de la matière organique présente dans les silts estuariens ne se répercutent pas dans les analyses physico-chimiques de

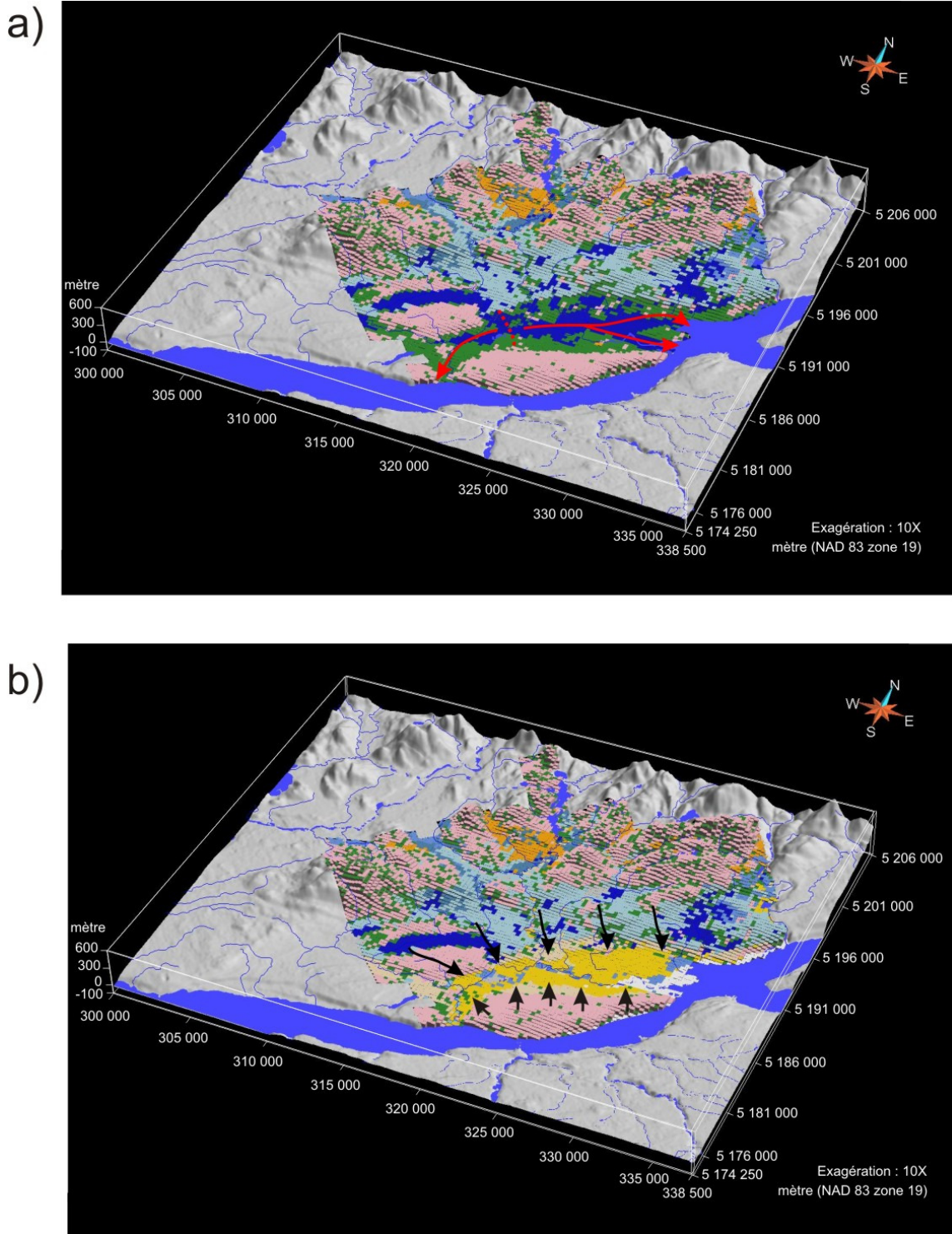


Figure 4.8 Modèle conceptuel hydrogéologique de l'aquifère deltaïque enfoui de Québec; a) nappes divisées par la ligne de partage des eaux souterraines (ligne pointillée rouge), b) zones de recharge et directions des apports d'eau à l'aquifère à partir des terrasses fluviales anciennes.

l'eau souterraine du delta. En effet, une faible conductivité de l'eau et un taux élevé d'oxygène dissous appuient la thèse d'une recharge latérale de l'aquifère de même qu'un écoulement relativement rapide dans l'aquifère. Les unités perméables à proximité, telles que les terrasses fluviales anciennes, constitueraient des zones préférentielles de recharge de l'aquifère (figure 4.8). Localement, un contact direct avec l'aquifère régional rocheux peut être envisagé, notamment en raison du remaniement des sédiments par les courants et les vagues sous la limite marine.

L'analyse plus détaillée de la distribution des hydrofaciès dans les différents sondages au piézocône montre que l'architecture du delta est caractérisée par une unité grossière basale (hydrofaciès 4) dans la partie centrale du paléochenal principal et surmontée par une unité sableuse (hydrofaciès 2-3). La figure 4.7 montre également des fluctuations verticales rapides des hydrofaciès dans l'unité sableuse. Le caractère grossier des sédiments localisés dans l'axe central du paléochenal principal du Proto-Saint-Laurent résulte de l'érosion de hauts fonds situés un peu en amont de Québec et remodelés par un écoulement à plein régime du système fluvial laurentien.

## 4.9 Conclusion

La succession des sédiments quaternaires dans la région de Québec est le résultat d'un système d'érosion-sédimentation caractérisé par d'importantes variations spatio-temporelles. La réinterprétation du mode de mise en place d'un système deltaïque tardif recouvert par des silts estuariens dans la vallée enfouie du Proto-Saint-Laurent illustre l'importance d'intégrer différentes données de sous-surface et de bien comprendre les changements paléoenvironnementaux rapides qui ont caractérisé l'émersion des terres et le rétablissement du système fluvial du Saint-Laurent. Ainsi, la modélisation géologique tridimensionnelle a été réalisée dans le secteur de Québec dans le but d'établir un cadre hydrostratigraphique régional, et en particulier celui de l'aquifère de la basse ville. Pour ce faire, des données de différentes sources ont été standardisées et intégrées à l'aide de contraintes au modèle géologique 3D. Dans un premier temps, il importait de classer les données selon leur degré de fiabilité. En effet, seules des données de haute qualité doivent être utilisées dans la modélisation afin de produire un modèle géologique 3D cohérent. Toutefois, lorsqu'on ne dispose que de données éparées et de faible qualité, le développement d'un modèle géologique conceptuel s'avère important pour l'établissement de contraintes dictées par la connaissance des environnements de sédimentation et de leur dynamique spatio-temporelle. Ainsi, 14 unités ont pu être identifiées dans le secteur de Québec et leurs propriétés ont été réparties dans un maillage tridimensionnel.

La découverte d'un delta enfoui dans la basse ville démontre l'importance d'un tel exercice. Ce complexe deltaïque associé à la dernière phase de la Mer de Goldthwait et au commencement du système fluvial du Proto-Saint-Laurent provient des conditions hydrodynamiques très particulières survenues lors de la régression marine postglaciaire. En effet, l'unité grossière retrouvée à la base du delta enfoui est associée à un environnement sédimentaire plus énergétique que celui associé à l'unité sableuse sommitale. De plus, les silts estuariens recouvrant les sables deltaïques tardifs avaient tout d'abord été confondus avec les argiles marines franches, ce qui explique l'absence du delta dans les reconstitutions paléogéographiques antérieures.

L'histoire géologique particulière de la ville de Québec a un impact direct sur l'architecture du système deltaïque enfoui de même que sur la distribution des hydrofaciès. La formation aquifère peut être divisée en deux sous-unités, soit l'une plus perméable à la base et l'autre au sommet dont la perméabilité est très variable. Les caractéristiques physico-chimiques indiquent que la recharge provient majoritairement des unités latérales plus perméables et que l'écoulement dans l'aquifère est plutôt rapide.

La modélisation géologique 3D permet la délimitation des unités stratigraphiques de sous-surface. L'intégration de vieilles et de nouvelles données dans un modèle géologique 3D de la région de Québec souligne la complexité architecturale des sédiments quaternaires dans la vallée enfouie et les terrains adjacents. Ainsi, avec un minimum d'information sur la structure de l'aquifère et de son milieu de dépôt, il est possible d'élaborer un modèle conceptuel hydrostratigraphique.

La modélisation géologique 3D est la première étape dans la compréhension des interactions entre les différents hydrofaciès. Sur la foi d'observations directes, les différentes méthodes géostatistiques permettront de produire divers scénarios plausibles de la répartition spatiale des propriétés hydrauliques de l'aquifère dans un contexte hydrostratigraphique prédéfini à l'aide d'un modèle géologique 3D. De plus, une bonne compréhension du contexte stratigraphique permet l'élimination de scénarios considérés comme incongrus dans le contexte sédimentaire de la vallée enfouie du Proto-Saint-Laurent dans le secteur de Québec.

Actuellement, la Ville de Québec s'approvisionne en eau en grande partie dans le lac Saint-Charles. La demande en eau croissante pousse les élus à considérer une ressource alternative en eau. Ainsi, une étude plus poussée de l'aquifère de Québec donnerait l'opportunité de définir le potentiel pour un usage industriel de cette ressource en eau souterraine. Cette étude préliminaire nous fournit une assise importante pour mieux établir la structure de l'aquifère. Une étude plus complète devrait être entreprise afin de définir la capacité réelle de cet aquifère ainsi que la qualité de l'eau avant de considérer l'exploitation de l'eau souterraine. De plus, les diverses contributions d'un modèle géologique 3D peuvent être multiples, que ce soit dans le domaine de la géothermie ou du microzonage sismique.

#### 4.10 References

- Appel, M. 2006. « From 3d geomodelling systems towards 3d geoscience information systems : Data model, query functionality, and data management ». *Computers and Geosciences*, vol 32, p. 222-229.
- Bard, P.Y. et Bouchon, M., 1985. « The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys ». *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 75, no. 2, p. 519-541
- Benns, D.I. et Evans, D.J.A. 1998. *Glaciers and Glaciation*. Oxford University Press, New-York. 734 p.
- Bolduc, A.M. 2003. *Géologie des formations superficielles : Charny, Québec*. Commission géologique du Canada, Dossier public 1776, échelle 1/50 000.

Bolduc, A.M., Paradis, S.J., Parent, M., Michaud, Y., and Cloutier, M. 2003. *Géologie des formations superficielles : Québec, Québec*. Commission géologique du Canada, Dossier public 3835, Scale 1/50 000 (revised version).

Calcagno, P., Chiles, J. P., Courrioux, G., et Guillen, A., 2008. « Geological modelling from field data and geological knowledge Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. » *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 171, no 1-4, p. 147-157.

Cloutier, M, Parent, M. et Bolduc, A.M. 1997. *Géologie des formations superficielles : St-Marc-des-Carières, Québec*. Commission géologique du Canada, Dossier public 3544, échelle 1/100 000

Consultative Group for International Agriculture Research- Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) (<http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp>) 2010

Dionne, J.C. 2001. *Relative sea level changes in the St. Lawrence estuary from deglaciation to present day*. Geological Society of America, Special Paper 351, p. 271-284.

Eslami, A. and Fellenius, B.H. 2004. « CPT and CPTu data for soil profile interpretation: review of methods and proposed new approach ». *Iranian Journal of Science & Technology*, Transaction B. vol. 28 no B1

Fauveau, E. 2006. Caractérisation hydro-géologique des sédiments meubles avec les sondages par enfoncement et rotoperçusion, M.Sc. thesis, INRS-ETE, Québec.

Fauveau, É., Lefebvre, R., Ballard, J.-M., Fortier, R., Martel, R., 2005. « Examples of hydrogeological characterization of unconsolidated sediments with direct push and rotoperçusion technologies ». Proceedings, *58<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference and 6<sup>th</sup> Joint CGS/IAH Conference*, Saskatoon, Canada, October 2005, Session 11EA, Paper 565, 8 p.

Kaufmann, O. M., Thierry, 2008. « 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines » *Computers & Geosciences*, vol. 34, p. 278-290.

Lamarche, L., Parent, M., Bolduc, A. et Paradis, S. 2010. *Géologie des formations superficielles, région de Québec, Québec*, Commission géologique du Canada, Dossier public 6665, échelle 1/50 000.

Lamarche, L., 2011 *Évolution paléo-environnementale de la dynamique quaternaire dans la région de Québec : Application en modélisation tridimensionnelle et hydrogéologique*, Thèse de doctorat, INRS-ETE, Québec

Lasalle, P. et J.A. Elson. 1975. « Emplacement of the St-Narcisse Moraine as a Climatic Event in Eastern Canada. » *Quaternary Research*, vol. 5, p. 621-625

Lefebvre, R., Boutin, A., Blais, V., Martel, R., Therrien, R. Parent, M., Ouellon, T., Roy, N., Lapointe, M., 2004. « Characterization of the hydrogeological context and dissolved TCE plume in the granular aquifer system of the Valcartier area, Quebec, Canada ». Proceedings, *57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH Conference*, October 24-27, 2004, Quebec City, Canada, Session 4B, p. 28-35.

- Macpherson, J.C., 1966. The post-Champlain evolution of the drainage pattern of the montreal lowland. M. Sc., Department of geography, McGill University, Montreal, p.264.
- Mallet, J.L., 2002. Geomodelling. Oxford University Press, New York, p. 599
- Martel, R., Parent, M., Lefebvre, R., Paradis, M., Carrier, M.-A., Mailloux, M., Hardy, F., Michaud, Y. 2000. *Caractérisation complémentaire des contextes géologique et hydrogéologique des terrains du CRDV et de l'USS Valcartier. Rapport final, Phase I.* Étude réalisée pour le CRDV et l'USS Valcartier, Centre géoscientifique de Québec, Novembre 2000, 110 p., cartes et annexes.
- Nakamura, Y. 1989. « A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using micro-tremors on the ground surface. » *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute.* Vol. 30, p.25-33.
- Nastev, M. L., L.; Naumoski, N.; Perret, D.; Parent, M.; Lamarche, L.; (2008). « Effects of soil behaviour modelling on the seismic response of representative soils in the Quebec City region » SCGC/CSCE. p. 1-10.
- Ouillon, T. 2006. Distribution spatiale de la conductivité hydraulique dans le système aquifère de Valcartier et influence de l'hétérogénéité sur la modélisation de l'écoulement. Mémoire de M Sc. INRS-ETE, Québec.
- Ouillon, T., Lefebvre, R., Marcotte, D., Boutin, A., Blais, V. and Parent, M. 2008. « Hydraulic conductivity heterogeneity of a local deltaic aquifer system from the kriged 3D distribution of hydrofacies from borehole logs, Valcartier, Canada”. *Journal of Hydrology.* Vol. 351 no 1-2. p.71-86
- Paradis, S.J. , Bolduc, A.M., 1999 , Mouvement glaciaire vers le nord sur le piémont laurentien dans la région de Québec, Québec , Recherches en cours , 1999-D , Commission géologique du Canada , p. 1-7.
- Parent, M., J.M.M. Dubois, P. Bail, A. Larocque et G. Larocque. 1985. « Paléogéographie du Québec méridional entre 12 500 et 8000 ans BP. » *Recherches amérindiennes au Québec*, vol. 15, no 1-2, p. 17-37.
- Parent, M. et S. Occhietti. 1988. « Late Wisconsinan Deglaciation and Champlain Sea invasion in the St. Lawrence Valley, Québec. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol 42, no 3, p. 215-246.
- Parent, M. et S. Occhietti. 1999. « Late Wisconsinan Deglaciation and Glacial Lake development in the Appalachians of Southeastern Québec. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 53, no 1, p. 117-135.
- Parent, M., Girard, F., Fagnan, N., Michaud, Y., Boisvert, É., et Fortier, R., 2008. Caractérisation géologique des formations superficielles enfouies. Chapitre 4, dans le *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires*. Contribution 2003016 de la Commission Géologique du Canada, réalisée conjointement avec l'INRS-Géoressources (maintenant INRS-Eau, Terre et Environnement), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, la MRC de Portneuf et l'université Laval. Dépôt légal -

Bibliothèque est Archives nationales du Québec, ISBN 978-2-550-51189-2 (pdf), p. 23-40.  
[http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/aquiferes/guide\\_granulaires.pdf](http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/aquiferes/guide_granulaires.pdf)

Pugin, A., Pullan, SE, Sharpe, Dr, 1999. « Siesmic facies and regional architecture of the Oak Ridges Moraine area, Southern Ontario », *Canadian journal of Earth Sciences*, vol. 36, no. 3. P. 409-432

Richard, P.J.H. et S. Occhietti. 2004. « Déglaciation et invasion marine champlainienne au Mont Saint-Hilaire, Québec : nouvelles données chronologiques et implications paléogéographiques. » *72<sup>e</sup> Congrès de l'Acfas*, Université du Québec à Montréal, présentation orale.

Ross, M., Parent, M. et 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*, vol. 13, p. 690-707.

## **Chapitre 5**

### **Synthèse stratigraphique et interprétation de la mise en place des formations quaternaires**

Le contexte géomorphologique et géologique de la région de Québec lui confère une importance majeure dans l'histoire quaternaire du Québec méridional, notamment en ce qui a trait à l'incursion marine qui a suivi la déglaciation de la vallée du Saint-Laurent. La stratigraphie des formations quaternaires de part et d'autre du secteur à l'étude a démontré la complexité de l'histoire quaternaire régionale et ce, au-delà de la dernière glaciation. Toutefois, le développement urbain et le faible relief des lieux limitent sévèrement les observations géologiques directes dans la région immédiate de la ville. De ce fait, il faut compter sur la construction d'infrastructures, telles que les bassins de rétention ou de nouveaux développements domiciliaires, pour constituer un aperçu mieux documenté de la sous-surface. Toutefois, les excavations réalisées lors de ces travaux de construction ne donnent généralement accès qu'à quelques mètres supérieures des unités quaternaires. Pour obtenir une image plus complète de la stratigraphie, il faut recourir à d'autres méthodes d'investigation, principalement des forages et des sondages qui permettent d'identifier correctement les unités localisées à plus grande profondeur, et en particulier sous le niveau marin actuel.

L'intégration de nos observations et des observations antérieures dans le secteur du seuil de Québec (Lasalle, dans Lamothe, 1987; Cummings et Occhietti, 2001) nous amène à reconsidérer la dynamique spatio-temporelle des conditions de sédimentation dans cet environnement charnière entre le milieu marin ouvert de la Mer de Goldthwait et celui, beaucoup plus fermé, de la Mer de Champlain. Au cours de cette discussion seront donc abordés différents aspects de la déglaciation et des conditions marines, lacustres et fluviales qui ont suivi. Une brève description des conditions qui prévalaient lors de l'épisode marin ancien et de l'avancée glaciaire qui a suivi seront également discutés. Finalement, les contributions de la modélisation géologique tridimensionnelle dans le cadre d'une étude hydrostratigraphique seront détaillées.

#### **5.1 Déglaciation et incursion marine dans la région de Québec**

La dernière déglaciation au Québec méridional est marquée par une succession d'environnements dont la dynamique a modelé la répartition des sédiments. La présence d'un courant glaciaire et d'une baie de vêlage dans l'estuaire du Saint-Laurent impliquent une dynamique interne du glacier qui a une influence sur son mode de retrait de même que sur la phase glaciomarine qui a suivi. La reconstitution de la déglaciation dans le secteur de la ville de Québec peut nous renseigner sur l'incursion marine qui a suivi le retrait de l'inlandsis dans les Basses-Terres du



Saint-Laurent. Cette région charnière fait le lien entre les épisodes des mers de Goldthwait et de Champlain et plus tard entre l'estuaire maritime et l'estuaire fluvial, en particulier durant l'épisode du Proto-Saint-Laurent.

La région de Québec est à l'embouchure de l'immense bassin hydrographique du fleuve Saint-Laurent. Toute l'eau en provenance des Grands-Lacs, et des rivières majeures du sud du Québec passe par le détroit de Québec. Au cours de la déglaciation et ce jusque vers 8400 ans avant aujourd'hui, alors que les eaux de l'Atlantique ont envahi la baie d'Hudson, la vallée du Saint-Laurent a constitué la principale voie de drainage des eaux de fonte de la moitié est de l'Inlandsis Laurentidien (Teller, 1988; Licciardi et al., 1998; Leverington, et al., 2000; Teller et al., 2002; Clarke et al., 2004).

### **5.1.1 Dynamique glaciaire et déglaciation**

Les diverses glaciations ont modelé le paysage régional en érodant profondément le socle rocheux, y créant notamment de nombreuses zones de surcreusement. La glaciation laurentidienne, quant à elle, a déposé une couche de till plus ou moins épaisse et plus ou moins continue sur l'ensemble du secteur à l'étude. Les formes d'érosion et dépôts glaciaires nous renseignent également sur la dynamique d'écoulement du glacier. En effet, un écoulement vers le nord a été reconnu sur la rive sud de Québec (Lamarche, 1971; Chauvin et al., 1985) et ce jusqu'en Gaspésie (David et Leblais, 1985). Ce mouvement a également été identifié sur la rive nord dans la région de Québec et sur la Côte de Beaupré (Bolduc et al. 2003) de même que dans la région de Charlevoix (Occhietti et al., 2001). Ces différentes observations semblent mieux s'intégrer dans un modèle de déglaciation centré sur la formation d'un courant glaciaire s'écoulant dans l'axe du fleuve (Parent et Occhietti, 1999) que dans le modèle centré sur la rétrogression d'une baie de vêlage (Chauvin et al., 1985; Parent et Occhietti, 1988). Cette réorientation d'écoulement au sein de la masse glaciaire se prolonge à l'ouest de Québec traversant tout le secteur d'étude (Parent et Occhietti, 1999). En effet, plusieurs traînées morainiques sous abri orientées vers l'est-nord-est et le nord-est ont été identifiées en bordure des Laurentides dans le cadre de nos travaux (Lamarche et al., 2010). Ces mégaformes glaciaires confirment donc l'intensité de ce mouvement glaciaire tardif vers l'est et le nord-est qui avait été mis en évidence par les microformes d'érosion glaciaire dans la région (Paradis et Bolduc, 1999).

La vallée de la rivière Montmorency montre une dynamique de déglaciation qui la distingue nettement de celle de la plupart des vallées de la bordure sud des Laurentides. En effet, la présence d'une langue émissaire alimentée par le courant glaciaire et occupant l'axe central de la vallée y avait endigué un lac proglaciaire. De tels lacs de barrage glaciaire occupaient aussi les vallées de la région de Charlevoix lors la déglaciation (Occhietti et al., 2001). La présence de chenaux et d'amas juxtaglaciaires sur le piedmont du Bouclier dans ce secteur démontre bien ce style de déglaciation analogue à celui de l'Estrie (Parent et Occhietti, 1988).

Le recul de la marge glaciaire au centre des Basses-Terres du Saint-Laurent est très mal connu. En effet, les dépôts associés à la marge glaciaire sont soit enfouis sous une épaisse couche d'argile marine (mers de Champlain et de Goldthwait), soit fortement remaniés par les vagues et les courants sous la limite marine (de 185 m à 230 m d'élévation dans la région de Québec). Il existe donc un important hiatus qui limite notre compréhension des événements liés à la déglaciation et à l'intégration des observations provenant des rives sud et nord du fleuve. Les

données intégrées dans le modèle géologique 3D montrent la présence d'un till sous les dépôts marins. Toutefois, il n'est pas possible d'identifier des indicateurs géomorphologiques, excepté les traînées morainiques sous abri mentionnées plus haut, pouvant éclairer davantage le mode de déglaciation local. De plus, la méthode d'interpolation utilisée pour la réalisation des surfaces géologiques, de même que le fait que les données soient ponctuelles, ne permettent pas de représenter des formes géologiques complexes. L'analyse de diverses coupes stratigraphiques dans la région semble une avenue plus prometteuse pour la reconstitution du mode de déglaciation. Sur la rive nord, le Till de Saint-Nicolas ou son équivalent n'a pas été observé. Daté à 11,2 ka BP (Cummings et Occhietti, 2001), ce till semble indiquer une réavancée glaciaire tardive au centre de la vallée.

### **5.1.2 Incursion marine et évolution du niveau marin relatif**

Alors qu'à l'est la formation du courant glaciaire du Saint-Laurent et la baie de vêlage concomitante dans la Mer de Goldthwait ont contrôlé le début de l'incursion marine dans les Basses-Terres centrales, ce sont plutôt les différents épisodes de déglaciation dans l'ouest du Québec et l'est de l'Ontario qui ont influencé les modalités de l'épisode champlainien. Tout d'abord, plusieurs lacs proglaciaires, tels que les lacs Agassiz, Algonquin, Objiway et *Candona* ont formé une série de bassins successifs à l'ouest de la région; leur évolution et leur drainage étaient contrôlés par le retrait de la marge glaciaire, le relèvement glacio-isostatique différentiel, l'élévation des exutoires et le relief local (figure 5.1) (Parent et Occhietti, 1999; Teller et al., 2002; Clarke et al., 2004; Fisher, 2003; Cronin et al., 2008; Rodrigues et al., 1994). Ainsi, l'ouverture de nouveaux exutoires et leur éventuel abandon ont entraîné des modifications aux apports en eau douce dans le système fluvial (Licciardi et al., 1998; Leverington et al., 2000). La transition entre le drainage du Lac Agassiz en direction du Mississippi vers le bassin du fleuve Saint-Laurent coïncide avec la transgression de la Mer de Champlain (Clarke et al., 2001; Fisher, 2003; Cronin et al., 2008; Rodrigues et al. 1994). Aux environs de 11,4 ka BP, une réavancée glaciaire (Marquette Readvance) aurait bloqué de nouveau le drainage du lac vers le Saint-Laurent, marquant ainsi la fin du Dryas récent (Licciardi et al., 1998). Le recul subséquent de la marge glaciaire permet de nouveau le déversement des eaux du Lac Agassiz vers le Saint-Laurent. Les phases Moorhead (10.8 ka cal. BP à 10 ka cal BP) et Nipigon (9.5 ka cal. BP à 8.5 ka cal BP) du lac Agassiz montrent des variations des apports en eau provenant des Grands-Lacs vers le fleuve.

Les déglaciations du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent en aval de Québec sont marquées par le retrait progressif du courant glaciaire dans l'axe du fleuve. On retrouve les dépôts associés à cette phase dans les différentes vallées bordant le fleuve (Hétu, 1998; Hétu et Gray, 2000). L'incursion de la Mer de Goldthwait le long du fleuve survient peu avant 13 300 ans BP. Elle reste lente jusqu'à l'intervalle de 12 300 ans BP à 11 800 ans BP. La marge glaciaire suit approximativement le tracé de la limite marine, établie à 140 m aux environs de Rimouski. Deux stabilisations de la marge glaciaire sont associées aux Dryas ancien et récent. (Hétu, 1998; Hétu et Gray, 2000)

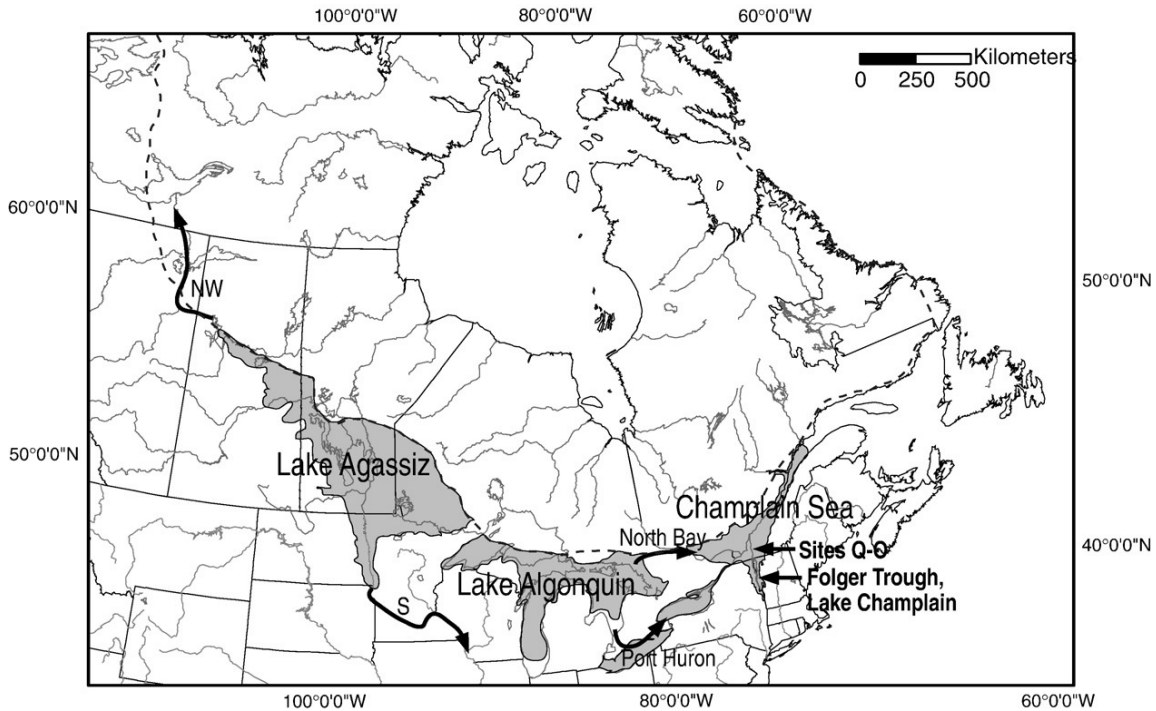


Figure 5.1 Localisation de la marge glaciaire à 11,5 ka, du Lac Agassiz, du Lac Algonquin et de la Mer de Champlain avec les différents exutoires des lacs proglaciaires. (Cronin et al., 2008)

L'incursion de la Mer de Champlain dans les Basses-Terres n'a pu avoir lieu que suite à la déglaciation du seuil de Québec. À l'exception d'un âge relativement trop vieux sur de la matière organique (âge non représentatif : QU-311, 60 m, 15024-16013 ans cal BP), les âges coquilles montrent que le secteur de Québec a été libéré des glaces aux environs de 12,5 ka cal BP et même un peu avant, vers 13 ka cal BP (figure 3.8), ce qui est conforme à l'âge de l'incursion marine établie au Lac Hertel au Mont Saint-Hilaire (Richard et al., 2003). Le début de la régression marine dans le secteur de Québec est contrôlé par le relèvement isostatique. Cette phase est peu propice à l'établissement d'une faune à cause de la proximité de la marge glaciaire et des apports massifs d'eau de fonte et de sédiments. En effet, peu d'espèces ont été identifiées à une élévation supérieure à 140 m. D'ailleurs, les bivalves retrouvés (*P. arctica* et *H. arctica*) ne sont pas directement associés à une ligne de rivage; ainsi les lignes de rivage précoces correspondent à une interpolation entre la première ligne de rivage datée et la limite marine maximale. La suite de la régression semble rapide et est marquée par une suite de terrasses marines étagées. Le Dryas récent, entre 10,5 ka cal BP et 10 ka cal BP, semble marqué par un ralentissement de la chute du niveau marin relatif (figure 3.9).

Les analyses microfauniques montrent un changement paléoenvironnemental lors de l'épisode de la Mer de Goldthwait dans le secteur de Québec entraînant un niveau peu fossilifère entre les niveaux de 39,5 m et de 44 m dans le forage profond (FL06-01 et FL07-01). Un refroidissement ou un apport considérable d'eau de fonte dans le système pourrait en être la cause. Au moins trois apports d'eau douce provenant de lacs proglaciaires ont eu lieu dans la Mer de Goldthwait, soit tout d'abord le déversement du Lac *Candona* lors de l'ouverture du seuil de Québec, puis une première vidange du Lac Agassiz lors de la phase de la transition entre le bassin du Mississippi et

celui du fleuve et troisièmement plusieurs fluctuations des apports en eau lors des phases ultérieures (Rodrigues et al., 1994). Ceci a eu pour conséquence de modifier la température et la salinité des environnements glaciomarins dans les Basses-Terres, et par conséquent les conditions de vie. L'âge des sédiments marins d'eau profonde dans le secteur de la basse ville de Québec est postérieur à la déglaciation (12,5 ka cal BP), mais antérieur aux sédiments deltaïques tardifs en basse ville datés à 10 ka cal BP (Beta-242587; Beta-242588), ainsi le niveau peu fossilifère peut être associé à la phase Moorhead des Grands-Lacs ou à un événement antérieur. Dans cette hypothèse, il ne faut pas négliger la présence de la marge glaciaire dans le secteur de même que son influence. Lasalle (dans Lamothe, 1987) à la même époque a identifié une réavancée du front glaciaire (réavancée de Saint-Nicolas).

Lasalle (1984) postule que le retour à des conditions saumâtres dans le secteur de Québec c'est fait vers 9,7 ka BP, ce qui correspond à la dernière apparition de coquilles marines datées et à la transition de la Mer de Goldthwait au Proto-Saint-Laurent dans le secteur. À partir de ce moment, la composante isostatique du relèvement devient plutôt faible et les fluctuations enregistrées du niveau marin résultent principalement d'effets glacio-eustatiques. Le dynamisme des courants suppose un environnement fluvial de fort débit au niveau du seuil de Québec durant cette période. En effet, la présence de blocs métriques dans les alluvions de haute terrasse indique non seulement la force du courant du Proto-Saint-Laurent mais aussi l'existence de conditions glacielles dans le sud du Québec.

Tableau 5.1 Résumé des événements géologiques depuis la dernière déglaciation dans le secteur de la rive Nord de Québec.

Événements	Caractéristiques
Déglaciation régionale	Courant glaciaire et vêlage important dans l'estuaire : Formation de lacs proglaciaires dans les vallées du Saint-Laurent et des Grands-Lacs, de 15 ka à 12,5 ka
Déglaciation du seuil de Québec	Permet l'incursion marine dans les Basses-Terres du Saint-Laurent vers 12,5 ka.
Mer de Goldthwait	Étendue d'eau salée résultant de l'enfoncement glacio-isostatique dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent de 13,3 ka à 9,7 ka
Mer de Champlain	Étendue d'eau salée résultant de l'enfoncement glacio-isostatique dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, de 12,5 ka à 9,8 ka; remplacée par le Lac à <i>Lampsilis</i> dans la portion ouest du Bassin, de 9,8 ka à 8 ka.
Tronçon aval du Proto-Saint-Laurent dans le secteur de Québec	Système fluvial précoce dans la vallée du Saint-Laurent. Début à une élévation de 65 m dans le secteur de Québec aux environs de 9,7 ka.
Fleuve Saint-Laurent	Système fluvial actuel.

### 5.1.3 Limite entre la Mer de Champlain et la Mer de Goldthwait

La Mer de Champlain a été définie par Elson (1970) comme étant la masse d'eau marine s'étendant à l'ouest de la ville de Québec et la Mer de Goldthwait comme étant la masse d'eau marine entre le golfe du Saint-Laurent et la ville de Québec durant la dernière déglaciation. Ainsi, la Mer de Champlain constituait un bassin relativement fermé par le seuil de Québec, tandis que la Mer de Goldthwait constituait un bassin beaucoup plus ouvert sur l'Atlantique, réalité qui se manifeste d'ailleurs par une faune malacologique plus diversifiée (Hillaire-Marcel, 1980; Wagner, 1971). Comme les analyses microfauniques réalisées dans le forage de la basse ville montrent un assemblage de mer ouverte, le secteur de la ville s'apparente davantage aux paléoenvironnements de la Mer de Goldthwait. Puisque le bassin de Québec est contigu avec celui de l'estuaire, il nous semble donc préférable d'établir la limite entre la Mer de Champlain et la Mer de Goldthwait à l'ouest de la ville de Québec, soit au niveau du seuil de Québec. Ce seuil correspond à la zone d'étranglement du socle rocheux entre Neuville et Donnacona (figure 5.2). Cette limite marque l'extrémité est du bassin fermé correspondant à la Mer de Champlain. De plus, à l'ouest de ce seuil, l'épisode marin a été suivi d'un bassin successeur, celui du Lac à *Lampsilis* (Parent et al., 1997); à l'est du seuil, l'épisode lacustre est absent et l'épisode marin goldthwaitien s'est poursuivi durant plusieurs milliers d'années, au moins jusqu'à la Transgression Laurentienne, vers 6,5 ka BP (Dionne, 1988; 1999; 2001).

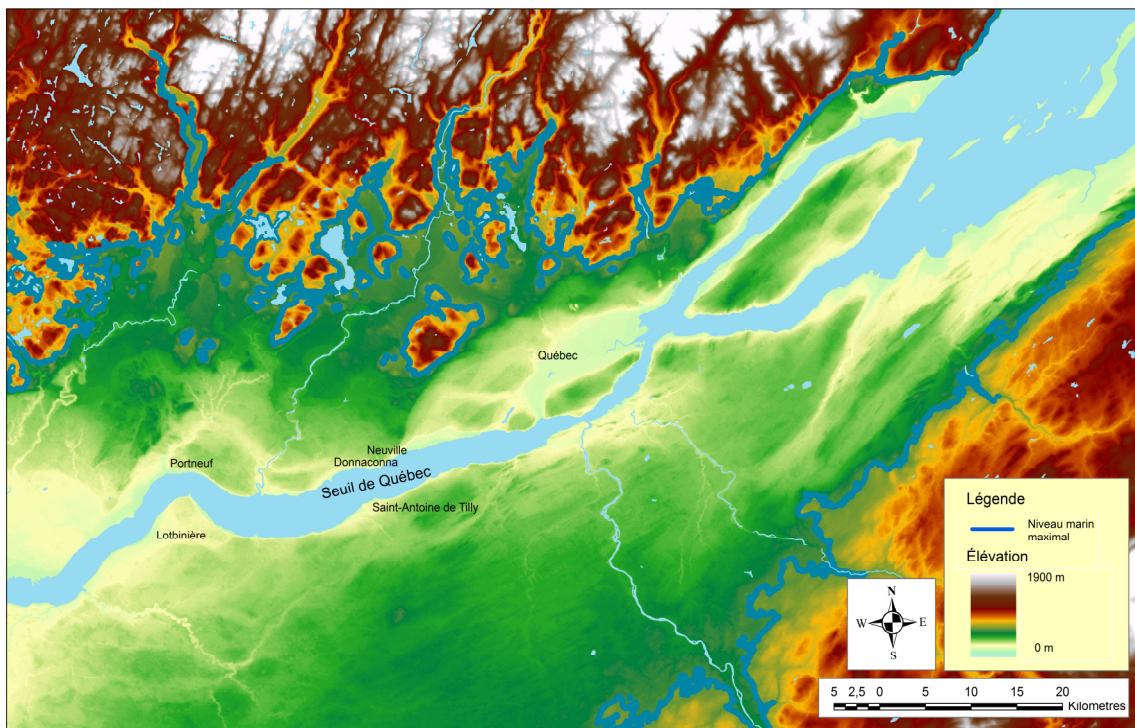


Figure 5.2 Localisation du seuil de Québec entre Neuville et Donnacona.

## 5.2 Stratigraphie

### 5.2.1 Région de Québec

Les formations quaternaires retrouvées dans la région de Québec proviennent d'une succession complexe d'événements glaciaires, interglaciaires ou interstadias dont divers témoins ont été préservés localement, généralement sous forme de lambeaux lorsqu'il s'agit de sédiments antérieurs au Wisconsinien supérieur. Étant donné sa situation au point de rencontre des trois grandes provinces géologiques et physiographiques, la région de Québec a joué un rôle déterminant dans l'évolution quaternaire du Québec méridional. Un modèle stratigraphique schématique est présenté à la figure 5.3. On y observe à la base le socle rocheux qui peut être constitué de roches métasédimentaires appalachiennes, de roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent ou de roches ignées et métamorphiques du Bouclier canadien. Ces trois ensembles rocheux sont délimités par diverses failles, la plupart d'envergure régionale. La plus connue, la faille de Logan, sépare la dernière écaille appalachienne de la Plate-forme du Saint-Laurent observée en basse ville (figure 2.29). Ces roches sédimentaires ordoviciennes sont facilement reconnaissables dans le modèle numérique de terrain en raison de leur faible rugosité qui contraste avec les terrains appalachiens et grenvilliens les bordant de part et d'autre. Une longue période d'érosion qui a suivi la mise en place de ces différents ensembles géologiques a donné lieu, entre autres, à la formation de la terrasse Micmac, une falaise rocheuse observable de part et d'autre de la zone d'étude et bordant généralement le tracé du fleuve (cf. carte : Lamarche et al., 2010).

La morphologie régionale du socle rocheux a un impact déterminant tant sur la dynamique glaciaire que sur l'incursion marine qui a suivi. En effet, la vallée du Saint-Laurent a joué un rôle déterminant sur la formation du courant glaciaire du Saint-Laurent et sur son orientation (Parent et Occhietti, 1999). De plus, le seuil de Québec a joué un rôle prépondérant en contrôlant l'incursion des eaux marines dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. Ces conditions se répercutent directement sur la stratigraphie de la région, comme l'illustre le modèle schématique de la figure 5.3.

Peu de sédiments antérieurs à la dernière déglaciation ont été préservés sur la rive nord à la hauteur de Québec. Seulement quatre vallées enfouies présentent des dépôts interstadias ou interglaciaires, soit les vallées de la rivière Jacques-Cartier, de la rivière Beauport, du lac Saint-Augustin et du Proto-Saint-Laurent (basse ville) (Lasalle, dans Lamothe, 1987; Lasalle 1972). Localement, une unité glaciaire sous-jacente a été reconnue au site du forage FL06-01 (chapitre 2; section 2.2.9). À la base se trouve un till (till inférieur), mais ses propriétés ne sont pas particulièrement distinctives, de sorte que sa corrélation régionale est plutôt tributaire de l'unité marine qui lui est superposée. Deux hypothèses peuvent être envisagées, soit qu'il s'agisse d'un équivalent latéral du Till de Lévrard (Wisconsinien inférieur) ou soit qu'il s'agisse du Till de Bécancour (Illinoien), tous deux identifiés plus à l'ouest dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (Lamothe, 1989). Ce till, que l'on appelle ici provisoirement « till inférieur », constitue donc la base de la séquence quaternaire à Québec. Il est caractérisé par une dominance de clastes sédimentaires des Basses-Terres du Saint-Laurent, mais cela ne permet pas de tirer de conclusions claires sur sa provenance ou sur la direction d'écoulement glaciaire qui lui est associée. Il a été

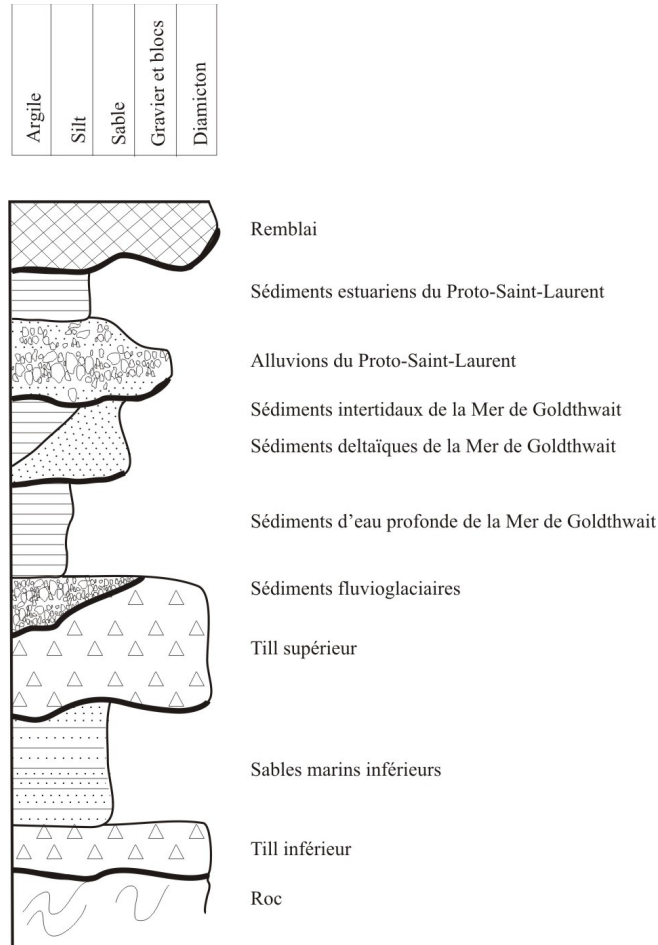


Figure 5.3 Modèle stratigraphique schématique de la rive nord de Québec (contact érosif en gras) observé dans un seul forage, localisé de surcroît dans la partie la plus profonde du paléo-chenal du Proto-Saint-Laurent, ce qui nous indique qu'il a dû n'être préservé que très localement dans la région d'étude.

En ce qui concerne les sables marins inférieurs identifiés en forage dans la basse ville, ils indiquent que l'estuaire du Saint-Laurent était au moins partiellement déglacé et que des conditions de drainage libre devaient alors avoir cours dans la vallée du Saint-Laurent. Leur assignation stratigraphique est donc compliquée par le fait que plusieurs unités de sédiments fluviatiles ou marins dans les régions voisines de Québec indiquent qu'il y a eu plusieurs épisodes de drainage libre depuis le Sangamonien dans la vallée du Saint-Laurent. Comme le montre le tableau 5.2, les sables marins inférieurs peuvent s'insérer à deux niveaux dans la série quaternaire régionale, celui des Sédiments de Saint-Pierre – Argile de La Pérade ou encore celui des Sables de Lotbinière (Lamothe, 1989; Hardy et Lamothe, 1997; Occhietti et al., 1996). L'analyse microfaunique des sables marins inférieurs indique qu'il s'agit d'une unité glaciomarine proximale, ce qui semble plus en accord avec le caractère interstadiaire des Sédiments de Saint-Pierre ou de l'Argile de la Pérade. Cette hypothèse de corrélation est renforcée par l'âge préliminaire obtenu en luminescence, de sorte que l'unité pourrait être corrélée au Wisconsinien moyen, si l'on adopte le cadre chronologique de Lamothe (1989), ou encore à la transition Wisconsinien inférieur-Sangamonien, si l'on adopte la chronologie d'Occhietti et al. (1996). Il

faut aussi se rappeler que l'on ne peut exclure la possibilité que les sables marins inférieurs soient corrélatifs des Sables de Lotbinière ou même de la Formation de l'Île aux Coudres et qu'il s'agisse d'une unité mise en place vers la fin de l'interglaciaire illinoien (Tableau 5.2). Localement, le contexte stratigraphique des sables marins inférieurs ne nous permet pas non plus de déterminer s'ils sont antérieurs ou postérieurs aux rythmites anciennes observées sur les berges de la rivière Beauport (Lasalle, dans Lamothe, 1987)

Étant donné sa position stratigraphique, le till supérieur est naturellement mis en corrélation avec le Till de Gentilly, sans qu'il ne soit possible de préciser si ce till représente tout le Wisconsinien ou seulement le Wisconsinien supérieur (Tableau 5.2). Dans la vallée de la rivière Montmorency et les vallées adjacentes à l'est, les sédiments glaciolacustres mis en place dans les lacs de barrage précèdent forcément l'incursion de la Mer de Goldthwait du côté nord de la vallée en amont de Cap-Tourmente. Si la marge nord du glacier émissaire qui a fait suite au courant glaciaire du Saint-Laurent est assez bien définie grâce à ces lacs de barrage glaciaire, le tracé de sa marge sud reste à définir; il est possible qu'il corresponde à la position de divers amas juxtaglaciaires aux environs de Saint-Raphaël sur la bordure appalachienne (Lasalle et al., 1977; Chauvin et al., 1985) et jadis attribués à la Moraine du Highland Front (Gadd et al., 1972).

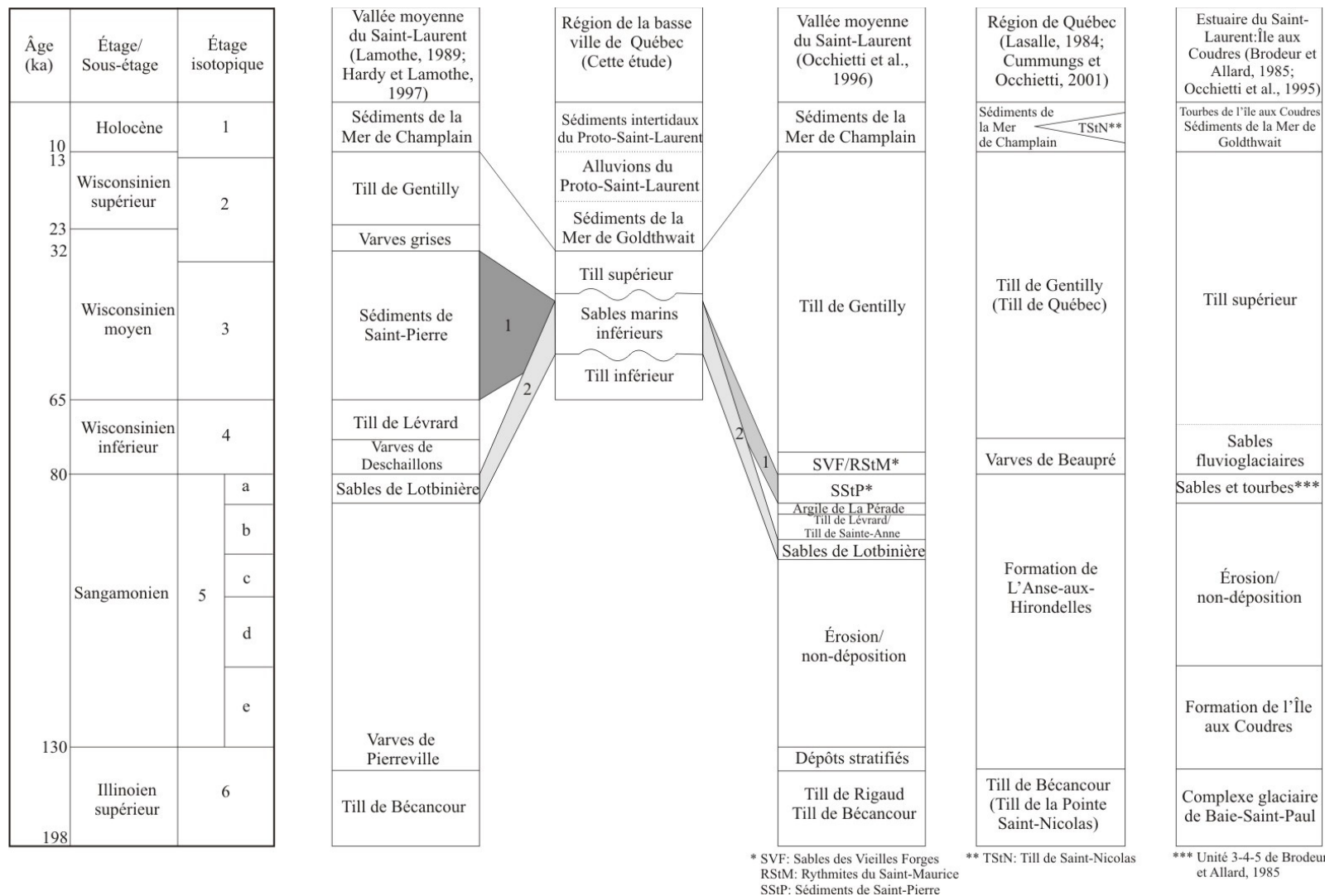
Le retrait de ce glacier émissaire du détroit de Québec a permis l'incursion d'un bras de mer jusqu'à une élévation de 180 m à 230 m sur la rive nord et jusqu'à environ 190 m sur la rive sud (Gadd, 1978). Les dépôts de la Mer de Goldthwait recouvrent généralement le till supérieur dans la partie centrale de la vallée sous la limite marine. Les âges des coquilles marines trouvées dans ces dépôts varient de 13 ka cal BP (*P. arctica*) à 9,5 ka cal BP (*H. arctica*). Dans les parties plus profondes du bassin, la base de la séquence marine est constituée de silts argileux ou de silts sableux laminés à proximité des grands complexes deltaïques. À l'embouchure des rivières majeures, telles les rivières Jacques-Cartier et Montmorency, se sont développés de grands complexes deltaïques dont l'élévation s'échelonne de 200 m à 170 m. Un vaste delta largement enfoui, formé à l'embouchure du Proto-Saint-Laurent dans la Mer de Goldthwait un peu au dessus du niveau marin actuel, constitue le corps sédimentaire le plus tardif déposé en eaux salées dans la région de Québec. Constitué de sables et de sables graveleux, ce delta a progradé sur les sédiments fins marins et cet épisode a terminé vers 9 ka cal BP ou un peu avant.

Les premières traces de l'incision du Proto-Saint-Laurent dans le seuil de Québec, soit les alluvions de terrasses anciennes sous l'élévation de 65 m, signalent la fin de l'épisode de la Mer de Champlain et le début du Lac à *Lampsilis*. Dans la région immédiate de Québec, les plus beaux exemples sont les paléo-chenaux associées au lac Saint-Augustin (cf. carte : Lamarche et al., 2010).

Au sommet de la séquence stratigraphique et en discordance sur divers autres sédiments quaternaires ou le roc se trouvent les dépôts estuariens associés au Proto-Saint-Laurent. D'après les âges <sup>14</sup>C obtenus dans le cadre de notre étude, cette sédimentation estuarienne a eu principalement lieu lors de deux épisodes transgressifs dans l'estuaire du Saint-Laurent : (1) celui de la Transgression laurentienne vers 6500 ans BP (Dionne, 2001), (2) celui de la transgression Mitis vers 2000 ans BP qui avait aussi été observé dans le cadre de travaux antérieurs plus ponctuels sur des sites archéologiques (Allard et Séguin, 1992; Garneau, 1997).



Tableau 5.2 Hypothèse de corrélation stratigraphique suprarégionale de la région de Québec



### 5.2.2 Paléogéographie wisconsinienne du Québec méridional

Les contributions significatives à la paléogéographie wisconsinienne régionale de cette thèse résident dans l'élaboration d'un cadre stratigraphique intégrant les connaissances antérieures de même que les nouvelles données acquises dans cette étude. À cet égard, 4 aspects majeurs peuvent être retenus; (1) l'identification et la datation des silts estuariens associés aux transgressions Laurentienne (6,5 ka) et Mitis (2 ka) dans la région de Québec; (2) l'identification et la datation du delta marin tardif mis en place par le Proto-Saint-Laurent dans la Mer de Goldthwait; (3) la clarification des relations spatio-temporelles entre les mers de Champlain et de Goldthwait et de ce fait, la redéfinition de la limite nord-est de la Mer de Champlain; (4) la découverte d'une unité marine vraisemblablement interstadiaire sous le till supérieur.

### 5.3 Modélisation géologique tridimensionnelle

La réalisation d'un modèle géologique tridimensionnel dans la région de Québec a contribué à notre compréhension de l'architecture des dépôts meubles, ainsi qu'à l'interprétation de l'évolution des événements qui sont survenus depuis la dernière glaciation. En interpolant les données stratigraphiques des différents descriptifs des forages, de géophysique, ainsi que de la carte géologique de surface en sous-surface, le modèle géologique 3D nous permet de transposer le modèle stratigraphique conceptuel sur l'ensemble du territoire. De plus, il nous apporte des précisions sur l'étendue et l'épaisseur des unités géologiques afin de mieux contraindre le cadre hydrostratigraphique (figure 4.8).

La première étape de la réalisation d'un modèle géologique 3D plausible est la validation et la standardisation des données. La qualité d'un modèle est à prime à bord contrôlée par la qualité des données disponibles ainsi que leur distribution spatiale (Kaufmann et Thierry, 2008). À ce stade, il importe de bien hiérarchiser la fiabilité des données. Seules les données de haute précision devraient être utilisées pour la réalisation d'un modèle géologique 3D, de façon à potentiellement minimiser le recours à des données erronées (Ross et al., 2005). Toutefois, le jugement du géologue est incontournable et nécessaire lorsque les données sont trop éparpillées ou localement de faible fiabilité. Ainsi, l'élaboration d'un modèle stratigraphique conceptuel probant permet de minimiser les incohérences conceptuelles.

En raison des limites du potentiel de calcul imposées par la configuration de l'ordinateur utilisé, deux modèles ont été réalisés, l'un régional avec une résolution plus grossière (250X250X2m; Annexe G), l'autre local avec une résolution plus fine (250X250X1m; figure 4.5). Le modèle régional a servi dans un premier temps à mettre en place le cadre stratigraphique de la région d'étude, tandis que le modèle local a servi de base à l'élaboration d'un modèle hydrogéologique conceptuel du delta de Québec. En effet, les épais sédiments deltaïques enfouis sous des silts estuariens dans la vallée du Proto-Saint-Laurent constituent un important aquifère en milieu urbain. L'analyse plus détaillée de la distribution des hydrofaciès dans les différentes unités montre que ces sédiments deltaïques sont caractérisés par une répartition hétérogène de ses propriétés hydrauliques. Le regroupement en hydrofaciès de ces paramètres permet d'utiliser des méthodes géostatistiques pour produire divers scénarios plausibles de répartition. Ainsi, il est possible de spécifier un agencement prédéfini d'hydrofaciès selon l'unité stratigraphique

identifiée à un point précis. Par exemple, la structure du delta de Québec est constituée d'une unité grossière (hydrofacès 4) à la base et au centre du chenal principal recouverte par une unité sableuse (hydrofacès 2-3). L'hétérogénéité des paramètres physiques à l'intérieur même de l'unité peut ainsi être mieux représentée en analogie avec les conditions de mise en place du delta.

## Conclusion

La région de Québec a longtemps été considérée comme point charnière dans l'évolution paléogéographique wisconsinienne du Québec méridional. (MacPherson, 1966; Lasalle et Elson, 1975; Parent et al., 1985; Parent et Occhietti, 1988, 1999; Richard et Occhietti, 2004). En effet, le détroit de Québec constituait un seuil déterminant lors des différents épisodes glaciomarins et marins de la vallée du Saint-Laurent et des épisodes fluviaux qui ont suivi. L'architecture des sédiments quaternaires de la région résulte d'une succession de systèmes d'érosion-sédimentation marins, estuariens et fluviaux. La découverte récente d'un vaste delta enfoui sous les silts estuariens de la basse ville de Québec illustre l'importance de bien comprendre les changements rapides des conditions paléoenvironnementales au Quaternaire.

Le développement informatique depuis une trentaine d'années permet de réaliser des modèles tridimensionnels de plus en plus complexes en intégrant des multiples sources de données (Calcagno et al., 2008). Toutefois, la limite de ces reconstructions est proportionnelle à la qualité et à la quantité des données de sous-surface disponibles (Ross et al., 2005). La réalisation d'un modèle stratigraphique en milieu urbain s'avère particulièrement difficile, puisque les dépôts sont dans la majorité des cas inaccessibles directement. Comme les formations quaternaires sont généralement minces dans le secteur de la haute ville, la plupart des travaux ont été réalisés dans la basse ville où ces formations sont beaucoup plus épaisses, et notamment afin de mieux caractériser les sédiments estuariens et deltaïques tardifs nouvellement identifiés. La réalisation de forages, de levés géophysiques, de coupes géologiques, ainsi que celle d'analyses paléoécologiques, sédimentologiques et géochronologiques ont permis d'élaborer un cadre stratigraphique et par le fait même de retracer l'évolution paléoenvironnementale dans le secteur de Québec. Cela a aussi permis de poser des diagnostics sur les conditions d'érosion-sédimentation dans les différents milieux observés. Dans le cadre de ce projet, 24 sites d'intérêt ont pu être identifiés et décrits afin d'établir une stratigraphie plus complète du secteur d'étude, soit seulement 5 coupes naturelles localisées en périphérie de la zone urbaine, 7 excavations dont 6 réalisées pour la construction de bassins de rétention pour la ville et un autre pour celle d'un nouveau développement résidentiel, ainsi que 12 forages et sondages effectués dans le cadre de cette thèse.

Les divers scénarios stratigraphiques et paléogéographiques postulés sont directement liés à l'architecture et aux séquences de faciès sédimentaires observés dans le paléodelta de sorte que cela guide notre compréhension de la distribution des propriétés hydrauliques du système. Ainsi, la modélisation géologique 3D a comme but premier de définir les limites spatiales des différentes unités hydrostatigraphiques dans le contexte d'une étude hydrogéologique

préliminaire, notamment celle du delta enfoui de la basse ville de Québec. Ce travail permet d'identifier et de caractériser une série représentative d'hydrofaciès. L'aquifère de la basse ville peut être divisé en deux sous-unités, soit l'une à la base caractérisée par des faciès plus perméables (hydrofaciès 4) et une autre au sommet caractérisée par des faciès de perméabilité très variable (hydrofaciès 2 et 3). Il a été établi selon les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de même que les propriétés hydrauliques des unités présentes dans le modèle géologique 3D que la recharge provient majoritairement des unités latérales plus perméables et que l'écoulement de l'eau dans l'aquifère est plutôt rapide.

La base de la séquence stratigraphique observée est constituée d'un till inférieur que l'on peut attribuer à une avancée glaciaire régionale, mais dont l'âge n'a pu être établi. Par contre, le sable marin inférieur surmontant ce till a été déposé dans un environnement glaciomarin proximal associé vraisemblablement au Wisconsinien moyen. Toutefois, l'âge de cette unité n'est pas connu et pourrait être plus vieux, puisque la datation IRSL de ces sables n'est que préliminaire. Le till supérieur surmontant ces sables marins représente la phase principale de la glaciation laurentidienne dans le secteur de Québec, de même que l'épisode du Courant glaciaire du Saint-Laurent qui l'a suivie dans la région. Sur ce till reposent des sédiments marins d'eau profonde concentrés principalement dans les diverses dépressions topographiques, ainsi que de grands complexes deltaïques à l'embouchure des rivières majeures. Dans la basse ville, un delta tardif enfoui, mis en place par le Proto-Saint-Laurent dans la Mer de Goldthwait, a fait l'objet d'une analyse hydrostratigraphique préliminaire. En effet, l'épaisseur et l'étendue de ce delta en font un important aquifère, susceptible d'être exploité tant sur le plan hydrique que géothermique. Les silts estuariens recouvrant ces sables deltaïques avaient jusqu'à présent été confondus avec les argiles marines franches, ce qui explique l'absence du delta dans les interprétations et modèles géologiques antérieurs. Deux oscillations du niveau marin relatif ont été identifiées dans la basse ville de Québec. La plus ancienne, associée à la Transgression laurentienne vers 6 000 ans, a atteint le niveau de 15 m environ et a donné lieu à la mise en place des silts estuariens mentionnés ci-haut. La plus récente, associée à la phase de Mitis (de 2500 à 1000 ans), a été d'amplitude plus modeste, atteignant la cote de 8 m dans la basse ville.

L'évolution de la faune dans le contexte d'une incursion marine postglaciaire telle que les mers de Champlain et de Goldthwait nous renseigne sur les conditions paléoenvironnementales. La présence d'espèces thermohalines ou mésohalines, de littoral ou de milieu profond, de même que l'apparition de débris végétaux impliquent des changements environnementaux, climatiques et hydriques. L'analyse détaillée de ces différents assemblages fauniques constitue un outil paléoenvironnemental nous renseignant sur l'évolution sédimentaire du secteur d'étude. Ainsi, une analyse des faunes et de la flore de même que leur moment d'apparition permet de reconstituer l'évolution du niveau marin relatif ainsi que les conditions de température et de salinité des différentes masses d'eau qui ont caractérisé le détroit de Québec suite à la dernière déglaciation. Il a été possible de déterminer que dans le secteur de la basse ville, les conditions étaient vraisemblablement celles d'un milieu glaciomarin ouvert directement sur la Mer de Goldthwait. Ainsi la limite nord-est de la Mer de Champlain a été établie au seuil de Québec. Ce seuil correspond à la zone d'étranglement du socle rocheux entre Neuville et Donnacona. De plus à l'ouest de ce seuil, l'épisode marin a été suivi d'un bassin successeur, celui du Lac à *Lampsilis* (Parent et al, 1997); à l'est du seuil, l'épisode lacustre est absent et l'épisode marin goldthwaitien

s'est poursuivi durant plusieurs milliers d'années, au moins jusqu'à la Transgression Laurentienne (Dionne, 1988, 1999, 2001).

En résumé, les contributions significatives à la paléogéographie wisconsinienne régionale de cette thèse résident dans l'élaboration d'un cadre stratigraphique intégrant les connaissances antérieures de même que les nouvelles données acquises dans cette étude. À cet égard, quatre aspects majeurs peuvent être retenus; soit (1) l'identification et la datation des silts estuariens associés aux transgressions laurentienne (6,5 ka) et Mitis (2 ka) dans la région de Québec, (2) l'identification et la datation du delta marin tardif mis en place par la Proto-Saint-Laurent dans la Mer de Goldthwait, (3) la clarification des relations spatio-temporelles entre les mers de Champlain et de Goldthwait et de ce fait, la redéfinition de la limite nord-est de la Mer de Champlain (4) la découverte d'une unité marine vraisemblablement interstadaire sous le till supérieur. De plus, la réalisation d'un modèle hydrostratigraphique 3D cohérent permet de caractériser de façon préliminaire le delta de Québec et ainsi poser une base à la modélisation hydrogéologique de ce complexe deltaïque, de même que pour le bassin de la rivière Saint-Charles. Une validation croisée sur les propriétés hydrauliques (test de pompage) ou géophysiques de la sous-surface permettrait de tester la robustesse du modèle géologique 3D. La modélisation géologique 3D est une prémisse à la caractérisation des aquifères dans les dépôts meubles, ainsi que pour leur potentiel géothermique dans un environnement urbain, telle que la ville de Québec.

Sous la foi d'observations directes, les différentes méthodes géostatistiques permettront de produire divers scénarios plausibles de la répartition spatiale des propriétés hydrauliques de l'aquifère dans un contexte hydrostratigraphique prédéfini à l'aide d'un modèle géologique 3D. De plus, une bonne compréhension du contexte stratigraphique permet l'élimination de scénarios considérés comme incongrus dans le contexte sédimentaire de la vallée enfouie du Proto-Saint-Laurent dans le secteur de Québec.

Actuellement, la Ville de Québec s'approvisionne en eau en grande partie dans le lac Saint-Charles. La demande en eau croissante pousse les élus à considérer une ressource alternative en eau. Ainsi, une étude plus poussée de l'aquifère de Québec donnerait l'opportunité de définir le potentiel pour un usage industriel de cette ressource en eau souterraine. Cette étude préliminaire nous fournit une assise importante pour mieux établir la structure de l'aquifère. Une étude plus complète devrait être entreprise afin de définir la capacité réelle de cet aquifère ainsi que la qualité de l'eau avant de considérer l'exploitation de l'eau souterraine. De plus, les diverses contributions d'un modèle géologique 3D peuvent être multiples, que ce soit dans le domaine de la géothermie ou du microzonage sismique.

## Références

- Aitken, M.J. 1998. *An introduction to optical dating: the dating of quaternary sediments by the use of photon-stimulated luminescence*. Oxford University Press, Oxford, 267 p.
- Allard, M. et Séguin, J. 1992. « Le niveau du Saint-Laurent de 2000 BP et l'Occupation amérindienne préhistorique de la place Royale, à Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 46, no. 2, p. 181-188
- Appel, M. 2006. « From 3d geomodelling systems towards 3d geoscience information systems : Data model, query functionality, and data management ». *Computers and Geosciences*, vol 32, p. 222-229.
- Bard, P.Y. et Bouchon, M., 1985. « The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys ». *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 75, no. 2, p. 519-541
- Benns, D.I., et Evans, D.J.A. 1998. *Glaciers and Glaciation*. Oxford University Press, New-York. 734 p.
- Bertrand, P. et C. Doré. 1994 *Les conséquences potentielles du changement climatiques global sur le Saint-Laurent*. Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Sainte-Foy, Québec, 46 p.
- Besré, F. et Occhietti, S. 1990. « Les Varves de Deschaillons, les Rythmites du Saint-Maurice et les Rythmites de Leclerville, Pléistocène supérieur, Vallée du Saint-Laurent, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol.44, no. 2, p. 181-198.
- Boespflug, X. Long, B.F.N. et Occhietti, S. 1995. « CAT-scan in marine stratigraphy : a quantitative approach ». *Marine Geology*, vol. 122, p. 281-301.
- Bolduc, A.M. 2003. *Géologie des formations superficielles : Charny, Québec*. Commission géologique du Canada, Dossier public 1776, échelle 1/50 000.
- Bolduc, A.M., Paradis, S.J., Parent, M., Michaud, Y., and Cloutier, M. 2003. *Géologie des formations superficielles : Québec, Québec*. Commission géologique du Canada, Dossier public 3835, échelle 1/50 000 (version révisée).
- Bondue, V. 2004. *La réponse des tributaires du Saint-Laurent aux changements environnementaux*. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal,
- Boutin, A. 2004. *Caractérisation et modélisation numérique de la contamination en TCE des eaux souterraine du secteur de Valcartier*. Mémoire de maîtrise, Institution National de la Recherche Scientifique, Université du Québec, 94 p.
- Brazeau, A. 1989a. *Inventaire des ressources en granulats de la région de Grondines*; Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 89-14, 74 p.
- Brazeau, A. 1989b. *Inventaire des ressources en granulats de la région de Saint-Raymond*; Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 89-53, 79 p.

- Brazeau, A. 1989c. *Inventaire des ressources en granulats de la région de Montaubau*; Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 89-55, 77 p.
- Brazeau, A. 1992. *Inventaire des ressources en granulats de la région de Québec*; Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 92-07, 72 p., et 1 carte à l'échelle 1/50 000.
- Brazeau, A. 1999. *Inventaire des ressources en granulats de la région de Charny*; Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 98-07, 33 p., et 1 carte à l'échelle 1/50 000.
- Brodeur, D et Allard, M. 1985. « Stratigraphie et Quaternaire de l'Îles aux Coudres, estuaire moyen du Saint-Laurent, Québec. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 34, no. 2, p. 183-197.
- Calcagno, P., Chiles, J. P., Courrioux, G., et Guillen, A., 2008. « Geological modelling from field data and geological knowledge Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. » *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 171, no 1-4, p. 147-157.
- Caron, Olivier. (en cours) Synthèse et modèle cartographique 3D des dépôts quaternaires pour les bassins versants des rivières Chaudière et Saint-François : Géochronologie, sédimentologie et paléogéographie wisconsinienne du sud du Québec, thèse de Doctorat, Université du Québec à Montréal.
- Castonguay, S., Tremblay, A. et Lavoie, D. 2002. *Carte de compilation géologique, Québec-Chaudière. Les ponts géologiques de l'est du Canada, Transect 2*, Québec; Commission géologique du Canada, Dossier public 4314, échelle 1/125 000.
- Centre Saint-Laurent. 2000. *Les risques et les conséquences environnementales de la navigation sur le Saint-Laurent*. Environnement Canada- Région du Québec, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent, Rapport scientifique et technique ST-188, 174 p.
- Charbonneau, L., LaSalle, P. et Thibault, L. 1980. *Géologie des sédiments meubles de la région de Portneuf et de Lotbinière, Québec*. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, DVP 741.
- Chauvin, L., Martineau, G., and Lasalle, P., 1985, Deglaciation of the Lower St. Lawrence region, Québec, in Borns, H.W., Jr, Lasalle, P., and Thompson, W.B., eds., Late Pleistocene history of northeastern New England and adjacent Quebec: Geological Society of America, Special Paper 197, p. 111-123.
- Clark, T.H. et Globensky, Y. 1973. *Portneuf et parties de Saint-Raymond et de Lyster*. Ministère des Richesses Naturelles du Québec, Rapport géologique 148, 110 p.
- Clark, T.H. et Globensky, Y. 1975. *Région de Grondines*. Ministère des Richesses Naturelles du Québec, Rapport géologique 154, 159 p.
- Clark, P.U., S.J. Marshall, G.K.C. Clarke, S.W. Hostetler, J.M. Licciardi et J.T Teller. 2001. « Freshwater Forcing of Abrupt Climate Change During the Last Glaciation. » *Science*, vol. 293, p. 283- 287.
- Clarke , G.K.C., Leverington, D.W., Teller, J.T et Dyke, A.S. 2004 « Paleohydraulics on the last outburst flood from glacial Lake Agassiz and the 8200 BP cold event ». *Quaternary Science Reviews*, vol 23, no. 3-4, p. 291-305.
- Clet, M. et Occhietti, S. 1995. « Palynologie des sédiments de la fin de l'optimum climatique de l'interglaciaire sangamonien, Île aux Coudes, estuaire du Saint-Laurent, Québec. » *Géographie physique et Quaternaire* vol. 49, no. 2, p. 291-304.



- Clet-Pellerin, M. et Occhietti, S. 2000. « Pleistocene palynostratigraphy in the St. Lawrence Valley and middle Estuary. » *Quaternary International*, vol. 68-71, p. 39-57.
- Cloutier, V. 2004. *Origine et évolution géochimique des eaux souterraines du système aquifère des Basses-Laurentides dans les roches sédimentaires paléozoïques des Basses-Terres du Saint-Laurent, Québec, Canada*. Thèse de doctorat, Institut National de Recherche Scientifique, Université du Québec, Québec, 382 p.
- Cloutier, M., Parent, M. et Bolduc, A.M. 1997. *Géologie des formations superficielles : St-Marc-des-Carières, Québec*. Commission géologique du Canada, Dossier public 3544, échelle 1/100 000
- Courrioux, G., Nullans, S., Guillen, A., Boissonnat, J.D. Repousseau, P. Renaud, X. et Thibaut, M. 2001. « 3D volumetric modelling of Cadomian terrans (Northern Brittany, France) : an automatic method using Voronoï diagrams. » *Tectonophysics*, vol. 331, p. 181-196.
- Cronin, T.M., Manley, P.L., Brachefeld, S., Manley, T.O., Willard, D.A., Guilbault, J.P., Rayburn, J.A., Thunell, R. et Berke, M. 2008. Impacts of post-glacial lake drainage events and revised chronology of the Champlain Sea episode 13-9 ka. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 262, p. 46-60.
- Cummings, D., Occhietti, S. 2001. « Late Wisconsinan sedimentation in the Québec City region: evidence for energetic subaqueous fan deposition during initial deglaciation. » *Géographie physique et Quaternaire*. Vol. 53, no. 3, p. 257-273.
- David, P.P. et Leblond, J. 1985. *Glacial maximum and deglaciation of western Gaspé, Québec, Canada*. Geological Society of America, Special Paper 197, p. 85-109.
- Denis, R. 1974. *Late Quaternary Geology and Geomorphology in the Lake Maskinongé Area Québec*. University of Uppsala, Department of physical geography, Suède, 125 p.
- Dionne, J.C. 1988. « Sedimentary structures made by shore ice in muddy tidal-flat deposits, St. Lawrence estuary, Québec ». *Sedimentary Geology*, vol. 116, no 3-4, p. 261-274.
- Dionne, J.C. 1999. « Indices de fluctuations mineures du niveau marin relatif à l'Holocène supérieur, à l'Isle-Verte, côte sud de l'estuaire du Saint-Laurent, Québec. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 53, no 2, p. 277-285.
- Dionne, J.C. 2001. « Relative sea level changes in the St. Lawrence estuary from deglaciation to present day. » *Geological Society of America*, special Paper 351 : 271-284.
- Dyke, A.S. et W.R. Peltier. 2000. « Forms, response times and variability of relative sea-level curves, glaciated North America. » *Geomorphology*, vol. 32, no 3-4, p. 315-333.
- Elson, J. 1970. « Late Quaternary marine submergence of Québec. » *Revue de géographie de Montréal*, vol. 23, no 3, p. 247-258.
- Eslami, A. et Fellenius, B.H. 2004. « CPT and CPTu data for soil profile interpretation: review of methods and proposed new approach. » *Iranian Journal of Science & Technology*, Transaction B. 28(B1)
- Fauveau, E. 2006. *Caractérisation hydro-géologique des sédiments meubles avec les sondages par enfoncement et rotopercussion*. Mémoire de M.Sc. INRS-ETE, Québec.
- Fauveau, É., Lefebvre, R., Ballard, J.-M., Fortier, R., Martel, R., 2005. « Examples of hydrogeological characterization of unconsolidated sediments with direct push and rotopercussion technologies ». Proceedings, 58<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference and 6<sup>th</sup> Joint CGS/IAH Conference, Saskatoon, Canada, October 2005, Session 11EA, Paper 565, 8 p.

- Ferland, P. et Occhietti, S. 1990. « Révision du stratotype des Sédiments de Saint-Pierre et implications stratigraphiques, Vallée du Saint-Laurent, Québec. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol.44, no. 2, p. 147-158.
- Feyling-Hanssen, R.W., 1991. *Some Late-Cenozoic foraminifera from Baffin Island and East Greenland*. Geologisk Institut, Aarhus
- Fisher, T. G., Yansa, C. H., Lowell, T.V., Lepper, K., Hajdas, I. et Ashworth, A. 2008. « The chronology, climate, and confusion of the Moorhead Phase of glacial Lake Agassiz: new results from the Ojata Beach, North Dakota, USA. » *Quaternary Science Reviews*, vol 27, no. 11-12, p. 124-1135.
- Freeze, R.A. et Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Gadd, N.R. 1971. *Pleistocene geology of the central St. Lawrence Lowland*. Geological survey of Canada, Mémoire 359.
- Gadd, N.R. 1978. *Surficial geology of Saint-Sylvestre map-area, Québec*. Geological Survey of Canada, Paper 77-16; 9 p., carte 1407A à l'échelle 1/ 50 000.
- Gadd, N.R., MacDonald, B.C. et Shilts, W.W. 1972. *Deglaciation of southern Quebec*. Geological Survey of Canada, Paper 71-47, 19 p., Carte 10-1971 à l'échelle 1/253 440.
- Gagnon, J. et Morelli, S. 1986. *La déglaciation de Saint-Roch-de-Mékinac, Québec*. Thèse de maîtrise, Université du Québec à Montréal, 113 p.
- Gagnon, M. 1994. *Cartographie, lithostratigraphie et paléogéographie des dépôts quaternaire de la région de Saint-Raymond-de-Portneuf*. Rapport de recherche de maîtrise, Université du Québec à Montréal, 74 p.
- Garneau, M. 1997. « Paléoécologie d'un secteur riverain de la rivière Saint-Charles : Analyse macrofossile du site archéologique de la Grande Place, à Québec. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 51, no. 2, p. 221-220.
- Gregory, D., 1980. « Assemblages of the ostracod *Cytheropteron montrosiense* Brady, Crosskey and Robertson from offshore Devonian deposits in the Minch, west of Scotland. » *Scottish Journal of Geology*. Vol. 16, no. 4, p. 287-289.
- Guilbault, J.-P., 1980. *A stratigraphic approach to the study of the Late-Glacial Champlain Sea deposits with the use of foraminifera*. Unpublished Licentiat Thesis, Aarhus Universitet. University Microfilms no. 82-28, 762
- Guilbault, 2008, *Analyse microfaunique de 31 échantillons de sédiments quaternaires de forages dans la ville de Québec, pour le compte de Michel Parent et Lise Lamarche, de la Commission géologique du Canada*. BRAQ-Stratigraphie Compton QC, 6 p.
- Guilbault, 2009. *Analyse microfaunistique de la carotte FL06-01, forée dans la ville de Québec, pour le compte de Michel Parent et Lise Lamarche, de la Commission géologique du Canada*. BRAQ-Stratigraphie Compton QC, 11 p.
- Hardy, F. 1997. *Datation par photoluminescence de sédiments glaciolacustres du sud du Québec et corrélations stratigraphiques par déblais de forage*. Université du Québec à Montréal, Montréal, 128 p. Mémoire de maîtrise.
- Hardy, F. et Lamothe, M. 1997. « Quaternary basin analysis using infrared stimulated luminescence on borehole cores and cuttings. » *Quaternary Science Reviews*. Vol. 16, p. 417-426.

- Hétu, Bernard. 1998. « La déglaciation de la région de Rimouski, Bas Saint-Laurent (Québec) : Indices d'une récurrence glaciaire dans la Mer de Goldthwaith entre 12 400 et 12 000 BP ». *Géographie Physique et Quaternaire*, Vol. 52, No. 3, p. 325-347
- Hétu, Bernard et Gray, James T. 2000. « Les étapes de la déglaciation dans le Nord de la Gaspésie (Québec) : les marges glaciaires des Dryas ancien et récent ». *Géographie Physique et Quaternaire*, Vol. 54, No. 1, p. 5-40
- Hillaire-Marcel, C. 1979. « Les mers post-glaciaires du Québec : quelques aspects », Thèse de doctorat d'état, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 293 p.
- Hillaire-Marcel, C. et P. Pagé. 1981. Paléotempératures isotopiques du Lac glaciaire de Deschaillons. Dans W.C. Mahaney (ed), *Quaternary paleoclimate*, Geo Books, Norwich, p. 273-298.
- Hounslow, A.E. 1995. *Water quality data: Analysis and interpretation*. Lewis Publisher.
- Hughen, K.; Lehman, S.J.; Southon, J.R.; Overpeck, J.T.; Marchal, O.; Herring, C.; Turnbull, J. 2004. Cariaco Basin 50KYr Radiocarbon Calibration and Reconstruction, *Science*, vol 303, no 5655.
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I. et Thewalt, M.L.W. 1985 « Optical dating of sediments » . *Nature*, vol. 313, p. 105-107
- Huntley, F.J. et Lamothe, M. 2001. « Ubiquity of anomalous fading in K-feldspars and the measurement and correction for it in optical dating ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 38, no. 7, p. 1093-1106.
- Huntley, D.J. et A.G.Wintle. 1981. « The use of alpha scintillation counting for measuring Th-230 and Pa-231 content of ocean sediments. » *Canadian journal of Earth Science*, vol. 18, p. 419-432.
- Huot, S. 2003. *Étude détaillée de la luminescence de feldspaths de sédiments fluviaux holocènes*. Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Montréal, Montréal, 108 p.
- IPCC. 2001. « *Climate change 2001: the scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change.* » Houghton, J.T., Y.
- Karrow, P.F. 1957. *Pleistocene geology of the Grondines map-area, Québec*. Thèse de doctorat, University Illinois, Urbana.
- Kaufmann, O. M., Thierry, 2008. « 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. » *Computers & Geosciences*. Vol. 34, p. 278-290.
- Kolterman, C.E. et Gorelick, S.M. 1996. « Heterogeneity in the sedimentary deposits: A review of the structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches. » *Water Resources Research*, vol. 32, no. 9, p. 2617-2658.
- Korsun, S.; Hald, M., 1998. « Modern benthic foraminifera off Novaya Zemlya tidewater glaciers, Russian Arctic. » *Arctic and Alpine Research*. Vol. 30, no. 1, p. 61-77.
- Korsun, S.; Hald, M., 2000. « Seasonal dynamics of benthic foraminifera in a glacially fed fjord of Svalbard, European Arctic. » *Journal of Foraminiferal Research*. Vol. 30, p. 251-271.
- Knox, J.C. 2000. « Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change. » *Quaternary Science Reviews*, vol. 19, p. 439-457.

Lamarche, R.Y. 1971. « Northward moving ice in the Thetford-Mines area of southern Quebec ». *American Journal of Sciences*, vol 271, no. 4, p. 383-388.

Lamarche, L. 2005. *Histoire géologique récente des variations des niveaux de base du Lac Saint-Pierre depuis 10 000 ans*. Université du Québec à Montréal, Montréal, Mémoire de maîtrise, 118 p.

Lamarche, L., Parent, M., Bolduc, A. et Paradis, S. J. 2010. Géologie des formations superficielles, région de Québec, Québec, Commission géologique du Canada, Dossier public 6665, échelle 1/50 000.

Lamarche, L. Michel Parent, René Lefebvre, Didier Perret. 2010. « 3D geological model of a deltaic aquifer system formed in a buried channel of the St. Lawrence River in Quebec City », Canada. *GeoEdmonton*.

Lamarche, L., Parent, M. et Perret, D. 2010. Cartes des formations meubles de surface et de sous-surface, Ville de Québec, Québec – Intervalles verticaux de 5m et maillage de 250m X 250m X 1m. Dossier public xxxx, échelle 1/140 000.

Lamothe, M. 1985. *Lithostratigraphy and geochronology of the Quaternary deposits of the Pierreville and St-Pierre les Becquets areas, Québec*. Université de Western, Ontario, 227 p. thèse de doctorat.

Lamothe, M. (ed) 1987. *Pleistocene stratigraphy in the St-Lawrence lowland and the Appalachians of southern Québec : a field guide*. Volume 4. Collection Environnement et Géologie. Sous la direction de Delisle, C. E. et Bouchard, M. A. Université de Montréal, 280 p.

Lamothe, M. 1989. « A new framework for the Pleistocene stratigraphy of the central St. Lawrence Lowland, southern Québec. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 43, no2, p. 199-129.

Lamothe, M. 1996. « Datation par les méthodes de luminescence des feldspaths des milieux sédimentaires : le problème de la remise à zéro. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 50, p. 365-376.

Lamothe, M. et D.J. Huntley. 1988. « Thermoluminescence dating of Late Pleistocene sediments, St. Lawrence Lowland, Québec. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 42, no 1, p. 33-44.

Lamothe M. et Auclair M. 1999. A solution to anomalous fading and age shortfalls in optical dating of feldspar minerals. *Earth and Planetary Science Letters*, vol 171, p. 319-323.

Lapointe, M. 2000. « Late quaternary paleohydrology of the Gulf of St. Lawrence (Quebec, Canada) based on diatom analysis. » *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 156, no 3-4-, p. 261-276.

LaSalle, P., Hardy, L. et Poulin, P. 1972. *Une position du front glaciaire au nord et au nord-est de la ville de Québec*. Ministère des Richesse Naturelles, gouvernement du Québec. 8p.

LaSalle, P. 1974. *Géologie des dépôts meubles de la région de Québec*. Ministère des Richesses naturelles du Québec, DP 249, 15 p., 1 carte / 4 feuillets à l'échelle 1/31 680.

LaSalle, P. 1978. *Géologie des sédiments de surface de la région de Québec*. Ministère des Richesses naturelles; DVP 565.

LaSalle, P. 1984. Quaternary stratigraphy of Quebec : A review. Quaternary Stratigraphy of Canada- A Canadian contribution to IGCP Project 24, ed. R.J. Fulton; Geological Survey of Canada, Paper 84-10, p. 155-171.

- LaSalle, P. 1989. *Géologie des sédiments meubles de la région de Montauban – rapport préliminaire*. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 89-56, 3 p.
- LaSalle, P., Martineau, G. et Chauvin, L. 1977. *Dépôts morainiques et stries glaciaires de la région de la Beauce – Monts Notre-Dame – Parc des Laurentides*. Ministère des Richesses naturelles, DVP 515.
- Lasalle, P. et J.A. Elson. 1975. « Emplacement of the St-Narcisse Moraine as a climatic Event in Eastern Canada. » *Quaternary Research*, vol. 5, p. 621-625
- Lasalle, P. et Shilts, W. W. 1993 « Younger Dryas-age readvance of Laurentide ice into the Champlain Sea. » *Boreas*, vol. 22, p. 25-37.
- Lefebvre, R. 2006. *Note de cours : Écoulement multiphase en milieu poreux*. INRS-Ete, Québec, 371 p.
- Lefebvre, R., Boutin, A., Blais, V., Martel, R., Therrien, R. Parent, M., Ouellon, T., Roy, N., Lapointe, M., 2004: Characterization of the hydrogeological context and dissolved TCE plume in the granular aquifer system of the Valcartier area, Quebec, Canada. Proceedings, *57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH Conference*, October 24-27, 2004, Quebec City, Canada, Session 4B, 28-35.
- Lemelin, M.J. 2004. *Évolution des environnements holocènes sur la rive Nord du Lac Saint-Pierre, Région de Berthierville, Québec*. Université du Québec à Montréal, Montréal, 118 p. Mémoire de maîtrise.
- Leverington, D.W., Mann, J.D. et Teller, J.T. 2000. « Changes in the bathymetry and volume of Glacial Lake Agassiz between 11,000 and 9300 14C yr B.P. » . *Quaternary Research*, vol. 54, no. 2., p. 174-181.
- Licciardi, J.M., Clark, P.U., Jenson, J.W. et Macayeal, D.R. 1998. « Deglaciation of a soft-bedded Laurentide Ice Sheet ». *Quaternary Science Reviews*, vol. 17, no. 4-5, p. 427-448.
- McDonald, B.C., and Shilts, W.W., 1971. « Quaternary stratigraphy and events in southeastern Quebec » *Geological Society of America Bulletin*, vol. 82, p. 683-698.
- MacCormack, K.E et Eyles, C.H. 2010. Enhancing the Reliability of 3D Subsurface Models through Differential Weighting and Mathematical Recombination of Variable Quality Data, *transaction in GIS*, vol. 14, no 4, p. 401-420.
- Macpherson, J.C., 1966. The post-Champlain evolution of the drainage pattern of the montreal lowland. M. Sc. thesis, McGill University, Department of geography, , Montreal, 264 p.
- Mallet, J.L. 2002. *Geomodeling*. Oxford University, Oxford, 599 p.
- Marshall, S. J. et G.K.C. Clarke. 1999. « Modeling North American Freshwater Runoff through the Last Glacial Cycle. » *Quaternary Research*, vol. 52, no 3, p. 300-315.
- Martel, R., Parent, M., Lefebvre, R., Paradis, M., Carrier, M.-A., Mailloux, M., Hardy, F., Michaud, Y. 2000. *Caractérisation complémentaire des contextes géologique et hydrogéologique des terrains du CRDV et de l'USS Valcartier. Rapport final, Phase I*. Étude réalisée pour le CRDV et l'USS Valcartier, Centre géoscientifique de Québec, Novembre 2000, 110 p., cartes et annexes.
- Michaud, Y., Lefebvre, R. and McCormick, R., 2003. *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires de surface*. Centre géoscientifique de Québec. 139 p.

Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. 1984. *Compilation de la géologie du Quaternaire – région des Appalaches, Québec*. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, DV 84-10.

Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. 1992. Carte minérale de la région de Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, PRO90-03, échelle 1/125 000.

Muller, S.D.; P.J.H Richard, J. Guiot, J.L. de Beaulieu et D. Fortin. 2003. « Postglacial climate in the St. Lawrence lowlands, southern Quebec: pollen and lake-level evidence. » *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 193, no 1, p. 51-72.

Murray, A.S. et A.G. Wintle. 2000. « Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. » *Radiation Measurements*, vol. 31, no 1, p. 57-73.

Nakamura, Y. 1989. « A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using micro-tremors on the ground surface. » *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute*. Vol. 30, p.25-33.

Nastev, M. L., L.; Naumoski, N.; Perret, D.; Parent, M.; Lamarche, L.. 2008. « Effects of soil behaviour modelling on the seismic response of representative soils in the Quebec city region. » *SCGC/CSCE*, p. 1-10.

Occhiatti, S. 1980. *Le Quaternaire de la région de Trois-Rivières - Shawinigan, Québec, contribution à la paléogéographie de la vallée moyenne du Saint-Laurent et corrélations stratigraphiques*. Paléo-Québec 10, 223 p.

Occhiatti, S. 1990. « Lithostratigraphie du Quaternaire de la vallée du Saint-Laurent : méthode, cadre conceptuel et séquences sédimentaire ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 44, no. 2, p. 137-145.

Occhiatti, S., Clet, M., Bernier, F., Besré, F., Ferland, P. et Lancery, J.M. 1989. Contribution à la lithostratigraphie de la vallée du Saint-Laurent : Saint-Pierre-les-Becquets, Sainte-Anne-de-la-Pérade et Donnacona, Dans Lamothe, éd., Stratigraphie du Pléistocène du Québec méridional, Livret-guide d'excursion A1, Réunion annuelle de l'Association des géologues du Canada, p. 35-53

Occhiatti S. et M. Clet. 1989. « The last interglacial/glacial group of sediments in the St Lawrence Valley, Quebec, Canada. » *Quaternary International*, vol. 3-4, p. 123-129.

Occhiatti, S., S. Balescu, M. Lamothe, M. Clet, T. Cronin, P. Ferland et P. Pichet. 1996. « Late Stage 5 Glacio-isostatic Sea in the St. Lawrence Valley, Canada and United States. » *Quaternary Research*, vol. 45, no 2 p. 128-137.

Occhiatti, S. C.; Hillaire-Marcel, C.; Cournoyer, M.; Cumbaa, S.L.; Harington, C. Richard. 2001. « Paléoenvironnement de la mer de Champlain dans la région de Québec, entre 11 300 et 9750 BP: le site de Saint-Nicolas. » *Géographie physique et Quaternaire*. Vol 55, no. 1, p. 23-46.

Ouillon, T., Lefebvre, R., Marcotte, D., Blais, V. et Parent, M. 2005. *3D mapping of hydraulic conductivity using geological facies in the Valcartier aquifer system, Québec*. Résumé de conférence, Saskatoon.

Ouillon, T. 2006. *Distribution spatiale de la conductivité hydraulique dans le système aquifère de Valcartier et influence de l'hétérogénéité sur la modélisation de l'écoulement*. Mémoire de M Sc., INRS-ETE, Québec.

Ouillon, T., Lefebvre, R., Marcotte, D., Boutin, A., Blais, V. and Parent, M. 2008. « Hydraulic conductivity heterogeneity of a local deltaic aquifer system from the kriged 3D distribution of

hydrofacies from borehole logs, Valcatier, Canada. » *Journal of Hydrology*. Vol 351, no. 1-2, p. 71-86

Pagé, P. 1999. *Les grandes glaciations – l’histoire et la stratigraphie des glaciations continentales dans l’hémisphère Nord*. Guérin Universitaire, Montréal, 492 p.

Paradis, S.J. , Bolduc, A., 1999. *Mouvement glaciaire vers le nord sur le piémont laurentien dans la région de Québec, Québec*. Recherches en cours, 1999-D , Commission géologique du Canada, p. 1-7.

Parent, M. 1987. *Late Pleistocene stratigraphy and events in the Abestos-Valcourt region, southeastern Québec*. Thèse de doctorat, University of Western Ontario, London, Ontario, 316 p.

Parent, M., J.M.M. Dubois, P. Bail, A. Larocque et G. Larocque. 1985. « Paléogéographie du Québec méridional entre 12 500 et 8000 ans BP. » *Recherches amérindiennes au Québec*, vol. 15, no 1-2, p. 17-37.

Parent, M. et S. Occhietti. 1988. « Late Wisconsinan Deglaciation and Champlain Sea invasion in the St. Lawrence Valley, Québec. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol 42, no 3, p. 215-246.

Parent, M., Cloutier, M., Doiron, A., Bolduc, A.M. et Michaud, Y. 1997. « The Champlain Sea - Lampsilis Lake - Proto-St. Lawrence transition in the central St. Lawrence valley. » *CANQUA, 8<sup>th</sup> Biennial Meeting*, Montréal, May 22-25, 1997, Programme and abstracts, p. 52.

Parent, M. et S. Occhietti. 1999. « Late Wisconsinan Deglaciation and Glacial Lake development in the Appalachians of Southeastern Québec. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 53, no 1, p. 117-135.

Parent, M., Girard, F., Fagnan, N., Michaud, Y., Boisvert, É., et Fortier, R., 2008. Caractérisation géologique des formations superficielles enfouies. Chapitre 4, dans le *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires*. Contribution 2003016 de la Commission Géologique du Canada, réalisée conjointement avec l’INRS-Géoressources (maintenant INRS-Eau, Terre et Environnement), le Ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs, la MRC de Portneuf et l’université Laval. Dépôt légal - Bibliothèque est Archives nationales du Québec, ISBN 978-2-550-51189-2 (pdf), p. 23-40. [http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/aquiferes/guide\\_granulaires.pdf](http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/aquiferes/guide_granulaires.pdf)

Polyak, L.; Korsun, S.; Febo, L.A.; Stanovoy, V.; Khusid, T.; Hald, M.; Paulsen, B.E.; Lubinski, D.J., 2002. « Benthic foraminiferal assemblages from the southern Kara Sea, a river-influenced Arctic marine environment. » *Journal of Foraminiferal Research*. Vol. 32, no. 3, p. 252-273.

Pugin, A., Pullan, SE, Sharpe, Dr, 1999. « Seismic facies and regional architecture of the Oak Ridges Moraine area, Southern Ontario. » *Canadian journal of Earth Sciences*, vol. 36, no. 3. P. 409-432

Reimer, P. J., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., Buck, C. E., Burr, G. S., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hajdas, I., Heaton, T. J., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kaiser, K. F., Kromer, B., McCormac, F. G., Manning, S. W., Reimer, R. W., Richards, D. A., Southon, J. R., Talamo, S., Turney, C. S. M., van der Plicht, J., & Weyhenmeyer, C. E. 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, vol 51, no 4, p. 1111-1150.

Richard, P. 1977a. « Végétation tardiglaciaire au Québec méridional et implications paléoclimatiques. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 31, no1-2, p. 161-176.

- Richard, P. 1977b. *Histoire post-wisconsinienne de la végétation du Québec méridional par l'analyse pollinique*. Ministère des terres et forêts, Québec, 2 volumes.
- Richard, P.J.H. et S. Occhietti. 2004. « Déglaciation et invasion marine champlainienne au Mont Saint-Hilaire, Québec : nouvelles données chronologiques et implications paléogéographiques. » *72<sup>e</sup> Congrès de l'Acfas*, Université du Québec à Montréal, présentation orale.
- Riva, J. 1972. *Excursion B-19 : Géologies des environs de Québec*. 24<sup>e</sup> congrès géologique international, Commission géologique du Canada, 60 p.
- Rodrigues, C.G., 1992. « Successions of invertebrate microfossils and the late Quaternary deglaciation of the central St. Lawrence Lowland, Canada and United States. » *Quaternary Science Reviews*. Vol.11, p. 503-534.
- Rodrigues, C.G. 1994. « The impact of glacial lake runoff on the Goldthwait and Champlain seas : the relationship between glacial Lake Agassiz runoff and the Younger Dryas ». *Quaternary Science Reviews*, vol. 13, no 9-10, p. 923-944.
- Ross, M. 2004. *Stratigraphie et architecture des formations quaternaires au Nord-ouest de Montréal – Applications en hydrogéologie régionale*. Thèse de doctorat, INRS – Eau, Terre et Environnement, Québec, 319 p.
- Ross, M., Parent, M. et 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*. Vol.13, p. 690-707.
- Ross, M., Parent, M., Benjumea, B. Hunter, J. 2006. The late Quaternary stratigraphic record northwest of Montréal : regional ice-sheet dynamics, ice-stream activity and early deglaciation events, *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol 43, p. 461-485.
- Scott, D.B.; Baki, V.; Younger, C.D., 1989. « Late Pleistocene-Holocene paleoceanographic changes on the eastern Canadian margin: stable isotopic evidence. » *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. vol. 74, p. 279-295.
- Service de l'Inventaire Forestier 1990. *Carte des dépôts de surface 21 L/14*. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. SIF 21 L/14; 1 carte à l'échelle 1/50 000.
- Shilts, W.W., 1970. *Pleistocene geology of the Lac Mégantic region, southeastern Quebec, Canada*. Thèse de doctorat, Syracuse University, 154 p.
- Shilts, W.W., 1981. *Surficial geology of the Lac Mégantic area, Québec*.: Commission Géologique du Canada, Memoire 397, 102p.
- Shilts, W.W. 1982. « The Highland Front Moraine Complex. » dans P. LaSalle, P.P. David et M.A. Bouchard, ed., *Guidebook of the 45<sup>th</sup> Annual Meeting of the friends of Pleistocene*, Drummondville-Saint-Hyacinthe, Québec, Canada, Université de Montréal, Montréal, p. 47-51
- Smirnoff, A., Boivert, É. et Paradis, S. 2008. « Support Vector Machine for 3D modeling from sparse geological information of various origins. » *Computer and Geosciences*. Vol. 34, p. 127-143.
- St-Julien, P. 1995. *Géologie de la région de Québec*. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, MB 94-40, 68 p., 8 cartes à l'échelle 1/20 000, 3 cartes à l'échelle 1/10 000, 2 planches (coupes structurales) à l'échelle 1/20 000, 1 planche (diagrammes domaines structuraux) et 1 planche (légende).
- Stuiver, M. P.J. Reimer, E. Bard, J.W. Beck, G.S. Burr, K.A. Hughen, B. Kromer, G. McCormac, J. Van der Plicht et M. Spurk. 1998. « Intercal98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. » *Radiocarbon*, vol. 40, no 3, p. 1041-1083.



Tavenas, F., Chapelle, J.-F. et Larochelle, P. 1970. Étude des sables submergés par échantillonnage non remanié, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 7, no. 37, p. 37-53.

Teller, J.T. 1988. « Lake Agassiz and Its Contribution to Flow Trough the Ottawa- St. Lawrence System. » Dans Gadd, N.R. éd., *The Late Quaternary Development of the Champlain Sea Basin : Geological Association of Canada*, Special paper 35, p. 281-289.

Teller, J.T., Leverington, D.W. et Mann, J.D. 2002. « Freshwater outbursts to the oceans from glacial Lake Agassiz and their role in climate change during the last deglaciation ». *Quaternary Science Reviews*, vol. 21, no. 8-9, p. 879-887.

Terasmae, J. 1958. « Contributions to Canadian palynology, pt. 2; non-glacial deposits in the St. Lawrence lowland, Quebec. » *Geological Survey Canadian Bulletin*. Vol. 46, p. 13-28.

Tremblay, T. 2008. *Hydrostratigraphie et géologie du Quaternaire dans le bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, 224p.

Wagner, 1971.« Faunas of the Pleistocene Champlain Sea. » GSC Bulletin 181, 104 p.

Wintle, A.G. 1993. « Luminescence dating of aeolian sand : an overview ». The dynamics and environmental context of aeolian sedimentary systems, K. Pye (ed.), *Geological Society of London*, special publication, vol. 72, p. 49-58.

### **Site internet**

Consultative Group for International Agriculture Research- Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) (<http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp>)

Ministère de l'Environnement du Québec : ([www.menv.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm](http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm))

Ministère des Ressources Naturelles du Québec ([www.mrnf.gouv.qc.ca](http://www.mrnf.gouv.qc.ca))

## **Annexe A**

Lignes de code pour la réalisation du modèle géologique 3D (Gocad® version 2.8)

Afin de faciliter la réalisation du modèle géologique 3D dans la plateforme gOcad®, certaines lignes de code sont réécrites dans un « script » puisqu'elles doivent être reproduites plusieurs fois durant la validation du modèle. Ainsi, le texte qui suit représente les lignes de codes utilisées pour attribuer les différentes cellules aux bonnes régions dans le voxel, de même que les différentes propriétés des régions.

\* Création des régions

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "X" use_top_feature "true"
top_feature "remblai_surface" use_bottom_feature "false" bottom_feature "B" stype "or" dynamic
>false"
```

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "O" use_top_feature "true"
top_feature "O_surface" use_bottom_feature "false" bottom_feature "B" stype "or" dynamic
>false"
```

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "Ap_At" use_top_feature
>true" top_feature "Ap_At_surface" use_bottom_feature "false" bottom_feature "B" stype "or"
dynamic "false"
```

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "Ax" use_top_feature
>true" top_feature "Ax_surface" use_bottom_feature "false" bottom_feature "B" stype "or"
dynamic "false"
```

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "Ae" use_top_feature
>true" top_feature "Ae_surface" use_bottom_feature "false" bottom_feature "B" stype "or"
dynamic "false"
```

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "Md_BV" use_top_feature
>true" top_feature "Md_BV_surface" use_bottom_feature "false" bottom_feature "B" stype "or"
dynamic "false"
```

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "Md_g_BV"
use_top_feature "true" top_feature " Md_g_BV_surface " use_bottom_feature "false"
bottom_feature "B" stype "or" dynamic "false"
```

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "Mb" use_top_feature
>true" top_feature "Mb_surface" use_bottom_feature "false" bottom_feature "B" stype "or"
dynamic "false"
```

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "Mi" use_top_feature
>true" top_feature "Mi_surface" use_bottom_feature "false" bottom_feature "B" stype "or"
dynamic "false"
```

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "Md" use_top_feature
>true" top_feature "Md_surface" use_bottom_feature "false" bottom_feature "B" stype "or"
dynamic "false"
```

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "Md2" use_top_feature
>true" top_feature "Md2_surface" use_bottom_feature "false" bottom_feature "B" stype "or"
dynamic "false"
```

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "Ma" use_top_feature
>true" top_feature "Ma_surface" use_bottom_feature "false" bottom_feature "B" stype "or"
dynamic "false"
```

```
gocad on GObj "model_qc" between_geologic_features_region region "G" use_top_feature "true"
top_feature "G_surface" use_bottom_feature "false" bottom_feature "B" stype "or" dynamic
>false"
```

gocad on GObj "model\_qc" between\_geologic\_features\_region region "T\_Q" use\_top\_feature "true" top\_feature "Till\_surface" use\_bottom\_feature "false" bottom\_feature "B" stype "or" dynamic "false"

gocad on GObj "model\_qc" between\_geologic\_features\_region region "R" use\_top\_feature "true" top\_feature "Roc\_surface" use\_bottom\_feature "false" bottom\_feature "B" stype "or" dynamic "false"

\* Soustraction des régions selon la stratigraphie

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "T\_Q" with "R"

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "G" with "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "G" with "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ma" with "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ma" with "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ma" with "G"

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md2" with "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md2" with "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md2" with "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md2" with "Ma"

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md" with "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md" with "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md" with "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md" with "Ma"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md" with "Md2"

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mi" with "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mi" with "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mi" with "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mi" with "Ma"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mi" with "Md2"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mi" with "Md"

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mb" with "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mb" with "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mb" with "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mb" with "Ma"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mb" with "Md2"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mb" with "Md"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Mb" with "Mi"

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_g\_BV" with "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_g\_BV" with "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_g\_BV" with "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_g\_BV" with "Ma"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_g\_BV" with "Md2"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_g\_BV" with "Md"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_g\_BV" with "Mi"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_g\_BV" with "Mb"

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_BV" with "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_BV" with "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_BV" with "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_BV" with "Ma"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_BV" with "Md2"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_BV" with "Md"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_BV" with "Mi"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_BV" with "Mb"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Md\_BV" with "Md\_g\_BV"

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ae" with "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ae" with "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ae" with "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ae" with "Ma"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ae" with "Md2"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ae" with "Md"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ae" with "Mi"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ae" with "Mb"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ae" with "Md\_g\_BV"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "Ae" with "Md\_BV"

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "At\_Ap" with "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "At\_Ap" with "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "At\_Ap" with "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "At\_Ap" with "Ma"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "At\_Ap" with "Md2"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "At\_Ap" with "Md"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "At\_Ap" with "Mi"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "At\_Ap" with "Mb"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "At\_Ap" with "Md\_g\_BV"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "At\_Ap" with "Md\_BV"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "At\_Ap" with "Ae"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "At\_Ap" with "Ax"

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "Ma"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "Md2"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "Md"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "Mi"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "Mb"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "Md\_g\_BV"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "Md\_BV"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "Ae"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "Ax"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "O" with "At\_Ap"

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "T\_Q"

gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "Ma"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "Md2"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "Md"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "Mi"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "Mb"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "Md\_g\_BV"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "Md\_BV"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "Ae"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "Ax"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "At\_Ap"  
 gocad on GObj "model\_qc" minus\_region region "X" with "O"

\* Attribution des propriétés numériques pour chaque région

gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 1 region "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 2 region "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 3 region "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 4 region "Ma"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 5 region "Md2"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 5 region "Md"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 6 region "Mi"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 7 region "Mb"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 8 region "Md\_g\_BV"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 9 region "Md\_BV"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 10 region "Ae"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 11 region "Ax"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 12 region "At\_Ap"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 13 region "O"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "units" value 14 region "X"

gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 1 region "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 2 region "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 3 region "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 6 region "Ma"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 4 region "Md2"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 4 region "Md"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 5 region "Mi"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 4 region "Mb"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 3 region "Md\_g\_BV"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 4 region "Md\_BV"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 5 region "Ae"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 3 region "Ax"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 4 region "At\_Ap"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 7 region "O"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "type" value 8 region "X"

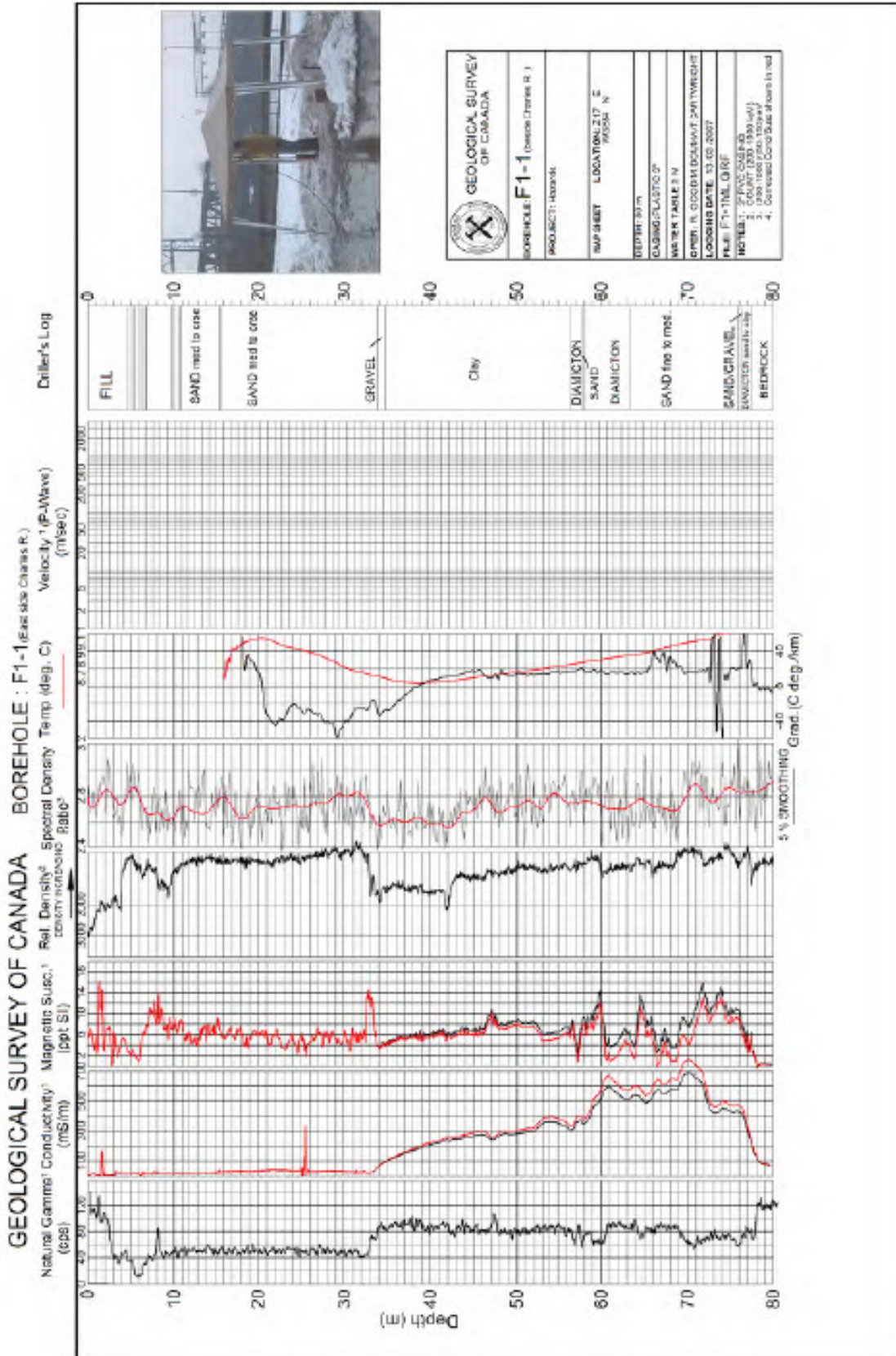
gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 1 region "R"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 2 region "T\_Q"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 2 region "G"  
 gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 3 region "Ma"

gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 3 region "Md2"  
gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 3 region "Md"  
gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 3 region "Mi"  
gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 3 region "Mb"  
gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 3 region "Md\_g\_BV"  
gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 3 region "Md\_BV"  
gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 3 region "Ae"  
gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 3 region "Ax"  
gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 4 region "At\_Ap"  
gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 4 region "O"  
gocad on GObj "model\_qc" set\_value\_property property "age" value 4 region "X"

## **Annexe B**

Levé géophysique du forage FL06-01

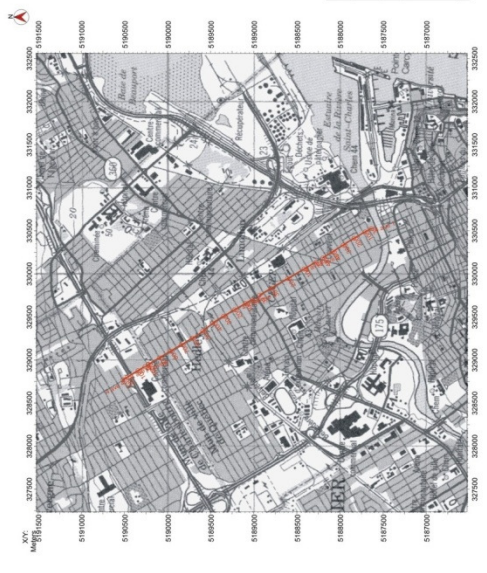
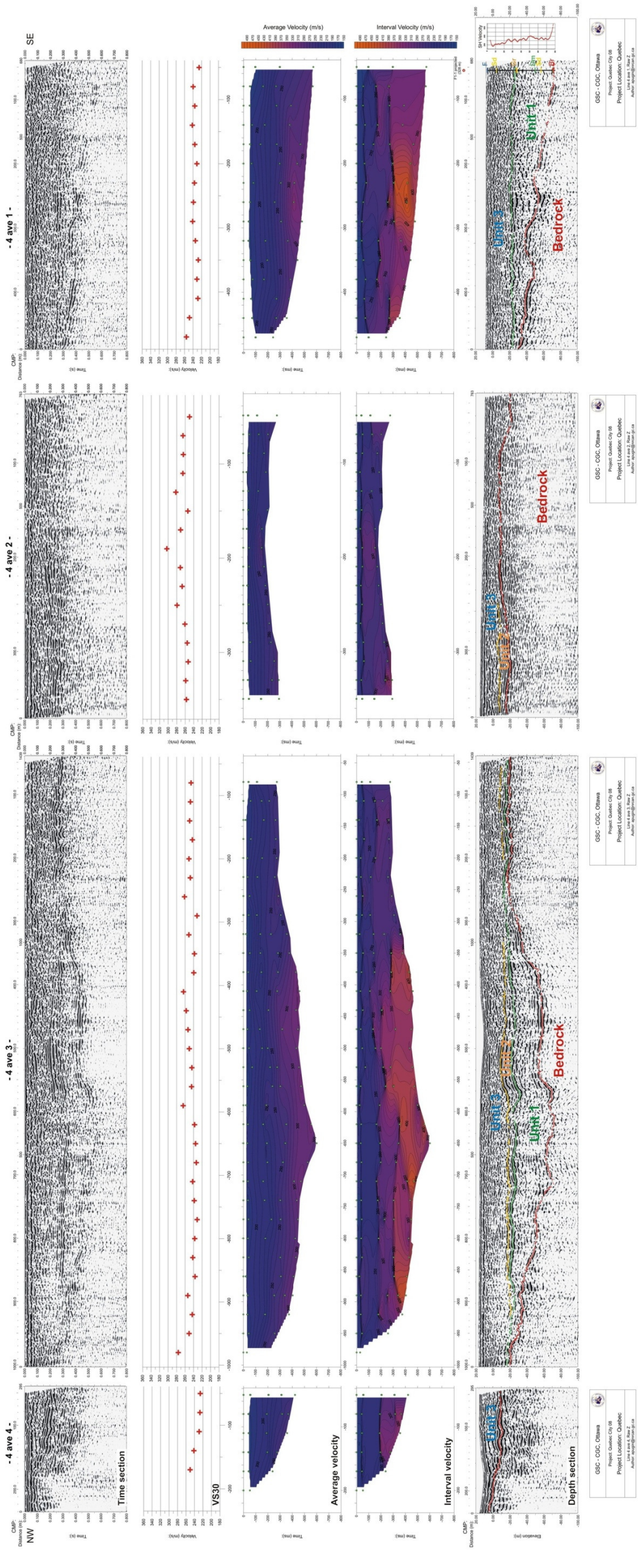




## **Annexe C**

Levé de sismique réflexion

Ville de Quebec, 4eme Avenue



Picture: Minibuggy, Minivib, with multi-component landstreamer in action on the 4th Avenue in Quebec City

**Shallow High Resolution Seismic Reflection Survey**  
*Robert Barris, James Hunter, Timothy Carrivick, Marwan Drouazi*

**Acquisition:**  
 Source: Minibuggy Minivib 1  
 Receiver: Minivib 1  
 Sweep type: Linear  
 Start frequency: 20 Hz  
 End frequency: 250 Hz  
 Start edge: 0.2 s  
 End edge: 0.2 s  
 Plot trace: '0'

**Processing:**  
 Software used: KGS Winseis, Beta test version, VistaWin and in-house developed software  
 1. Data conversion, SEG2 to SEG-Y/KGS  
 2. Spectral whitening (A/GC, 1000 m)  
 3. Correlation, 1 second  
 4. Trace alignment  
 5. Trace padding  
 6. Band Pass filtering  
 7. Trace normalization  
 8. Velocity analysis (CMP binning at 1.5 m)  
 9. Velocity analysis every 45 m  
 10. NMO  
 11. Stack (25 fold)  
 12. Stack (25 fold)  
 13. Band Pass filtering  
 14. Mix three traces (25%, 50%, 25%)  
 15. Data quality control  
 16. Datum static correction  
 17. Time to depth conversion using velocity analysis

Sections expected and interpreted and plotted in SMT, Kingdom suite.

**Signal recording:**  
 Geophones: 2-25, 30 Hz  
 - 11 (odd channels)  
 - 12 (even channels)  
 Array: 11m x 11m  
 Geophones spacing: 0.75 m  
 Source to geophone: 1.3 m  
 Source spacing: 3 m  
 Channels: 6  
 Record length: 7.2 s, uncorrelated  
 Sampling rate: 0.5 ms

**Project Information:**  
 GSC - CGC, Ottawa  
 Project Name: City 08  
 Project Location: Quebec  
 Author: Robert Barris

## **Annexe D**

Données de la microfaune de l'unité marine d'eau profonde



Échantillon	Profondeur	Fraction flottée										fraction lourde							> 1 mm																	
		ostracodes		miscellanées								foraminifères		ostracodes		miscellanées					miscellanées															
		<i>Cytheropteron pseudomontrosiense</i>	<i>Cytheropteron sp.</i>	<i>Bullinularia sp.</i> (thécamoebien)	spicules d'éponges	"spicules" à corrugations	échinodermes indifférents	échinodermes indifférents	éphines d'oursins	diatomées centrales	diatomées pennales	radiolaires	gastéropodes juvéniles	crustacés (?)	mégaspores	matière végétale (voir texte)	Polymorphinidés indiff.	<i>Islandiella sp.</i>	<i>Elphidium excavatum</i>	<i>Cassidulina reniforme</i>	<i>Cytheropteron pseudomontrosiense</i>	<i>Cytheropteron nodosum</i>	spicules d'éponges	"spicules" à corrugations	échinodermes indifférents	éphines d'oursins	diatomées centrales	pélécyropodes	insectes	matière végétale (voir texte)	ophiures	matière végétale	pélécyropodes	ophiures		
FL07-01	105'	-	-	✓	✓	✓								0,7											?							✓				
	106' 8"	32,5	-	1	✓	✓		✓					✓	1											✓											
	108'	32,9	-	-		✓		✓						1																						
	110'	33,5	-	-	✓	✓		✓						0,7																						
	111' 7"	34,0	-	-	?	✓		✓						1			2		1	1					✓	✓	✓	✓			✓					
	113' 4"	34,5	3	-	✓	✓		?	✓					0,5		1									✓	✓	✓	✓			✓					
	114' 8"	35,0	1	-				✓	✓				✓	0,5								✓			✓	✓	✓	✓				✓				
	116' 4"	35,4	1	-	✓				✓					0,7								✓			✓	✓	✓	✓				✓				
	120'	36,6	2	-		✓		✓	?	✓	✓			1											✓	✓	✓	✓		0,2						
	122'	37,2	2	-		✓		✓		✓	✓			1								✓			✓	✓	✓	✓								
	123' 10"	37,7	1	1	-	✓		✓		✓	✓		✓	1																						
	125' 6"	38,2	3	-	-	✓		✓		✓				1											✓	✓	✓	✓								
	127' 5"	38,8	1	-	-	✓		✓		✓				1											✓	✓	✓	✓								
	129'	39,3		-	-	✓								1																						
	131'	39,9		-	-									1																					0,2	
	133'	40,5		-	-									1																						
	143' 6"	43,7		-	-									1																						
	144' 6"	44,0		-	-			✓						1																						
	146' 5"	44,6		-	-					✓			✓	2																						
	148' 3"	45,2	1	-	-			✓		✓	✓		✓	2																						
	150'	45,7	3	-	-	✓				✓	✓			0,5			1		3																	
	151' 8"	46,2		-	-			✓		✓	✓			1											✓											
	153' 3"	46,7	2	-	-	✓				✓	✓			0,5											✓											
	159' 6"	48,6		-	-			✓			✓			2		1									✓											
	161' 7"	49,2	3	4	-				✓		✓			0,5		1									✓		✓	✓								
	163' 4"	49,8		-	-			✓			✓			0,7											✓		✓	✓								

"✓" = présent  
 "-" = présence de fragments

## **Annexe E**

Données de la microfaune des sédiments interstadiaires

Échantillon	Profondeur	Foraminifères																Lobation des <i>Elphidium excavatum</i>																				
		<i>Trochammina ochracea</i>	<i>Miliolites</i> indéterminés	<i>Trochammina</i> sp.	<i>Fissurina marginata</i>	<i>Polymorphinidés</i>	lagenidae uniloculaires indiff.	<i>Irenita ornigera</i>	<i>Bolivina decussata</i>	<i>Bolivina pseudopunctata</i>	<i>Cassidulina reniforme</i>	<i>Islandiella helenae</i>	<i>Islandiella norcrossi</i>	<i>Islandiella mégalosphérique juvénile</i>	<i>Globocassidulina bradshawi</i>	<i>Buliminella hensoni</i>	<i>Stainforthia feylingi</i>	<i>Discorbis squamata</i>	<i>Gavelinopsis</i> sp.	<i>Buccella trigida</i>	<i>Epistominella naraensis</i>	<i>Heronallenia</i> indiff.	<i>Cibicides lobatulus</i>	<i>Nonionella labradorica</i>	<i>Nonionella auricula</i>	<i>Astrononion gallowayi</i>	<i>Elphidium excavatum</i> f. <i>clavata</i>	<i>Elphidium hallandense</i>	<i>Haynesina orbicularis</i>	foraminifères planctoniques	foraminifères calcaireux indéterminés	total	spéc/g	spéc/g	spéc/g	spéc/g		
FL06-01	208'	63,4		1					1																								2	104	0,02	2		
	210'	64,0		2																													6	102	0,06	4		
	212'	64,6																															1	102	0,01	1		
214'	65,2																																	3	101	0,03	2	
214' 6"	65,4		1						3																								6	102	0,06	4		
214' 10"	65,5								1																								1	96	0,01	1	x	
215'	65,5								1						1																		2	102	0,02	1		
220'	67,1	1																															11	98	0,11	2	2	
221'	67,4		2																														3	213	0,01	2		
222'	67,7	1				1	2	3	1						3	1	1	1	1	1	1	1	1	5		2	1					26	104	0,25	15			
222'B	67,7																																	108				
223'	68,0																																	205				
224'	68,3		1												1																		2	101	0,02	2		
225'	68,6								1																								3	125	0,02	2		
225B	68,6								1																								3	104	0,03	2		
225'	68,6				1																												1			1		
226'	68,9								6																								8	105	0,08	2		
228'	69,5				1				4						1																		13	101	0,13	7		
230'	70,1								1	1			1																				8	101	0,08	4		
232'	70,7								1																								1	103	0,01	1		
234'	71,3								6																								7	102	0,07	2		
236'	71,9								1	1																								8	103	0,08	6	
238'	72,5								4	1																								11	105	0,1	3	
240'	73,2								3																									4	104	0,04	2	
242'	73,8																																	7	102	0,07	4	
244'	74,4								6																									7	101	0,07	2	
246'	75,0								2																									3	105	0,03	2	
248'	75,6	3						2	1	7		1		9													2	4					49	102	0,48	11		
249'	75,9														1																			4	103	0,04	2	
250'	76,2								1																									8	115	0,07	4	2
250' 2"	76,3		1						5																									11	142	0,08	4	



Échantillon	Profondeur	ostracodes		Miscellanées														
		Cytheropteron pseudomontrosiense	Ostracode indéf.	Eau salée				Eau douce										
				spicules d'éponges	"spicules" à corrugations	échinodermes indifférenciés	ophiures	épines d'oursins	diatomées centrales	diatomées pennales	dinoflagellé	gastéropodes juvéniles	pélécy-podes juvéniles	arthropodes, surtout cladocères	figs insectes	charophytes	mégaspores	fragments de gyttja avec pollens
<b>FL06-01</b>	208'	<b>63,4</b>	5					1										3
	210'	<b>64,0</b>		√				?				c	√					0,7
	212'	<b>64,6</b>																1
	214'	<b>65,2</b>		√				12	√			c		√				2
	214' 6"	<b>65,4</b>		√				21		√				√				2
	214'10"	<b>65,5</b>		√				√										5
	215'	<b>65,5</b>	-					3		√		c						1
	220'	<b>67,1</b>	2	√				√		√								3
	221'	<b>67,4</b>	3	1	√	√	√	1						√	√			2
	222'	<b>67,7</b>			√		√				√			√				3
	222'B	<b>67,7</b>									√							0,5
	223'	<b>68,0</b>	1		√												√	3
	224'	<b>68,3</b>	7		√	√	√	√						√	√			5
	225'	<b>68,6</b>	4			√		√			√							6
	225B	<b>68,6</b>	3		√									√				4
	225'	<b>68,6</b>	5			√	√	√			√	c		√	√			6
	226'	<b>68,9</b>	4		√			√										3
	228'	<b>69,5</b>	-		√			1				c						1
	230'	<b>70,1</b>	4		√			4										0,7
	232'	<b>70,7</b>	-		√						√	c						2
	234'	<b>71,3</b>	2		√									√				3
	236'	<b>71,9</b>	1?		√			4						√				1
	238'	<b>72,5</b>	-					1						√				1
	240'	<b>73,2</b>			√			1						√				1
	242'	<b>73,8</b>			√			16				√+c?		√				0,7
	244'	<b>74,4</b>			√	√												2
	246'	<b>75,0</b>			√			1						√				1
	248'	<b>75,6</b>			√			√	1			c		√				4
	249'	<b>75,9</b>	1	-		√		1		√		c						1
	250'	<b>76,2</b>			√							√						2
	250' 2"	<b>76,3</b>			√									√				4

## **Annexe F**

Datations au radiocarbone publiées pour la région de Québec

# labo	Site	Localisation			Description	Référence
		X	Y	Z (m asl)		
Matière organique						
*Beta-28459	Québec (vieux-Québec)	331950,21	5186786,78	8,05	Charbon de foyer (vrai niveau de la plage; exondation)	Allard et Séguin,1992
*Beta-28462	Québec (vieux-Québec)	331948,26	5186786,78	8,39	Charbon de foyer	Allard et Séguin,1992
*Beta-28463	Québec (vieux-Québec)	331948,26	5186786,78	8,4	Charbon de foyer	Allard et Séguin,1992
*Beta-33922	Québec (rivière St-Charles)	330795,54	5186800,22	8,00	dallage de bois; associé à l'épisode Mitis	Garneau, 1997
UL-575	Québec (vieux-Québec)	331948,26	5186786,78	8,78	Charbon d'une dépression	Allard et Séguin,1992
Beta-143297	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	60	bois	Occhietti et al 2001
*TO-13297	Québec	330633,86	5187669,99	-1	Cône de <i>Pinus strobes</i> ; Remanié; unité grossière sommet des sables deltaïques	ce texte
*TO-13298	Québec	330633,86	5187669,99	0	Racines de <i>Equisetum</i> sp.;Silts estuariens	ce texte
TO-13299	Québec	328788,64	5189038,88	-4	Brindilles de <i>Salix</i> sp.; Sables deltaïques	ce texte
*Beta-228275	Québec	330846,59	5187771,73	-0.5	Bois; Sables alluviaux récents	ce texte
Beta-228276	Québec	330846,59	5187771,73	-4	Bois; Sables deltaïques	ce texte
*Beta-228277	Québec	328788,64	5189038,88	-4	Plante; Base des silts estuariens	ce texte
*Beta-228278	Québec	328788,64	5189038,88	-4	Plante; Remanié; unité grossière sommet des sables deltaïques	ce texte
*Beta-228614	Québec	329445,33	5188169,45	3.5	Bois; Silts intertidaux	ce texte
*Beta-228615	Québec	329445,33	5188169,45	2	Bois; Unité grossière sommet des sables deltaïques	ce texte
*Beta-242590	Québec	327902,79	5188069,82	4	Plante; Silts estuariens	ce texte
GX-28863-AMS	PIA-LGD-1	320304,90	5182449,42	15	Fragments de plante; silt/ sédiments intertidaux	Parent, comm. Pers.
*Gx-27458-AMS	OO-Pia-CR1	320538,76	5181455,52	15	Fragments de plante; silt/ sédiments intertidaux	Parent, comm. Pers.
GSC-6629	01-BZA-0008D	326907,99	5165012,42	118	Matière organique (incluant du bois), conifère selon R.J. Mott; Sable alluvial	Bolduc, comm. Pers.
GSC-6637	01-BZA-0008	326907,99	5165038,40	118	Matière organique; Sable	Bolduc, comm. Pers.
GSC-6633	01-BZA-0009 (2,6m depth)	326907,99	5163370,01	115	tourbe basale; sous des sédiments alluviaux	Bolduc, comm. Pers.
*GSC-6631	01-BZA-0010	341963,19	5169710,13	102	Matière organique; Sable	Bolduc, comm. Pers.
GSC-6472	99-BZA-0102B	334141,97	5197861,33	150	Bois; tourbe	Bolduc, comm. Pers.
GSC-6444	99-BZA-0120G	334141,97	5197861,33	150	Bois; Sable organique	Bolduc, comm. Pers.
*Beta-242591	Québec	327902,79	5188069,82	5	Plante; sédiments estuariens	ce texte
QU-5	Québec (rivière Saint-Charles)	330046,49	5190916,42	15	<i>Pinus</i> sp.	Compilation CGC
QU-95	Québec (rivière Saint-Charles)	324828,55	5185961,57	10	<i>Anus</i> sp	Compilation CGC
QU-96	Québec (rivière Saint-Charles)	330324,19	5189352,50	10	<i>Pinus</i> sp.	Compilation CGC
QU-311	St-Rédempteur	325478,61	5176207,62	60	Sol	Compilation CGC
QU-579	Beaupré	356011,69	5211400,52	15	Bois ( <i>Larix</i> ou <i>Pecea</i> )	Compilation CGC
QU-500	St-Michel (Bellechasse)	357810,94	5192407,86	16	<i>Quescus rubra</i>	Compilation CGC
*Beta-242592	Québec	330157,52	5188881,64	6	Plante; unité sableuse au sommet du delta	ce texte

\* Données utilisées pour la réalisation de la courbe de niveau marin relative de la région de Québec, de la déglaciation à aujourd'hui (figure 3.9)

# labo	Site	Localisation			Description	Référence
		X	Y	Z (m asl)		
<i>Balanus</i> sp.						
GSC-5927	Riv. Du Chênes (Saint-Édouard)	280792,65	5158266,68	72	<i>Balanus hameri</i>	Compilation CGC
GSC-1232	Beauport	331772,20	5195959,03	106	<i>Balanus</i> sp.; Diamicton (glaciomarin?)	Lowdon et Blake, 1976
GSC-1295	Lapointe	351925,49	5208987,46	67	<i>Balanus hameri</i> ; Diamicton (glaciomarin?)	Lowdon et Blake, 1976
GSC-1476	Pointe Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	61	<i>Balanus hameri</i> ; Gravier de contact glaciaire sous 3 m de gravier	Compilation CGC
GSC-4998	Issoudun (II)	294175,77	5161746,07	90	Coquille de <i>Balanus hameri</i> dans un till; Collecté dans le diamicton compact associé à la réavancé de Saint-Nicolas	Compilation CGC
QU-98	Pointe Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	60	<i>Balanus hameri</i> ; Gravier (contact glaciaire?)	Samson et al, 1977
UQ-39	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	44	<i>Balanus hameri</i> ; silt et argile avec galet	Parent et Occhietti, 1988
UQ-40	Pointe Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	57	<i>Balanus hameri</i> ; sédiments marins d'eau profonde remaniés	Parent et Occhietti, 1989
UQ-64	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	48	<i>Balanus hameri</i> ; colonie précoce	Parent et Occhietti, 1990
GSC-4804	Rivière Ste-Anne	270810,85	5182886,75	60	<i>Balanus hameri</i> ; colonie précoce	Lasalle et Shilts, 1993
GSC-2090	Saint-Alban	269867,63	5186134,77	71	<i>Balanus hameri</i> ; colonie précoce	McNeely, 1989
Beta-125967	Pointe-Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	65	<i>Balanus hameri</i> ; colonie précoce	Cumming, 1999
GSC-1712	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	44		Compilation CGC
GSC-5957	Issoudun	294175,80	5161691,79	90	<i>Balanus hameri</i> ; colonie précoce	Occhietti et al, 2001
GSC-6283	98-BZA-0028	313702,86	5185669,58	75	<i>Balanus hameri</i> ; Diamicton argileux	Bolduc, comm. Pers.
GSC-4769	Rivière du Chêne (Les trois fourches)	286042,19	5153330,68	60		Compilation CGC
GSC-1533	Charlesbourg	326567,03	5191198,21	110	<i>Portlandia arctica</i> ; sable argileux	Lowdon et Blake, 1973
GSC-4783	Rivière Sainte-Anne (I)	269928,57	5183292,11	60	Coquille de <i>Portlandia arctica</i> (conditions froides près du front glaciaire)	Compilation CGC
GSC-6051	95-BZA-8059	274718,88	5169923,20	10	<i>Balanus</i> sp.; Diamicton glaciomarin	Bolduc, Comm. Pers.
GSC-4752	Saint-Édouard	278974,51	5159788,60	38	<i>Portlandia arctica</i> ; Lits intermédiaires dans les successions de faciès de la Mer de Champlain	Lasalle et Shilts, 1993
<i>Hemithylis</i> sp.						
*GSC-1451	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	48	<i>Hemithylis psittacea</i> ; sable régressif	Lowdon et Blake, 1979
<i>Mya truncata</i>						
*GSC-1235	ND des Laurentides (Bon Pasteur)	324907,51	5197462,11	176	<i>Mya truncata</i> ; Sédiments glaciomarins	Lowdon et Blake, 1976
QU-20	Pointe Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	70	<i>Mya truncata</i> ; Sédiments d'eau peu profonde remaniés	Samson et al, 1977
*GSC-4996	Saint-Antoine de Tilly (ruisseau Bourret)	303437,69	5168276,75	68	Coquille de <i>Mya arenaria</i> dans des sédiment littoral d'eau peu profonde; age minimum de la réavancé de Saint-Nicolas	Compilation CGC
<i>Macoma calcarea</i>						
GSC-4799	Rivière Sainte-Anne (II)	269928,57	5183292,11	60	Coquille de <i>Macoma calcarea</i> dans de l'argile silteuses marines	Compilation CGC
*Beta-115873	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	52	<i>Macoma calcarea</i>	Occhietti et al 2001
*GSC-6292	98-BZA-0027	316325,82	5188669,09	85	<i>Macoma calcarea</i> ; sable littoraux aux contact du till	Bolduc, Comm. Pers.
Beta-147723	Saint-Augustin	316577,67	5178969,93	35	<i>Macoma calcarea</i> ; Communautés littorales ou postérieures à la lacune d'érosion	Occhietti et al, 2001
<i>Macoma balthica</i>						
GSC-5536	92BZA3034	290781,69	5185273,83	90	<i>Macoma baltica</i> ; argile	Bolduc, Comm. Pers.
GSC-6285	98-BZA-0025 (1-1,5 m depth)	340615,78	5200240,68	115	<i>Macoma baltica</i> ; sable stratifié	Bolduc, Comm. Pers.
GSC-2150	Rivière Sainte-Anne/Saint-Alban	269867,63	5186134,77	90	<i>Macoma baltica</i> ; Lits intermédiaires dans les successions de faciès de la Mer de Champlain	Occhietti, 1980
<i>Mytilis</i> sp.						
GSC-1508	Série de Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	64	<i>Mytilis edulis</i> ; Fossile d'eau peu profonde associé au remaniement tardif de la Mer de Champlain	Compilation CGC
Morse						
*Beta-115199	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	63		Occhiet et al., 2001

\* Données utilisées pour la réalisation de la courbe de niveau marin relative de la région de Québec, de la déglaciation à aujourd'hui (figure 3.9)

# labo	Site	Localisation			Description	Référence
		X	Y	Z (m asl)		
<i>Hiatella artica</i>						
GSC-4997	Issoudun (I)	294175,77	5161746,07	90	Coquille de <i>Hiatella artica</i> ; Collecté juste au dessus du diamicton de balanus dans des sédiment littoral ; age minimum de la réavancé de Saint-Nicolas	Compilation CGC
QU-447	Pont-Rouge	296498,61	5181731,83	90	<i>Hiatella artica</i> ; Sédiments d'eau peu profonde remaniés	Lasalle et al, 1977a
QU-93	St-Henri-de Lévis	336722,50	5167111,89	104	<i>Hiatella artica</i> ; Argile et gravier interlité	Samson et al., 1977
QU-94	Sainte-Croix-de-Lotbinière	295633,33	5166338,14	84	<i>Hiatella artica</i> , <i>Macoma balthica</i> ; Sédiment d'eau peu profonde remaniés	Samson et al, 1977
QU-97	Beauport	331675,69	5191796,52	58	<i>Hiatella artica</i> ; Sédiments littoraux	Samson et al, 1977
UQ-1287	Ste-Foy	325524,19	5180520,21	38	<i>Hiatella artica</i> ; Sédiments d'eau peu profonde remaniés	Parent et Occhietti, 1988
UQ-206	Pointe Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	50	<i>Hiatella artica</i> ( <i>Mytilus edulis</i> , <i>Balanus</i> sp.); Sédiments d'eau peu profonde remaniés	Parent et Occhietti, 1988
Beta-125968	Ruisseau Bourret	303414,60	5168251,34	68	<i>Hiatella artica</i> ; Communautés littorales ou postérieures à la lacune d'érosion	Cummings, 1999
Beta-143298	Saint-Nicolas	318035,59	5174517,48	62	<i>Hiatella artica</i>	Lowdon et Blake, 1979
Beta-147722	Ponte-Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	53	<i>Hiatella artica</i> ; Communautés littorales ou postérieures à la lacune d'érosion	Occhietti et al, 2001
TO-13300	Québec	328788,64	5189038,88	-4	<i>Hiatella artica</i> ; Sable deltaïque	Compilation CGC
GSC-475	Ste-Christine	236415,98	5166468,25	144	coquille <i>Hiatella artica</i> ; coquille en place: niveau marin 510ft à 540ft (155-165 m)	Compilation CGC
*Beta-242524	VALC-TM9-445	310610,54	5194300,37	160	<i>Hiatella artica</i> ; en forage, horizon de silt, traces à un peu d'argile	Parent, Comm. Pers.
*GSC-6624	01-BZA-0012	340607,58	5178903,23	85	<i>Hiatella artica</i> ; sable	Bolduc, Comm. Pers.
*GSC-6623	01-BZA-0004	323330,64	5174075,96	80	<i>Hiatella artica</i> ; sable	Bolduc, Comm. Pers.
*GSC-6622	01-BZA-0003B	314267,14	5168830,20	99	<i>Hiatella artica</i> ; Sable et silt argileux	Bolduc, Comm. Pers.
*GSC-6660	2000-BZA-0006 (1m depth)	312922,47	5160158,00	125	<i>Hiatella artica</i> ; Sable massif graveleux	Bolduc, Comm. Pers.
GSC-6213	97-BZA-0001	279059,96	5175896,59	20	<i>Hiatella artica</i> ; Sable	Bolduc, Comm. Pers.
GSC-5529	92-BZA-3033	273520,57	5182678,44	115	<i>Hiatella artica</i> ; diamicton glaciomarin	Bolduc, Comm. Pers.
*GSC-6039	95-BZA-8069	271415,86	5189830,57	140	<i>Hiatella artica</i> ; Argile marine avec des lits de gravier	Bolduc, Comm. Pers.
*GSC-6280	98-BZA-0026	345582,76	5203829,49	65	<i>Hiatella artica</i> ; Till remanié	Bolduc, Comm. Pers.
*GSC-5536	Pont-Rouge	290781,69	5185273,83	90	<i>Hiatella artica</i> ; Communautés littorales ou postérieures à la lacune d'érosion	Gagnon, 1994
Mélange d'espèce						
QU-492	Morigeau	373654,99	5193078,89	70		Barette et al., 1981
Beta-242587	Québec	330846,59	5187771,73	-34	Coquille; sable deltaïque	ce texte
Beta-242588	Québec	330846,59	5187771,73	-34.5	Coquille; sable deltaïque	ce texte
QU-310	St-Rédempteur	325478,61	5176207,62	60	Coquille	Compilation CGC

\* Données utilisées pour la réalisation de la courbe de niveau marin relative de la région de Québec, de la déglaciation à aujourd'hui (figure 3.9)

# labo	Site	Localisation			age mesuré	erreur	age conventionnelle (-25‰)	erreur	age corrigé (0‰)	erreur	Âge calibré publié		effet reservoir (-1300 +- 140 ans)	erreur	âge calibré calculé	
		X	Y	Z (m asl)							CAL max	CAL min			CAL min	CAL max
Matière organique																
Beta-28459	Québec (vieux-Québec)	331950,21	5186786,78	8,05			2120	120				-	-	1951	2306	
Beta-28462	Québec (vieux-Québec)	331948,26	5186786,78	8,39			1990	60				-	-	1872	2002	
Beta-28463	Québec (vieux-Québec)	331948,26	5186786,78	8,4			1670	60				-	-	1520	1692	
Beta-33922	Québec (rivière St-Charles)	330795,54	5186800,22	8,00			2080	60				-	-	1952	2132	
UL-575	Québec (vieux-Québec)	331948,26	5186786,78	8,78			1970	80				-	-	1878	1984	
*Beta-143297	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	60			9470	40		11045	10580	-	-	10605	10764	
TO-13297	Québec	330633,86	5187669,99	-1			420	40				-	-	339	517	
TO-13298	Québec	330633,86	5187669,99	0			1070	90				-	-	933	1051	
TO-13299	Québec	328788,64	5189038,88	-4			8750	60				-	-	9627	9888	
Beta-228275	Québec	330846,59	5187771,73	-0,5	150	40	130	40		280	0	-	-	0	269	
Beta-228276	Québec	330846,59	5187771,73	-4	8660	40	8600	40		9590	9530	-	-	9528	9595	
Beta-228277	Québec	328788,64	5189038,88	-4	6130	40	6090	40		7150	6860	-	-	6891	7137	
Beta-228278	Québec	328788,64	5189038,88	-4	4550	40	4460	40		5290	4910	-	-	4977	5276	
Beta-228614	Québec	329445,33	5188169,45	3,5	2580	40	2510	40		2740	2460	-	-	2497	2720	
Beta-228615	Québec	329445,33	5188169,45	2	5720	40	5720	40		6640	6410	-	-	6446	6560	
Beta-242590	Québec	327902,79	5188069,82	4	5500	40	5460	40				-	-	6213	6298	
GX-28863-AMS	PIA-LGD-1	320304,90	5182449,42	15			7040	40				-	-	7844	7932	
Gx-27458-AMS	OO-Pia-CR1	320538,76	5181455,52	15			5020	30				-	-	5665	5882	
GSC-6629	01-BZA-0008D	326907,99	5165012,42	118	4920	80	4890	80				-	-	5488	5726	
GSC-6637	01-BZA-0008	326907,99	5165038,40	118	930	50	740	50				-	-	661	724	
GSC-6633	01-BZA-0009 (2,6m depth)	326907,99	5163370,01	115	7890	90	7810	90				-	-	8454	8717	
GSC-6631	01-BZA-0010	341963,19	5169710,13	102	9150	100	9120	100				-	-	10197	10475	
GSC-6472	99-BZA-0102B	334141,97	5197861,33	150	3310	70	3280	70				-	-	3409	3583	
GSC-6444	99-BZA-0120G	334141,97	5197861,33	150	4960	80	4920	80				-	-	5588	5739	
Beta-242591	Québec	327902,79	5188069,82	5	5700	40	5690	40				-	-	6409	6501	
QU-5	Québec (rivière Saint-Charles)	330046,49	5190916,42	15	5500	170	5907	170				-	-	6505	6938	
QU-95	Québec (rivière Saint-Charles)	324828,55	5185961,57	10	5130	210	5537	210				-	-	6021	6561	
QU-96	Québec (rivière Saint-Charles)	330324,19	5189352,50	10	5160	210	5567	210				-	-	6123	6637	
QU-311	St-Rédempteur	325478,61	5176207,62	60	12340	340	13096	340				-	-	15024	16013	
QU-579	Beaupré	356011,69	5211400,52	15	7760	130	8167	130				-	-	8990	9399	
QU-500	St-Michel (Bellchasse)	357810,94	5192407,86	16	3590	110	3997	110				-	-	4260	4785	
Beta-242592	Québec	330157,52	5188881,64	6	6460	40	6460	40				-	-	7327	7426	

\* Données utilisées pour la réalisation de la courbe de niveau marin relative de la région de Québec, de la déglaciation à aujourd'hui (figure 3.9)

# labo	Site	Localisation			age mesuré	erreur	age conventionnelle (-25‰)	erreur	age corrigé (0‰)	erreur	Âge calibré publié		effet reservoir (-1300 +/- 140 ans)	erreur	âge calibré calculé	
		X	Y	Z (m asl)							CAL max	CAL min			CAL min	CAL max
<i>Balanus sp.</i>																
GSC-5927	Riv. Du Chênes (Saint-Édouard)	280792,65	5158266,68	72	11300	100	11700	100	11300	100			10400	240	11829	12703
GSC-1232	Beauport	331772,20	5195959,03	106			11507	160	11100	160	13219	12785	10207	300	11364	12384
GSC-1295	Lapointe	351925,49	5208987,46	67			11200	160			13479	12859	9900	300	10821	11979
GSC-1476	Pointe Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	61			11607	170	11200	170	13135	12789	10307	310	11621	12639
GSC-4998	Issoudun (II)	294175,77	5161746,07	90			11800	90	11400	90	13485	13025	10500	230	12111	12776
QU-98	Pointe Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	60	11120	220	11527	220					10227	360	11353	12572
UQ-39	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	44			11297	125	10890	125	13150	12609	9997	265	11189	12046
UQ-40	Pointe Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	57			11747	180	11340	180	13520	12874	10447	320	11826	12803
UQ-64	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	48	9355	115	11688	101					10388	241	11826	12687
GSC-4804	Rivière Ste-Anne	270810,85	5182886,75	60			11400	120	11000	120	13170	12632	10100	260	11247	12107
GSC-2090	Saint-Alban	269867,63	5186134,77	71			11007	160	10600	160	12921	11882	9707	300	10587	11601
Beta-125967	Pointe-Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	65			11370	60	10950	60	13481	12837	10070	200	11291	11975
GSC-1712	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	44			11507	150	11100	150	13208	12786	10207	290	11397	12380
GSC-5957	Issoudun	294175,80	5161691,79	90			11300	130	10900	130	13153	12602	10000	270	11183	12056
GSC-6283	98-BZA-0028	313702,86	5185669,58	75	10900	110	11688	111					10388	251	11825	12688
GSC-4769	Rivière du Chêne (Les trois fourches)	286042,19	5153330,68	60			10900	120	10500	120	12839	11877	9600	260	10521	11250
GSC-1533	Charlesbourg	326567,03	5191198,21	110			12807	160	12400	160	15424	14039	11507	300	13118	13677
GSC-4783	Rivière Sainte-Anne (I)	269928,57	5183292,11	60	10500	100	10807	100	10400	100			9507	240	10520	111172
GSC-6051	95-BZA-8059	274718,88	5169923,20	10	11300	100	11700	100	11300	100			10400	240	11829	12703
GSC-4752	Saint-Édouard	278974,51	5159788,60	38			10800	90	10400	90	12648	11652	9500	230	10522	11163
<i>Hemithylis sp.</i>																
GSC-1451	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	48			10407	150	10000	150	11950	11015	9107	290	9790	10657
<i>Mya truncata</i>																
GSC-1235	ND des Laurentides (Bon Pasteur)	324907,51	5197462,11	176			12007	160	11600	160	13849	13131	10707	300	12163	12938
QU-20	Pointe Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	70	11260	290	11667	290					10367	430	11504	12789
GSC-4996	Saint-Antoine de Tilly (ruisseau Bourret)	303437,69	5168276,75	68			10600	100	10200	100	12175	11143	9300	240	10221	11065
<i>Macoma calcarea</i>																
GSC-4799	Rivière Sainte-Anne (II)	269928,57	5183292,11	60	10300	90	10607	90	10200	90			9307	230	10227	11063
Beta-115873	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	52			10470	80	10060	80	11924	11090	9170	220	9949	10635
GSC-6292	98-BZA-0027	316325,82	5188669,09	85	10700	120	11100	120	10700	120			9800	260	10762	11694
Beta-147723	Saint-Augustin	316577,67	5178969,93	35			10710	60	10310	60	12360	11380	9410	200	10406	11073
<i>Macoma balthica</i>																
GSC-5536	92BZA3034	290781,69	5185273,83	90	10400	120	10800	120	10400	120			9500	260	10445	11186
*GSC-6285	98-BZA-0025 (1-1,5 m depth)	340615,78	5200240,68	115	10700	100	11100	100	10700	100			9800	240	10780	11614
*GSC-2150	Rivière Sainte-Anne/Saint-Alban	269867,63	5186134,77	90			10607	90	10200	90	12164	11149	9307	230	10227	11063
<i>Mytilis sp.</i>																
*GSC-1508	Série de Saint-Nicholas	318035,59	5174497,99	64			10357	150	9950	150	11927	10827	9057	290	9749	10563
<i>Morse</i>																
Beta-115199	Saint-Nicolas	318035,59	5174497,99	63			9790	80			10860	10343	-	-	10343	10860

\* Données utilisées pour la réalisation de la courbe de niveau marin relative de la région de Québec, de la déglaciation à aujourd'hui (figure 3.9)

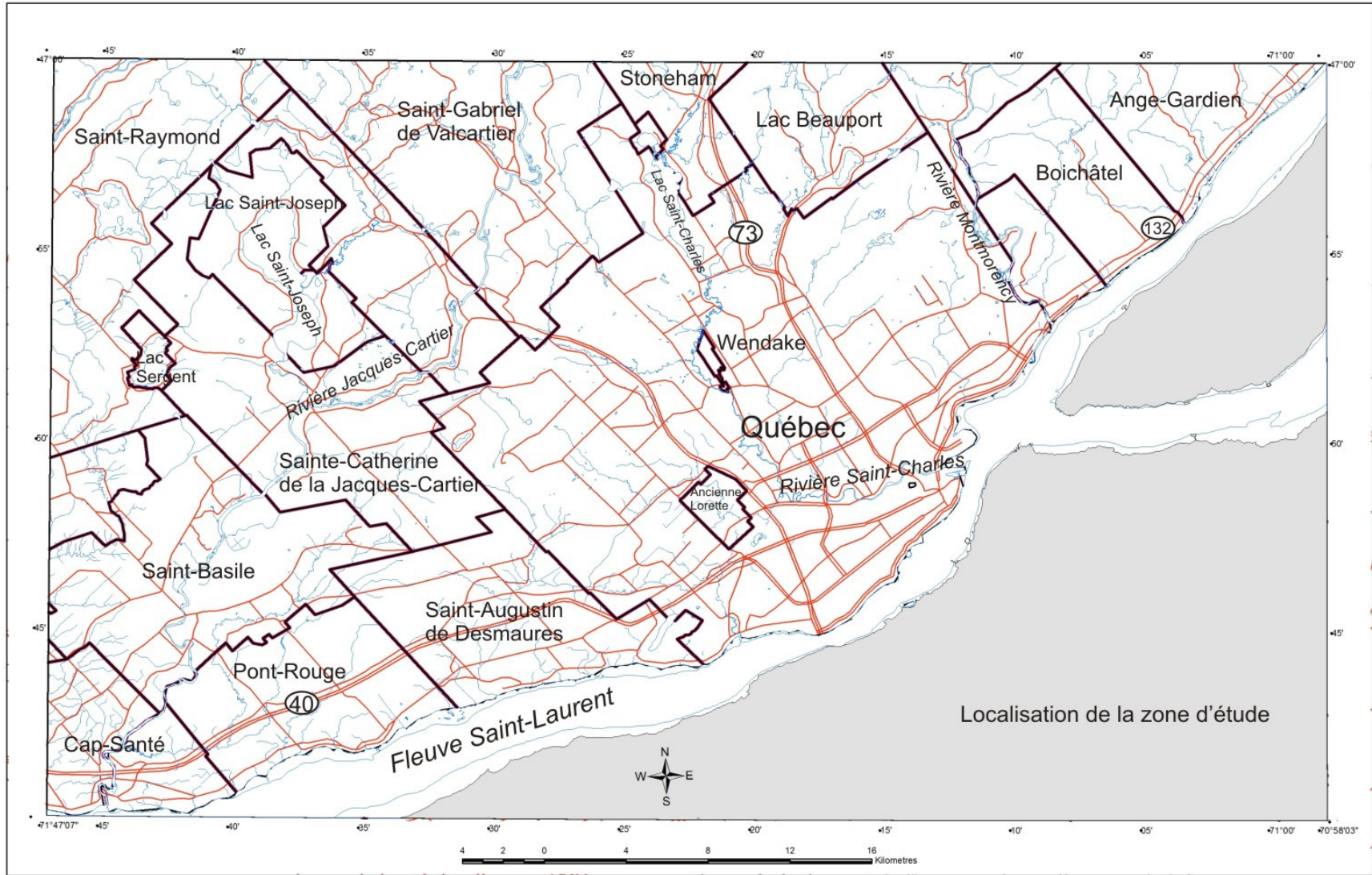
# labo	Site	Localisation			age mesuré	erreur	age conventionnelle (-25‰)	erreur	age corrigé (0‰)	erreur	Âge calibré publié		effet reservoir (-1300 +/- 140 ans)	erreur	âge calibré calculé	
		X	Y	Z (m asl)							CAL max	CAL min			CAL min	CAL max
<i>Hiatella artica</i>																
GSC-4997	Issoudun (I)	294175,77	5161746,07	90		10707	90	10300	90	12376	11365	9407	230	10300	11078	
QU-447	Pont-Rouge	296498,61	5181731,83	90		10797	130	10390	130	12620	11632	9497	270	10438	11191	
QU-93	St-Henri-de Lévis	336722,50	5167111,89	104	12230	250	12637	250				11337	390	12889	13602	
QU-94	Sainte-Croix-de-Lotbinière	295633,33	5166338,14	84	10700	200	11107	200				9807	340	10706	11815	
QU-97	Beauport	331675,69	5191796,52	58	10650	240	11057	240				9757	380	10582	11806	
*UQ-1287	Ste-Foy	325524,19	5180520,21	38		10307	100	9900	100	11688	10836	9007	240	9743	10414	
UQ-206	Pointe Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	50	9460	190	9867	190				8567	330	9148	10150	
*Beta-125968	Ruisseau Bourret	303414,60	5168251,34	68		10560	70	10100	70	11973	11139	9260	210	10199	10748	
Beta-143298	Saint-Nicolas	318035,59	5174517,48	62		10220	70	9810	70	11380	10820	8920	210	9699	10238	
*Beta-147722	Ponte-Saint-Nicolas	311129,23	5174080,08	53		10450	80	10040	70	11750	11090	9150	220	9935	10658	
TO-13300	Québec	328788,64	5189038,88	-4		10050	80					8750	220	9544	10146	
GSC-475	Ste-Christine	236415,98	5166468,25	144	11530	160	11937	160				10637	300	12119	12883	
Beta-242524	VALC-TM9-445	310610,54	5194300,37	160	11030	60	11450	60		13100	12860	10150	200	11355	12103	
GSC-6624	01-BZA-0012	340607,58	5178903,23	85	10500	110	10900	110	10500	110		9600	250	10568	11244	
GSC-6623	01-BZA-0004	323330,64	5174075,96	80	10200	100	10700	100	10300	100		9400	240	10298	11074	
GSC-6622	01-BZA-0003B	314267,14	5168830,20	99	10100	100	10600	100	10200	100		9300	240	10221	11065	
GSC-6660	2000-BZA-0006 (1m depth)	312922,47	5160158,00	125	10600	100	11000	100	10600	100		9700	240	10609	11393	
GSC-6213	97-BZA-0001	279059,96	5175896,59	20	9920	80	10300	80	9930	80		9000	220	9768	10398	
*GSC-5529	92-BZA-3033	273520,57	5182678,44	115	10300	100	10700	100	10300	100		9400	240	10298	11074	
GSC-6039	95-BZA-8069	271415,86	5189830,57	140	10300	100	10700	100	10300	100		9400	240	10298	11074	
GSC-6280	98-BZA-0026	345582,76	5203829,49	65	9880	110	10300	110	9890	110		9000	250	9708	10414	
GSC-5536	Pont-Rouge	290781,69	5185273,83	90		10800	120	10400	120	12668	11635	9500	260	10445	11186	
Mélange d'espèce																
QU-492	Morigeau	373654,99	5193078,89	70	10900	150	11688	151				10388	291	11773	12716	
Beta-242587	Québec	330846,59	5187771,73	-34	9670	60	10090	60				8790	200	9599	10149	
Beta-242588	Québec	330846,59	5187771,73	-34.5	9780	60	10210	60				8910	200	9705	10229	
QU-310	St-Rédempteur	325478,61	5176207,62	60	9210	130	10123	131				8823	271	9559	10187	

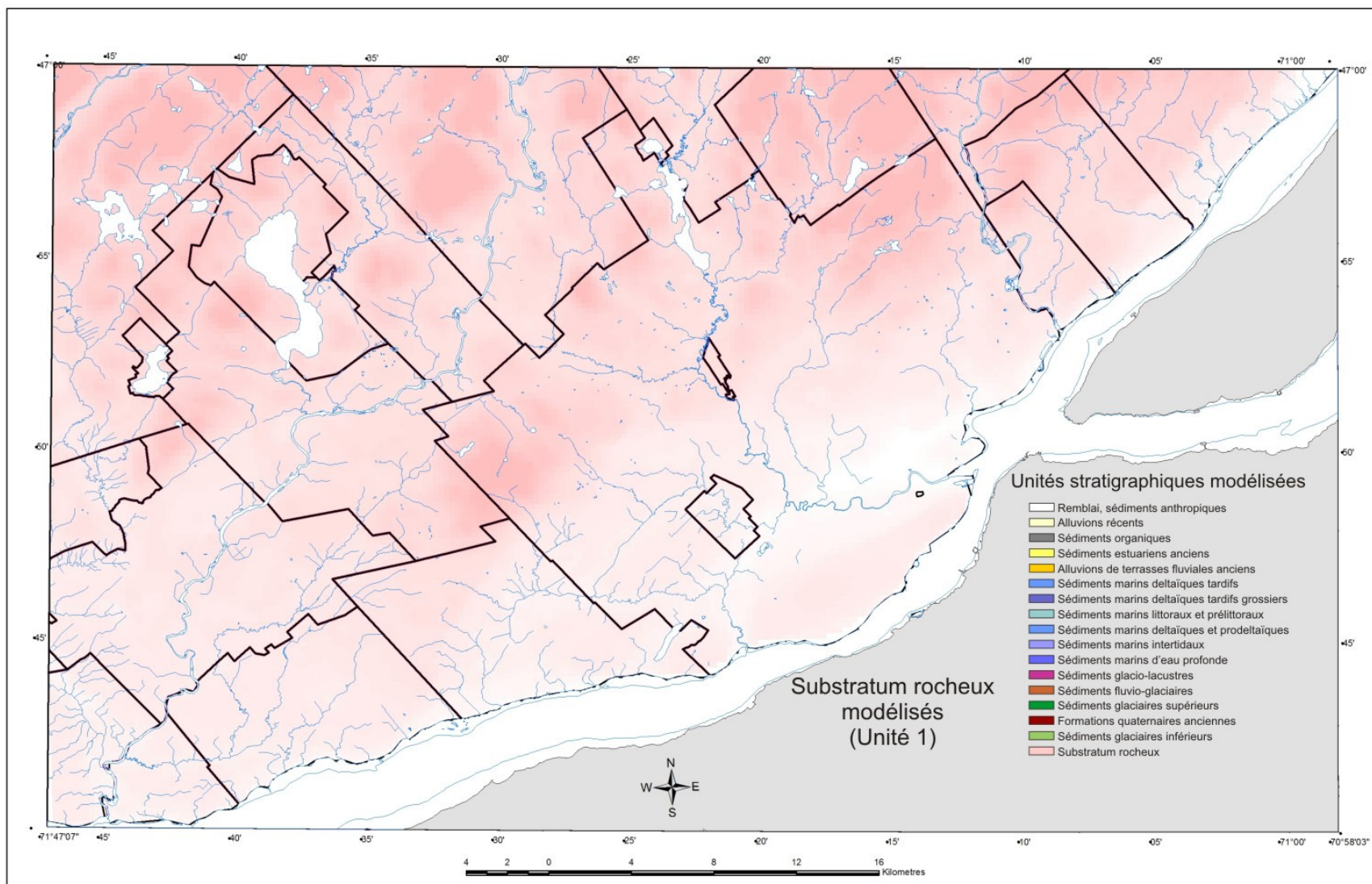
\* Données utilisées pour la réalisation de la courbe de niveau marin relative de la région de Québec, de la déglaciation à aujourd'hui (figure 3.9)

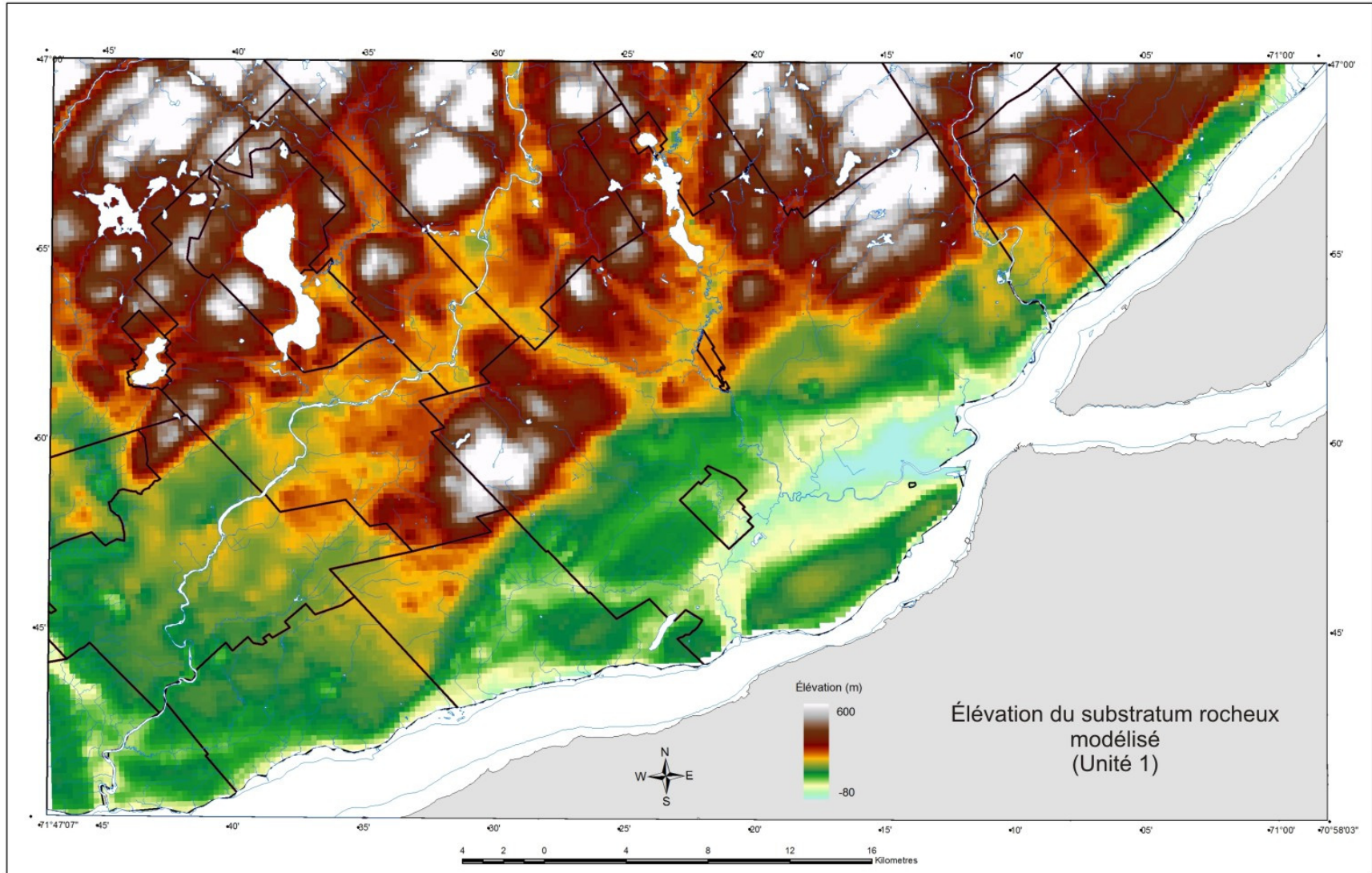


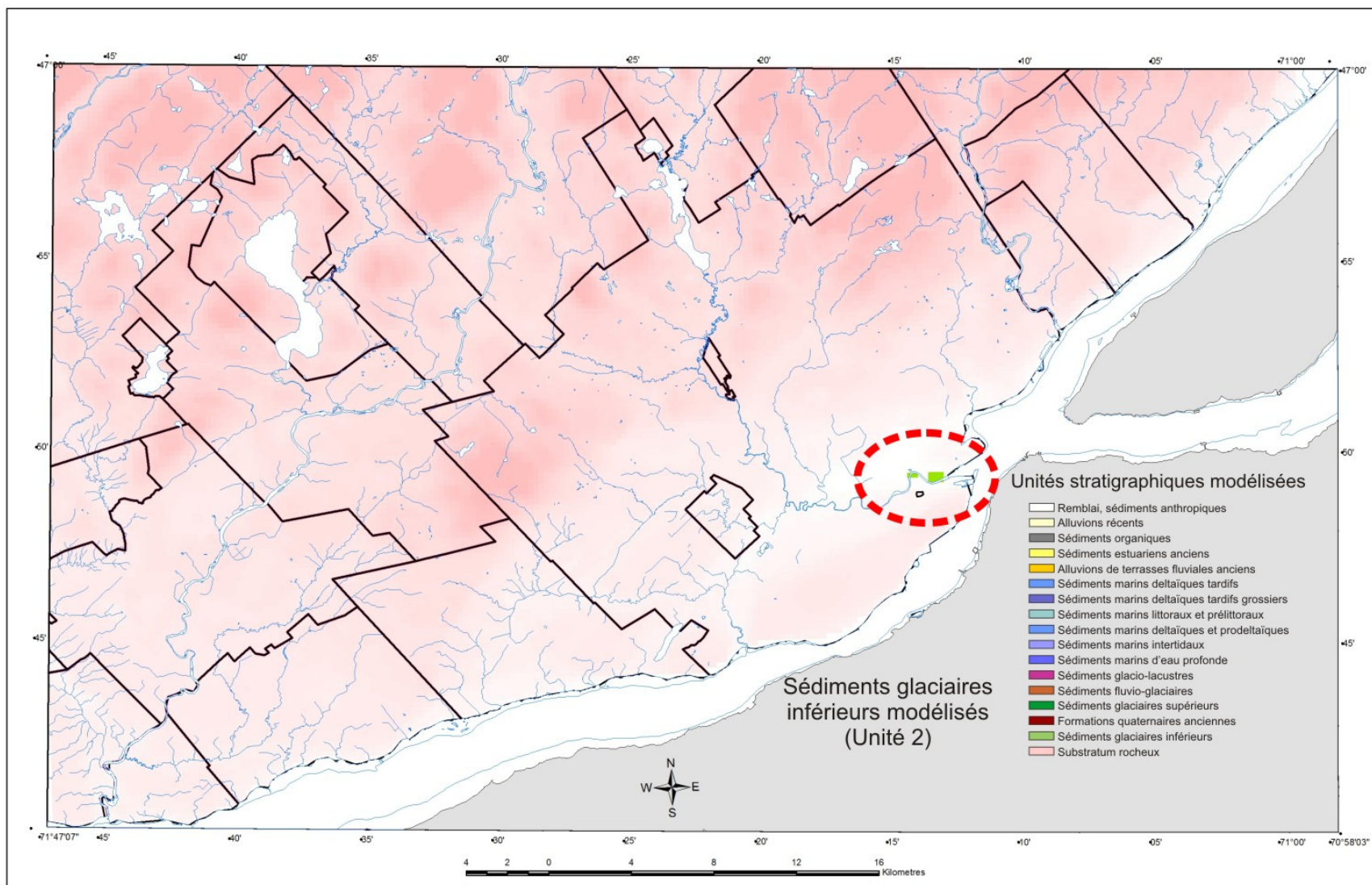
## **Annexe G**

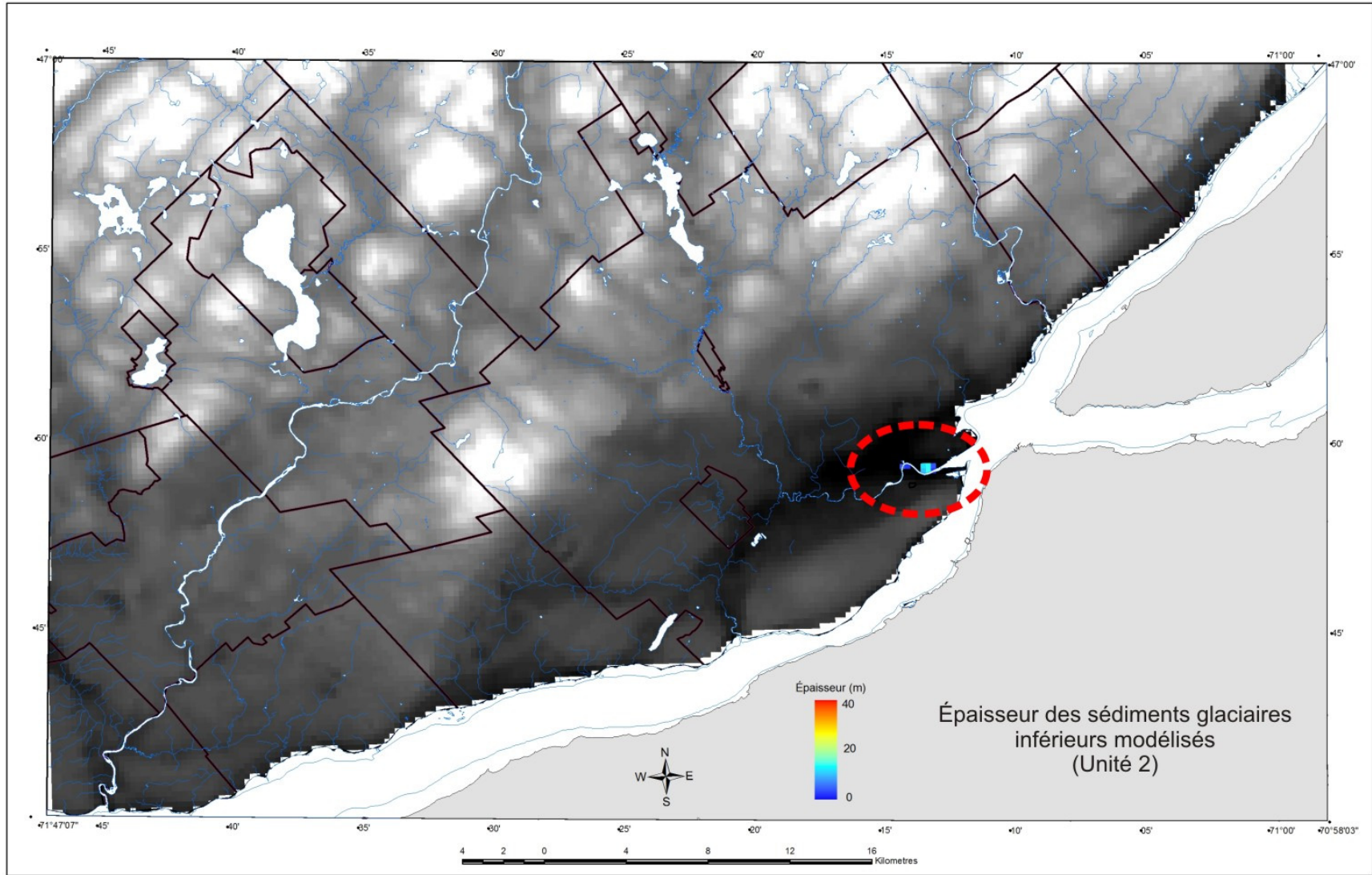
Modèle géologique 3D de la région de Québec et épaisseurs des unités modélisées

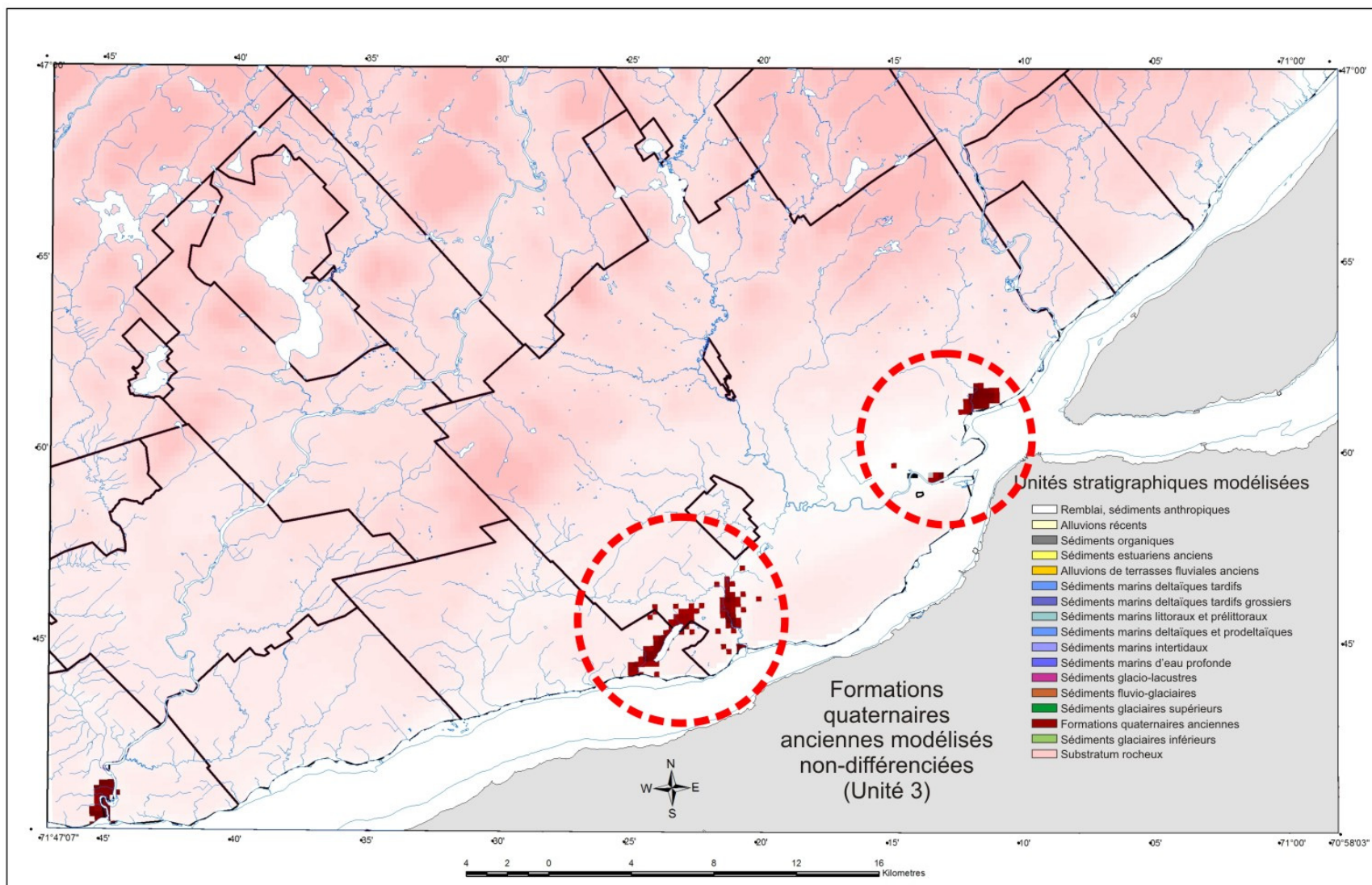


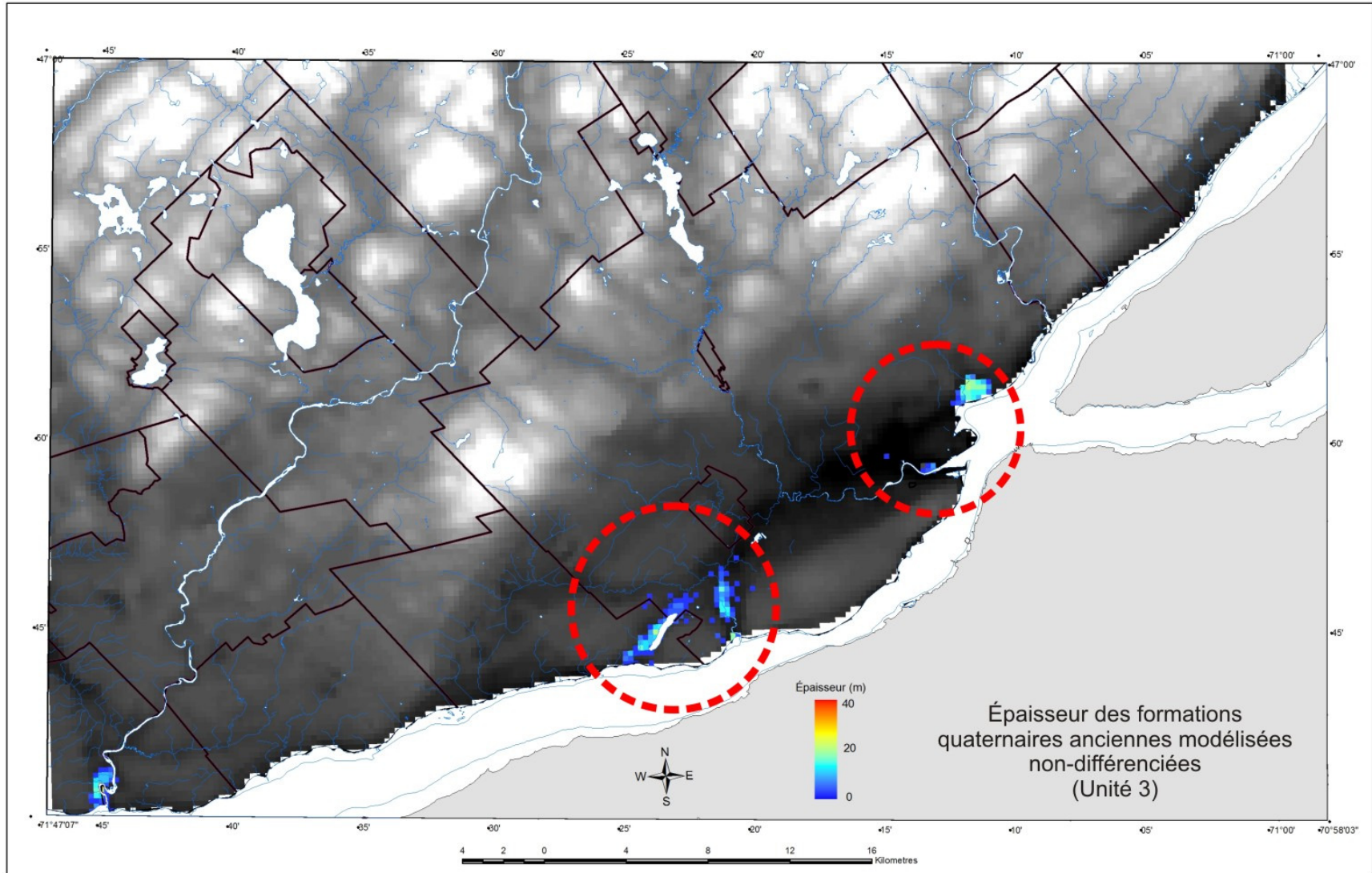




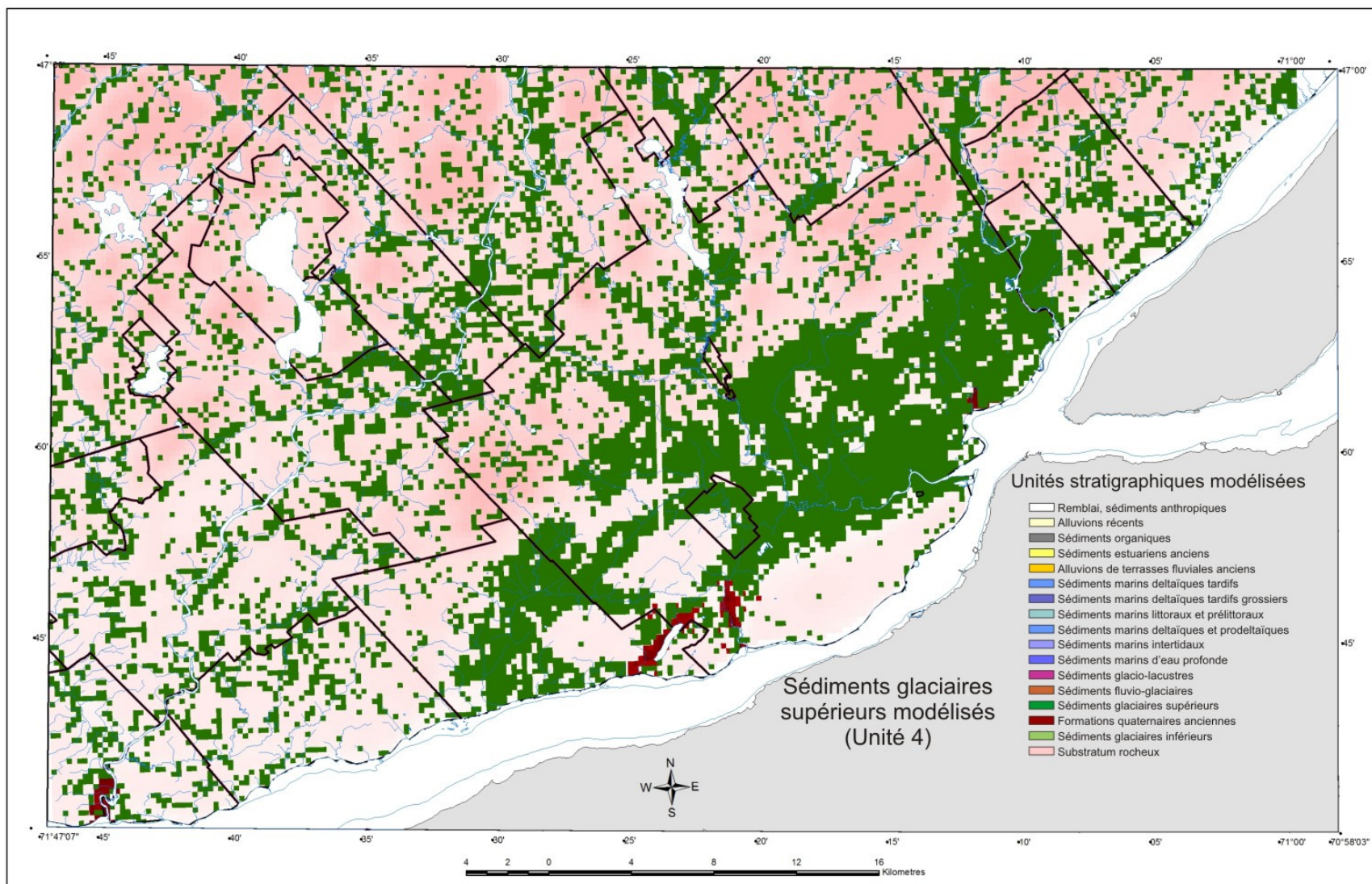


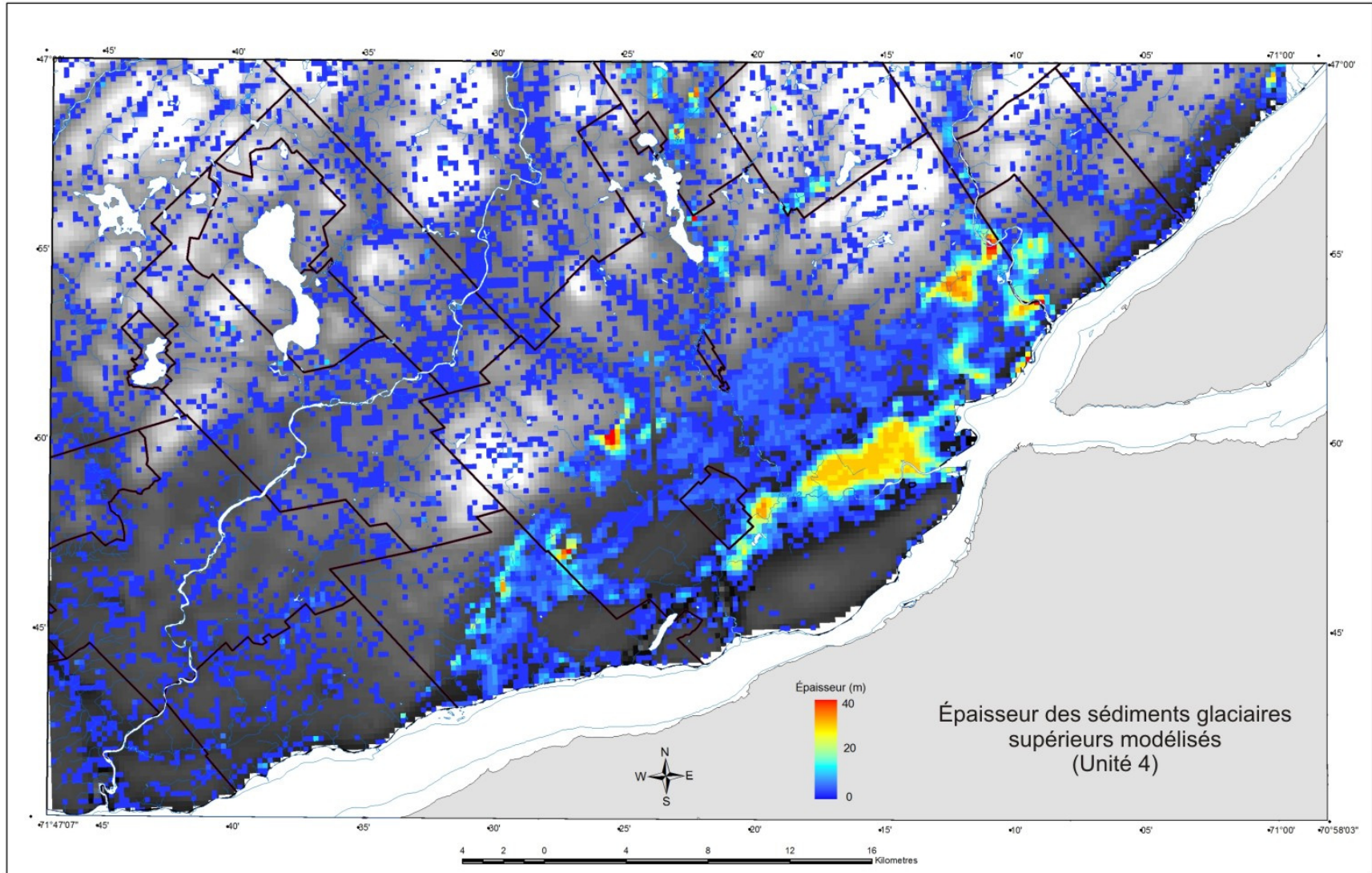


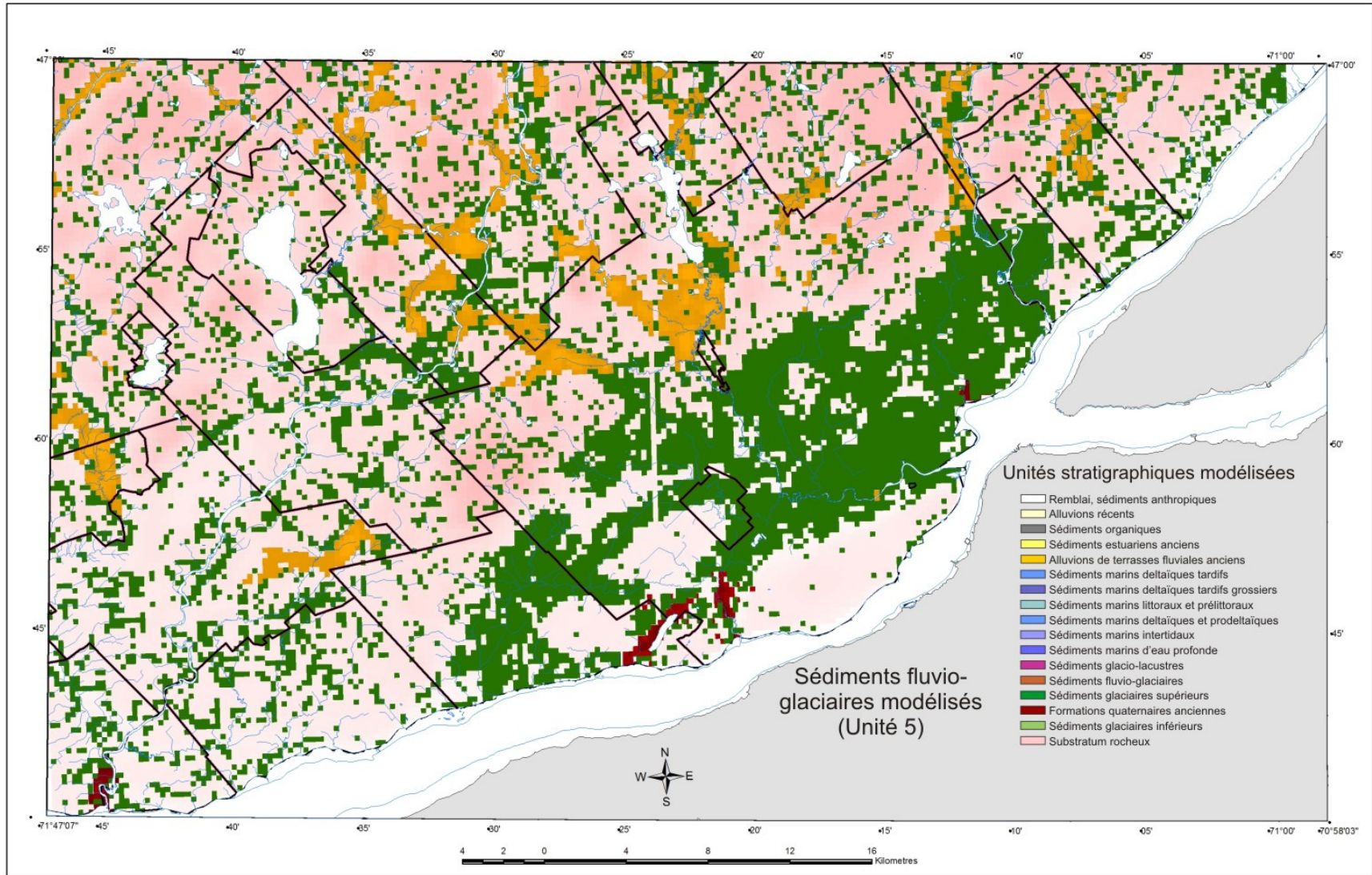


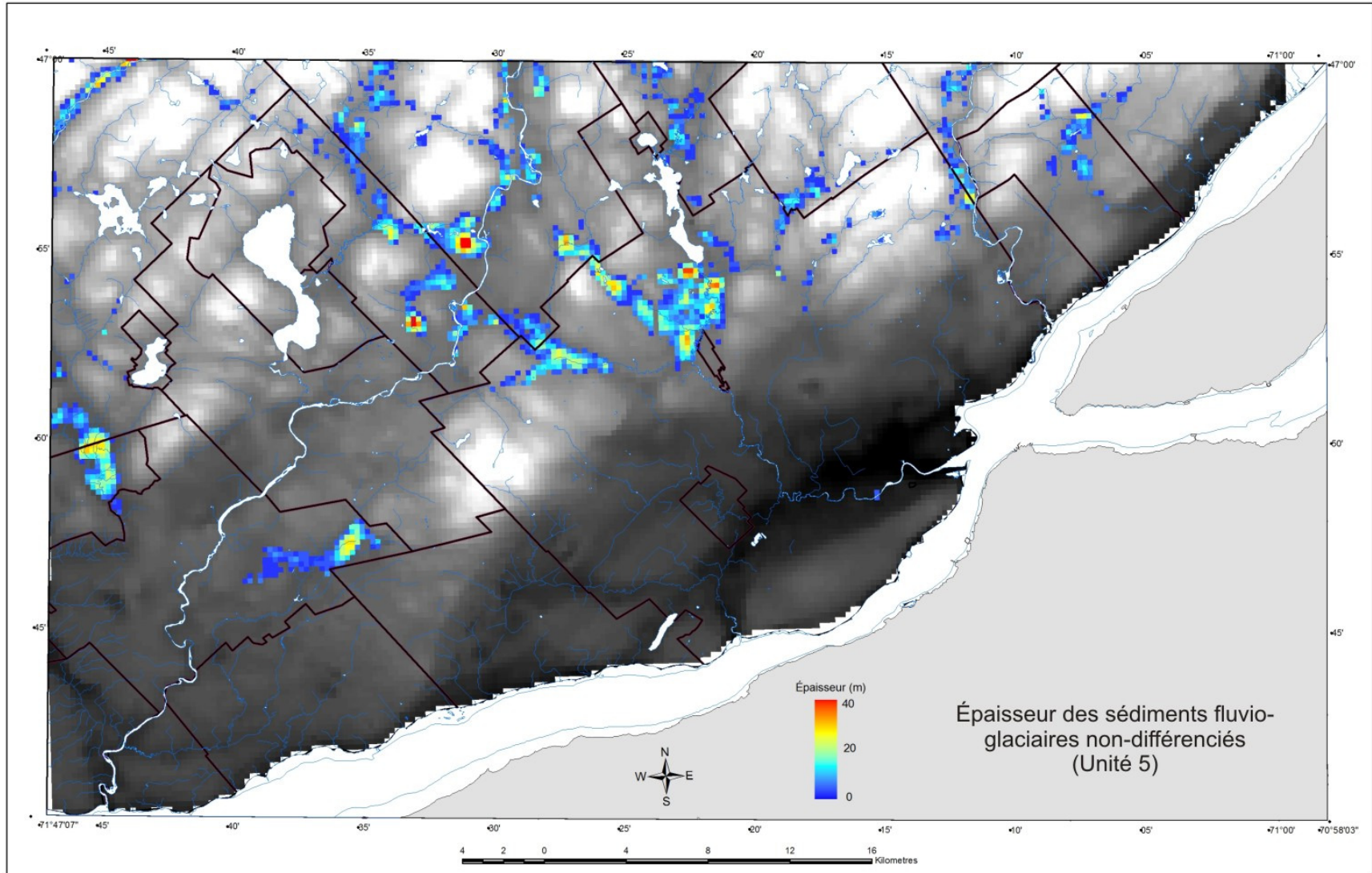


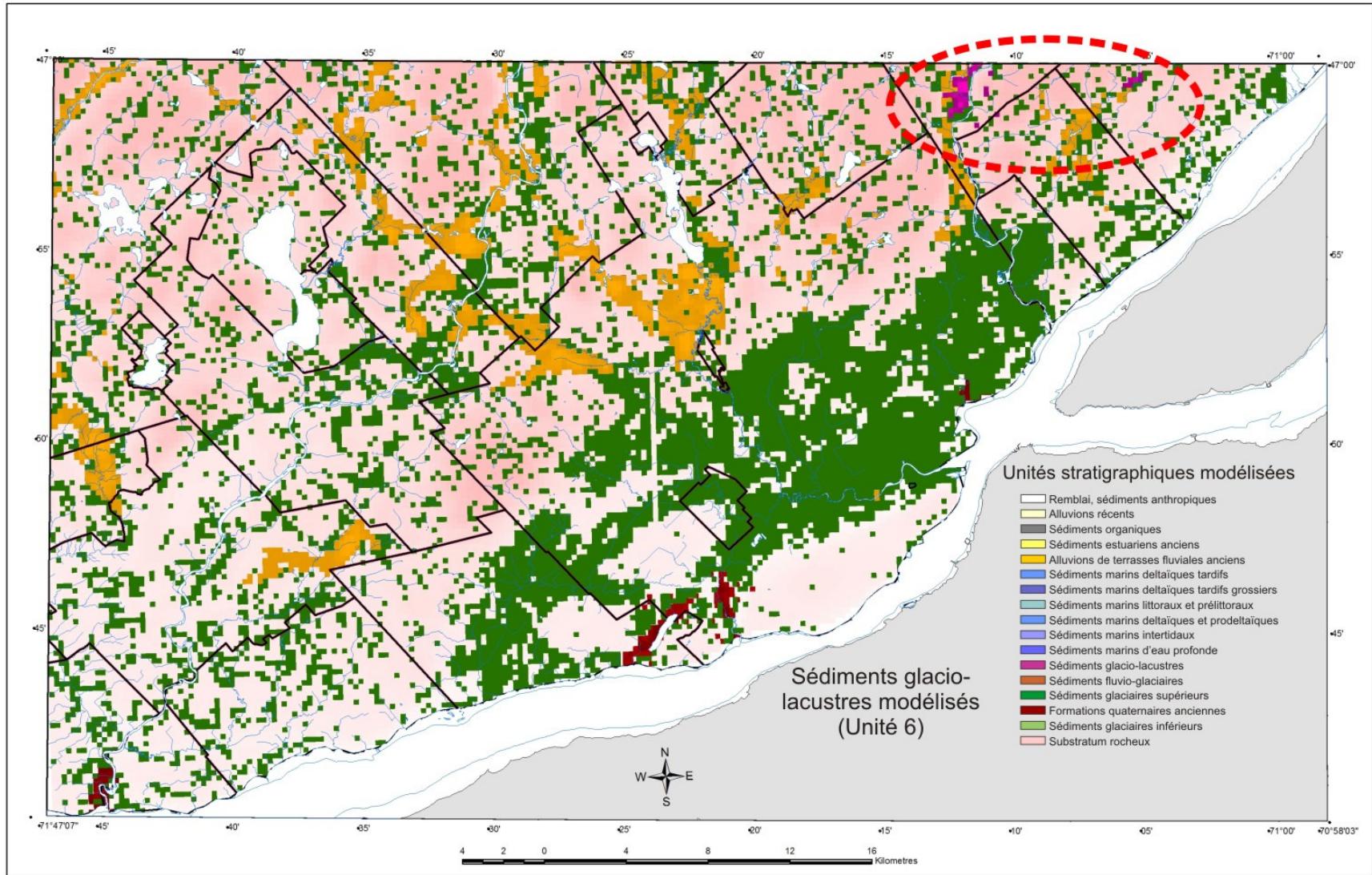


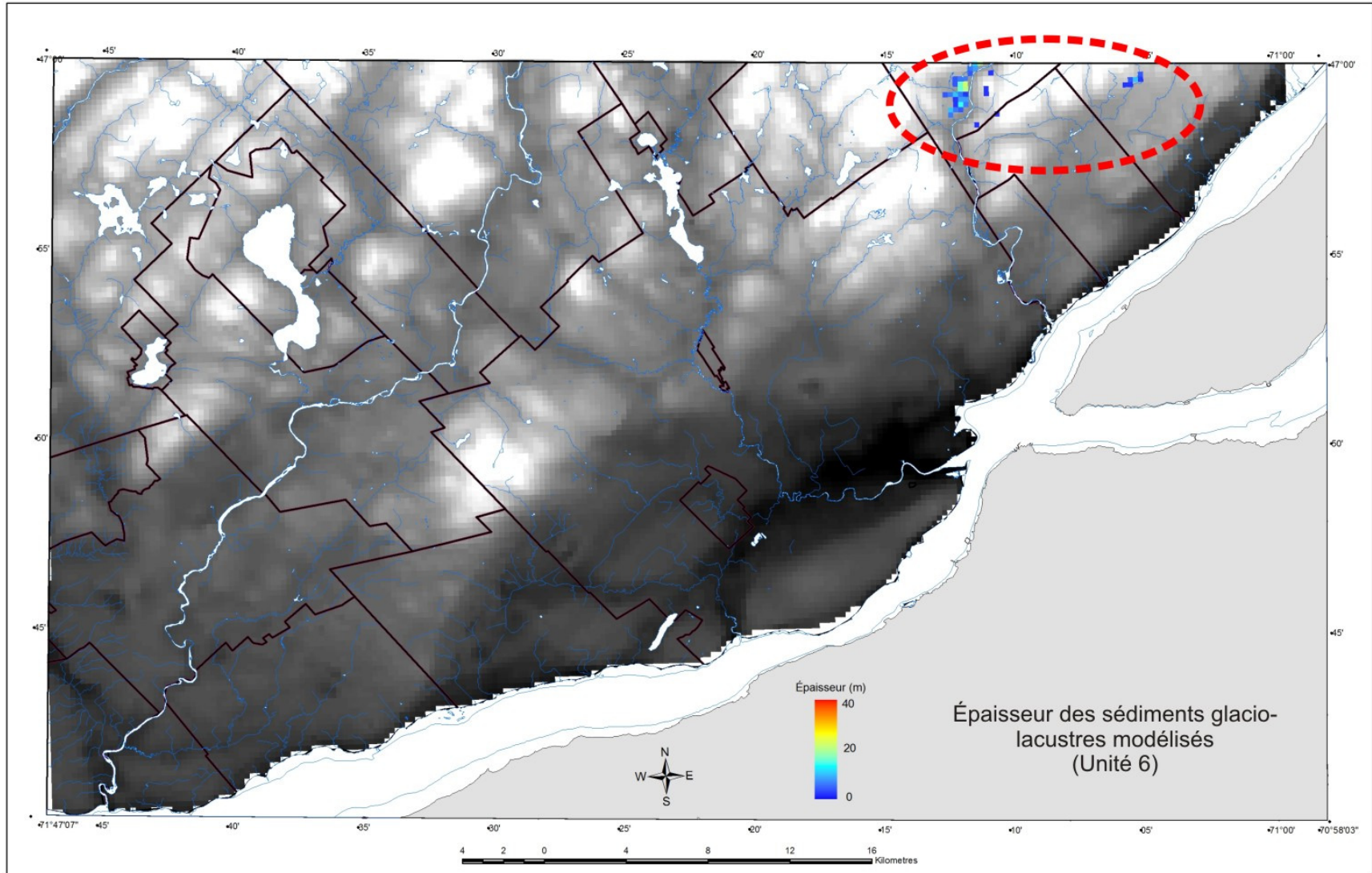


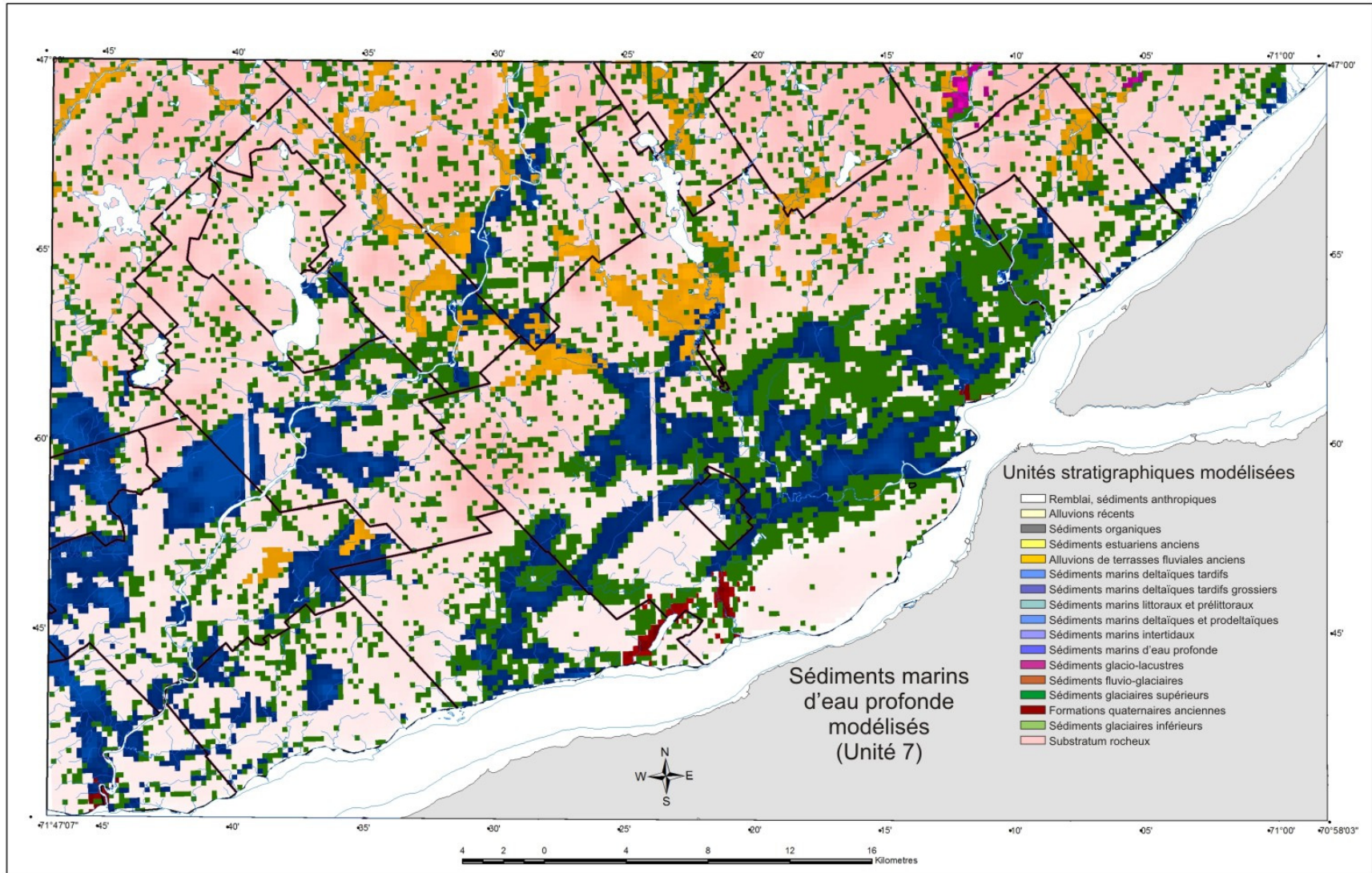


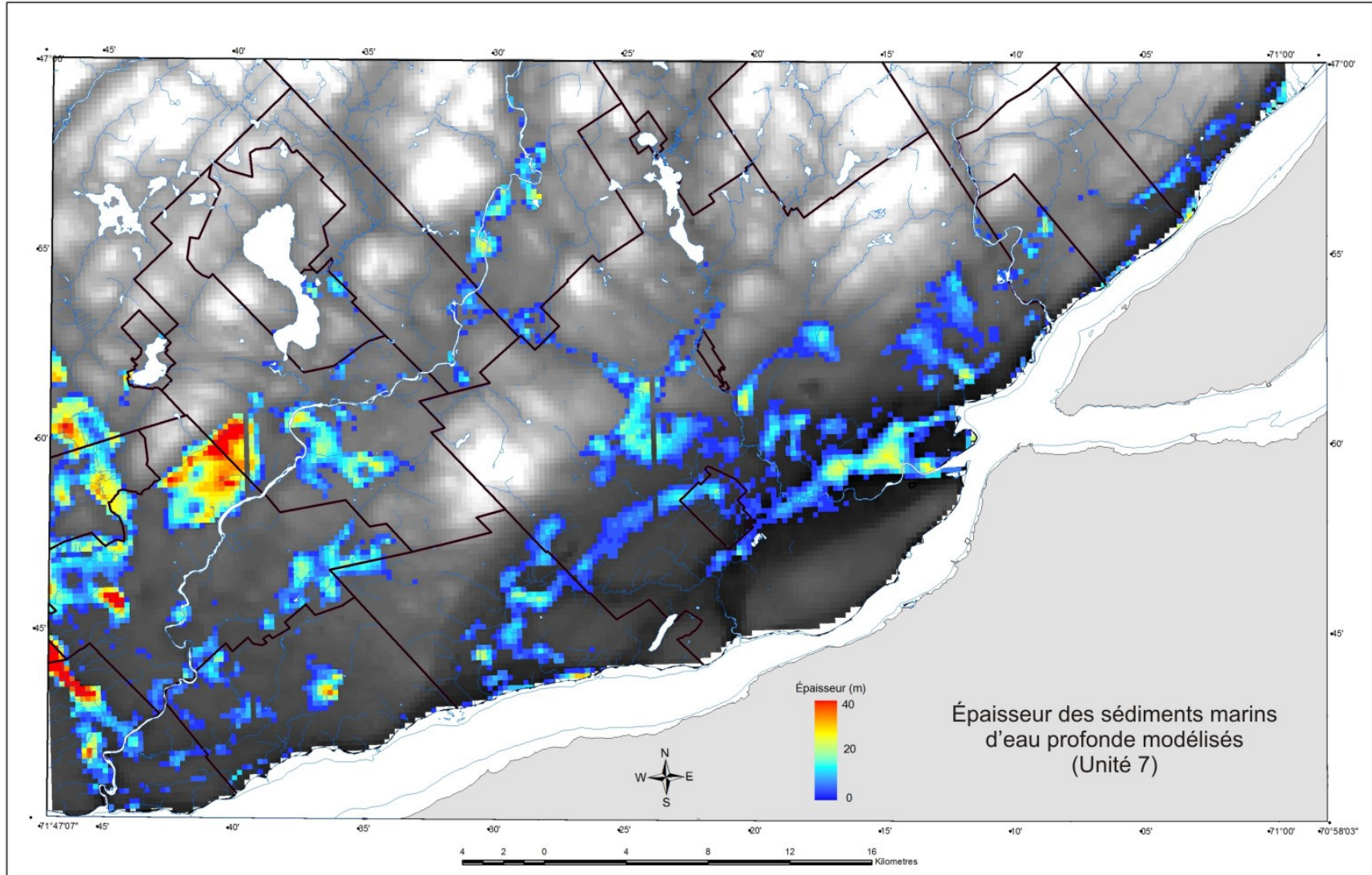




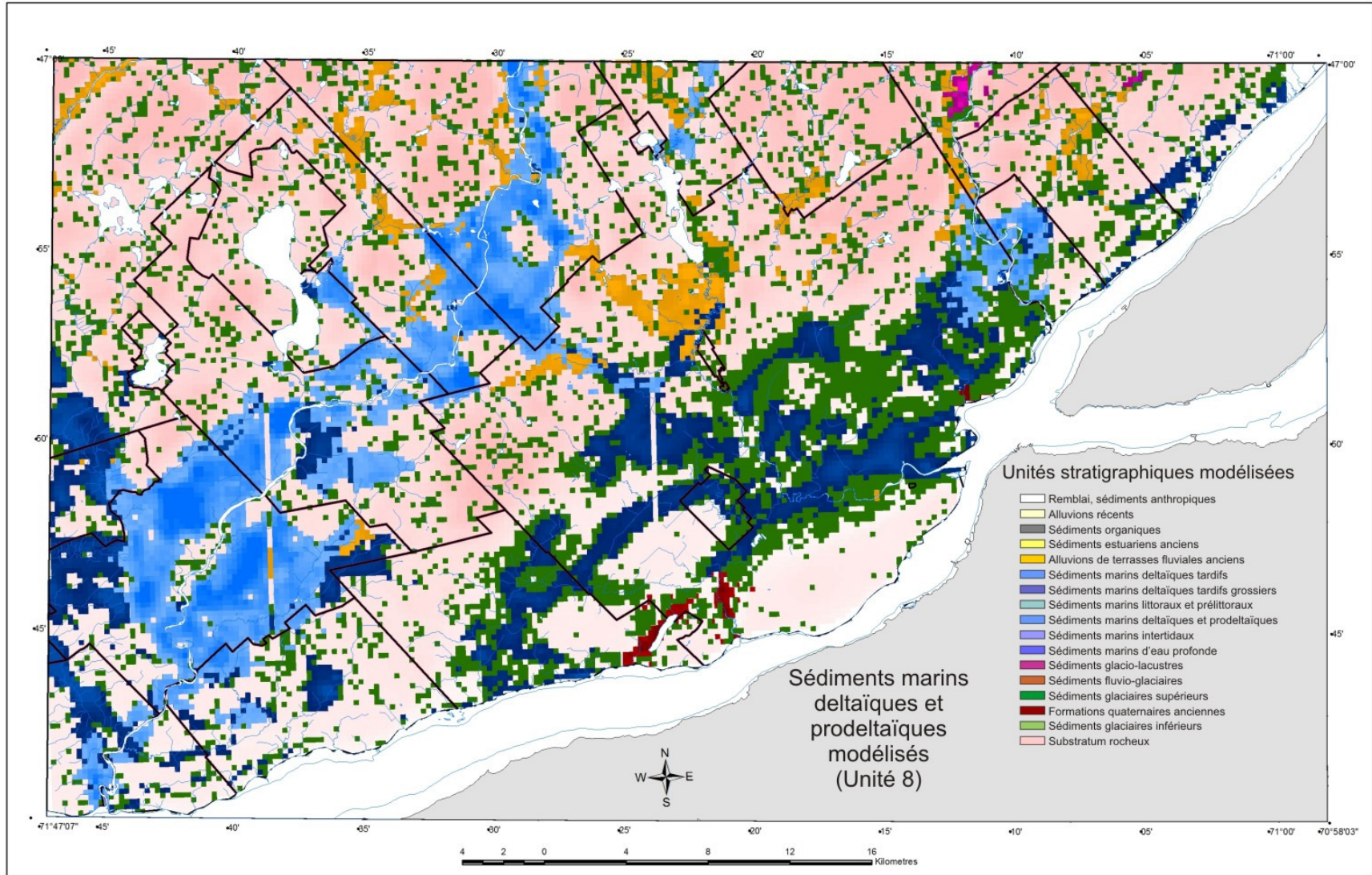


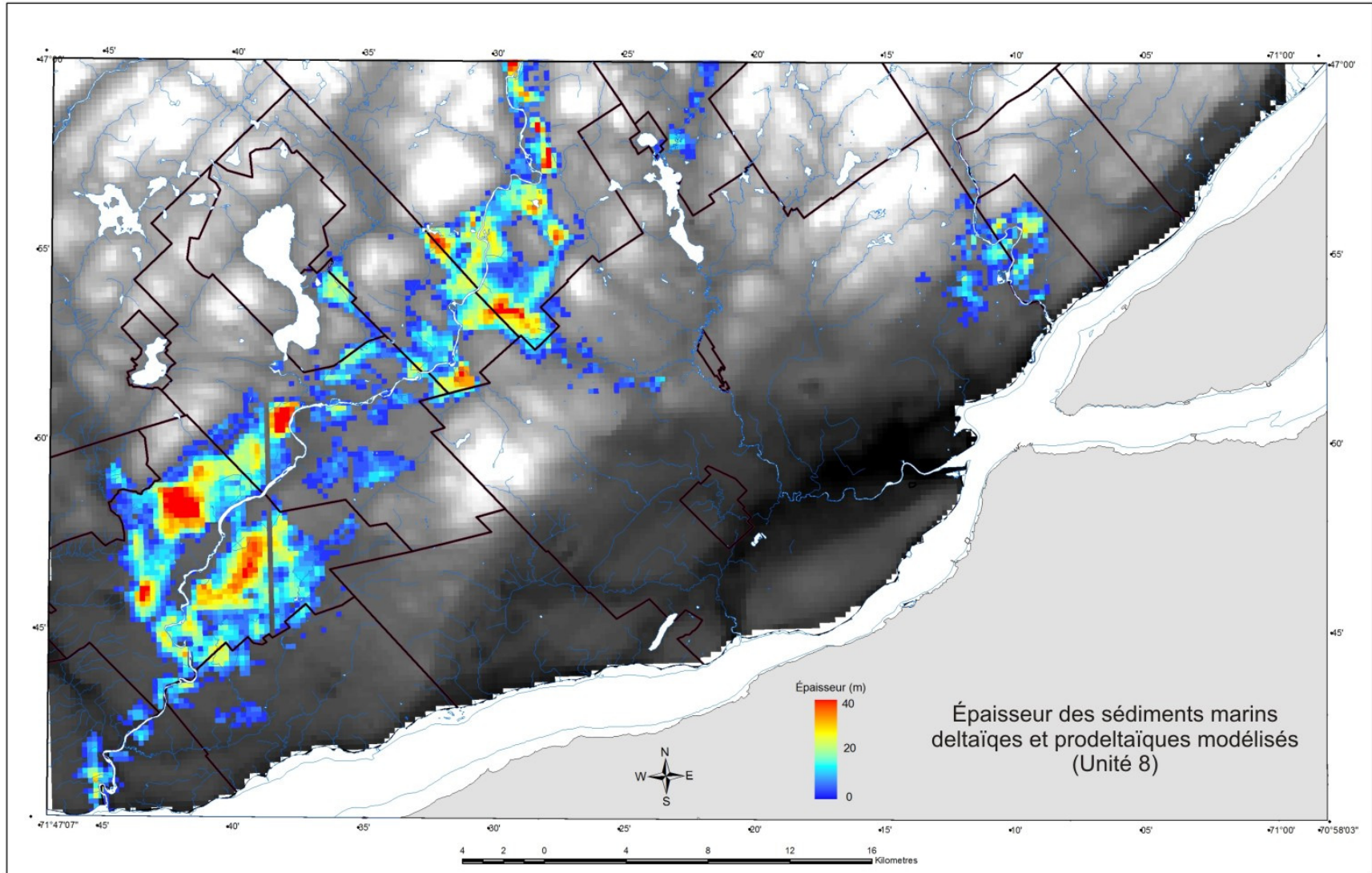


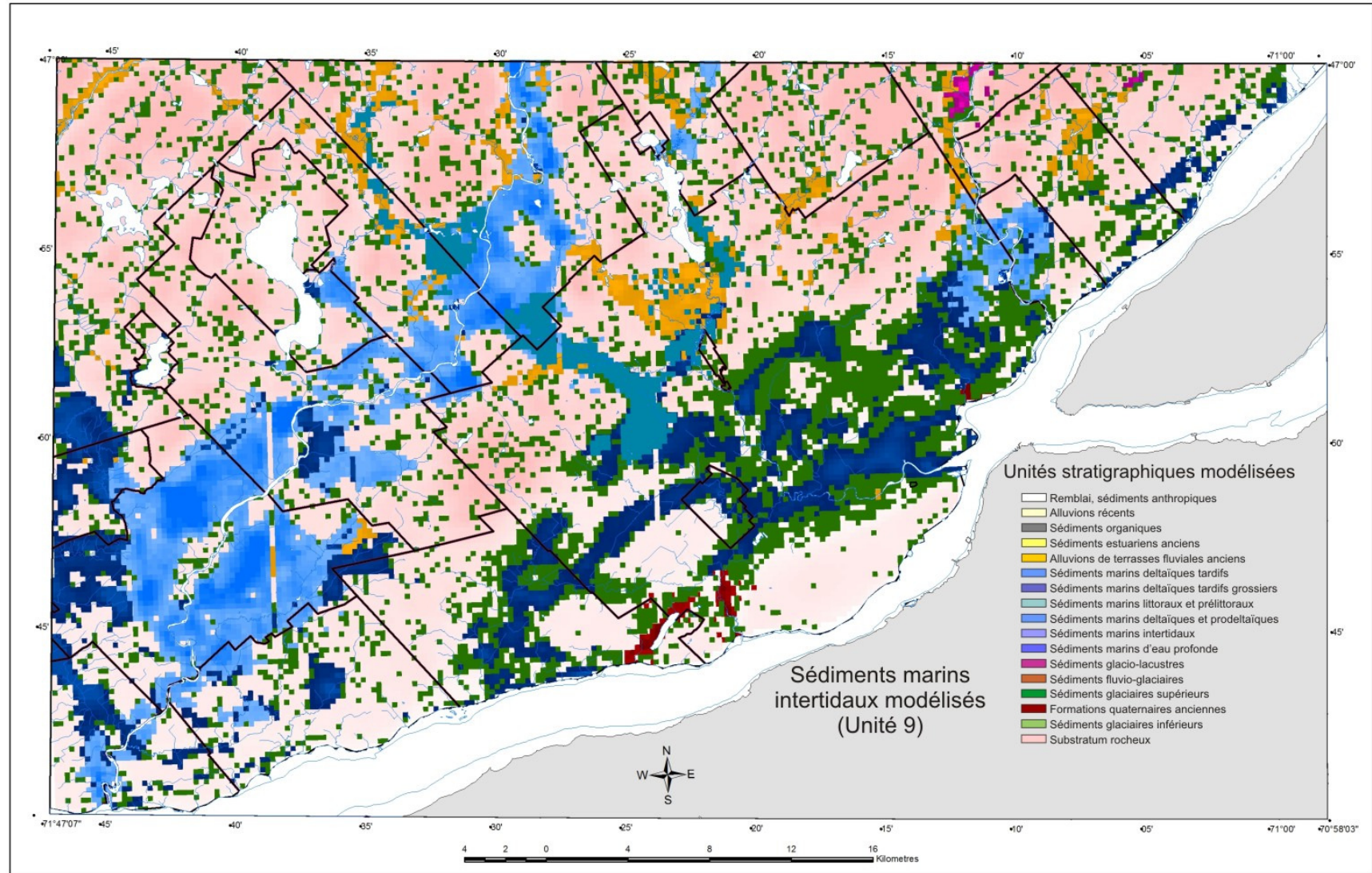


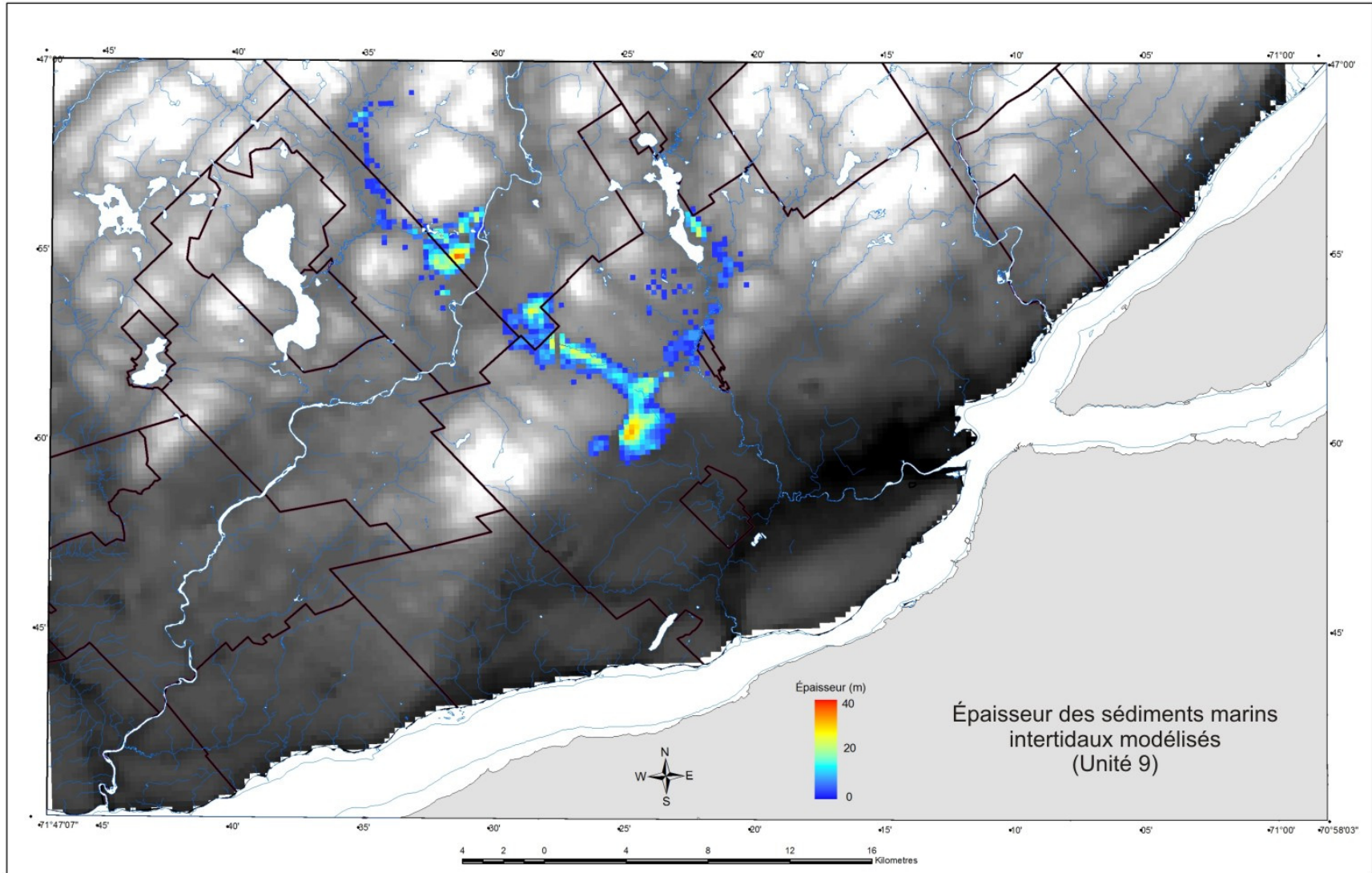


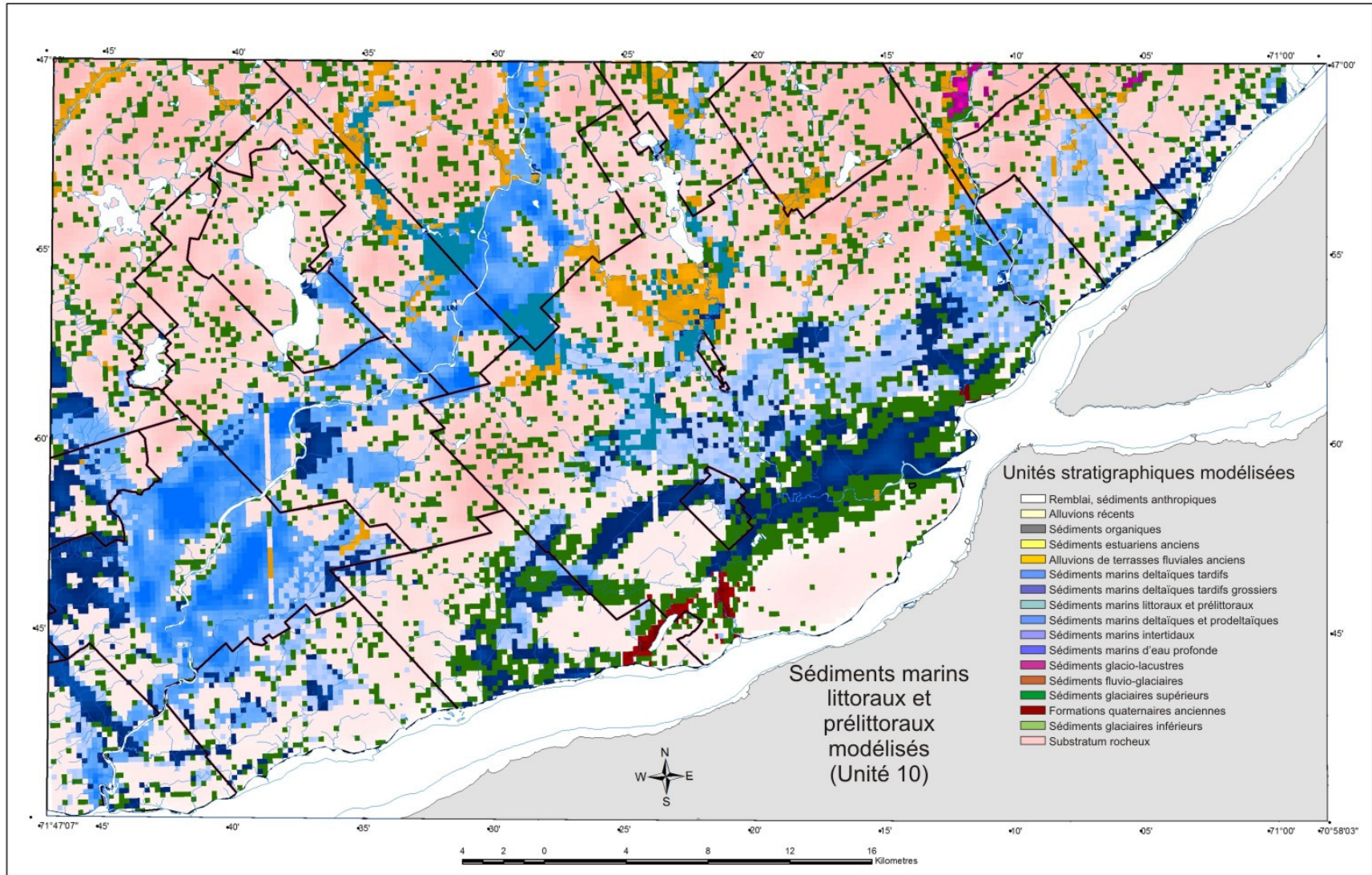


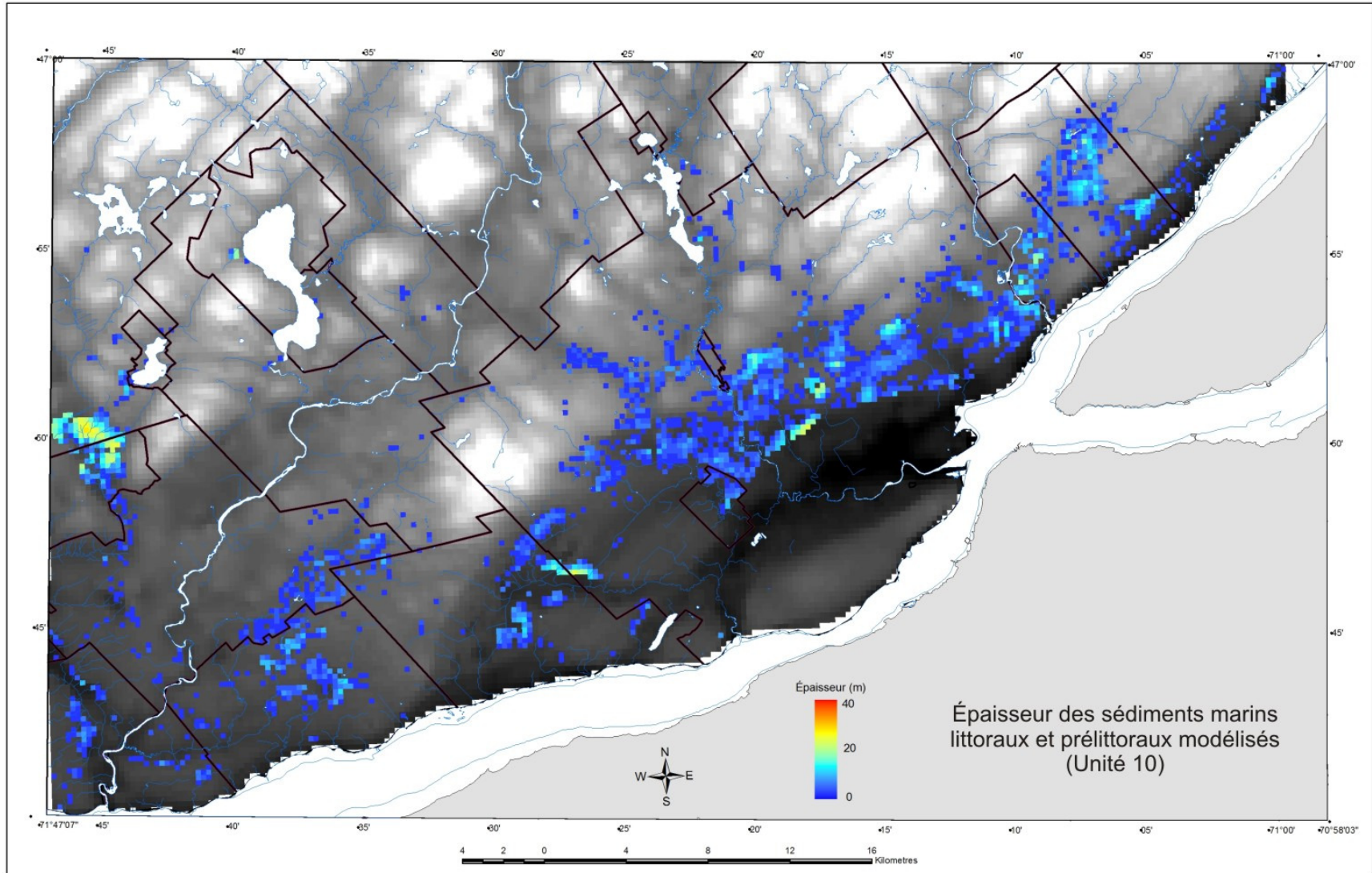


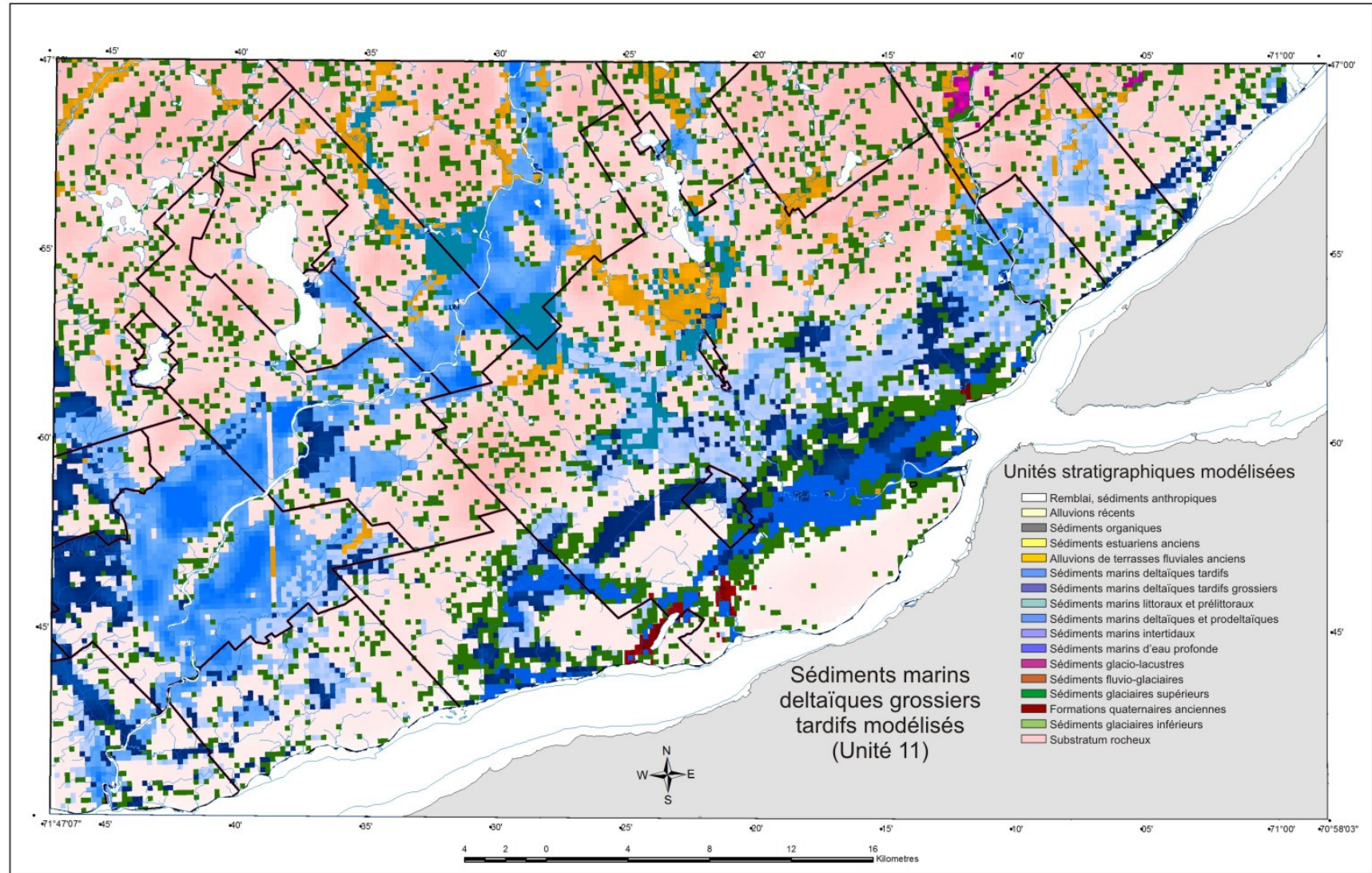


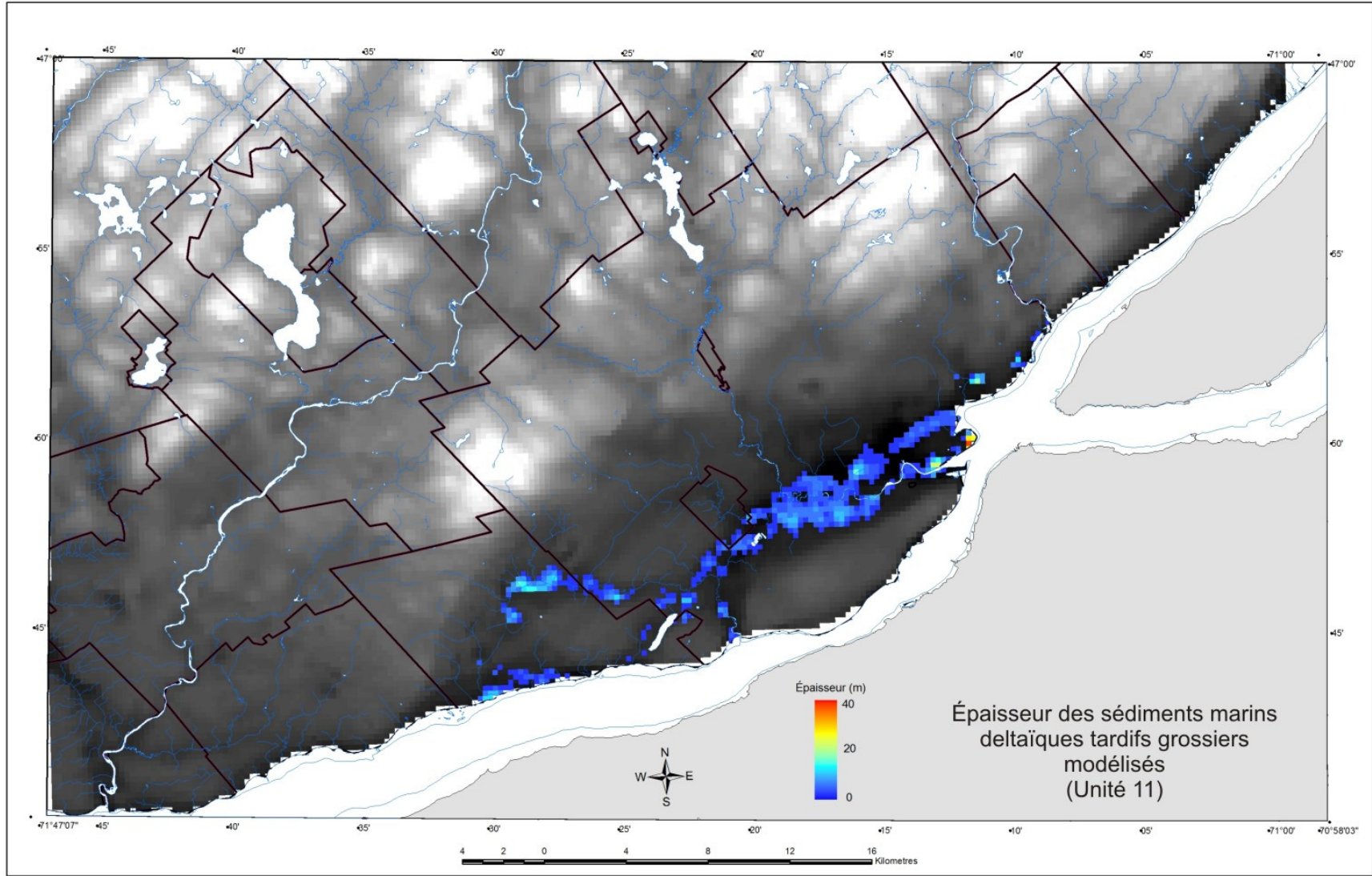




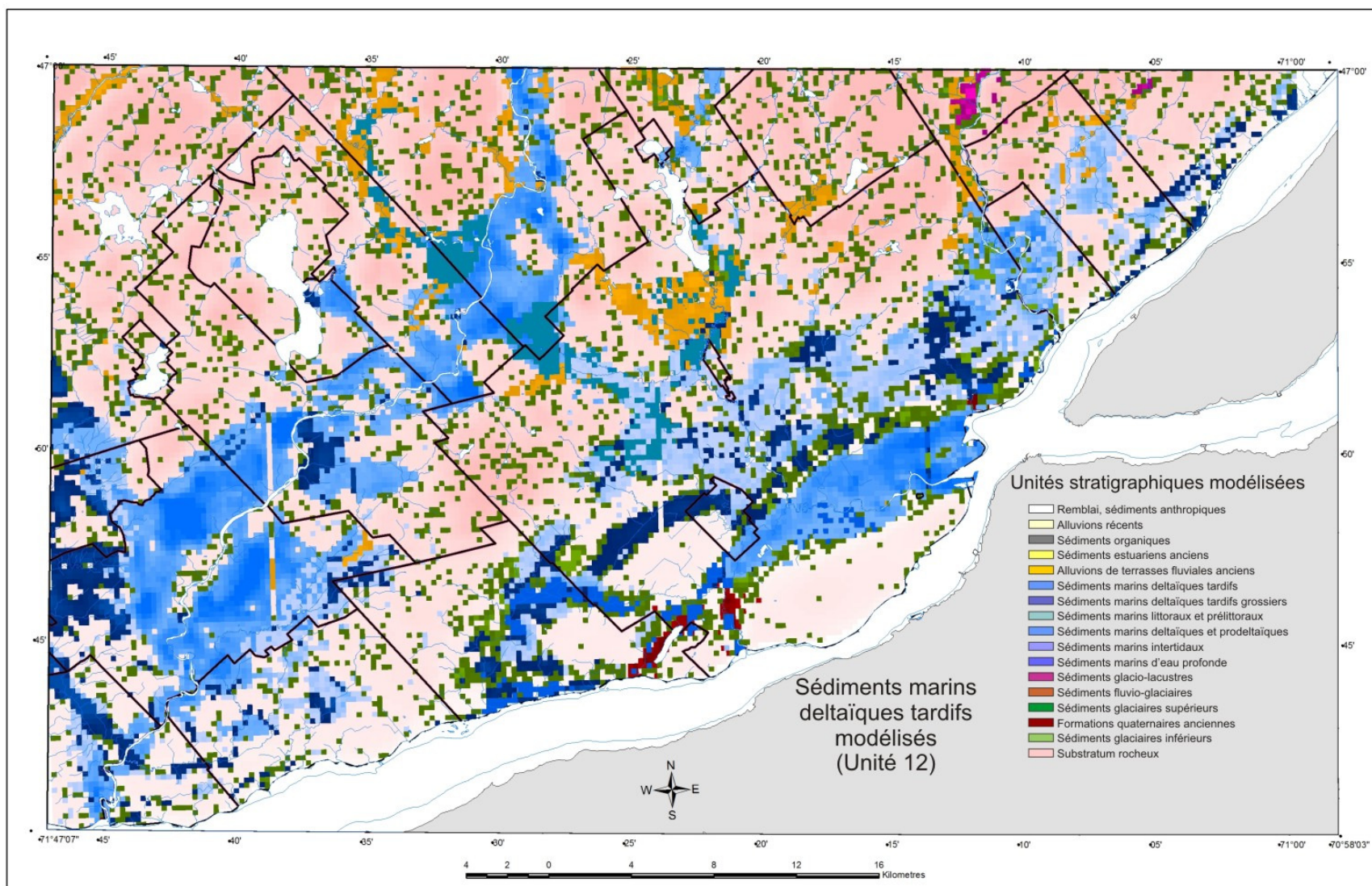


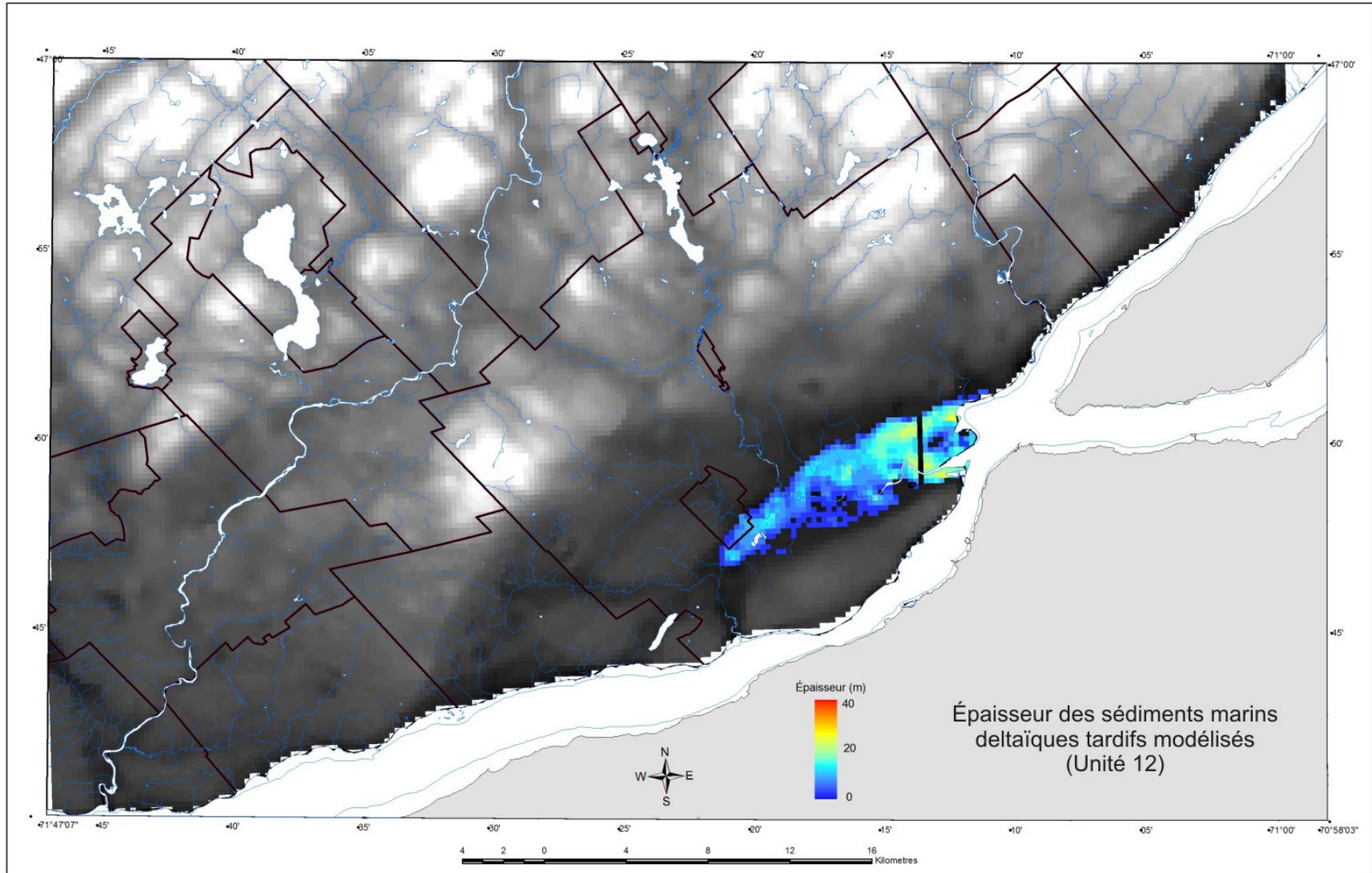


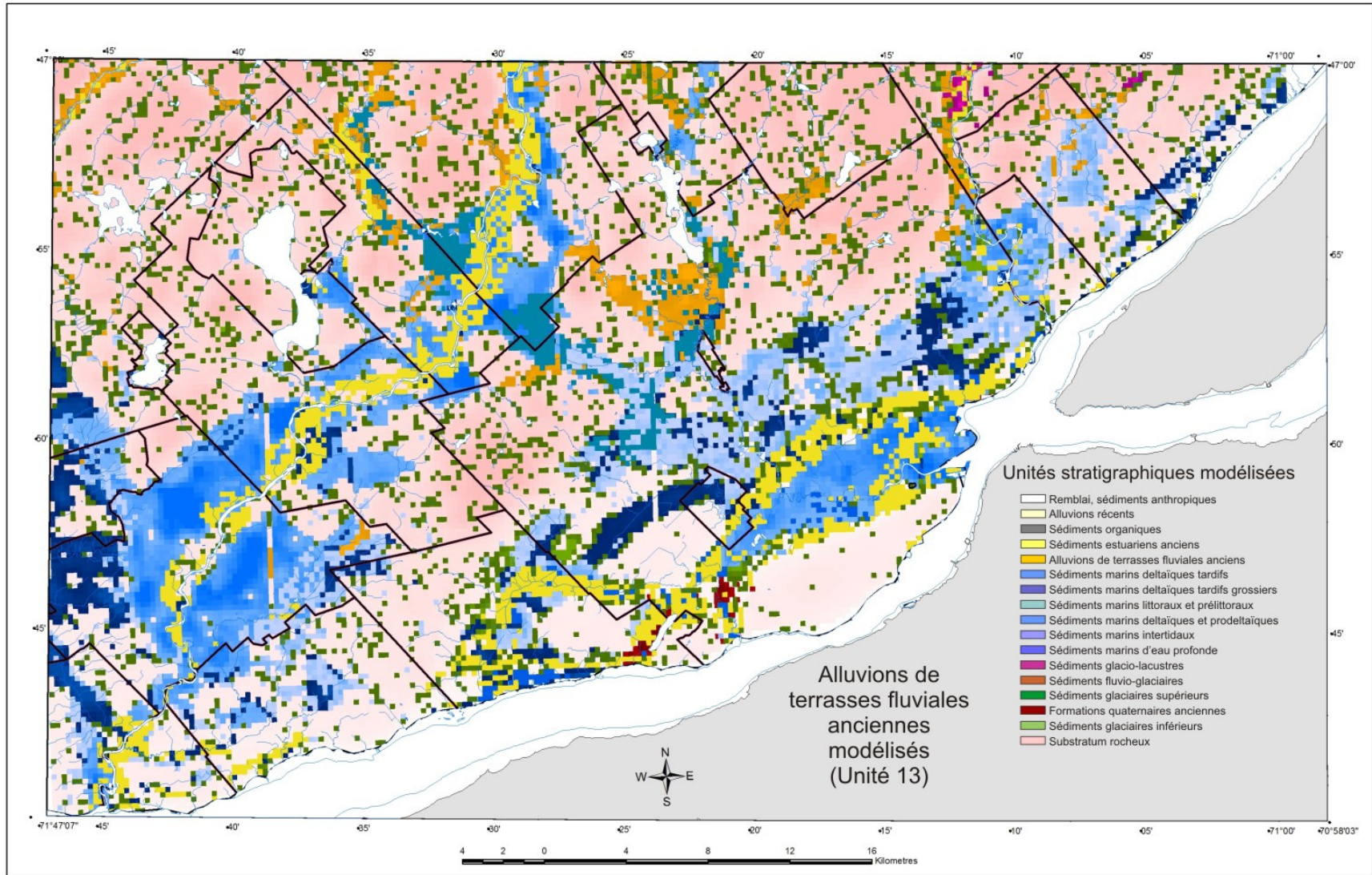


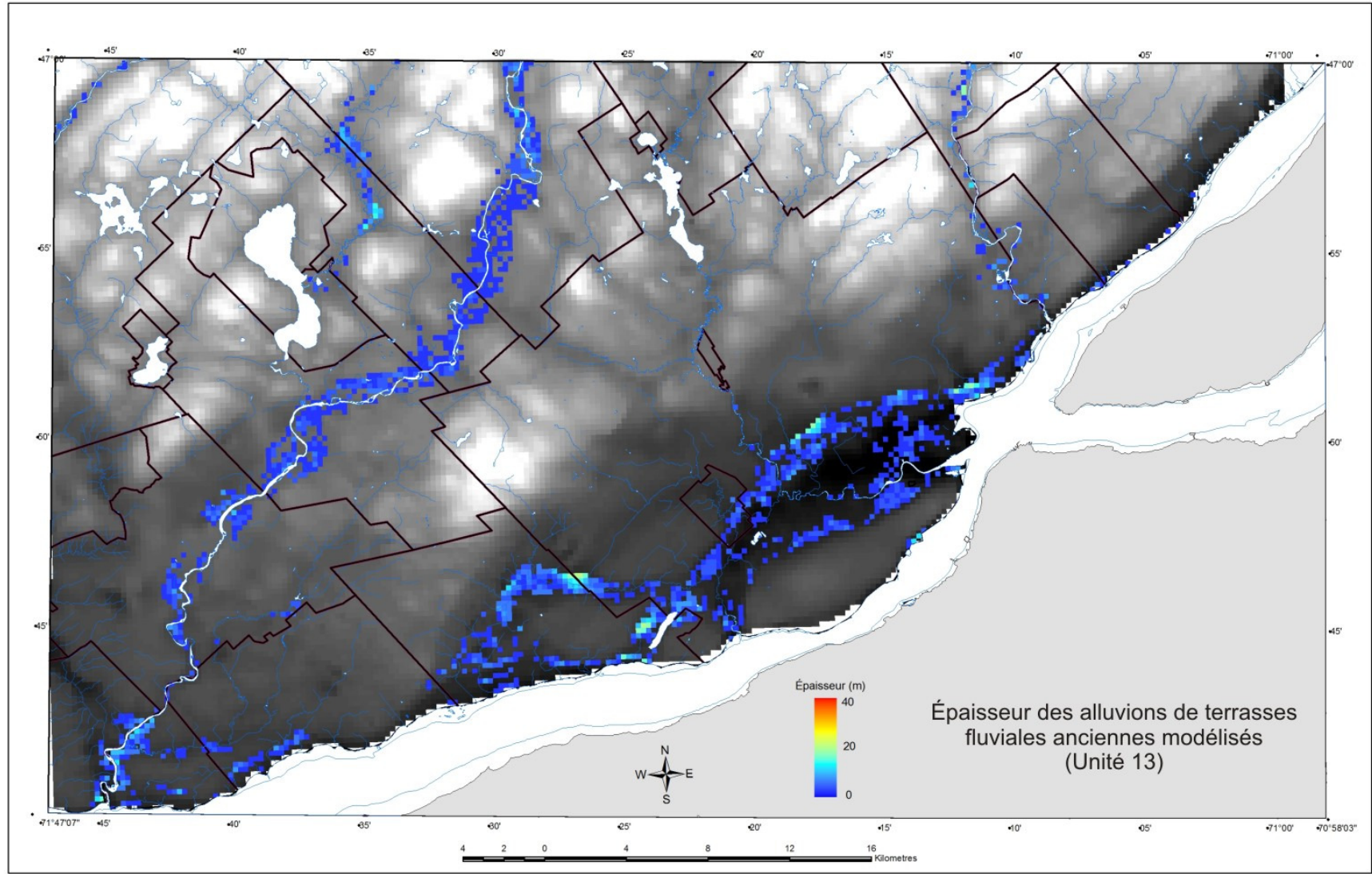


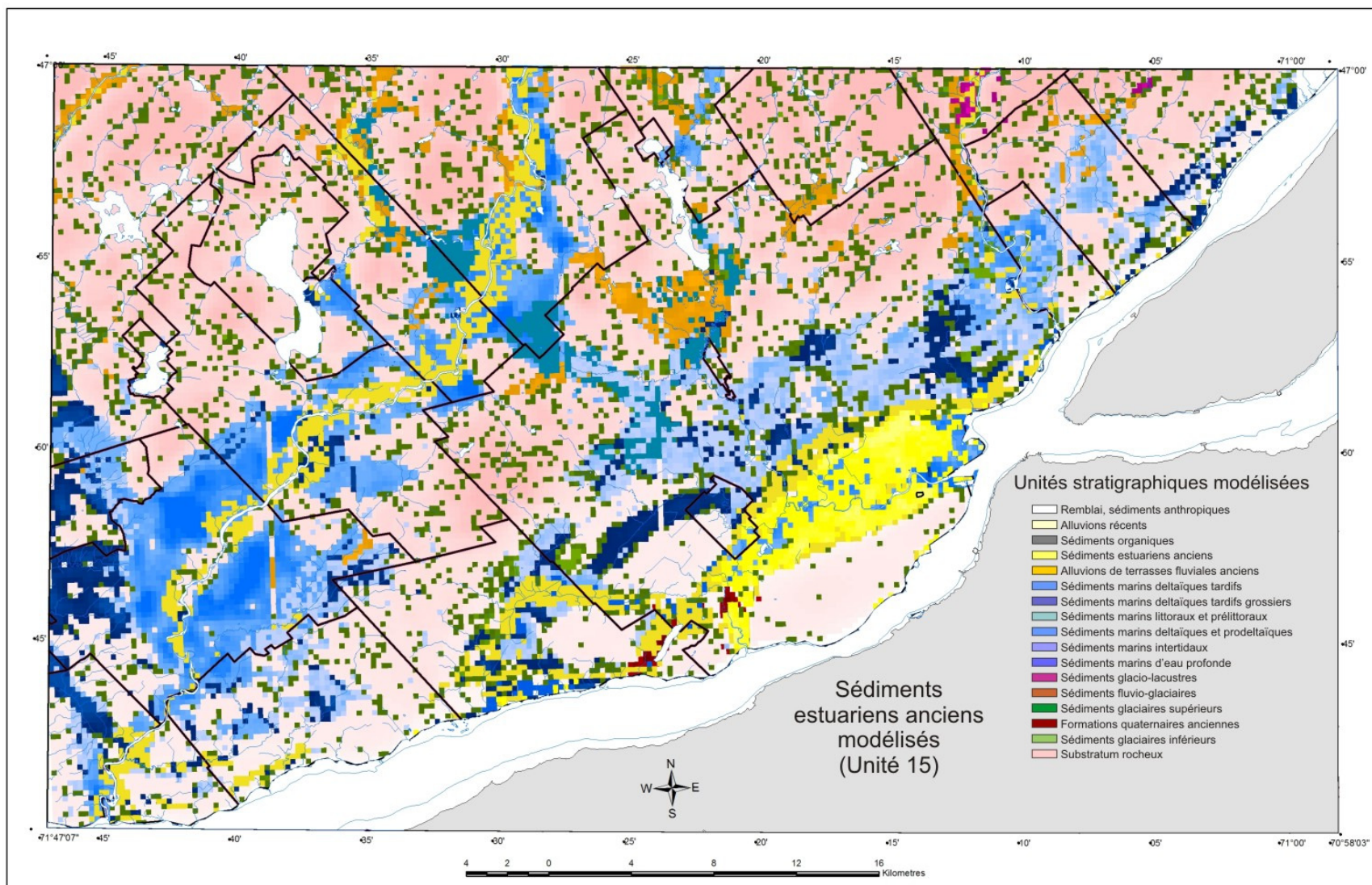


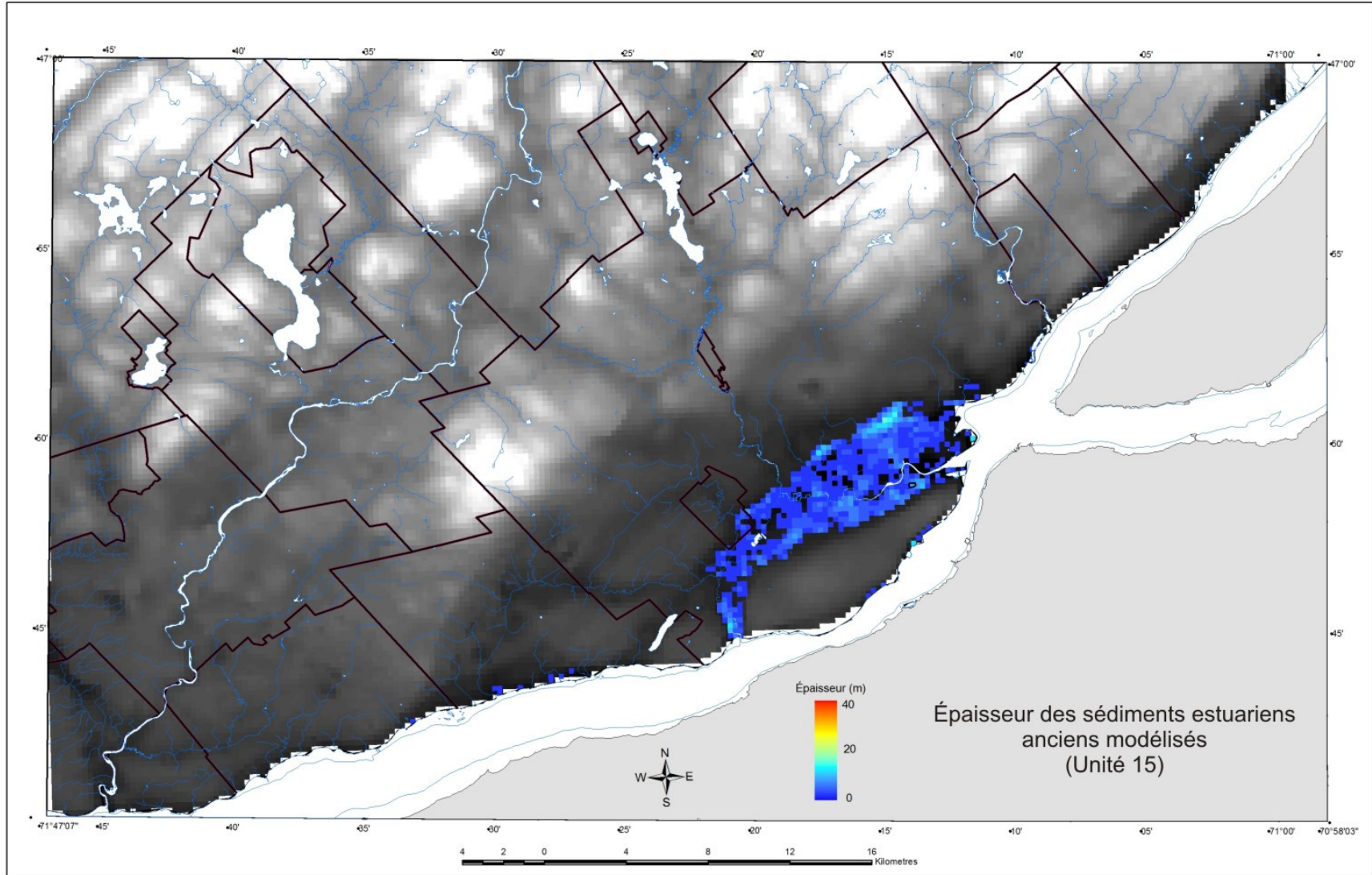


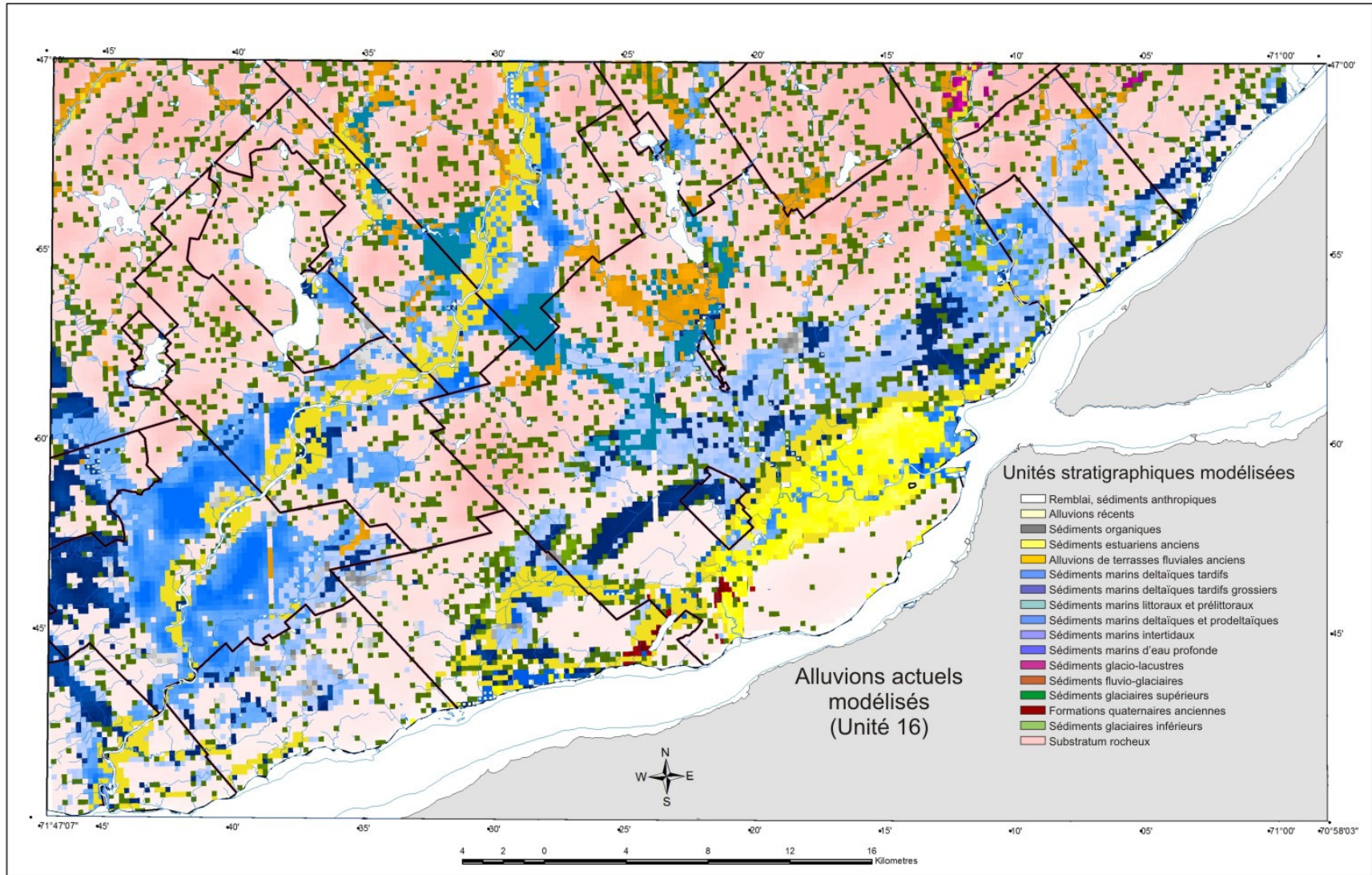


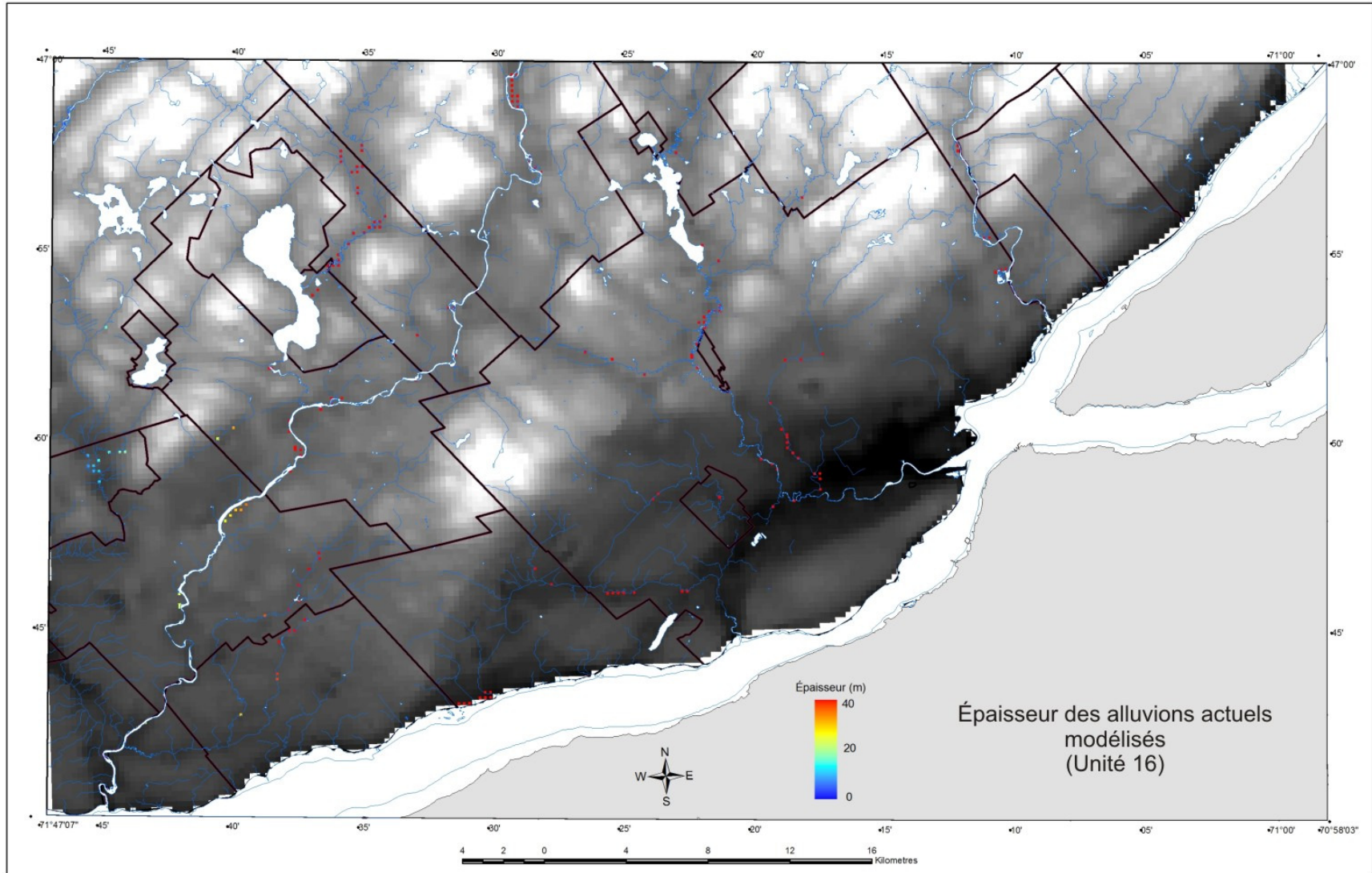




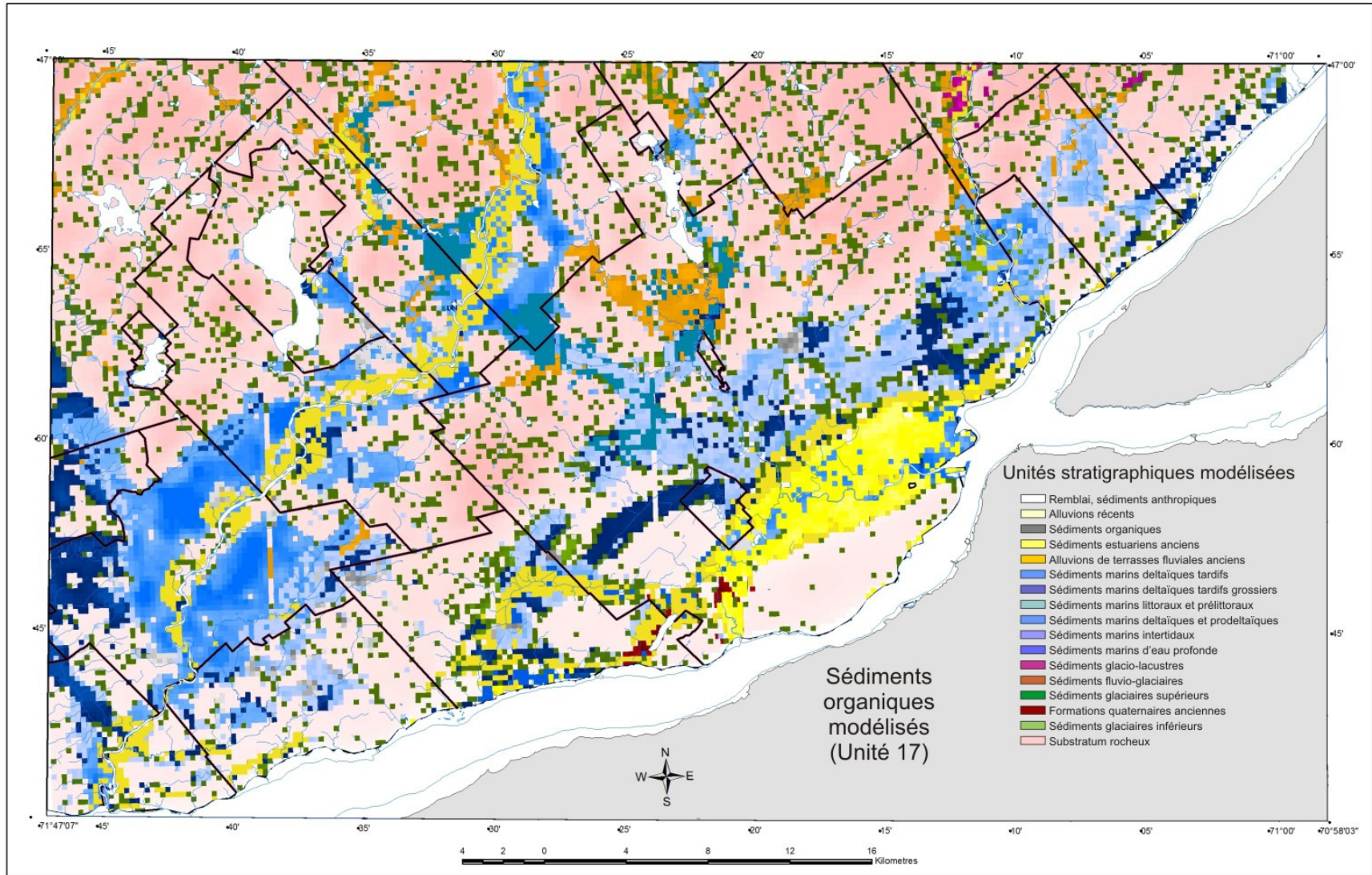


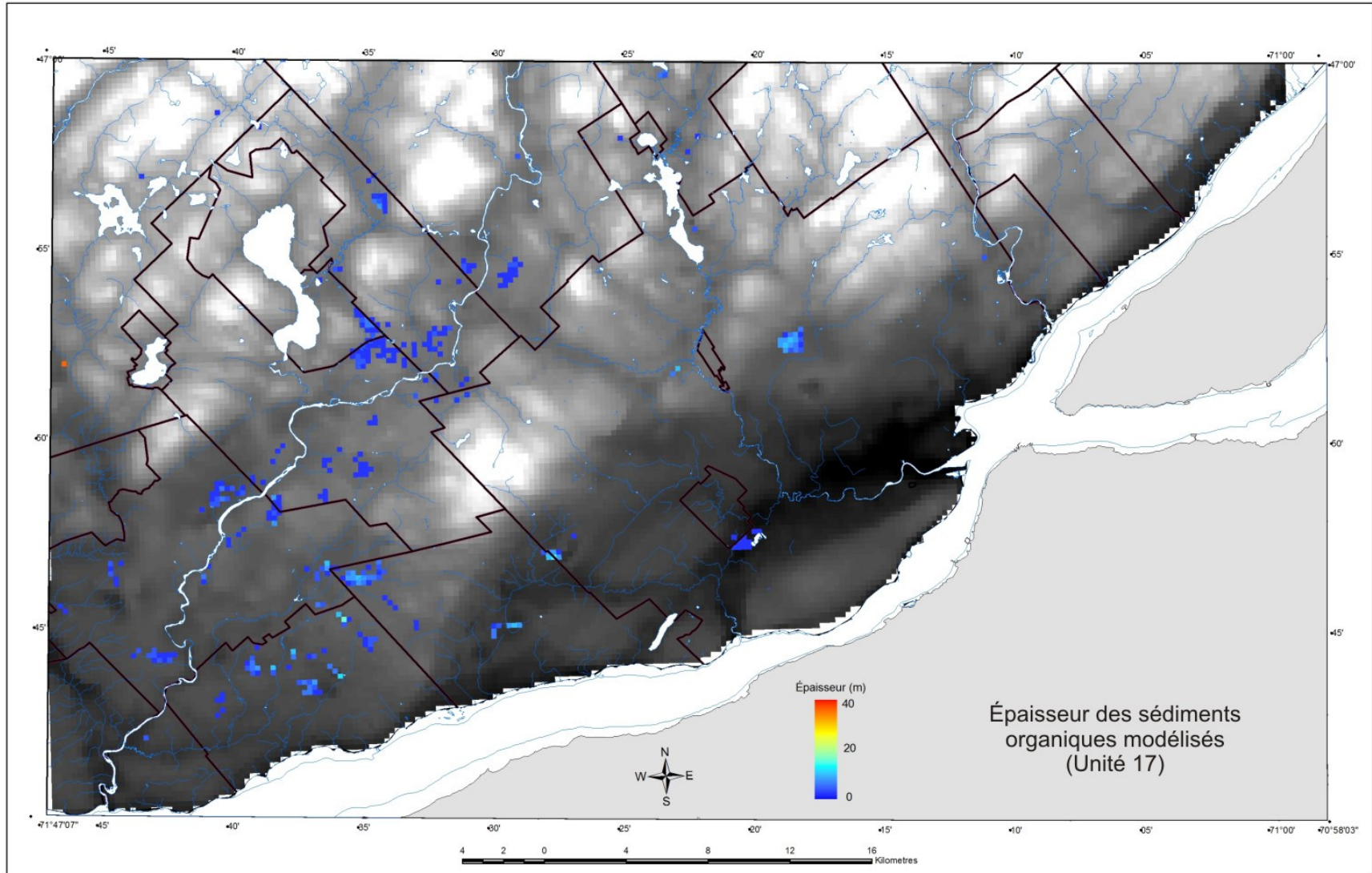


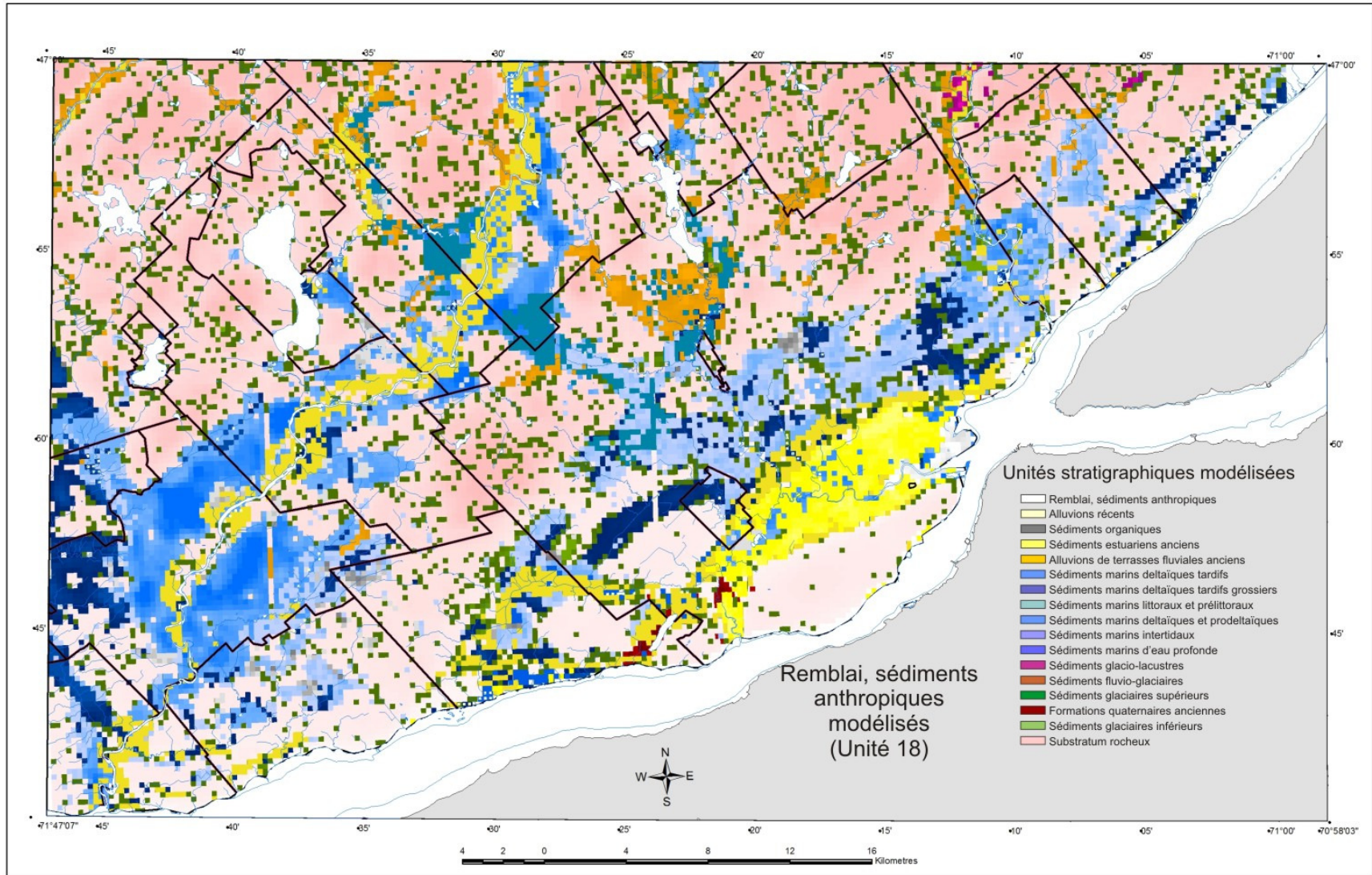


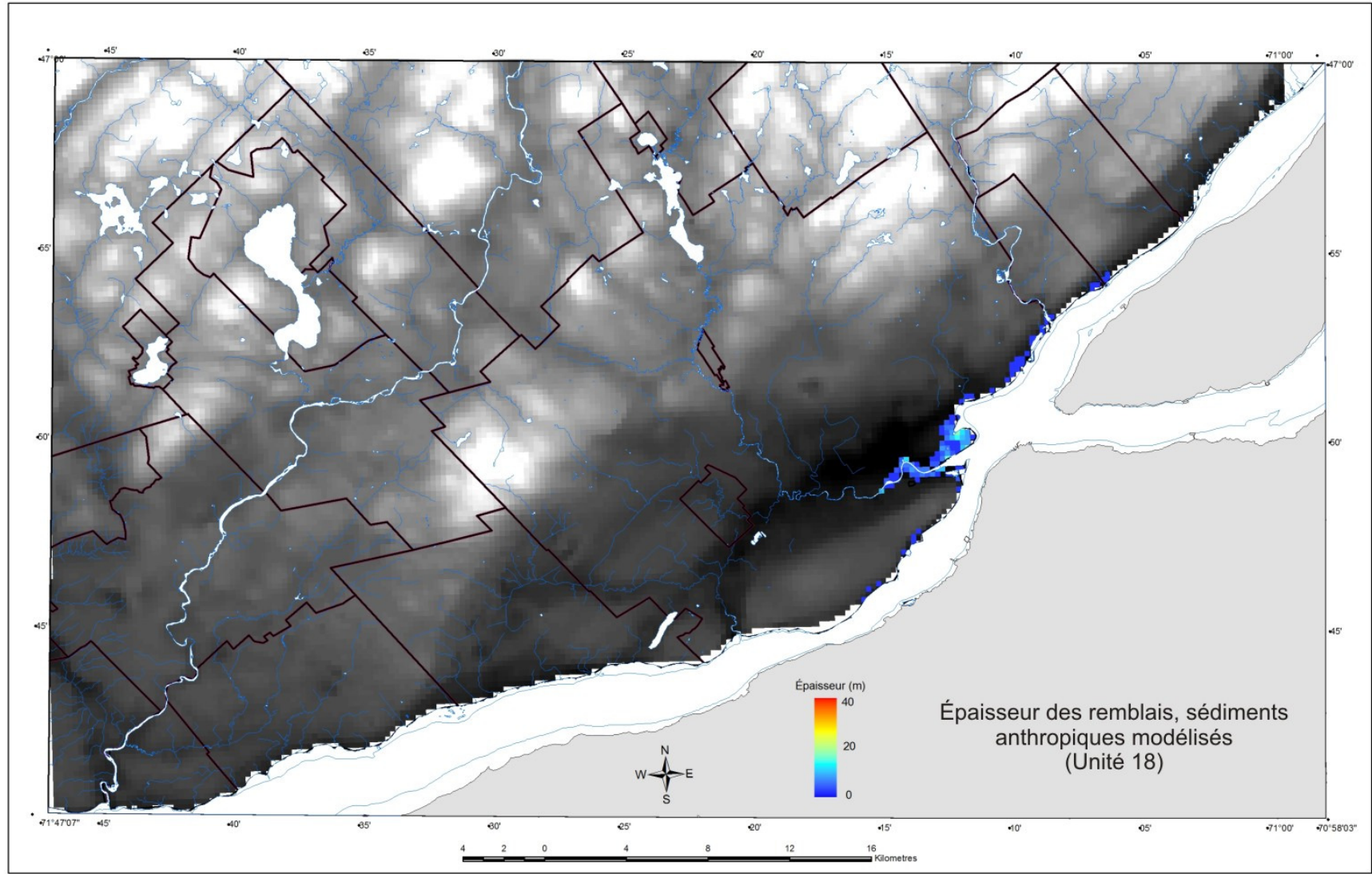












## **Annexe H**

Paramètres des eaux souterraines du delta tardif enfoui de la basse ville de Québec

Les paramètres physico chimiques de l'eau souterraine ont été mesurés à l'automne 2008 après le développement de la totalité des puits. Les mesures ont été prises in-situ à l'aide d'une cellule d'écoulement (flow through cell). Il est à noter que tous les échantillons sont faiblement acides. La majorité des températures se situent entre 5°C et 8°C, avec un minimum à 2°C au puits FL04-19\_S et de 2,8°C au puits FL07-04\_S. Ces températures de 5 à 8°C correspondent à la température atmosphérique moyenne sous nos latitudes. L'eau souterraine est caractérisée par une faible conductivité associée à une faible quantité de solides dissous. Une bonne oxygénation est également observée, représentant des conditions de nappe libre.

Tableau 5.V. Paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine

Nom du puits	Localisation			Profondeur de la crépine (m) (de – à)	Température de l'eau (°C)	Conductivité spécifique (µS/cm: corrigée pour la température)	Oxygène dissous (%)	pH
	X	Y	Z					
FL07-02_D	320 920	5 183 920	9	11-14	7.5	7.0	51.4	6.2
FL07-02_S	320 920	5 183 920	9	4-5	7.2	1.4	93.3	5.9
FL07-03_D	323 030	5 184 970	6	7-10	8.5	1.9	66.6	6.0
FL07-03_S	323 030	5 184 970	6	4-5	8.6	2.1	89.2	6.0
FL07-04_D	322 500	5 185 850	8	4-5	8.2	2.0	55.2	5.8
FL07-04_S	322 500	5 185 850	8	3-7	2.8	0.8	58.2	5.7
FL07- 06	325 220	5 186 000	8	3-5	5.3	1.4	119.1	6.0
FL07-13_D	329 300	5 187 500	6	17-20	8.7	3.5	68.5	6.2
FL07-13_S	329 300	5 187 500	6	5-7	4.4	2.8	62.1	6.4
FL07-15_D	327 900	5 188 100	9	19-21	6.9	3.6	75.0	6.3
FL07-17_D	330 820	5 187 775	5	25-27	6.8	1.4	46.7	6.3
FL07-17_S	330 820	5 187 775	5	6-8	8.0	0.5	54.9	6.9
FL07-19_D	330 150	5 188 875	9	15-19	8.2	2.4	61.8	6.3
FL07-19_S	330 150	5 188 875	9	3-5	2.0	1.1	50.2	6.6