

MB 2021-04

Modélisation géologique 3D des sédiments quaternaires du bassin-versant de la rivière Saint-François

Documents complémentaires

Additional Files



Licence



License

Cette première page a été ajoutée
au document et ne fait pas partie du
rapport tel que soumis par les auteurs.

Énergie et Ressources
naturelles

Québec

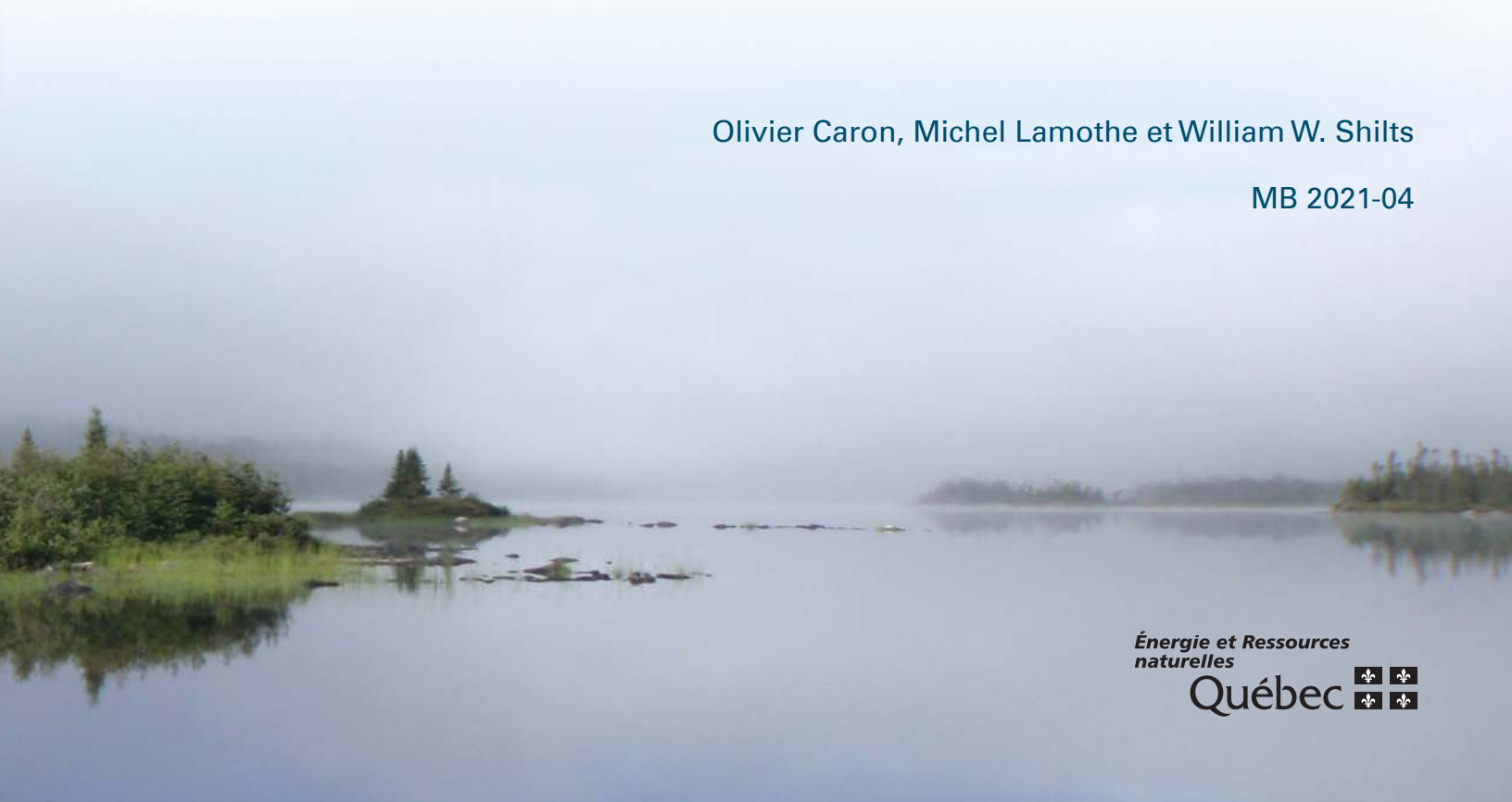




Modélisation géologique 3D des sédiments quaternaires du bassin-versant de la rivière Saint-François

Olivier Caron, Michel Lamothe et William W. Shilts

MB 2021-04



Avertissement

Ce document est une copie fidèle du manuscrit soumis par l'auteur, sauf pour une vérification sommaire destinée à assurer une qualité convenable de diffusion.



**MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D DES SÉDIMENTS QUATERNAIRES DU
BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS**



Par

**Olivier CARON
Michel LAMOTHE
William W. SHILTS**

Département des sciences de la Terre et de l'Atmosphère
Université du Québec à Montréal

Rapport présenté à l'intention du
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs
Gouvernement du Québec
Mars 2011

MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D DES SÉDIMENTS QUATERNAIRES DU BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS

CARON, Olivier

*Département des sciences de la Terre et de l'Atmosphère, Université du Québec à Montréal,
CP 8888 Centre-ville, Montréal, QC H3C 3P8, Canada*
caron.olivier@uqam.ca

LAMOTHE, Michel

*Département des sciences de la Terre et de l'Atmosphère, Université du Québec à Montréal,
CP 8888 Centre-ville, Montréal, QC H3C 3P8, Canada*
lamothe.michel@uqam.ca

SHILTS, William W.

*Institute of Natural Resource Sustainability (INRS), University of Illinois at Urbana-Champaign,
607 East Peabody Drive, Champaign, IL 61820*

RÉSUMÉ

Le bassin-versant de la rivière Saint-François est localisé sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent. Sa superficie importante et sa densité de population élevée font de cette région une zone intéressante pour les études hydrogéologiques. Depuis quelques années, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP) a entrepris une série de projets dont l'objectif ultime est de mieux connaître et protéger les eaux souterraines du bassin-versant de la rivière Saint-François, de la frontière internationale à la confluence avec le fleuve Saint-Laurent. Des programmes similaires ont été complétés pour les secteurs de Portneuf (Boisvert, 1998), Mirabel (Ross, 2005), de la rivière Châteauguay (Tremblay, 2009), au sud de Montréal, et de la rivière Chaudière (Caron, 2007). L'étude de la rivière Saint-François s'est donc inspirée des projets antérieurs. Dans ce contexte, un des intrants majeurs dans la détermination des propriétés hydrogéologiques régionales est la distribution et l'architecture tridimensionnelle des sédiments de surface d'âge quaternaire. Ce rapport présente les détails des travaux entrepris dans le cadre d'une entente liant le MDDEP et l'Université du Québec à Montréal (UQAM) dont le principal objectif est la cartographie et la modélisation 3D des formations superficielles de ce bassin-versant. La description de la séquence des travaux et la méthodologie retenue pour l'élaboration de la carte quaternaire et du modèle géologique 3D seront exposées, ainsi que les descriptions plus spécifiques des diverses unités lithostratigraphiques. Les objectifs et les contributions visés dans le cadre de ce modèle sont aussi abordés.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	2
TABLE DES MATIERES.....	3
INTRODUCTION	8
1. DESCRIPTION DU BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS	12
1.1 Géographie et hydrographie	12
1.2 Physiographie	14
1.3 Géologie du substratum rocheux.....	17
1.4 Élaboration du cadre stratigraphique.....	19
2. MÉTHODOLOGIE	21
2.1 Les campagnes de terrain	21
2.2 La photo-interprétation.....	22
2.3 Travaux antérieurs et intégration des données dans les systèmes d'informations géographiques (GIS).....	22
2.4 Cartographie des formations superficielles	27
3. LES UNITÉS STRATIGRAPHIQUES DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS ET LEURS IMPLICATIONS HYDROGÉOLOGIQUES.....	29
3.1 Le roc (R)	29
3.2 Formations quaternaires anciennes (Q)	29
3.2.1 Sédiments du lac proglaciaire Gayhurst.....	30
3.3 Till de surface (Lennoxville/Gentilly; T).....	30
3.4 Dépôts fluvioglaciaires (G; Gx/Gs)	31
3.5 Dépôts glaciolacustres (LG; LGa/LGb/LGd).....	32
3.6 Dépôts glaciomarins (MG; MGa/MGb/MGd).....	32
3.7 Dépôts alluviaux (Al; Ap/At), Dépôts lacustres (Lg), Dépôts d'éboulis (Ce), Sédiments éoliens (Ed).....	33
3.8 Dépôts organiques (O).....	34
4. MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE DES SÉDIMENTS QUATERNAIRES DU BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS.....	36
4.1 Les objectifs spécifiques de la modélisation géologique 3D	38
4.2 Méthodologie	38
4.2.1 Acquisition et compilation des données de surface et de sous-surface.....	40
4.2.2 Standardisation et interprétation des données	47
4.3 Modèle conceptuel de la stratigraphie quaternaire.....	49
4.4 Modélisation.....	51
4.4.1 Contraintes.....	52
4.4.2 Construction de la carte isopaque et choix de la méthode d'interpolation des différentes unités lithostratigraphiques.	52
4.4.3 La modélisation des objets géologiques.....	54
4.4.4 Exportation du modèle	57
4.4.5 Attribution des propriétés aux régions du modèle	58

4.4.6 Incertitudes	59
4.5 Résultats	60
5. CONCLUSION.....	64
6. BIBLIOGRAPHIE	67
APPENDICE 1	72
LOCALISATION ET CARTE ISOPAQUE DES FORMATIONS QUATERNAIRES ANCIENNES (Q).APPENDICE 2 ...	72
APPENDICE 2	73
LOCALISATION ET CARTE ISOPAQUE DES SÉDIMENTS GLACIAIRES (T).	73
APPENDICE 3	74
LOCALISATION ET CARTE ISOPAQUE DES SÉDIMENTS FLUVIOGLACIAIRES (Gs ET Gx).	74
APPENDICE 4	75
LOCALISATION ET CARTE ISOPAQUE DES SÉDIMENTS GLACIOLACUSTRES D'EAU PROFONDE (LGA).	75
APPENDICE 5	76
LOCALISATION ET CARTE ISOPAQUE DES SÉDIMENTS GLACIOLACUSTRES LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX (LGB).	76
APPENDICE 6	77
LOCALISATION ET CARTE ISOPAQUE DES SÉDIMENTS GLACIOLACUSTRES DELTAÏQUES ET PRODELTAÏQUES (LGd).	77
APPENDICE 7	78
LOCALISATION ET CARTE ISOPAQUE DES SÉDIMENTS GLACIOMARINS D'EAU PROFONDE (MGA).	78
APPENDICE 8	79
LOCALISATION ET CARTE ISOPAQUE DES SÉDIMENTS GLACIOMARINS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX (MGB).	79
APPENDICE 9	80
LOCALISATION ET CARTE ISOPAQUE DES SÉDIMENTS GLACIOMARINS DELTAÏQUES ET PRODELTAÏQUES (MGd).	80
APPENDICE 10	81
LOCALISATION ET CARTE ISOPAQUE DES SÉDIMENTS ALLUVIAUX (Ap, At), DES DÉPÔTS D'ÉBOULIS (Ce), DES SÉDIMENTS ÉOLIENS (Ed) ET DES SÉDIMENTS LACUSTRES (L).	81
APPENDICE 11	82
LOCALISATION ET CARTE ISOPAQUE DES SÉDIMENTS ORGANIQUES (O).	82
APPENDICE 12	83
LOCALISATION DES COUPES TOPO-GÉOLOGIQUES SYNTHÈSES DU BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS.	83
APPENDICE 13	84
COUPE TOPO-GÉOLOGIQUE DE LA RIVIÈRE MOE.	84

APPENDICE 14.....	85
COUPE TOPO-GÉOLOGIQUE DE LA RIVIÈRE SAUMON.	85
APPENDICE 15.....	86
COUPE TOPO-GÉOLOGIQUE DES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT.	86
APPENDICE 16.....	87
COUPE TOPO-GÉOLOGIQUE DE LA MORAINES INTERLOBAIRE À PROXIMITÉ DE COOKSHIRE.....	87
APPENDICE 17.....	88
COUPE TOPO-GÉOLOGIQUE DE LA COUPE STRATIGRAPHIQUE DE LA LOCALITÉ DE NEW-MEXICO.	88
APPENDICE 18.....	89
COUPE TOPO-GÉOLOGIQUE DES SÉDIMENTS PIÉGÉS DANS LA FAILLE DE LA GUADELOUPE.....	89
APPENDICE 19.....	90
COUPE TOPO-GÉOLOGIQUE DANS LE SECTEUR DE MILBY	90
APPENDICE 20.....	91
COUPE TOPO-GÉOLOGIQUE DANS LA VILLE DE COATICOOK.....	91
APPENDICE 21.....	92
COUPE TOPO-GÉOLOGIQUE DE L'ESKER DE COATICOOK.....	92
APPENDICE 22.....	93
COUPE TOPO-GÉOLOGIQUE DE LA RIVIÈRE TOMIFOBIA.	93
APPENDICE 23.....	94

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 DÉCOUPAGE DES FEUILLETS AU 1 : 50 000 (BNBT) POUR LE BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS.	11
FIGURE 2 DÉLIMITATION ET DIVISIONS ADMINISTRATIVES DU BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS (COGESAF).	13
FIGURE 3 PORTION DU BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS SITUÉE AUX ÉTATS-UNIS (COGESAF).	13
FIGURE 4 MODÈLE D'ÉLEVATION NUMÉRIQUE ET HYDROGRAPHIE DU BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS.	16
FIGURE 5 GÉOLOGIE ET STRUCTURE DES APPALACHES (SCHROETTER, 2004).	18
FIGURE 6 LOCALISATION DES SOURCES CARTOGRAPHIQUES DU BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS.	25
FIGURE 7 CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES.	28
FIGURE 8 SIMPLIFICATION DE LA CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES POUR L'INTÉGRATION DANS LE MODÈLE 3D.	28

FIGURE 9 CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES.	35
FIGURE 10 REPRÉSENTATION 2D DE LA STRATIGRAPHIE DE LA RIVIÈRE MOE, QUÉBEC.	37
FIGURE 11 ORGANIGRAMME DES ÉTAPES DE RÉALISATION DU MODÈLE TRIDIMENSIONNEL GÉOLOGIQUE.	39
FIGURE 12 COUPE STRATIGRAPHIQUE SYNTHÈSE DES VALLÉES TRIBUTAIRES À LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS.	49
FIGURE 13 MODÈLE CONCEPTUEL DE LA STRATIGRAPHIE QUATERNAIRE À TRAVERS LE QUÉBEC MÉRIDIONAL (TIRÉ DE PAGÉ, 1999; MODIFIÉ DE SHILTS, 1981 ET DE LAMOTHE ET AL., 1992).	50
FIGURE 13 CARTE DE LA DISTRIBUTION DE L'ÉPAISSEUR TOTALE DES SÉDIMENTS QUATERNAIRES POUR LE BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS.	53
FIGURE 14 EXEMPLE DE CALCUL POUR SUBDIVISER DEUX UNITÉS LITHOSTRATIGRAPHIQUES À PARTIR DE RATIOS QUANTIFIÉ AVEC LES DONNÉES DE FORAGES ET LA CARTE ISOPAQUE. (TREMBLAY, 2010).	56
FIGURE 15 ÉLÉVATION ET MODÉLISATION 3D DU SUBSTRATUM ROCHEUX (R).	61
FIGURE 16 ÉLÉVATION ET MODÉLISATION 3D DES FORMATIONS QUATERNAIRES ANCIENNES (Q).	61
FIGURE 17 ÉLÉVATION ET MODÉLISATION 3D DES SÉDIMENTS GLACIAIRES (T).	62
FIGURE 18 ÉLÉVATION ET MODÉLISATION 3D DES SÉDIMENTS FLUVIOGLACIAIRES (GS & GX).	62
FIGURE 19 ÉLÉVATION ET MODÉLISATION 3D DES SÉDIMENTS GLACIOLACUSTRES (LGA, LGB & LGD).	63
FIGURE 20 ÉLÉVATION ET MODÉLISATION 3D DES SÉDIMENTS GLACIOMARINS LACUSTRES ET ALLUVIAUX (MGA, MGB, MGD, L ET A).	63

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 COUVERTURE DES TRAVAUX CARTOGRAPHIQUES QUATERNAIRES POUR LE BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS.	23
TABLEAU 2 UNITÉS LITHOSTRATIGRAPHIQUES DU MODÈLE TRIDIMENSIONNEL DE LA SAINT-FRANÇOIS.	27
TABLEAU 3 CRITÈRE DE VALIDATION DE LA BASE DE DONNÉES DU MODÈLE 3D (ROSS, 2005).	40
TABLEAU 4 CARACTÉRISATION DES SOURCES DE DONNÉES MULTIPLES	45
TABLEAU 5 UNITÉS LITHOSTRATIGRAPHIQUES DU MODÈLE TRIDIMENSIONNEL DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS.	47

TABLEAU 6 PROPRIÉTÉS NUMÉRIQUES ATTRIBUÉES DANS LE MODÈLE 3D DANS LA PLATEFORME TARGET	58
---	----

TABLEAU 7 DISTRIBUTION ET POURCENTAGE DES DIFFÉRENTES SOURCES DE DONNÉES	59
---	----

INTRODUCTION

Le présent projet de recherche résulte d'une initiative du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP) visant une meilleure connaissance des eaux souterraines à l'échelle des principaux bassin-versants du Québec. Ces projets visent spécifiquement les ressources d'eau du Québec municipalisé. Les rivières situées sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent étant soumises à plusieurs contraintes industrielles et anthropiques, il devient important d'établir un bilan de la ressource. Les bassin-versants situés sur la rive nord du fleuve sont également affectés par l'activité humaine mais principalement au niveau de la partie aval. L'amont de ces bassins, situé sur le Bouclier canadien, est généralement peu habité. Il s'agit aussi d'une partie d'un programme visant la cartographie des formations quaternaires à l'échelle du territoire québécois. Cette étude peut donc établir un portrait moderne du bassin-versant de la rivière Saint-François afin de soutenir des programmes éventuels de caractérisation des eaux souterraines.

Il y a déjà plus de 10 ans, un premier programme moderne de cartographie quaternaire directement appliqué à l'hydrogéologie a été initié par le Centre géoscientifique de Québec (CGQ) et par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) sous la supervision de Michel Parent et Yves Michaud, dans le secteur de Portneuf cette étude couvrait la vallée de la rivière Sainte-Anne (Parent *et al.*, 1998). La cartographie de surface s'est accompagnée d'une analyse des forages régionaux, afin de modéliser les variations régionales d'épaisseur de la séquence quaternaire. Ces méthodes ont été améliorées dans le cadre des programmes subséquents, en particulier dans le cadre du doctorat de Martin Ross (2005; projet AFSOQ), dans la région de Mirabel par l'utilisation de logiciels plus performants (e.g. gOcad). Depuis le début des années 2000, une équipe du département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère de l'UQÀM sous la direction de Michel Lamothe, s'est impliquée dans deux autres

projets hydrogéologiques, chacun de ceux-ci comprenant une forte implication du milieu, en particulier celle des regroupements de bassin-versants. Les projets de Châteauguay (Tremblay et Lamothe, 2005) et de la rivière Chaudière (Caron *et al.*, 2007a,b) ont ainsi permis la production de nouvelles cartes synthèses de la géologie du Quaternaire.

La vallée de la rivière Saint-François a fait l'objet d'études de cartographie par des équipes de la Commission géologique du Canada, ainsi que le sujet de plusieurs mémoires et thèses universitaires. Les premiers travaux systématiques ont été réalisés par Nelson Gadd pour le secteur des Basses-Terres du Saint-Laurent au cours des années 50 et 60. Le secteur appalachien, principal sujet d'étude de ce rapport, a été investigué une dizaine d'années plus tard. Barrie C. McDonald y a complété une thèse de doctorat sur l'histoire glaciaire de la région de Sherbrooke-Richmond, cette thèse était supervisée par Richard Foster Flint (McDonald, 1967). McDonald a par la suite coordonné les travaux de William W. Shilts pour le secteur du lac Mégantic en Beauce. La synthèse de McDonald et Shilts publiée dans le Bulletin de la Geological Society of America en 1971 représente toujours le cadre stratigraphique en vigueur dans les études régionales. Michel Lamothe a réalisé une thèse de doctorat en 1985 sur la stratigraphie et la géochronologie des sédiments quaternaires dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. Une partie de ces travaux ont porté sur la stratigraphie de la rivière Saint-François et l'apport principal de cette étude est un nouveau cadre stratigraphique complexe et plus exhaustif des séquences quaternaires des Basses-Terres. Une seconde thèse de doctorat sur la stratigraphie quaternaire de l'Estrie a été réalisée par Michel Parent en 1987 dans les secteurs d'Asbestos Valcourt et Ascot. Ces travaux ont démontré le caractère essentiellement appalachien de la glaciation Chaudière. Armand Larocque, de l'Université de Montréal, a réalisé une thèse de doctorat en 1999 sur le tardiglaciaire et sur les différentes phases glaciolacustres associées à la déglaciation de la région du Haut Saint-François. Les professeurs du département de l'Université de Sherbrooke, en particulier Jean-Marie Dubois, ont

également dirigé un grand nombre de travaux sur la déglaciation de l'Estrie. Plus récemment, des équipes de l'UQAM (dans le cadre du cours de cartographie et géomorphologie des dépôts meubles; SCT-6820) sous la supervision de Martin Roy et de Michel Lamothe ont réalisé des travaux cartographiques systématiques pour les régions de Weedon (1992 à 1998), La Patrie/Mont Mégantic (1998 à 2005) et Coaticook (2005 à aujourd'hui).

Dans le cadre de ce mandat de cartographie et de modélisation, la zone d'étude inclut le secteur canadien du bassin de drainage de la rivière Saint-François, de la frontière internationale aux Basses-Terres du Saint-Laurent. Les cartes topographiques de la Base nationale de données topographiques (BNDT) couvertes par le projet sont au nombre de 18 (incluant le tout ou une partie des cartes 21E03, 21E04, 21E05, 21E06, 21E10, 21E11, 21E12, 21E13, 21E14, 21E15, 21L03, 31H01, 31H08, 31H09, 31H10, 31H15, 31H16, 31I02; figure 1).

Le rapport débute par les grandes lignes de la géographie, de la physiographie et un résumé de la géologie du soubassement rocheux du secteur étudié. La deuxième partie du rapport traite des objectifs, de la méthodologie appliquée et des résultats pour l'étude de la rivière Saint-François notamment pour les travaux de cartographie et de modélisation tridimensionnelle des sédiments quaternaires. La dernière partie du rapport contient les différentes cartes et coupes topo-géologiques obtenues dans le cadre de la modélisation 3D. Finalement, une liste comportant les détails des livrables est également incluse pour conclure le présent rapport.

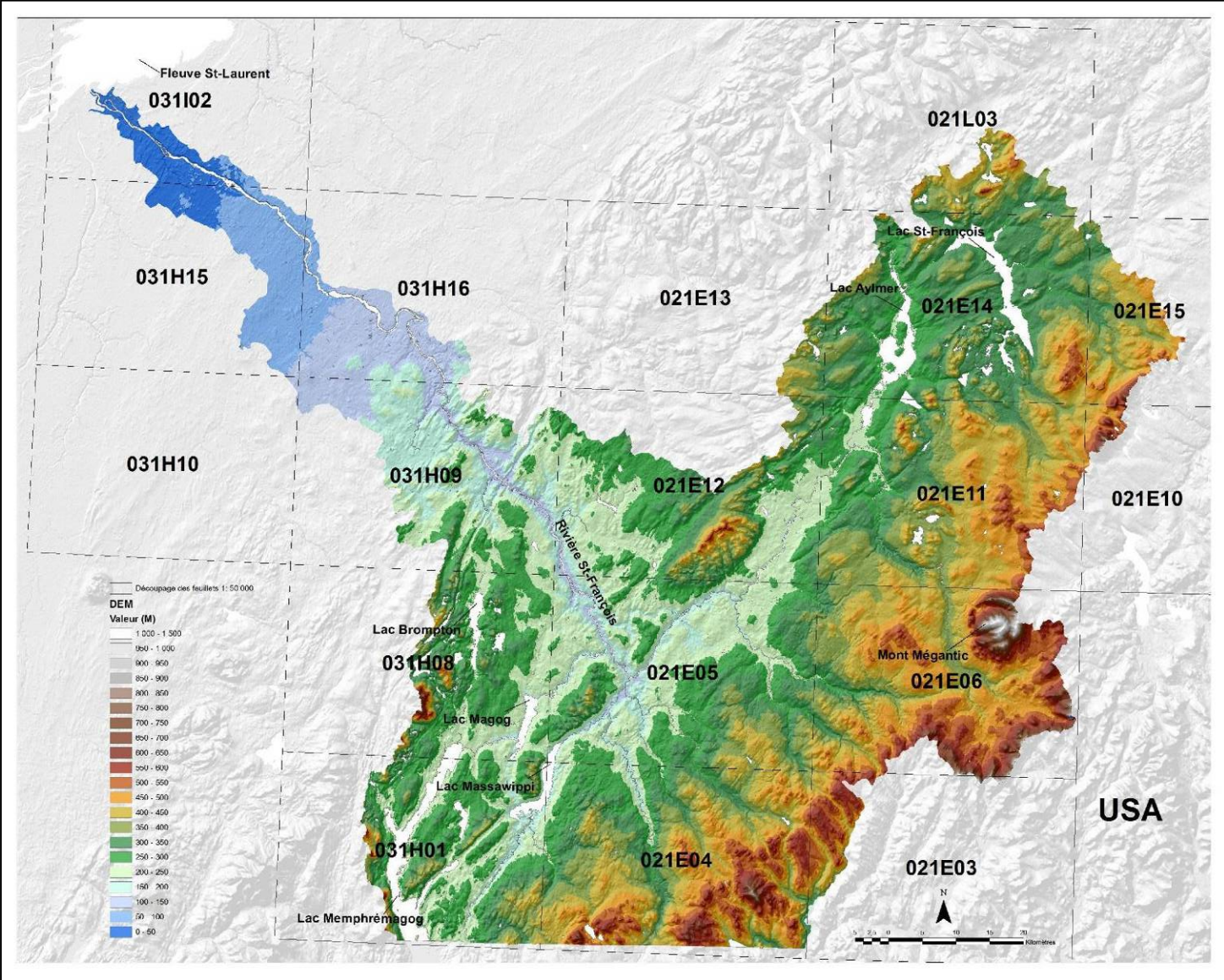


Figure 1 Découpage des feuillets au 1 : 50 000 (BNDT) pour le bassin-versant de la rivière Saint-François.

1. Description du bassin-versant de la rivière Saint-François

1.1 Géographie et hydrographie

Le bassin-versant de la rivière Saint-François est localisé sur la rive-sud du fleuve Saint-Laurent (figure 2). Il représente un des bassins-versants les plus étendus au Québec avec une superficie de 10 228 km². Les bassins limitrophes sont : à l'est, le bassin de la rivière Chaudière; au sud, les bassins américains des rivières Hudson, Connecticut et Androscoggin; à l'ouest, les bassins des rivières Yamaska et de la Baie Missiquoi et au nord, les bassins des rivières Nicolet et Bécancour. Une portion de 15% du bassin se trouve aux États-Unis. La portion États-Unienne occupe un territoire de 1 527 km² (figure 3). Les bassins des rivières Magog et Massawippi prennent leur source dans l'état du Vermont. Il est compris entre les latitudes 44°34' et 46°08' et entre les longitudes 70°48' et 72°56' (Conseil de gouvernance de l'eau des bassins-versants de la rivière Saint-François, Cogesaf).

L'ensemble de ce bassin se trouve principalement dans la région administrative de l'Estrie (80%). L'amont du bassin est situé dans la région Chaudière-Appalaches (9%) et l'aval dans la région Centre-du-Québec (11%). Il compte 95 municipalités et un territoire autochtone regroupés en 12 MRC. La population habitant le bassin-versant de la rivière Saint-François du côté québécois était de 348 800 en 2004 (Cogesaf). La densité moyenne de la population est de 34,10 habitant/km², concentrée près des centres urbains (Sherbrooke, Drummondville, Pierreville, Richmond, Windsor, Magog, Coaticook, East Angus, Weedon et Disraeli). La rivière Saint-François est une rivière majeure dans les Cantons-de-l'Est, avec un débit annuel moyen de 190 m³/s (MENV, 1999). De l'amont à l'aval, cette rivière s'écoule en suivant un trajet en forme de « V ». La longueur du talweg est estimée à 218 km. Elle prend sa source dans le lac Saint-François et elle se jette dans le lac Saint-Pierre. Les principaux tributaires sont la rivière au Saumon, la rivière Eaton, la rivière Massawippi et la rivière Magog.

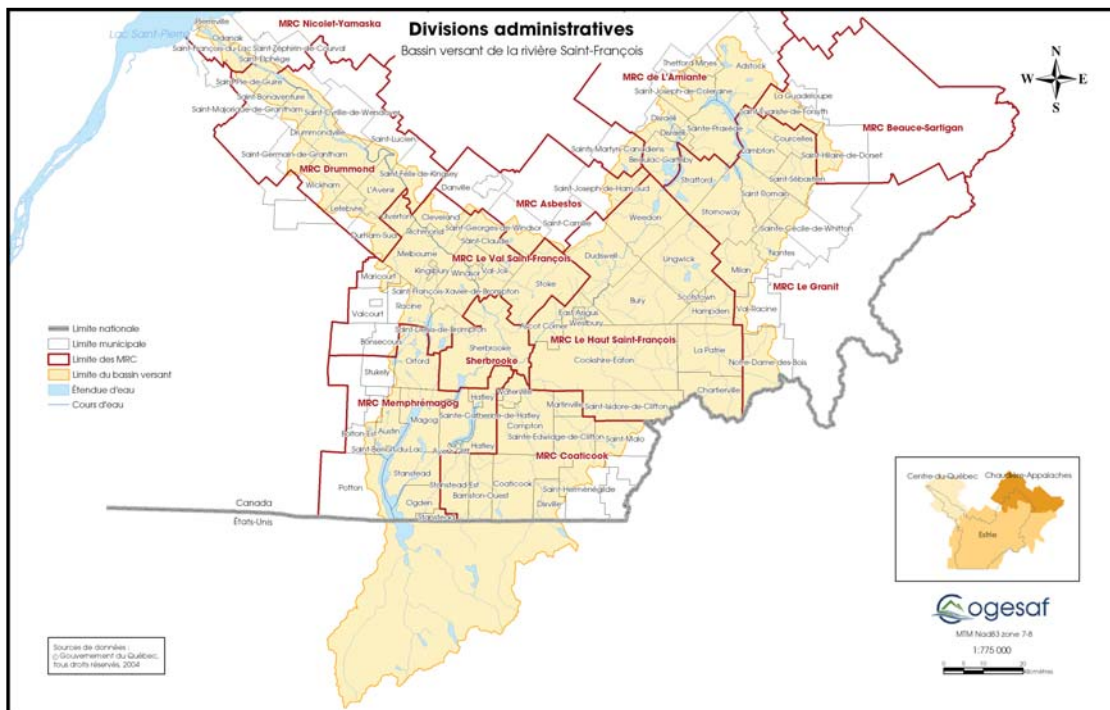


Figure 2 Délimitation et divisions administratives du bassin-versant de la rivière Saint-François (Cogesaf).

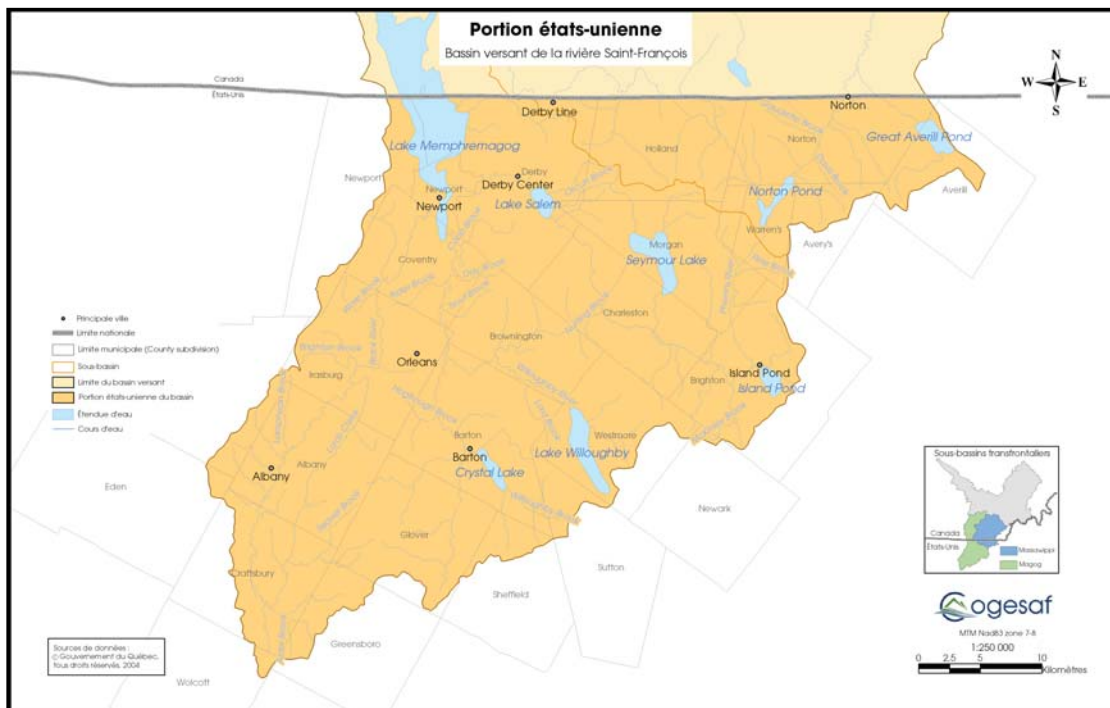


Figure 3 Portion du bassin-versant de la rivière Saint-François située aux États-Unis (Cogesaf).

Cette zone d'étude représente une fenêtre unique pour l'étude des glaciations wisconsinienne, l'interglaciaire sangamonien et même les reliques des glaciations illinoiennes. Le Quaternaire des Cantons-de-l'Est est constitué de dépôts glaciaires, de sédiments fluvioglaciaires et de sédiments glaciolacustres. Le nord de la zone d'étude est recouvert par des dépôts marins, fluviaux et intertidaux. Ces dépôts ont été mis en place successivement par la transition de la Mer de Champlain, au Lac à Lampsilis, au proto-Saint-Laurent et finalement au système alluvionnaire moderne.

L'analyse stratigraphique de cette région s'avère un défi de taille en ce qui concerne l'identification et la caractérisation des différentes unités. Les Cantons-de-l'Est sont caractérisés par de nombreuses moraines composées de matériel fluvioglaciaire, permettant la reconstruction d'isochrones de déglaciation. Les vallées secondaires et tributaires à la rivière Saint-François sont caractérisées par la présence de volumes importants de dépôts antérieurs à la dernière glaciation. Les épaisseurs de ces unités anciennes peuvent être considérables et atteindre plus de 60 m à plusieurs endroits.

1.2 Physiographie

La physiographie de cette région (figure 4) est caractérisée par des reliefs variés comprenant des montagnes, des plateaux et des plaines. L'altitude varie de 1105 m au Mont Mégantic à quelques mètres au-dessus du niveau de la mer près du fleuve Saint-Laurent. Voici une brève description des principaux secteurs physiographiques de l'amont vers l'aval, soit du sud vers le nord (figure 4). La zone d'étude est comprise en grande partie dans la province physiographique appalachienne et des Basses-Terres du Saint-Laurent pour l'aval du bassin-versant. Comprenant plusieurs sommets au-dessus de 900 m, les Montagnes frontalières (White Mountains du New Hampshire) marquent la frontière internationale ainsi que la limite sud du bassin-versant de la rivière Saint-

François (Boissonnault, 1983). Ces montagnes définissent une ligne de partage des eaux continentales à l'échelle de l'Amérique du Nord, entre le Saint-Laurent et le système des rivières de la Nouvelle-Angleterre se jetant dans l'océan Atlantique dont principalement le fleuve Connecticut. La région du piedmont appalachien (altitude moyenne d'environ 500 à 700 m) s'étend sur quelques dizaines de kilomètres le long de ces hauts sommets. Cette zone suit un plan incliné NE-SW vers le nord-ouest. La dépression du lac Memphrémagog découpe les Montagnes Vertes et son piémont. Le plus haut relief de la région est situé au Mont Mégantic qui culmine à plus de 1105 m. D'origine magmatique, cette montagne est située à la limite SE du bassin-versant de la rivière Saint-François et forme un relief localement proéminent. La limite SW du bassin-versant est délimitée par les montagnes Sutton et Orford (400 à 900 m).

La partie centrale du bassin-versant est constituée par le haut-plateau (altitude moyenne de 300 à 400 m) et le bas-plateau (altitude moyenne de 200 à 300 m) appalachien, formées par une ceinture de collines entourant le noyau de roches métamorphiques des Monts Notre-Dame (400 à 650 m à l'est de la rivière Saint-François). Le grain tectonique appalachien, d'orientation NE-SW, est visible au niveau de la topographie régionale et structure fortement les patrons de drainage subséquents, le talweg de la rivière Saint-François s'écoulant de façon conséquente à travers la structure régionale à partir de Sherbrooke. La rivière Saint-François forme une large vallée encaissée dans cette partie du bassin-versant. Au nord de ces hautes-terres, une zone de piémont (100 à 200 m) rejoint les Basses-Terres du Saint-Laurent, situées sous les 200 m d'altitude. Dans ce secteur la rivière Saint-François s'écoule jusqu'au fleuve dans une large plaine où se drainent également les autres affluents du Saint-Laurent tels que la Yamaska, la Richelieu et la Nicolet.

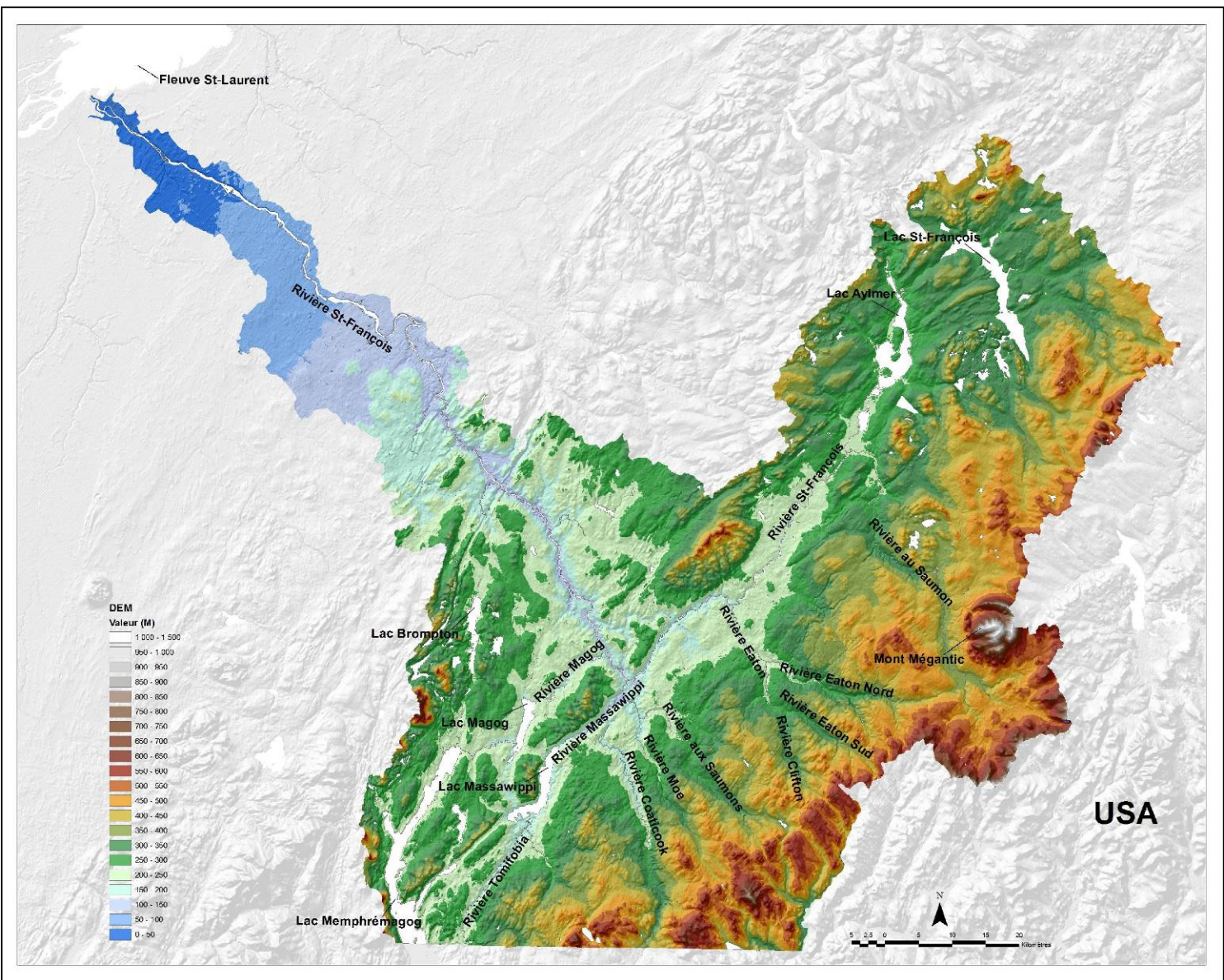


Figure 4 Modèle d'élévation numérique et hydrographie du bassin-versant de la rivière Saint-François.

1.3 Géologie du substratum rocheux

Cette section résume les grandes lignes de la géologie pré-Quaternaire, telle que décrite par Tremblay, A. et Castonguay, S. (2002) ainsi que par Schroetter (2004). Les Appalaches actuelles représentent les racines d'une ancienne chaîne de montagnes qui s'étend sur plus de 2 500 km, de l'Alabama jusqu'à Terre-Neuve. Dans le sud du Québec, les Appalaches sont constituées de roches dont l'âge varie du Cambrien au Dévonien inférieur (figure 5). Les roches cambriennes et ordoviciennes sont incluses dans les zones de Humber et de Dunnage, et sont recouvertes en discordance par des roches sédimentaires du Silurien supérieur et du Dévonien inférieur, qui sont incluses dans la Ceinture de Gaspé.

La zone de Humber représente les vestiges d'une marge continentale passive (i.e. carbonates, grès, shales), formée dans un contexte sédimentaire similaire à la marge Atlantique actuelle. Elle contient les tous premiers témoins du rift ayant donné naissance à l'Océan Iapetus. La zone de Dunnage est constituée de roches volcaniques et sédimentaires océaniques (ophiolites, mélanges, flyschs, roches volcaniques d'arc) représentant ce qu'il reste d'un bassin océanique marginal de l'Ordovicien, originellement situé en bordure de la marge continentale préservée dans la zone de Humber.

En surface, le contact entre les zones de Humber et de Dunnage définit la ligne Baie Verte-Brompton (BBL). Suite à l'orogénèse Taconienne, un régime tectonique dominé par de l'extension crustale a prévalu durant le Silurien et le Dévonien inférieur, et a entraîné la formation d'un ou de plusieurs bassins sédimentaires au sein desquels se sont déposées les roches (conglomérats, grès, calcaires) de la Ceinture de Gaspé (Tremblay, A., et Castonguay, 2002). Par la suite, l'orogénèse Acadienne s'est accompagnée de la mise en place d'intrusions granitiques du Dévonien Moyen qui recoupent la Ceinture de Gaspé

Le grain tectonique appalachien est de forte orientation NE-SW. En plus de traduire des alignements d'origine tectonique, entre les différentes terranes accrétées sur la marge nord-américaine, ces linéaments sont exprimés sous forme de grandes failles majeures. La Faille de la Guadeloupe, la Ligne Brompton Baie-Verte et la Faille de Logan séparent des domaines tectoniques différents, aussi bien sous la forme de linéaments visibles à l'échelle de l'affleurement qu'à l'échelle régionale. Les linéaments à l'échelle kilométrique ont été tracés à partir de l'analyse du DEM de la NASA. Ces structures peuvent être importantes à considérer pour la compréhension de l'écoulement et la recharge des eaux souterraines.

1.4 Élaboration du cadre stratigraphique

Au cours du Cénozoïque, les calottes de glace ont envahi périodiquement l'hémisphère Nord, et en particulier le continent nord-américain. La présence de ces calottes est la résultante de variations climatiques à l'échelle planétaire. Des séquences sédimentaires ont été déposées suite au développement, à la croissance et à la désintégration des Inlandsis. Elles sont caractérisées généralement par des faciès détritiques, des dépôts glaciaires, fluvioglaciaires, glaciolacustres et fluviaux. L'ensemble des sédiments quaternaires observés surtout dans les vallées secondaires de la région représente des événements qui se sont déroulés au cours des derniers 300 à 400 000 ans.

Le Quaternaire des Cantons-de-l'Est est constitué d'une succession de tills, de dépôts glaciolacustres et de sédiments alluviaux. Selon le modèle stratigraphique établi (Lamothe *et al.*, 1992 ; McDonald et Shilts (1971) ; Parent, 1987) le premier événement quaternaire est représenté par des sédiments alluviaux d'âge pré-Johnville, mis en place dans un réseau de drainage normal (i.e. non-obturé par un front glaciaire). Ces sédiments ont été datés à environ 180 000 ans par luminescence optique (Balescu *et al.*, 2000).

La séquence stratigraphique comprend trois tills. Localement, les épaisseurs cumulées peuvent être très importantes et dépasser les 90 m. L'unité de base est représentée par le Till de Johnville, d'âge préSangamonien (Illinoien?), et de composition dite laurentidienne. L'unité glaciaire suivante est le Till de Chaudière, qui date du début de la glaciation wisconsinienne. Ce till est « Appalachien », ayant une composition lithologique essentiellement régionale. Le Till de Lennoxville est le till de surface d'origine laurentienne qui a été déposé lors de la dernière grande avancée glaciaire et il recouvre l'ensemble de la région. Le réseau de drainage étant structuré vers le NW, les avancées et retraits du glacier provoquent la création de lacs glaciaires, ce qui explique que des sédiments laminés glaciolacustres soient présents au sommet et à la base de chaque couche de till. Des conditions normales de drainage, au cours du dernier interglaciaire, sont représentées par les sédiments fluviatiles, lacustres et organiques de la Formation de Massawippi.

La déglaciation finale a mis en place successivement des sédiments fluvioglaciaires et glaciolacustres. L'invasion postérieure de la Mer de Champlain a inondé les basses-terres, sous les élévations d'environ 180 m. Enfin, le réseau fluvial actuel s'est mis en place lors de l'Holocène.

2. Méthodologie

Une cartographie et une modélisation 3D systématique et détaillée des formations superficielles et de la géomorphologie glaciaire et post-glaciaire de l'Estrie s'impose afin d'identifier avec précision les zones potentielles de recharge pour les aquifères de la région. À cette fin, nous procédons aux étapes méthodologiques suivantes : compilation des cartographies existantes, validation des formations superficielles lors de campagnes sur le terrain, photo-interprétation et intégration des données dans les systèmes d'informations géographiques et construction d'une modélisation tridimensionnelle des formations superficielles.

2.1 Les campagnes de terrain

Les travaux de cartographie et de validation pour le bassin-versant de la rivière Saint-François ont été réalisés lors de l'été 2008 et 2009. Les travaux de sédimentologie, de stratigraphie et de géochronologie ont également été accomplis lors de ces campagnes de terrain.

Les campagnes de terrain pour la validation de la photo-interprétation cartographique du bassin-versant de la rivière Saint-François ont débuté lors de l'été 2007. Un grand nombre de nouvelles observations ont été menées afin de valider les travaux préliminaires. Ces campagnes ont permis de confirmer les interprétations et de compléter la cartographie. Plus d'une cinquantaine de sites ont été observés et caractérisés et un grand nombre de gravières, sablières et carrières ont été visitées. Le réseau routier a permis une couverture régionale relativement complète du territoire. Les descriptions morphologiques et les levés lithostratigraphiques ont aussi été effectués lors de ces campagnes de terrain.

Les travaux de sédimentologie, de stratigraphie et de géochronologie ont également été accomplis lors de ces campagnes de terrain. Des séjours dans les secteurs du Vermont et du Maine ont également été réalisés lors de l'automne 2009.

2.2 La photo-interprétation

Cette étape a permis de procéder à un inventaire préliminaire des formes et des dépôts dans les zones qui n'ont jamais été cartographiées. Cette photo-interprétation s'est faite systématiquement à partir de l'analyse de photographies aériennes à l'échelle du 1 : 40 000. Localement, l'échelle du 1 : 15 000 s'est aussi avérée nécessaire. Les photographies aériennes utilisées ont été prises entre les années 1984 et 1992 (les dates des lignes de vol étant variables d'une échelle à l'autre).

2.3 Travaux antérieurs et intégration des données dans les systèmes d'informations géographiques (GIS)

La compilation des travaux existants, les campagnes de terrain et la photo-interprétation ont permis de faire la compilation des éléments ponctuels à cartographier (figure 6). Les polygones des différentes unités géologiques et la géomorphologie ont été transférés et reportés à l'intérieur d'un système d'information géographique (ArcGis 9.3) pour ensuite être cartographiés à une échelle au 1 : 100 000.

La plus grande partie de la vallée a fait l'objet d'importantes campagnes de cartographie réalisées par des équipes de la Commission géologique du Canada, ainsi que le sujet de plusieurs thèses de doctorat et de mémoires de maîtrise pour les secteurs situés dans les Appalaches (tableau 1). Ces travaux

ont été supervisés notamment par William W. Shilts, directeur actuel de l'Illinois State Geological Survey et ainsi que par Barry McDonald, tous deux anciennement à la Commission Géologique du Canada.

TABLEAU 1 COUVERTURE DES TRAVAUX CARTOGRAPHIQUES QUATERNAIRES POUR LE BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS.

Feuillets BNDT :	Sources cartographiques :
21E03	McDonald, B.C., 1969, Surficial Geology of La Patrie-Sherbrooke Area, Québec; Including Eaton River Watershed, GSC, Ottawa, Paper 67-52. Maps 18-1967.
21E04	McDonald, B.C., 1969, Surficial Geology of La Patrie-Sherbrooke Area, Québec; Including Eaton River Watershed, GSC, Ottawa, Paper 67-52. Maps 18-1967.
21E05	McDonald, B.C., 1969, Surficial Geology of La Patrie-Sherbrooke Area, Québec; Including Eaton River Watershed, GSC, Ottawa, Paper 67-52. Maps 18-1967.
21E06	McDonald, B.C., 1969, Surficial Geology of La Patrie-Sherbrooke Area, Québec; Including Eaton River Watershed, GSC, Ottawa, Paper 67-52. Maps 18-1967.
21E10	Shilts, W.-W., 1981, Surficial Geology of Lac Mégantic Area, Québec, GSC, Ottawa; Memoir 397, Map 1494-A.
21E11	Tremblay, G., 1975, Quaternaire, Régions de Drummondville, Dudswell, Scotstown et Coaticook; MRN, Québec, DPV-434.
21E12	McDonald, B.C., 1966, Surficial Geology, Géologie des dépôts meubles Richmond-Dudswell; CGC, Ottawa, Carte 4-1966.
21E13	Chauvin, L., 1979 Géologie des dépôts meubles, Région d'Asbestos-Disraëli, MRN, Québec DPV-716.
21E14	Chauvin, L., 1979, Géologie des dépôts meubles, Région d'Asbestos-Disraëli, MRN, Québec DPV-716.
21E15	Shilts, W.-W., 1981, Surficial Geology of Lac Mégantic Area, Québec, GSC, Ottawa; Memoir 397, Map 1494-A.

21L03	Chauvin, L., 1979, Dépôts meubles de la région de Thetford Mines-Victoriaville, MRN, Québec, DPV-622.
31H01	Cloutier, M., 1982, Géologie et géomorphologie quaternaire de la région de Cowansville-Knowlton-Sutton; UQAM, Montréal, thèse de maîtrise, 143 p. Boissonnault, P., 1983, Géomorphologie et litho-stratigraphie à l'est du lac Memphrémagog. Mémoire de M.Sc., Département de géographie, Université de Sherbrooke, 150 p. Dubé, C., 1983, Géomorphologie quaternaire et déglaciation à l'ouest de lac Memphrémagog. Mémoire de M.Sc., Département de géographie, Université de Sherbrooke, 139 p.
31H08	Lasalle, P., 1982, Documents manuscrits, MER, Québec. Doiron, A., 1981. Les dépôts quaternaires de la région de Granby-Waterloo, Québec, cartographie, sédimentologie et stratigraphie; UQAM, Montréal; Thèse de maîtrise, 100 p.
31H09	McDonald, B.C., 1966, Surficial Geology, Géologie des dépôts meubles Richmond-Dudswell; CGC, Ottawa, Carte 4-1966.
31H10	Lasalle, P., 1982, Documents manuscrits, MER, Québec
31H15	Gadd, N.-R., 1960, Géologie d'Upton, Québec (dépôtsmeubles); CGC, Ottawa; Étude 60-27, Carte 15-1960.
31H16	Tremblay, G., 1975, Quaternaire, Régions de Drummondville, Dudswell, Scotstown et Coaticook; MRN, Québec, DPV-434.
31I02	Gadd, N.R., 1971, Pleistocene Geology of the Central St-Lawrence Lowlands; GSC, Ottawa, Memoir 359 153, Map 1197-A.

La première étape des travaux a consisté à recenser l'ensemble des cartes des formations superficielles déjà existantes réalisées pour ce bassin-versant. Ce travail a été principalement orienté vers des travaux et rapports de la Commission géologique du Canada (CGC) et ainsi que vers des travaux académiques. Dans l'ensemble, la couverture cartographique de cette région est presque complète. Les cartes ont été réalisées par Gadd (1960), McDonald (1966;1967 et 1969), Chauvin (1979), Lasalle (1982), Boissonnault (1983) et Dubé (1983).

Dans ce travail, la cartographie des différentes informations a été réalisée par numérisation à l'écran. Il a donc été nécessaire de numériser des cartes existantes et les photographies aériennes par balayage optique grâce à l'utilisation d'un traceur. Les images « raster » de ces documents ont ensuite été géoréférencées en attribuant les longitudes et les latitudes aux différents points pour les localiser dans l'espace. La superposition des différentes couches représentant les ensembles de dépôts et la géomorphologie permet de distinguer le modelé glaciaire et post-glaciaire. La carte des formations superficielles a été réalisée en utilisant la récente légende de la Commission géologique du Canada (Parent *et al.*, 2010). Les polygones des différentes unités et les symboles géomorphologiques des photographies aériennes ont été transférés et reportés à l'intérieur d'un système d'information géographique pour ensuite être cartographiés à des échelles variables. Dans le cadre de cette cartographie et de cette modélisation, les données d'élévation du sol (STRM) provenait de l'organisation CGIAR-CSI (<http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp>). Ce modèle d'élévation numérique de terrain (DEM; Digital elevation model) est disponible grâce au programme de la NASA (Shuttle Radar Topography Mission). Ces modèles d'élévation numériques ont une résolution de 90 m/pixels et sont réalisés par balayage satellite. Il est intéressant d'observer, grâce aux variations d'élévation par pixel, des particularités ou anomalies locales qu'il convient ensuite d'interpréter. De plus, son incertitude en Z est considérée comme acceptable dans le cadre d'une modélisation régionale. Les traitements et

l'utilisation de ce DEM, permettent de mettre en évidence certaines caractéristiques du paysage jusqu'ici difficilement détectables (anomalies du profil des cours d'eau, dissymétrie des bassin-versants ...) et de déterminer des zones de rupture topographique. Les cartes physiographiques et des linéaments du roc ont été réalisées à partir de ce DEM.

2.4 Cartographie des formations superficielles

Les composantes conservées suite aux simplifications du modèle quaternaire 3D sont les suivantes (tableau2 ; figure 7 et 8) :

TABEAU 2 UNITÉS LITHOSTRATIGRAPHIQUES DU MODÈLE TRIDIMENSIONNEL DE LA SAINT-FRANÇOIS.

Codification de la GSC (Commission géologique du Canada)	Identification
O	Sédiments de tourbière
A	Alluvions (inclus Ap, At)
C	Colluvions
LG	Sédiments lacustres
MGd	Sédiments glaciomarins deltaïques
MGb	Sables et graviers glaciomarins littoraux et pré-littoraux
MGa	Argiles et silts glaciomarins marins
LGd	Sédiments glaciolacustres deltaïques
LGb	Sédiments glaciolacustres littoraux et pré-littoraux
LGa	Sédiments glaciolacustres d'eau profonde
G	Sédiments fluvioglaciaires (Gx/Gs ;Graviers et sables grossiers)
T	Sédiments glaciaires (Tm, Tc, Tr, Trm, Tf)
Q	Formations quaternaires anciennes (incluant les sédiments Gayhurst)
R	Socle Rocheux

Figure 7 Cartographie des formations superficielles.

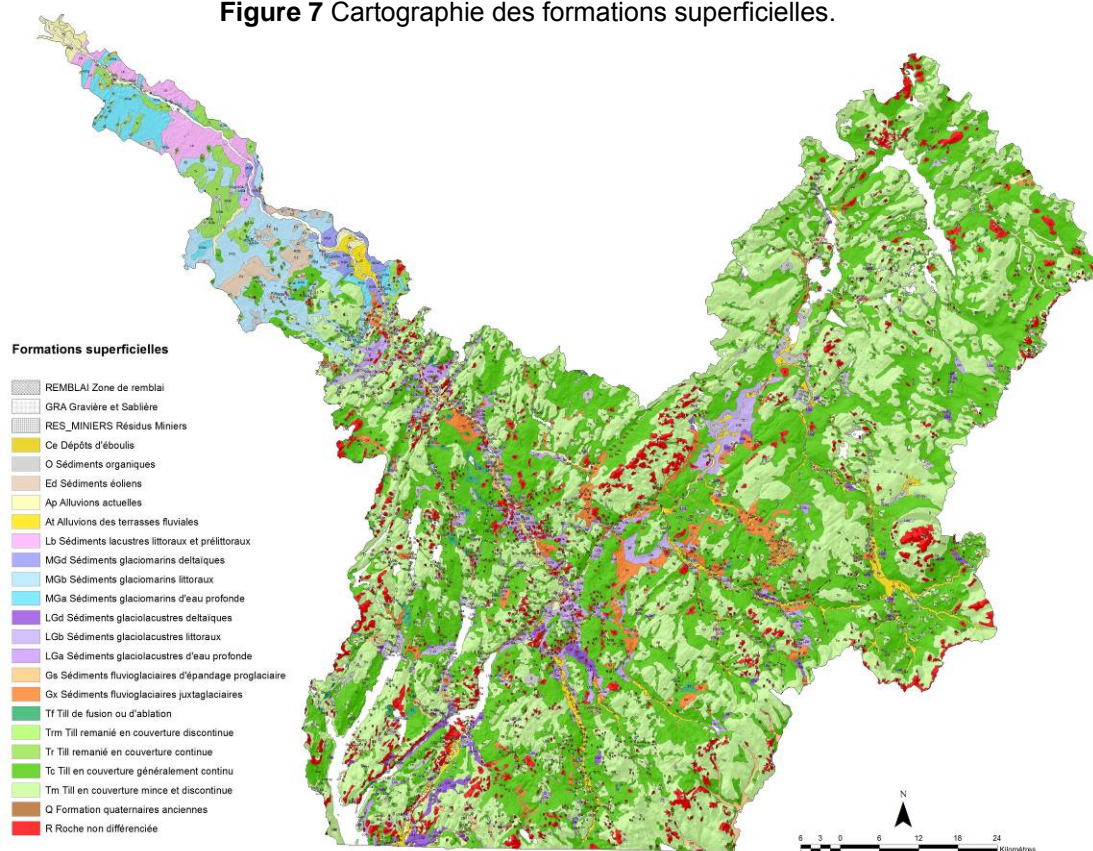
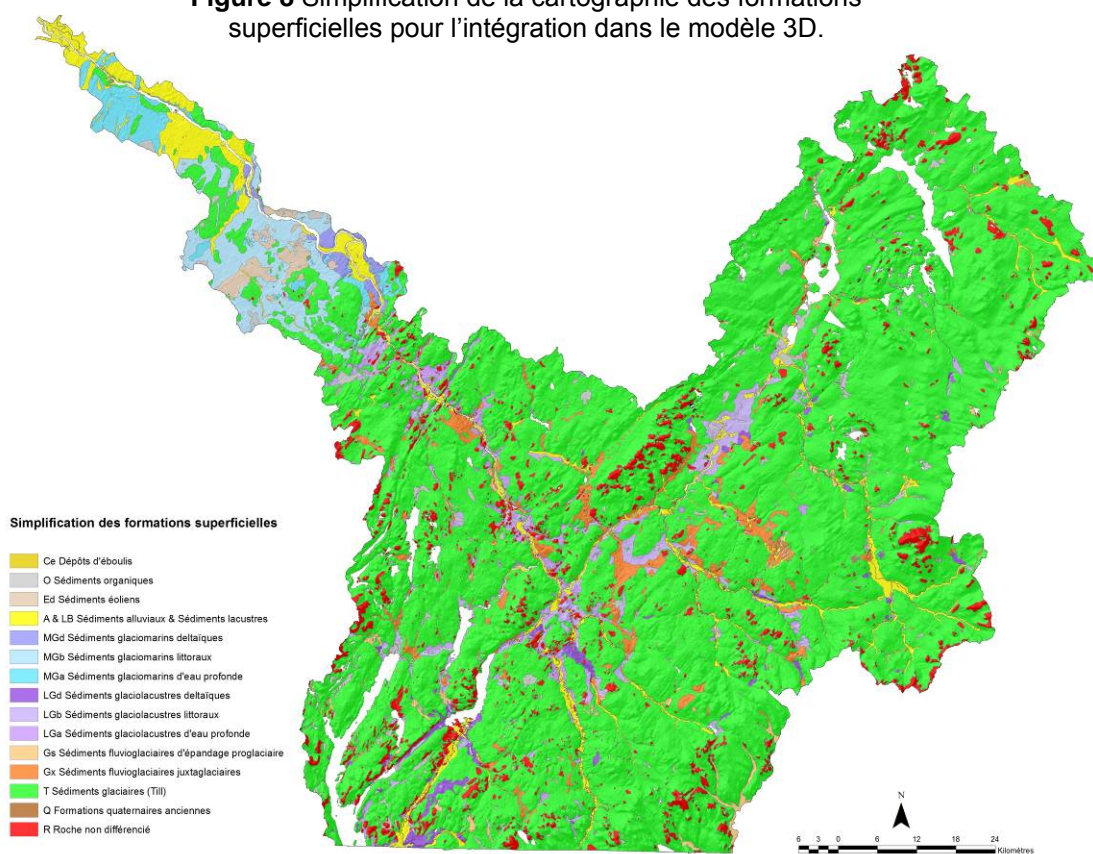


Figure 8 Simplification de la cartographie des formations superficielles pour l'intégration dans le modèle 3D.



3. Les unités stratigraphiques de la rivière Saint-François et leurs implications hydrogéologiques.

Des sédiments quaternaires recouvrent l'ensemble du bassin-versant de la rivière Saint-François. L'épaisseur moyenne des sédiments quaternaires pour l'ensemble de ce territoire est de quelques mètres. Toutefois, les épaisseurs peuvent dépasser les 100 mètres au sein d'anciennes vallées enfouies (notamment dans le secteur d'East-Angus), beaucoup plus larges que les vallées récentes de surface.

3.1 Le roc (R)

Le rôle hydrogéologique du substratum rocheux est en relation avec sa proximité à la surface. Pour un même sédiment, plus l'épaisseur totale de sédiments au roc est faible, plus l'aquifère fracturé est près de sa recharge et plus il est vulnérable. Cette unité est composée d'affleurements rocheux et roc à mince couverture de sédiments meubles (moins de 30 cm). Il a été cartographié et modélisé à partir de données de forages, à partir d'observations sur les photographies aériennes et par les observations terrains.

3.2 Formations quaternaires anciennes (Q)

Les sédiments antérieurs à la dernière glaciation (i.e. pré-Wisconsinien supérieur) sont surtout situés le long des talwegs des vallées régionales. L'épaisseur de ces différents faciès varie de quelques décimètres à plus de 60 m environ (Appendice 1). Ils peuvent avoir une importance hydrostratigraphique capitale, notamment lorsque des sédiments granulaires sont présents sous une couche aquitard ou aquiclude (till, varve). La séquence pré-Johnville surmonte une surface altérée (d'âge probablement tertiaire) au sommet du roc, et est constituée de sables et graviers fluviaux et de dépôts glaciolacustres montrant

l'avancée de la glaciation de Johnville. Cette unité perméable pourrait constituer un aquifère enfoui dans certaines vallées. Le Till de Johnville, unité de till à la base, et les sédiments de Massawipi, constitués de sables et graviers, sont des unités observées occasionnellement au fond de certaines vallées. Le rôle du Till de Johnville est probablement celui d'un aquiclude, tandis que les faciès sableux de Massawipi pourraient, à certains endroits, former un aquifère enfoui s'ils sont rechargés par la surface ou par l'aquifère fracturé. Cependant, cette unité sableuse et granulaire est probablement trop mince pour être importante. Le till de Chaudière est une unité d'épaisseur variable retrouvée à plusieurs endroits, surtout au fond des vallées, qui forme une couche aquiclude.

3.2.1 Sédiments du lac proglaciaire Gayhurst

Les sédiments de Gayhurst forment une couche d'une épaisseur souvent importante (dépassant parfois les 60 m), qui sont en majorité constitués de varves située sous le till de surface, et sont donc plutôt aquicludes. Dans la plupart des vallées de la région à l'étude, surtout dans la partie sud du bassin-versant, les sédiments de Gayhurst contribuent à former une couche protectrice des aquifères fracturés régionaux. Toutefois, en certains endroits, les sédiments de Gayhurst sont constitués de sables, à conductivité hydraulique plus élevée que les varves. Ces unités pourraient constituer un aquifère enfoui s'ils sont rechargés par la surface ou par l'aquifère fracturé. Il est toutefois difficile de les modéliser en détail en raison du manque de données de forage et de leurs discontinuités latérales.

3.3 Till de surface (Lennoxville/Gentilly; T, Tm, Tc, Tr, Trm et Tf)

L'unité hydrostratigraphique la plus fréquemment retrouvée dans cette région est le till de surface (Appendice 2). Cette unité est généralement composée de blocs

et graviers, et d'une matrice silteuse (comprenant environ 25% argile, 50 % silt et 25% sable; Shilts, 1981). Les shales, schistes et siltstones appalachiens sont facilement réduits en particules fines par l'érosion glaciaire, et produisent une matrice silteuse, contrairement aux roches granitiques du Bouclier canadien qui, par exemple, forment des matrices de till beaucoup plus sableuses. À certains endroits, en particulier dans les vallées, la matrice du till est silto-argileuse en raison de l'incorporation de varves du Gayhurst et peut atteindre des épaisseurs dépassant les 40 m. La teneur en cailloux cristallins précambriens varie de 1 à 3% pour la partie appalachienne du bassin-versant. Dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, la surface du till de Gentilly a été remaniée par les vagues de la Mer de Champlain. Le lessivage des particules fines comprises dans la matrice du till fait en sorte que ce dernier est plus perméable que le till non remanié.

3.4 Dépôts fluvioglaciaires (G; Gx/Gs)

Les sédiments fluvioglaciaires sont assez répandus à l'échelle de ce bassin-versant et peuvent atteindre des épaisseurs de 40 m (Appendice 3). Ils sont subdivisés en deux unités selon leur mode de mise en place. Lorsque le corps sédimentaire est déposé par des eaux en milieu sous-glaciaire ou au contact de la glace (Gx), ils sont surtout constitués de sables et graviers stratifiés et déformés. Ces sédiments sont mis en place par les eaux de fonte au contact ou à proximité du glacier. Les unités situées sous la limite marine ou glaciolacustre ont généralement été remaniées par les vagues et les courants lors de la submersion ou de l'exondation. Les eskers sont très nombreux sur l'ensemble sur l'ensemble de la zone d'étude et mais ont été considérablement exploités depuis le dernier siècle. Dans le secteur appalachien de la région d'étude, le territoire est façonné par une série de moraines cartographiées par Gadd, McDonald et Shilts (1972). Les sédiments associés à ces moraines sont liés à une récession progressive d'un front glaciaire actif qui abandonne des eskers et des amas fluvioglaciaires frontaux, dans un environnement contrôlé par

l'élévation des lacs d'obturation. Les principaux complexes morainiques sont localisés dans les secteurs de Dixville, East-Angus, Ham, Cherry-River et au nord de La Patrie. Les dépôts fluvioglaciaires déposés en milieu proglaciaire (Gs) forment des cônes d'épandage sous-aquatique et sont souvent constitués de graviers, de sable et/ou de silt et un peu de till ou de diamicton.

3.5 Dépôts glaciolacustres (LG; LGa/LGb/LGd)

Les sédiments mis en place dans le lac proglaciaire Memphrémagog (McDonald, 1969 et Parent, 1987) sont en partie constitués de sables en couverture, qui sont en général de conductivité hydraulique assez forte. Les dépôts associés au faciès glaciolacustre d'eau profonde (LGa) se présentent comme des rythmites présentant une alternance régulière de lits silteux situées dans les dépressions plus profondes du paléo-bassin (Appendice 4). Les sédiments littoraux et pré-littoraux (LGb) se présentent comme des sables, des sables silteux stratifiés, des graviers et des blocs formant des cordons littoraux (Appendice 5). Leur élévation est directement liée à l'abaissement du niveau des eaux glaciolacustres par l'abandon de seuils topographiques s'abaissant vers l'aval. Les sédiments deltaïques (LGd) associés à cet environnement sédimentaire sont constitués de silts, de sables et graviers stratifiés formant des accumulations tabulaires (Appendice 6). Ces sédiments ont été mis en place par les eaux de fonte et déposés à l'embouchure des rivières lors de la régression des plans d'eau glaciolacustre.

3.6 Dépôts glaciomarins (MG; MGa/MGb/MGd)

Les sédiments glaciomarins ont été mis en place lors de l'épisode de la Mer de Champlain. Ils sont présents dans la partie nord-ouest de la région à l'étude, dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. Ils sont fossilifères, contenant

plusieurs espèces typiques des mers arctiques comme par exemple : *Hiatella arctica*, *Macoma balthica*, *Balanus hameri*, *Portlandia arctica*. Les sédiments associés au faciès d'eau profonde sont composés de silt argileux et d'argile silteuse, massifs et parfois laminés (MGa). La mise en place des sédiments fins se fait généralement par décantation durant la phase d'inondation glaciomarine. Leur épaisseur peut varier dépendamment des dépressions et de l'accommodation et atteindre plus de 30 m (Appendice 7). L'importance hydrostratigraphique des argiles marines est notable, puisqu'elles sont très imperméables et forment une couche protectrice des aquifères fracturés. L'infiltration de l'eau de surface vers l'aquifère régional est donc très limitée. En surface, ils sont majoritairement constitués de sables et graviers, qui forment une couche perméable qui repose sur les sédiments antérieurs. Des argiles marines sous-jacentes sont présentes régionalement et parfois recouvertes par les sédiments littoraux (MGb) et par les sédiments deltaïques (MGd). Les sédiments littoraux et pré-littoraux sont mis en place en eau peu profonde et généralement représentés par des cordons littoraux (Appendice 8). Les sédiments deltaïques et prodeltaïques sont peu répandus à l'échelle du bassin-versant de la Saint-François. Ils sont mis en place à l'embouchure des cours d'eau qui se déversent dans la Mer de Champlain (Appendice 9).

3.7 Dépôts alluviaux (Al; Ap/At), Dépôts lacustres (Lg), Dépôts d'éboulis (Ce), Sédiments éoliens (Ed)

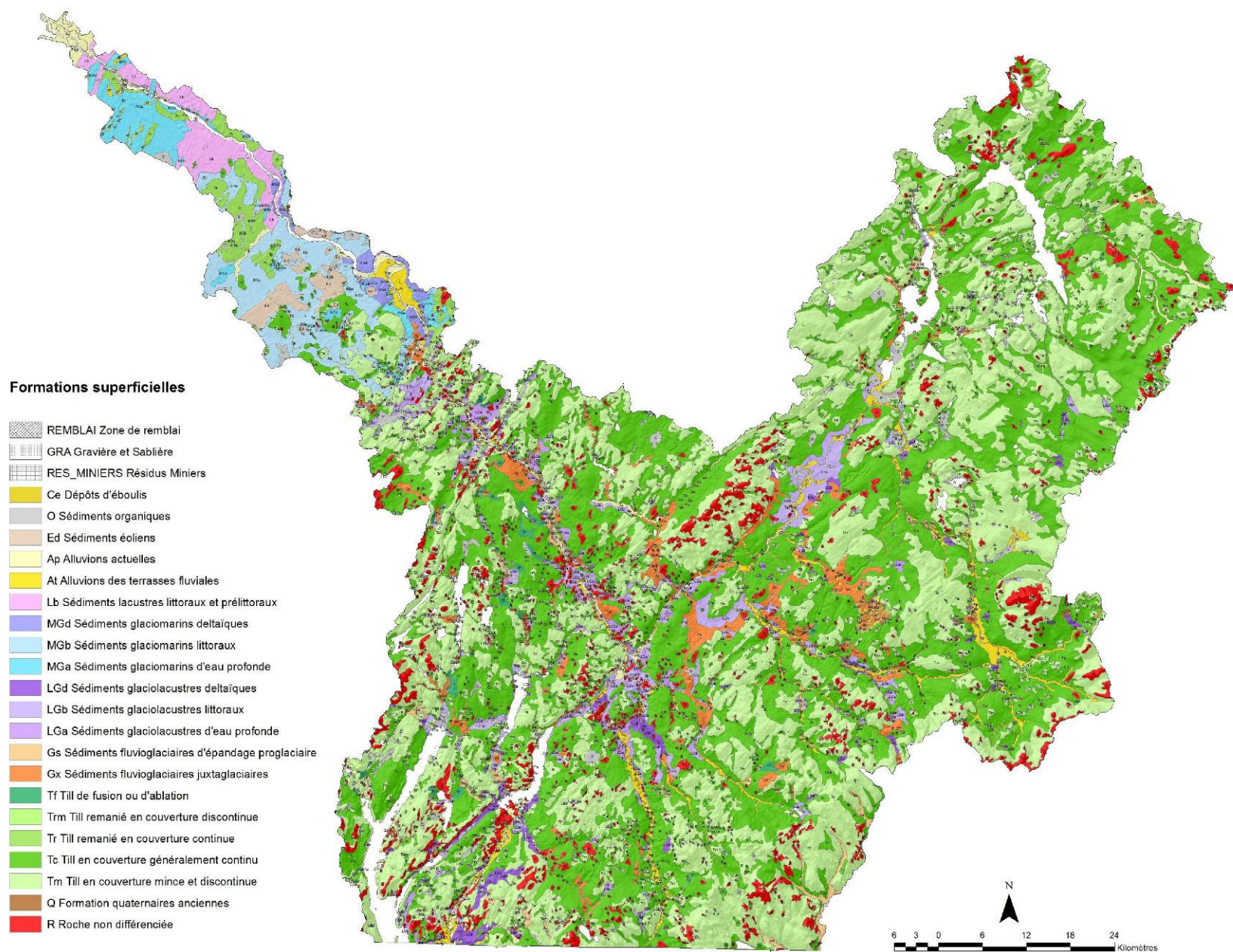
Dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, les sédiments littoraux et pré-littoraux (Lb) associés au Lac à Lampsilis, événement lacustre post-Mer de Champlain, ils se présentent comme des sables, des silt sableux et des sables graveleux mis en place en eau peu profonde lors de la phase plénilacustre et lors de l'exondation. Les dépôts d'éboulis (Ce) se présentent généralement comme des blocs anguleux à subanguleux gélifractés;formant des cônes ou des tabliers au pied d'escarpements rocheux. Les sédiments éoliens (Ed) représentent des

sables fins à stratification oblique diffuse mis en place par le vent sous formes de dunes formées à la surface des sédiments littoraux, alluviaux ou deltaïque. La vallée de la rivière Saint-François et la plupart des vallées confluentes fluviales sont recouvertes par une couche de sédiments alluviaux, sur des épaisseurs pouvant atteindre plusieurs mètres (Appendice 10). Ils ont été mis en place dans les plaines alluviales actuelles (Ap et At). La granulométrie de ces dépôts est sableuse, sablo-graveleuse ou silteuse. Ces dépôts alluviaux correspondent généralement à l'aquifère de surface.

3.8 Dépôts organiques (O)

Les dépôts organiques sont surtout constitués d'accumulations de tourbes à sphaigne, d'éricacées et de débris végétaux. Présents sur l'ensemble de la région à l'étude, ils apparaissent surtout dans les dépressions topographiques mal drainées et aux abords des lacs (Appendice 11). Ils sont déposés dans des milieux palustres à plan d'eau ouvert (étangs) et les épaisseurs de ces dépôts peuvent varier de 1 à 10m.

Figure 9 Cartographie des formations superficielles.



4. Modélisation tridimensionnelle des sédiments quaternaires du bassin-versant de la rivière Saint-François.

Le développement accru des systèmes d'information géographiques (SIG) et des logiciels de géomodélisation depuis une dizaine d'année a permis d'aborder la géologie du Quaternaire, la géomorphologie et l'hydrogéologie à partir de nouvelles approches. La prise en compte de la troisième dimension autorisée par l'emploi de modèles d'élévations numériques de terrain avec le couplage des données de sous-surface permet non seulement de modéliser le relief, d'effectuer des traitements géométriques plus rigoureux qu'en 2D (repérage de plans de failles, regroupements en familles de failles, morphologie des bassin-versants, étude du réseau hydrographique) mais aussi de mettre en évidence l'architecture des unités géologiques et des structures de sous-surface jusqu'ici difficiles à détecter et à caractériser. La présence des nombreuses vallées enfouies situées dans la Beauce et dans les Cantons-de-l'Est en est un bel exemple (figure 10).

La modélisation géologique tridimensionnelle a pour objet de fournir une représentation géoréférencée en format digital de la géométrie et, s'il y a lieu, des propriétés des unités géologiques d'une région donnée et ce, pour diverses utilisations (Ross, 2005). Ainsi, ce type de modélisation 3D de sous-surface, particulièrement en ce qui concerne les sédiments quaternaires, s'avère un outil très efficace afin de quantifier l'architecture stratigraphique et les différents paramètres hydrogéologiques notamment pour la recharge des nappes phréatiques. Ce modèle définit l'épaisseur et la distribution stratigraphique des dépôts meubles suivant le découpage du territoire sous forme de maillage de 250m x 250m x 1m. Le modèle décrit l'ensemble des sédiments rencontrés de la surface au roc incluant leur profondeur relative pour les coordonnées X et Y au centre de chaque maille. Malgré l'incertitude que représente ce type d'analyse

spatiale, la disposition proposée des sédiments quaternaires apparaît comme suffisamment précise pour des modèles hydrogéologique 3D.

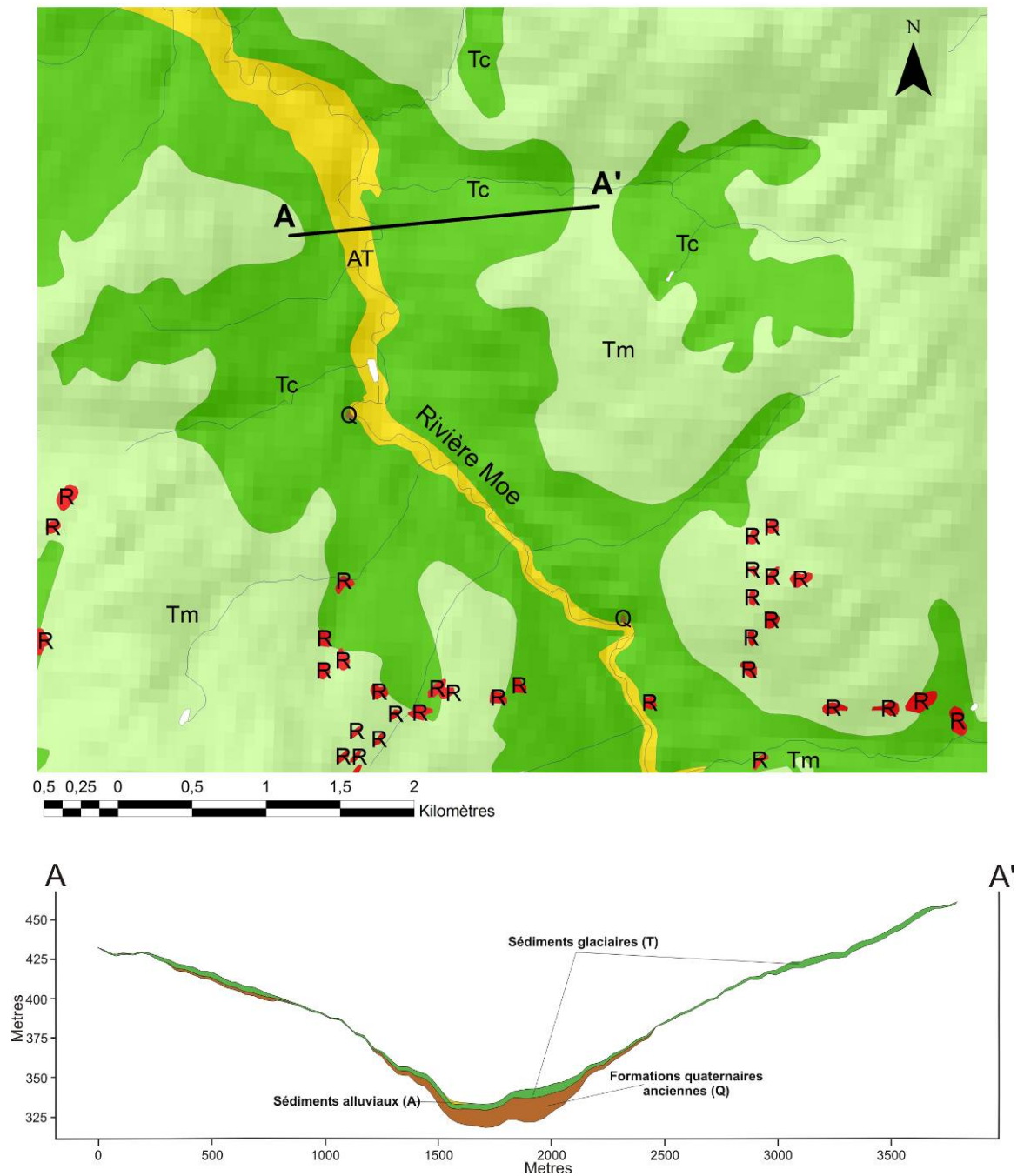


Figure 10 Représentation 2D de la stratigraphie de la rivière Moe, Québec.

4.1 Les objectifs spécifiques de la modélisation géologique 3D

- 1) Cartographier les formations superficielles à l'échelle du bassin-versant de la rivière Saint-François.
- 2) Définir la nature, l'origine et l'architecture stratigraphique des unités quaternaires. Un regard particulier sera porté aux vallées tributaires de la rivière Saint-François puisqu'une importante épaisseur de sédiments antérieurs à la dernière glaciation a pu être préservée.
- 3) Construire, à l'aide d'outils informatiques, un modèle tridimensionnel représentant la topographie du roc et l'architecture stratigraphique des unités quaternaires à l'échelle régionale.

4.2 Méthodologie

La méthode de modélisation tridimensionnelle choisie et utilisée est basée sur l'intégration des cartes 2D des formations superficielles de surface et de données d'épaisseurs (figure 11). Le calcul des épaisseurs est obtenu par l'interpolation des données primaires (forages archivés, données géotechniques, affleurements rocheux, coupes stratigraphiques, profils sismiques, GPS et données de contraintes) de diverses origines. Les présents travaux ont tenu compte également d'un modèle géologique conceptuel de la région d'étude. La méthode utilisée s'inspire des travaux réalisés dans le secteur de la rivière Châteauguay par le mémoire de Tommy Tremblay (2007) et la thèse de Martin Ross (2005) pour le secteur de Mirabel. Cette modélisation permet également de consolider l'élaboration de la paléogéographie de cette région. Le traitement des données sera réalisé à partir du logiciel Target de Geosoft. Ce logiciel permet une intégration de données variées et possède une capacité de calcul adéquate pour ce type de modélisation.

Étapes de réalisation pour le passage des données dans un environnement 2D à 3D :

- 1-Acquisition et compilation des données de surface et de sous-surface.
- 2-Standardisation et interprétation des données
- 3-Élaboration du modèle conceptuel
- 4-Modélisation géologique tridimensionnelle
- 5-Visualisation des données géologiques (Coupes stratigraphiques, cartes géologiques, Grid, Voxel)

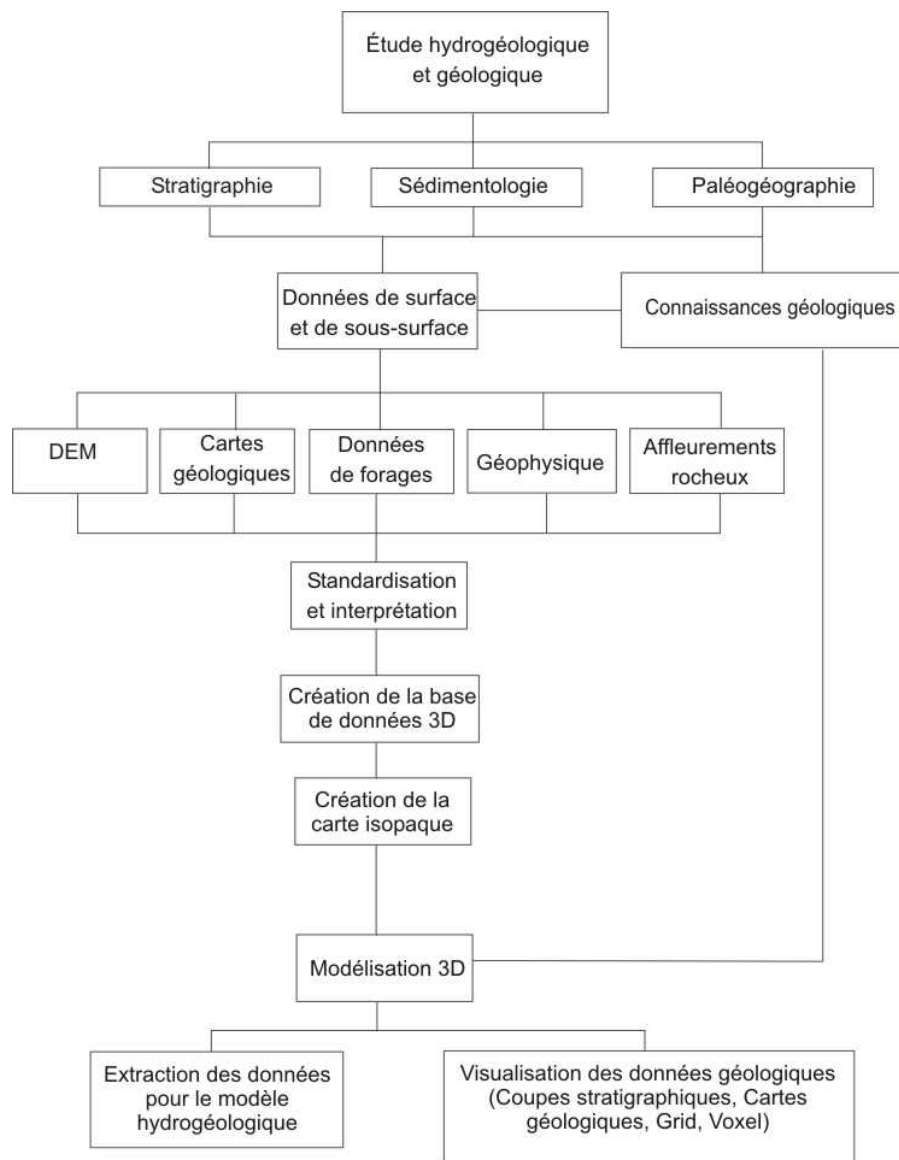


Figure 11 Organigramme des étapes de réalisation du modèle tridimensionnel géologique.

4.2.1 Acquisition et compilation des données de surface et de sous-surface.

La réalisation d'un modèle géologique tridimensionnel repose sur la disponibilité et la qualité des données de sous-surface. Seules les données de haute fiabilité devraient être incluses dans le modèle. Par conséquent un indice de fiabilité a été attribué pour chaque source de forages (selon des critères de localisation et de descriptions lithostratigraphiques des puits et des forages) afin d'évaluer et de quantifier le niveau d'incertitudes du modèle (tableau 3).

TABLEAU 3 CRITÈRE DE VALIDATION DE LA BASE DE DONNÉES DU MODÈLE 3D (ROSS, 2005)

Indice de fiabilité	Cote de fiabilité	Critère	Type de données
5	Très élevée	Les logs originaux des forages, les rapports et les échantillons sont disponibles. La description des logs de forages est très détaillée et validé. La localisation des forages s'avère bonne.	Forages géotechniques et stratigraphiques
4	Bonne	Les logs originaux des forages et les rapports sont disponibles. Quelques localisations de forages ont été validées lors des campagnes de terrain.	
3	Acceptable	Les logs originaux de forages ne sont pas disponibles. Il n'y a pas de contradiction apparente avec les données fiables limitrophes.	Forages géotechniques et puits

2	Faible	Un problème avec le forage ou le puit ; mauvaise localisation ou mauvaise description lithostratigraphique	Puits
1	Mauvaise	Plusieurs problèmes avec le forage ou le puit	Puits

La compilation des données primaires a été réalisée vers plusieurs sources et bases de données :

Données de forage du Ministère des Transports du Québec et du Ministère de l'Environnement du Québec

- Une collecte des différentes données de forages du Ministère des transports du Québec et du Ministère de l'Environnement du Québec a été réalisée lors de l'hiver 2008. Les données compilées proviennent des différents relevés compilés lors des travaux routiers en Estrie (FORLOG, GEOTECH, BDG, SOMMAIRE). Ces 536 forages représentent d'excellentes données en terme de descriptions stratigraphiques.

Données de forage provenant des travaux de Rénald McCormack, 1982

- Rapport hydrogéologique réalisé par Rénald McCormack visant la caractérisation hydrogéologique de la rivière Saint-François. Ce document contient 325 sondages comportant de bonnes descriptions stratigraphiques.

Données de forage provenant des travaux de Georges Simard, Gouvernement du Québec, Ministère des richesses naturelles, direction

générale des mines. (Étude hydrogéologique du bassin de la rivière Eaton, 1970, Levé hydrogéologique, East-Angus, 1971)

- Georges Simard a réalisé des études hydrogéologiques pour le secteur des bassins de la rivière Eaton et du secteur de la ville d'East-Angus. Le rapport de la rivière Eaton contient 67 sondages stratigraphiques et 38 sondages sismiques. Il a aussi réalisé des interprétations stratigraphiques en concevant des coupes topogéologiques. Le rapport du secteur East-Angus contient 9 sondages stratigraphiques.

Données de sondages compilés et provenant des archives du MDDEP (Ministère du Développement durable, de l'Environnement e des Parcs).

- Le MDDEP est dépositaire des différentes données touchant la ressource en eau. Ainsi un grand nombre de données de sondages (739 sondages, puits et forages) n'ayant jamais été compilées dans le système SIH (Banque des puisatiers du Québec) ont été compilées pour ce secteur visé. Ces données provenaient essentiellement de compagnies privées, d'études antérieures du Ministère de l'Environnement.

Données de la banque des puisatiers du Québec (SIH)

- Ces données sont disponibles sur le site du Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs du Québec (www.menv.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm). Ces données sont très nombreuses (18 724 données pour l'ensemble du bassin-versant) mais apportent très peu d'information sur la lithostratigraphie et la granulométrie des sols (elles sont très sommaires). Leur densité importante a toutefois été très utile afin de calculer l'épaisseur totale

des sédiments à l'échelle du bassin-versant mais également pour combler des secteurs sans données de forages.

Données de forage de la Commission Géologique du Canada (GSC)

- Des données (77 forages) provenant de la réserve de la Commission Géologique du Canada ont aussi été compilées dans la base de données. Ces forages ont été réalisés et interprétés notamment par William W. Shilts et Sharon Smith dans les années 80 principalement dans le secteur de la Haute-Chaudière. Ces forages stratigraphiques contiennent des descriptions lithostratigraphiques les plus détaillées du projet.

Données stratigraphiques académiques (Barry McDonald (1967), Michel Parent (1987), Armand Larocque (1999)).

- La compilation des levés de coupes stratigraphiques décrites dans le cadre de travaux académiques a été particulièrement utile. Les principales thèses complétées dans ce secteur ont été réalisées par respectivement Barry McDonald (1966), Michel Parent (1987) et Armand Larocque (1999). Ces données s'avèrent très importantes pour l'interprétation des différentes unités lithostratigraphiques.

Données stratigraphiques académiques provenant de l'Université du Québec à Montréal (UQAM).

- Des équipes de l'UQAM (dans le cadre du cours de cartographie et géomorphologie des dépôts meubles; SCT-6820) sous la supervision de Martin Roy et de Michel Lamothe ont réalisé des travaux cartographiques systématiques pour les régions de Weedon, La Patrie/Mont Mégantic et Coaticook. Un grand nombre de données

stratigraphiques ont été intégrés au modèle géologique de la rivière Saint-François. Plus récemment, dans le cadre d'une thèse de doctorat (Caron, en cours), 39 coupes stratigraphiques ont été analysées intégrés aux présents travaux.

Forages d'exploration minière pour le secteur de la rivière Moe, Géophysique G.P.R International Inc., (1986)

- La présence d'or dans les graviers de la rivière Moe a attiré l'attention de plusieurs compagnies depuis le début du siècle. Des travaux de prospection ont été entrepris en 1986 afin de réaliser une campagne de forages. Ce rapport contient 18 forages avec description détaillée des unités lithostratigraphiques. La profondeur des trous varie entre 5,8 et 38,7 mètres.

Affleurements rocheux

- Les affleurements rocheux ont été compilés et numérisés dans ArcGIS 9.3 à partir des différentes cartes géologiques compilées sur l'interface de SIGEOM du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (région couverte notamment par la carte-compilation de Slivitzky et Saint-Julien, 1987) et des données compilées au GPS lors des campagnes de terrain. Ils sont au nombre de 35 765 données.

DEM (Modèle d'élévation numérique)

- Les modèles d'élévation numérique utilisés dans le cadre de cette modélisation sont les produits SRTM de la NASA (<http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp>). Ce modèle d'élévation numérique a une résolution de 90 m par 90 m pour chaque maille. La Commission Géologique du Canada a aussi fourni un DEM avec une résolution de

30 m par 30 m pour chaque maille pour le secteur du bassin-versant de la rivière Chaudière.

Cartes des formations superficielles (Compilation des cartes sur les formations superficielles du bassin-versant de la rivière Saint-François; Caron, 2010)

Les données de la répartition des formations superficielles essentielles à la modélisation tridimensionnelle des sédiments proviennent des cartes 2D réalisées aussi dans le cadre de ce projet.

TABLEAU 4 CARACTÉRISATION DES SOURCES DE DONNÉES MULTIPLES

Type de données		Quantité	Commentaires	Facteur de fiabilité
Affleurements rocheux numérisés		35 765	Données linéaires qui ont été numérisés et intégré dans le logiciel SIG (ArcGIS 9.3).	5
Forages interprétations stratigraphiques		3361	Principales données de forages interprétées et utilisées pour la construction de l'architecture du modèle 3D des dépôts.	5 / 4 / 3
Travaux académiques (Coupes stratigraphiques)	Barry McDonald (1969)	19	Données stratigraphiques des coupes généralement localisées le long des rivières.	5
	Michel Parent (1987)	18	Données stratigraphiques des coupes généralement localisées le long des rivières.	5

	Armand Larocque (1991)	49	Données stratigraphiques des coupes généralement localisées le long des rivières.	5
	Olivier Caron (2011)	39	Données stratigraphiques des coupes généralement localisées le long des rivières.	5
Transport Québec (MTQ)		536	Données de forages	4
Rénald McCormack		325	Données de forages	3
Forages stratigraphiques de la Commission GSC		42	Données de forages	5
Georges Simard		Sondages : 76 forages Sismiques : 38 sondages sismiques	Données de forages	3
Forages exploration minière, Rivière Moe		18 forages	Données de forages	4
MDDEP (Compilation)		739 sondages et forages	Données de forages	2 / 3
SIH		18 724 forages	Données linéaires	1 / 2
Données topographiques (Modèle d'élévation numérique ; STRM)			Données matricielles de surface ; résolution : 90 x 90 m	
Cartes géologiques des dépôts de surface			Données vectorielles de surface divisées en 24 unités géologiques et simplifiées en 15 unités géologiques pour le modèle 3D.	

4.2.2 Standardisation et interprétation des données

L'intégration des différentes sources de données peut s'avérer parfois difficile dans les différentes plateformes de modélisation 3D. Il a donc été nécessaire d'apporter plusieurs modifications afin de standardiser les données. La première étape a consisté à simplifier et uniformiser la nomenclature des unités lithostratigraphiques définies et utilisée par la Commission géologique du Canada (GSC). Les différentes unités qui caractérisent les dépôts glaciaires (Till) et les dépôts fluvioglaciaires (Gs/Gx) ont été regroupées. Il en a été de même pour les sédiments alluviaux (A), les sédiments lacustres associés au Lac à Lampsilis (Lb), les dépôts d'éboulis (Ce) et les sédiments éoliens (Ed). Les composantes cartographiques conservées suite aux simplifications du modèle quaternaire 3D sont au nombre de 12 comparativement à la carte des formations superficielles qui est composé de 24 unités (Tableau 5).

TABLEAU 5 UNITÉS LITHOSTRATIGRAPHIQUES DU MODÈLE TRIDIMENSIONNEL DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS.

Abréviation	Identification
O	Matière organique
A_Ed_Ce_C_Lb	Alluvions (inclus Ap, At) Colluvions (C) Sédiments lacustres (Lb)
MGd	Sédiments glaciomarins deltaïques
MGb	Sables et graviers glaciomarins littoraux et pré-littoraux
MGa	Argiles et silts glaciomarines

LGd	Sédiments glaciolacustres deltaïques et prodeltaïques
LGb	Sédiments glaciolacustres Littoraux et pré littoraux
LGa	Sédiments glaciolacustres d'eau profondes
Fg(Gx/Gs)	Sédiments fluvioglaciaires (Graviers et sables grossiers)
T (Tf, Trm, Tr, Tc, Tm)	Sédiments glaciaires (Till)
Q	Formations quaternaires anciennes
R	Substratum rocheux

4.3 Modèle conceptuel de la stratigraphie quaternaire

Le modèle conceptuel représente la succession lithostratigraphique et hydrostratigraphique des unités modélisées de même que la topographie du sol. Dans le contexte régional du bassin-versant de la rivière Saint-François, le modèle conceptuel permet une meilleure intégration schématique et géométrique de l'architecture des différentes unités. Des coupes topo-géologiques ont été générées afin d'améliorer la compréhension régionale de la géologie (Appendices 12 à 22).

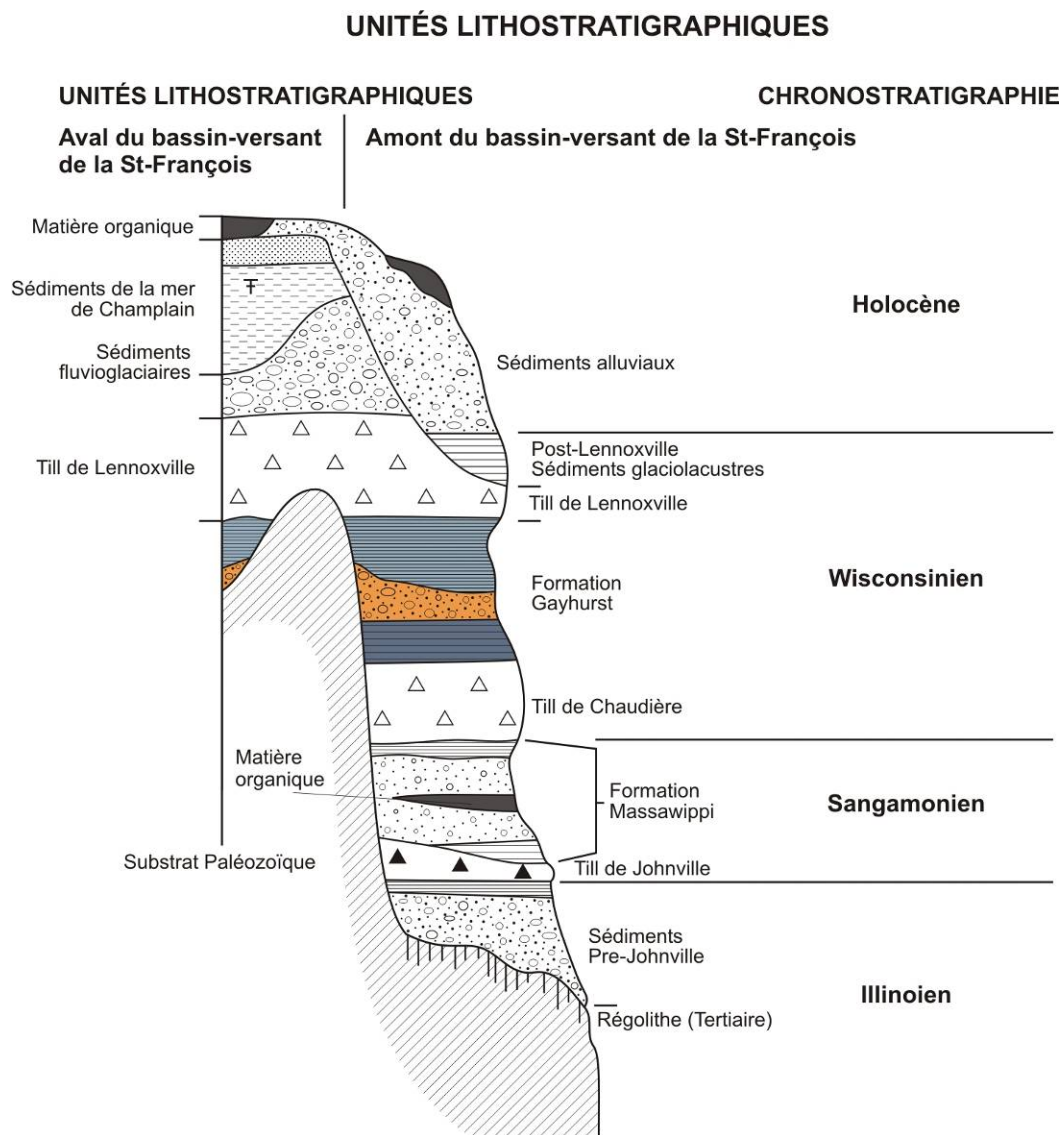


Figure 12 Coupe stratigraphique synthèse des vallées tributaires à la rivière Saint-François.

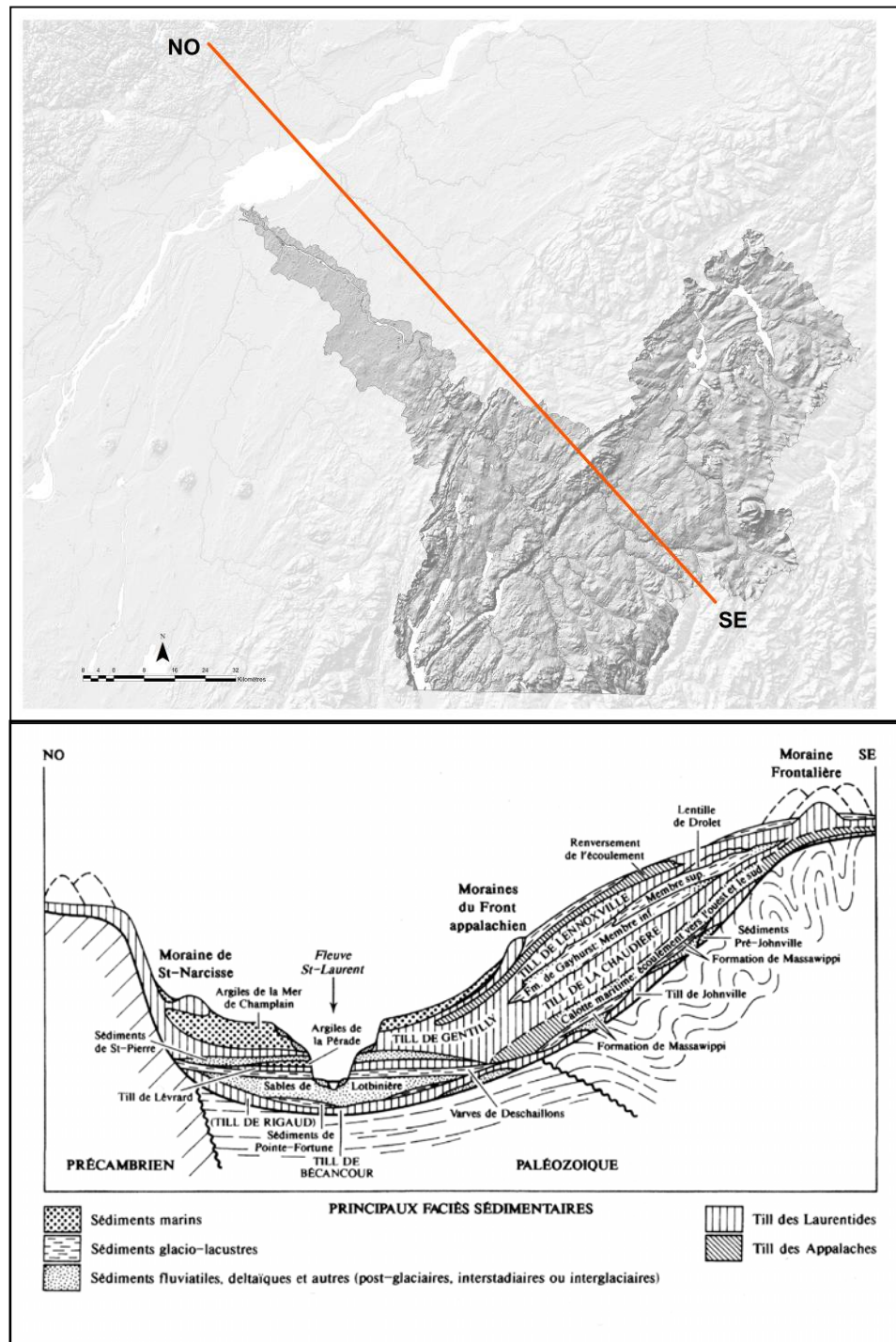


Figure 13 Modèle conceptuel de la stratigraphie quaternaire à travers le Québec méridional (tiré de Pagé, 1999; Modifié de Shilts, 1981 et de Lamothe et al., 1992).

4.4 Modélisation

L'importation des données a été réalisée à l'aide de différents logiciels de système d'information géographique (SIG). Conséquemment, les étapes de cartographie, d'intégration, de standardisation et d'interprétation des données ont été réalisées à l'aide des logiciels de MapInfo 9.0, ArcGIS 9.3 et de Vertical Mapper 3.0. Dans un premier temps, les données et les informations ont été compilées dans une base de données respectant les informations originelles. Ces données sont en général peu ou pas uniformisées et elles peuvent avoir été manipulées et transférées plusieurs fois, augmentant ainsi les imprécisions. Par la suite les données ont été insérées, optimisées, simplifiées et interprétées selon une nomenclature et une charte standard qui permettait d'uniformiser l'ensemble des données primaires (Ross, 2005). Les données de forages ont également été analysées et classées selon une série de critères de fiabilité afin de quantifier les incertitudes du modèle 3D. De plus, dans biens des cas, la majorité des forages et des puits n'atteignent pas le roc. Une partie du bassin-versant est donc sous-représentée et la topographie du substratum rocheux est difficile à détecter. La présente recherche comporte tout de même beaucoup de données de qualité atteignant le roc réparties de façon quasi-uniforme et pour lesquelles l'accès au format original est encore possible.

L'approche préconisée visait le passage de l'information en 1D (forage), vers une compréhension en 2D, via un modèle conceptuel et des coupes topogéologiques, puis à une interpolation des coupes 2D pour former un modèle 3D. La modélisation tridimensionnelle des données a été réalisée à l'aide du logiciel de géomodélisation Target de Geosoft. Ce logiciel développé pour répondre aux besoins de la modélisation géologique a permis de finaliser l'analyse tridimensionnelle. Le principal avantage de cette plate-forme 3D est l'utilisation commune avec ArcGIS 9.3 (ESRI). Il devient donc intéressant de travailler dans le même environnement numérique pour les étapes de cartographie vectorielle et de modélisation 3D en mode matricielle.

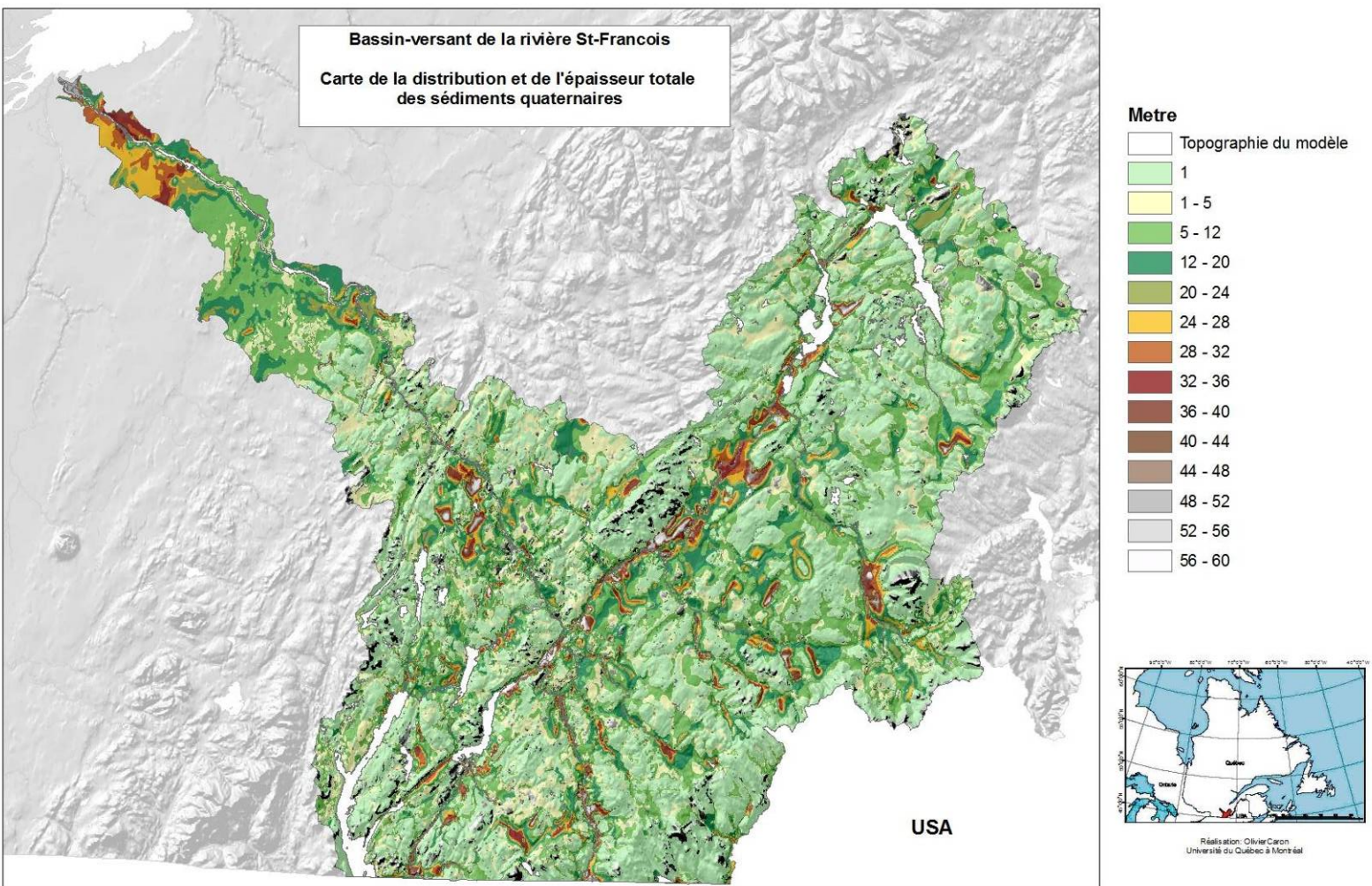
4.4.1 Contraintes

L'ajout de données de contraintes et de points de contrôle a été nécessaire particulièrement en ce qui attrait à l'épaisseur des zones de till épais et de till mince. La couverture de données primaires étant particulièrement discontinue, un certains nombre d'informations recueillies lors des campagnes de terrain ont été ajoutées comme données minimales d'épaisseurs pour les unités géologiques. Ces données comportent des informations sur les épaisseurs des unités et font en sorte que l'architecture du modèle est bonifiée puisque la densité et la localisation des données primaires n'est pas toujours uniforme.

4.4.2 Construction de la carte isopaque et choix de la méthode d'interpolation des différentes unités lithostratigraphiques.

La carte isopaque des sédiments représente la distribution de l'épaisseur totale des formations superficielles qui recouvrent le roc. Celle-ci a été réalisée à l'aide de la carte des formations superficielles (figure 9) et des différentes données primaires (tableau 4) couvrant légèrement une aire débordante de la zone d'étude. La méthodologie utilisée s'inspire des travaux antérieurs de la Commission géologique du Canada (Parent, *et al.*, 1998). Ainsi la première phase consistait à extraire les zones d'affleurements rocheux et de till mince ($\leq 1\text{m}$) à partir des cartes géologiques et des formations superficielles et à calculer une profondeur au roc en n'utilisant que les forages qui ont atteint le roc. De cette manière le calcul était directement concentré sur les vallées (pour la partie appalachienne du bassin-versant) où sont observées les grandes épaisseurs de dépôts (figure 13). Les calculs ont été réalisés selon la méthode d'interpolation spatiale krigeage. Cet interpolateur permet une estimation linéaire sans biais et à variance minimale des données disponibles. Les différentes cartes d'épaisseurs (Appendices 1 à 11) des unités lithostratigraphiques ont également été quantifiées avec cet interpolateur.

Figure 13 Carte de la distribution de l'épaisseur totale des sédiments quaternaires pour le bassin-versant de la rivière Saint-François.



L'estimation des épaisseurs des dépôts est contrôlée par la proximité du roc, l'épaisseur de matériel progresse régulièrement depuis une épaisseur nulle près des zones d'affleurement vers une épaisseur maximale dans le centre des vallées. L'épaisseur totale des sédiments est principalement comprise entre 0 et 126 m (une portion très faible se trouve en 60 et 126 m) et la moyenne se situe entre 8 et 20 m. Les résultats de cette interpolation concordent assez bien avec les observations de terrain.

4.4.3 La modélisation des objets géologiques

Il existe de nombreuses approches pour la construction des modèles géologiques 3D. Il existe deux grandes catégories de modélisation pour représenter en trois dimensions les objets géologiques : la modélisation volumique et la modélisation surfacique. Le présent modèle du bassin-versant de la rivière Saint-François a été conçu dans un premier temps selon une approche surfacique et transposé par la suite en modélisation de type volumique. La modélisation géologique 3D a pour objet de fournir une représentation géoréférencée en format numérique de la géométrie des unités géologiques d'une région donnée. Dans le cadre des présents travaux le modèle a été conçu avec un intérêt particulier pour la stratigraphie quaternaire des formations superficielles et plus spécifiquement les formations quaternaires anciennes (Q) préservées généralement dans le fond des vallées tributaires de la rivière Saint-François (ex : la rivière Moe, la rivière Eaton et la rivière Coaticook). Ce type de modèle pourra être utilisé à divers égards notamment pour une future caractérisation hydrogéologique de cette région pour quantifier et modéliser des paramètres tels que la recharge et la conductivité hydraulique.

- Approche vectorielle et surfacique (Tremblay, 2010)

Pour les aspects plus pratiques, le lecteur est invité à consulter l'article de Tremblay, T., *et al.*, (2010), 3D hydrostratigraphic modeling using relative

calculation method, Châteauguay watershed, Quebec, (Canadian Water Resources Journal). Cet article fait suite à des travaux similaires réalisés sur le bassin-versant de la rivière Châteauguay. Cette méthode représente une manière rapide de quantifier les épaisseurs de chaque unité lithostratigraphique tout en respectant la carte des formations superficielles et les données de sous-surface.

Cette approche consiste à créer dans un premier temps une carte isopaque de la zone d'étude en utilisant l'ensemble des données de sous-surface et de surface. Ensuite, le calcul des différentes épaisseurs des unités lithostratigraphiques s'opèrent par le calcul des ratios entre les différents ensembles géologiques et qui composent la carte isopaque. Le calcul des ratios (k) des forages sont quantifiés par la division d'une épaisseur d'une unité géologique **TA'** et qui se positionne au dessus d'une seconde **TB'** (figure 14). Ces valeurs sont ensuite interpolées, pondérées et soustraites à la carte isopaque. Ces étapes de calcul de ratio doivent ensuite être répétées afin d'individualiser chaque couche géologique qui compose le modèle. Cette approche s'avère intéressante dans le cas du bassin-versant de la rivière Saint-François puisque la topographie du substratum rocheux n'est pas uniforme et relativement accidentée occasionnant des variations d'épaisseurs importantes dans la répartition des dépôts de surface. Cette méthodologie de cartographie 3D permet donc la construction d'une modèle préliminaire de l'architecture de la sous-surface qui respecte les données primaires de forages mais également la carte des formations superficielles.

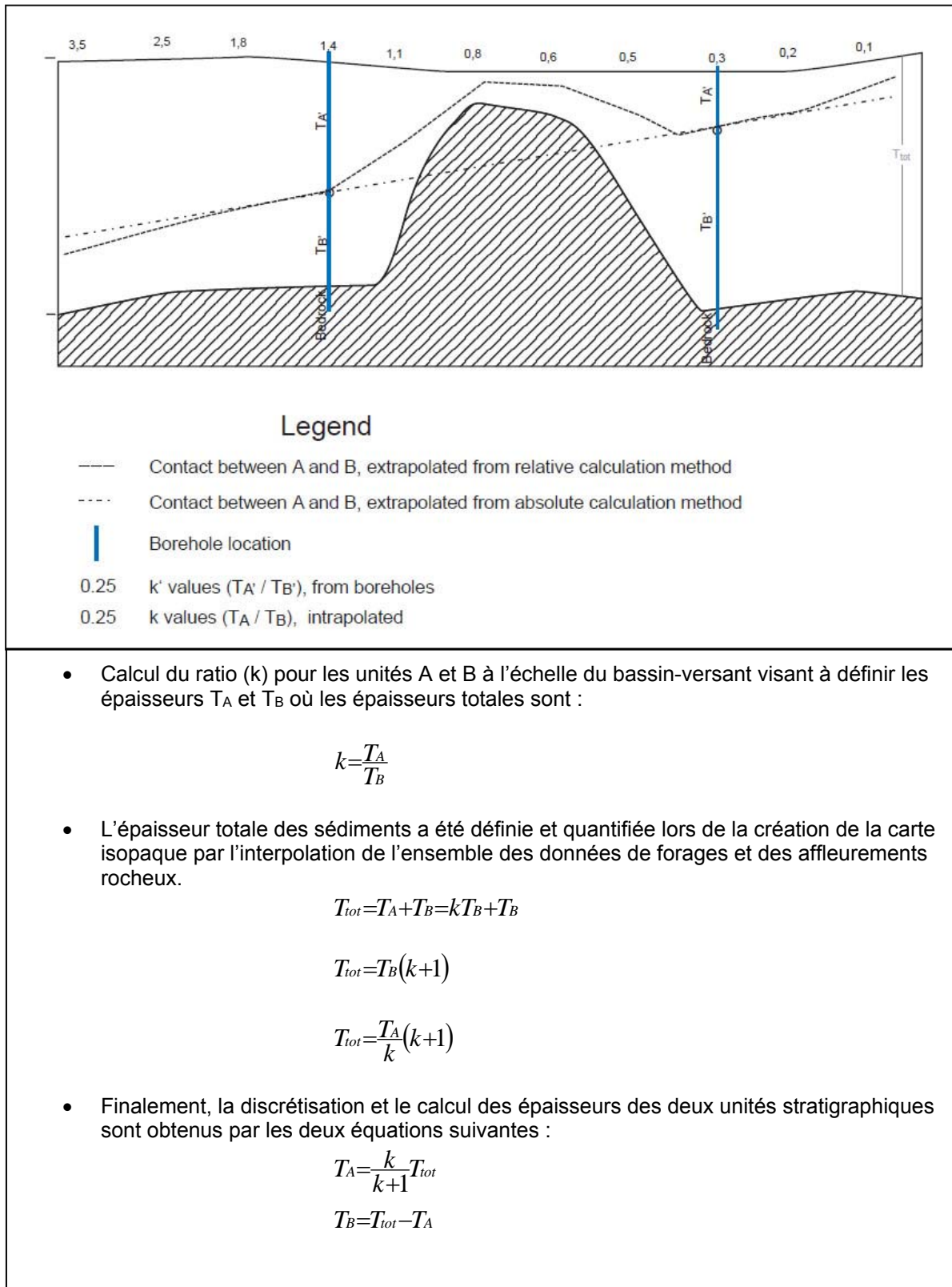


Figure 14 Exemple de calcul pour subdiviser deux unités lithostratigraphiques à partir de ratios quantifiés avec les données de forages et la carte isopaque. (Tremblay *et al.*, 2010).

Cette approche a été utilisée principalement pour construire un squelette préliminaire du modèle 3D. Cette approche est toutefois limitée lorsque le modèle doit être actualisé et bonifié avec de nouvelles données puisque toutes les étapes de calculs des surfaces doivent être requantifiées et resoustraites à nouveau à la carte isopaque.

- Approche volumique

Le modèle surfacique a été converti en format ASCII (XYZ) pour être intégré dans une plateforme 3d et pour générer les différentes surfaces représentant les unités géologiques. Des coupes géologiques supplémentaires ont également été générées à l'aide du logiciel cross-view (A-Prime software) afin de bonifier la compréhension de la distribution des dépôts pour certains secteurs où les densités de forage étaient plus faibles.

Le bassin-versant a été discrétisé en un maillage tridimensionnel dont chaque cellule a une résolution de 250m x 250m x 1m. Ce maillage s'avère standard pour l'intégration des données pour les modélisations et les études hydrogéologiques. Un maillage similaire a été utilisé dans le cadre du projet Chaudière en 2007.

4.4.4 Exportation du modèle

Dans le cadre des présents travaux, le modèle a été exporté premièrement en différentes surfaces (GRID) représentant les épaisseurs lithostratigraphiques des différentes unités qui composent le modèle. Le logiciel Target permet d'exporter les surfaces en plusieurs formats notamment en ASCII (XYZ) mais également en voxel standard pouvant être intégré aux différents logiciels 3D standard.

4.4.5 Attribution des propriétés aux unités géologiques du modèle

Les logiciels de modélisation géologique 3D ne permettant pas d'attribuer un texte comme propriété, chacune des propriétés du modèle a été associée à une valeur numérique. Cette étape s'avère nécessaire afin d'attribuer un code visuel aux différentes régions dans le but de faciliter la validation et l'exportation des propriétés du modèle.

TABLEAU 6 PROPRIÉTÉS NUMÉRIQUES ATTRIBUÉES DANS LE MODÈLE 3D DANS LA PLATE-FORME TARGET

Region	Unités	Type de matériel
Sédiments de tourbière (O)	1	Matière Organique
Alluvions, Sédiments éoliens, Dépôts d'éboulis, Colluvions et Sédiments lacustres (A,Ed,Ce,C et Lb)	2	Silt, sable et gravier
Sables et graviers glaciomarins littoraux et pré-littoraux (MGb)	3	Sable moyen à grossier
Sédiments glaciomarins deltaïques (MGd)	4	Sable fin
Argiles et silts glaciomarines (Mga)	5	Silt et argile
Sédiments glaciolacustres littoraux et pré-littoraux (LGb)	6	Sable moyen à grossier
Sédiments glaciolacustres deltaïques et prodeltaïques (LGd)	7	Sable fin
Sédiments glaciolacustres d'eau profondes (LGa)	8	Silt et argile
Sédiments fluvioglaciaires (Graviers et sables grossiers) (G)	9	Sable et gravier
Sédiments glaciaires ; Till (T)	10	Diamicton
Formations quaternaires anciennes (Q)	11	Très variable (Silt et argile, Sable et gravier, Diamicton)
Substratum rocheux (R)	12	Roc

4.4.6 Incertitudes

Chaque étape de la modélisation comporte son lot d'incertitudes. Évidemment la qualité du modèle est dépendante de la qualité des données disponibles ainsi que de leurs distributions spatiales (Appendices 1 à 11). La standardisation et la hiérarchisation des données limite l'utilisation des données erronées lors de la construction du modèle. La classification des données selon une codification de fiabilité était donc importante afin de construire un modèle honnête respectant le plus fidèlement possible la réalité.

TABLEAU 7 DISTRIBUTION ET POURCENTAGE DES DIFFÉRENTES SOURCES DE DONNÉES

Type de données		Quantité	Facteur de fiabilité	% des forages selon l'ensemble des données disponibles
Affleurements rocheux numérisés		35 765	5	
Forages interprétations stratigraphiques		3361	5 / 4 / 3	
Travaux académiques (Coupes stratigraphiques)	Barry McDonald (1969)	19	5	0,09%
	Michel Parent (1987)	18	5	0,09%
	Armand Larocque (1991)	49	5	0,24%
	Olivier Caron (2011)	39	5	0,19%

Transport Québec (MTQ)	536	4	2,60%
Rénald McComark	325	3	1,58%
Forages stratigraphiques de la Commission GSC	42	5	0,20%
Georges Simard	Sondages : 76 forages Sismiques : 38 sondages sismiques	3	
			0,18%
Forages exploration minère, Rivière Moe	18 forages	4	0,09%
MDDEP (Compilation)	739 sondages et forages	2 / 3	3,59 %
SIH	18 724 forages	1 / 2	90,95%

4.5 Résultats

La succession des sédiments quaternaires du bassin-versant de la rivière Saint-François est le résultat d'un système d'érosion et de déposition très complexe. La région de l'Estrie recèle des séquences de sédiments quaternaires intéressantes à plusieurs égards tant pour l'important volume de sédiments que pour la variété et la complexité des faciès. La modélisation 3D a donc permis pour la première fois de visualiser et quantifier le volume total des différentes unités lithostratigraphiques présentes dans la zone d'étude (figures 15 à 20). Le modèle tridimensionnel du bassin-versant de la rivière Saint-François a été construit essentiellement à partir d'une base de données contenant suffisamment de données fiables pour construire un modèle représentatif de la géologie.

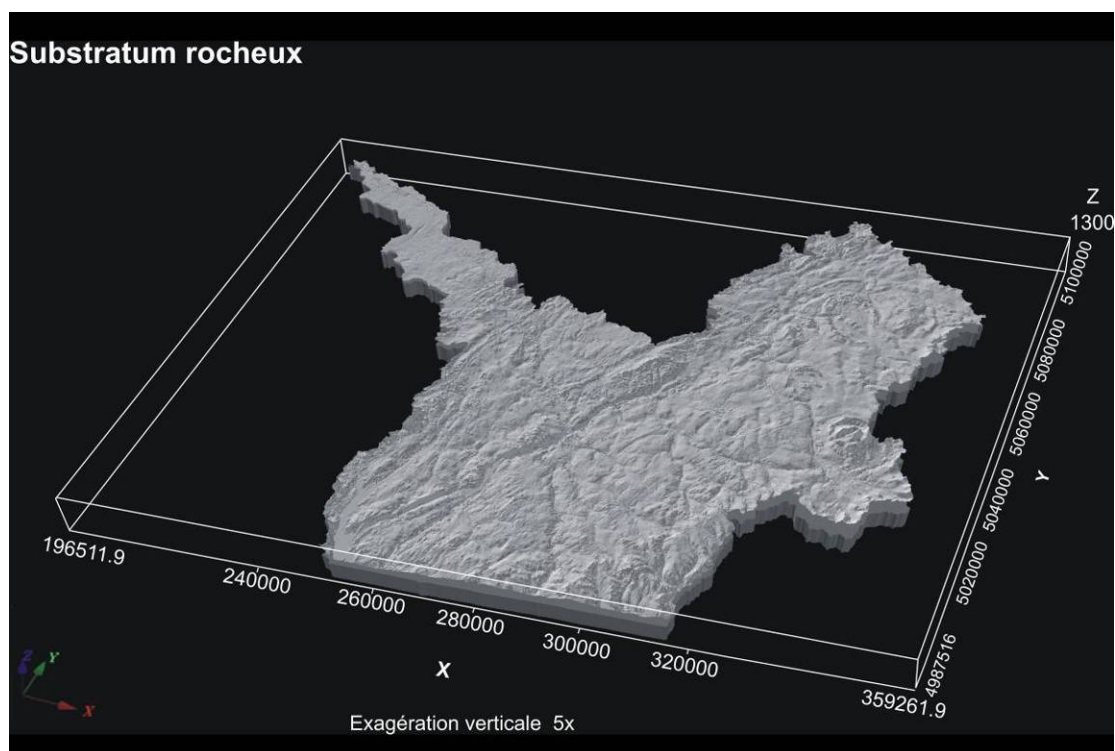


Figure 15 Élévation et modélisation 3D du substratum rocheux (R).

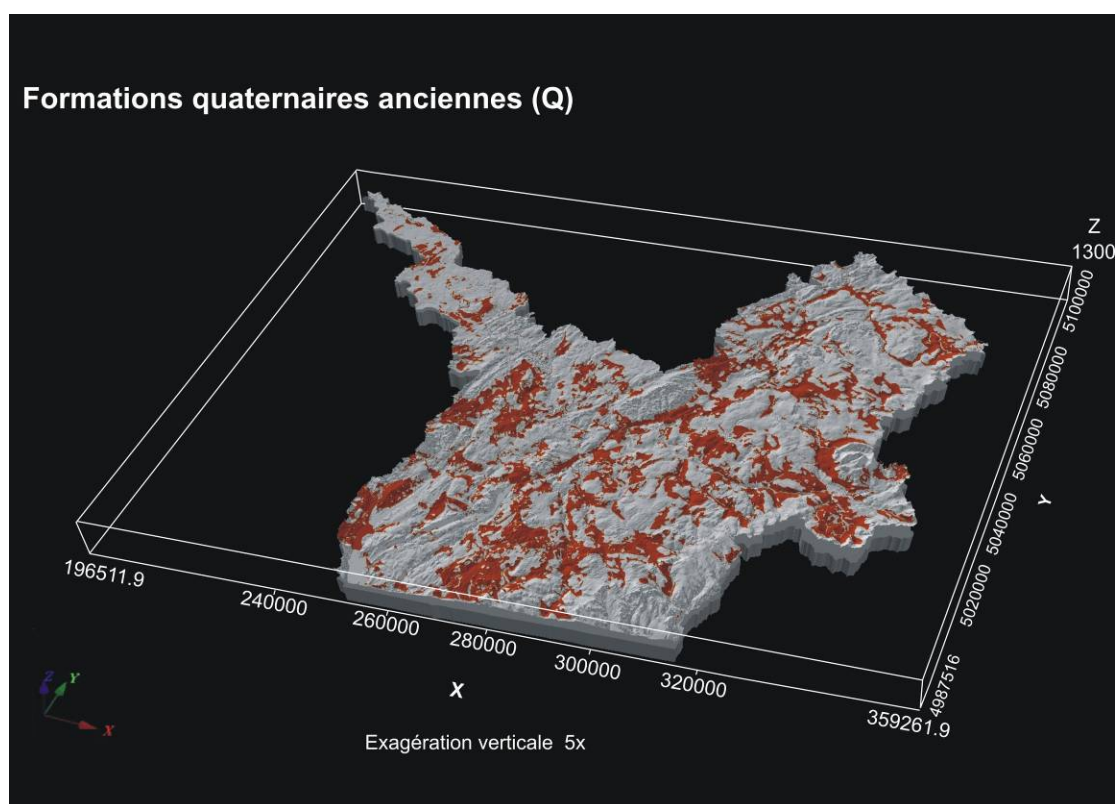


Figure 16 Élévation et modélisation 3D des formations quaternaires anciennes (Q).

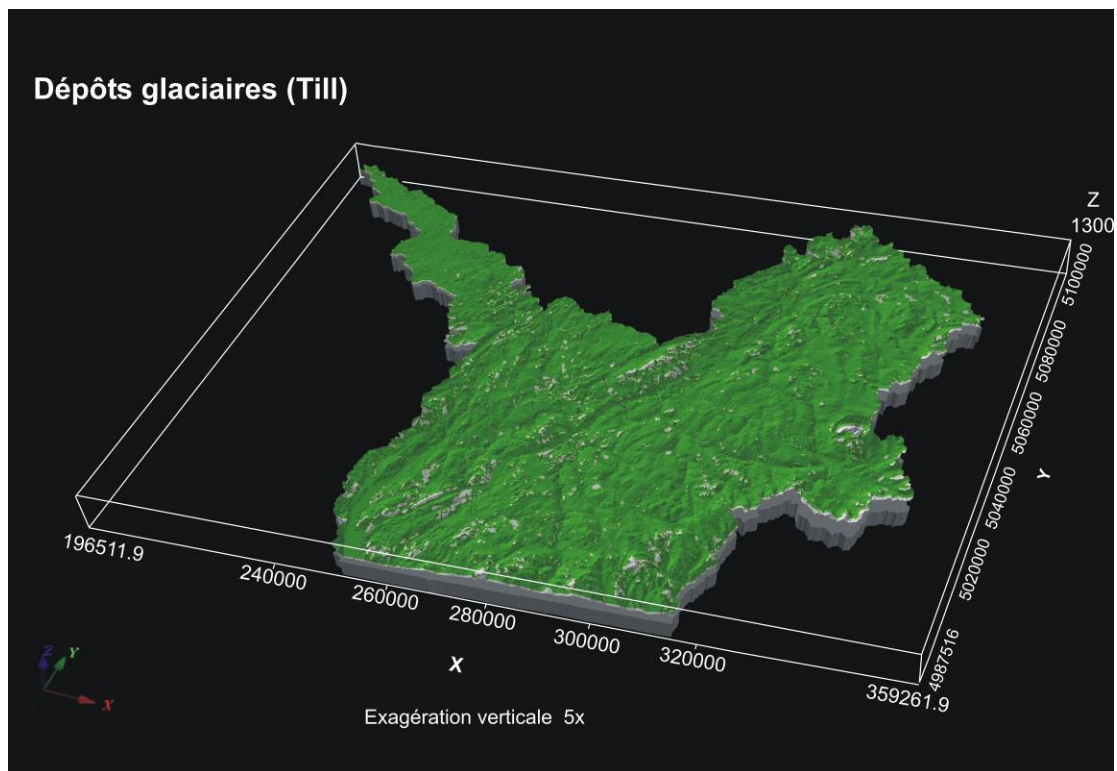


Figure 17 Élévation et modélisation 3D des sédiments glaciaires (T).

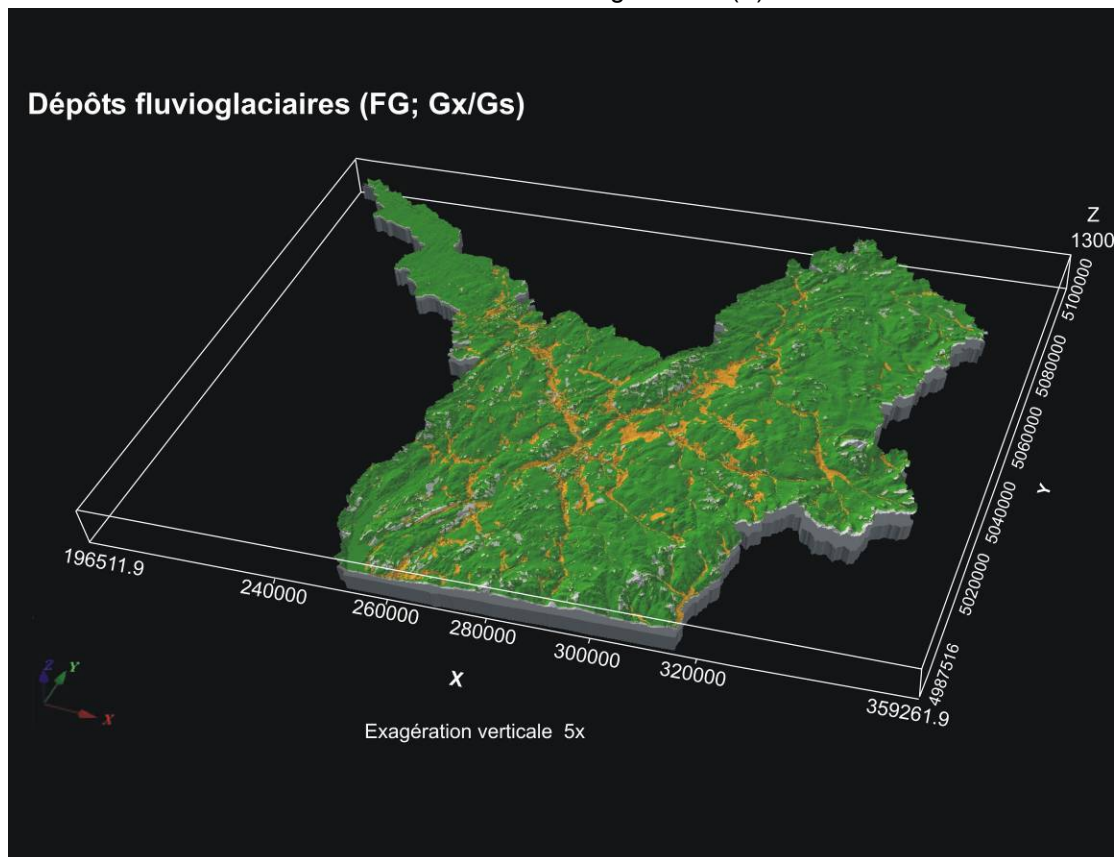


Figure 18 Élévation et modélisation 3D des sédiments fluvioglaciaires (Gs & Gx).

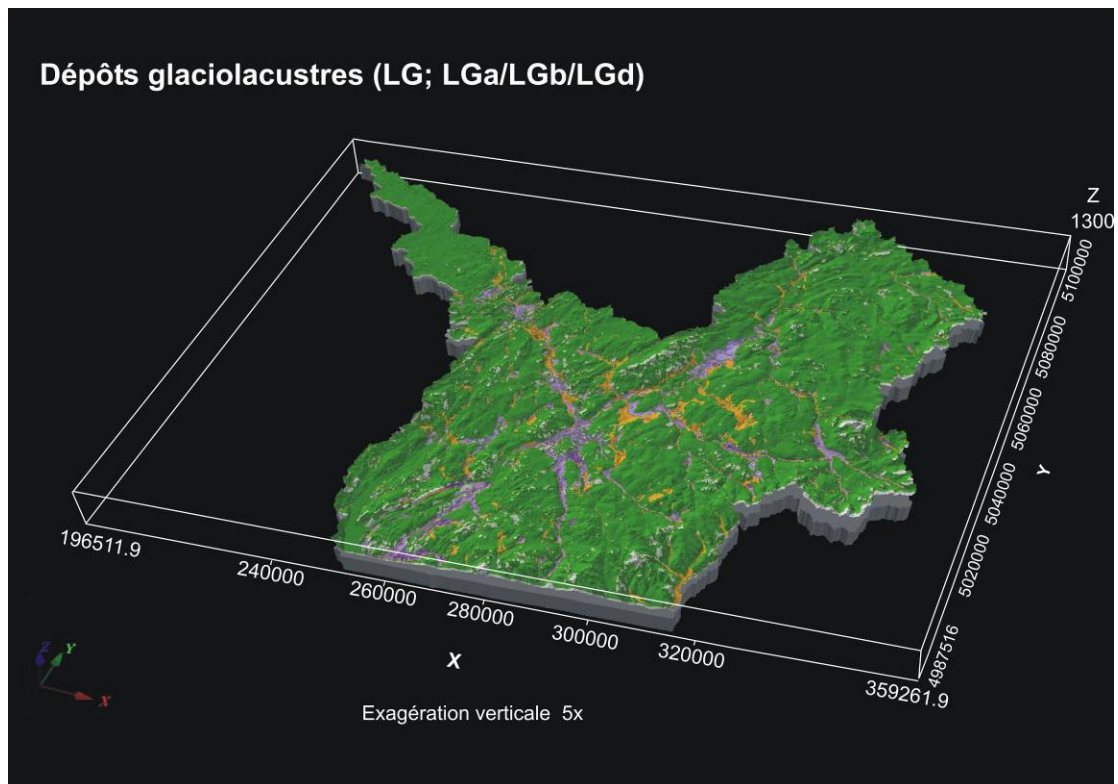


Figure 19 Élévation et modélisation 3D des sédiments glaciolacustres (LGa, LGb & LGd).

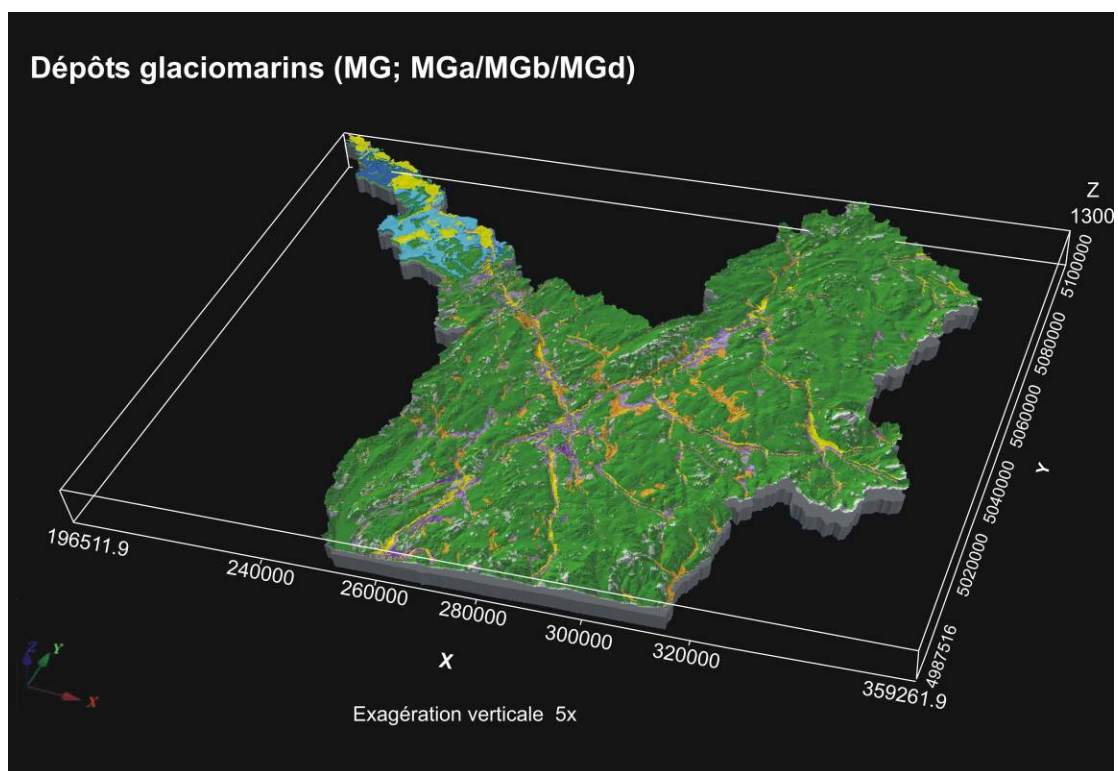


Figure 20 Élévation et modélisation 3D des sédiments glaciomarins lacustres et alluviaux (MGa, MGb, MGd, L et A).

5. CONCLUSION

Le système aquifère superficiel de la région comprend les sédiments glaciaires et postglaciaires qui ont été mis en place lors des différents épisodes d'avancée et de retrait glaciaire de l'Inlandsis Laurentidien. L'ensemble du bassin-versant a été recouvert par une immense masse de glace d'environ 3000 m d'épaisseur qui s'étendait jusqu'à l'emplacement actuel de la ville de New-York lors du dernier maximum glaciaire soit il y a environ 21 000 ans.

Ces sédiments quaternaires recouvrent le soubassement rocheux de l'ensemble du bassin-versant de la Saint-François. Les sédiments quaternaires jouent un rôle important dans les processus hydrogéologiques. Ils sont l'éponge naturelle à travers laquelle les eaux percolent, favorisant ainsi la recharge des aquifères régionaux plus profonds. Lorsqu'ils sont imperméables, les sédiments quaternaires confinent les eaux dans les aquifères fracturés et jouent alors un rôle de protection de ces nappes d'eau profonde. Les dépôts quaternaires de faible conductivité hydraulique (till, varves, tourbes, argiles marines) protègent les aquifères fracturés de la contamination provenant de la surface. Ces aquifères profonds constituent des réservoirs fragiles où est puisée la majorité de l'eau consommée en milieu rural. L'épaisseur moyenne des sédiments quaternaires pour l'ensemble de ce territoire est de quelques mètres. Toutefois, les épaisseurs peuvent dépasser les 100 mètres au sein d'anciennes vallées enfouies, beaucoup plus larges que les vallées récentes de surface.

L'étude de la distribution spatiale des dépôts quaternaires et de leur stratigraphie est capitale pour bien comprendre la dynamique des eaux souterraines. Le till mince et les zones d'affleurement rocheux montrent les zones où l'aquifère rocheux fracturé est près de la surface. Les sédiments graveleux (littoraux, fluvioglaciaire et alluviaux) font partie de l'unité « perméable ». Le till, les argiles marines, la tourbe et les dépôts alluvionnaires silto-argileux font partie de l'unité « imperméable ». La cartographie des présents travaux a permis de raffiner les

cartes établies par McDonald (1969), ainsi que mieux définir les zones de recharge de l'aquifère ainsi que les zones où l'aquifère est le mieux protégé. L'étude de la distribution spatiale des dépôts quaternaires et de leur stratigraphie est capitale pour bien comprendre la dynamique des eaux souterraines. À l'instar des projets Portneuf (Girard, 2000), AFSOQ (Ross, 2005) et Châteauguay (Tremblay, 2007), la synthèse des informations relatives à la géologie quaternaire est réalisée sous la forme d'un modèle hydrostratigraphique en 3 dimensions.

Dans le présent projet de recherche, deux couches d'information cartographique sont particulièrement utiles pour la modélisation hydrostratigraphique. La première est la carte des dépôts meubles (figure 9), qui constitue la base fondamentale à partir de laquelle s'élabore le modèle 3D. L'intégration des cartes à l'échelle régionale permet la création d'une carte hydrostratigraphique à l'échelle du bassin-versant. La deuxième couche d'information géographique importante est la carte d'élévation du substratum rocheux qui, conjointement avec les données de forages et d'affleurements rocheux (tableau 4), permet la création d'une carte d'épaisseur des dépôts meubles la plus fidèle possible à la réalité. Cette dernière carte est la base fondamentale sur laquelle repose la modélisation hydrostratigraphique 3D, l'estimation de la recharge, la détermination de l'élévation du sommet de l'aquifère fracturé et des paramètres d'estimation pour la protection des eaux souterraines.

La synthèse cartographique et la modélisation tridimensionnelle réalisées dans ce travail révèlent que la séquence quaternaire enfouie sous la plaine alluviale de la rivière Saint-François et des différentes rivières affluentes est méconnue, même si elle semble jouer un rôle important dans la caractérisation hydrogéologique et hydrologique du secteur d'étude. D'autres aspects de la géologie quaternaire pourraient faire le sujet d'une analyse plus poussée, dans le contexte où l'intrant géologique est critique. On pense, entre autres, aux volumes

de sédiments granulaires stratigraphiquement situés sous le Till de Lennoxville, à leur connectivité potentielle avec le roc sous-jacent, à l'étendue du faciès argileux du Till de Lennoxville et au volume inconnu de sédiments fluvioglaciaires enfouis sous les dépôts de surface dans le bassin de la haute Saint-François. La transition physiographique entre les Appalaches et les basses-terres du Saint-Laurent représente aussi une zone dont l'histoire géologique récente est complexe et peu documentée.

6. BIBLIOGRAPHIE

Balescu, S., Lamothe, M., Auclair, M. et Shilts, W.W. 2000. IRSL dating of Middle Pleistocene interglacial sediments from southern Quebec (Canada) using multiple and single grain aliquots. *Quaternary Science Reviews*, vol. 20, December 2001, p. 821-824.

Boissonnault, P., 1983. Géomorphologie et litho-stratigraphie à l'est du lac Memphrémagog. Mémoire de M.Sc., Département de géographie, Université de Sherbrooke, 150 p.

Caron, O., Lamothe, M., et Tremblay, T., (2007a) Géologie des formations superficielles du bassin versant de la Rivière Chaudière, Québec, Université du Québec à Montréal, 21E06, 21E07, 21E09, 21E10, 21E11, 21E14, 21E15, 21E16, 21L01, 21L02, 21L03, 21L06, 21L07, 21L08, 21L09, 21L10, 21L11, 1 : 100 000, 3 cartes, 3p.

Caron, O., Lamothe, M., et Tremblay, T., (2007b) Synthèse cartographique des formations superficielles du bassin versant de la rivière Chaudière, Québec. Rapport final et cartes de la géologie de surface, Université du Québec à Montréal, Rapport, 31 p.

Chalmers, R. 1898. Surface geology and auriferous deposits of southeastern Quebec. *Geological Survey of Canada, Annual Report*, V. 10, pt. V, 160 p.

Chauvin, L., 1979. Dépôts meubles de la région Thetford-Mines – Victoriaville. Ministère de l'énergie et des ressources, direction générale de la recherche géologique et minérale, DPV-622, 21L03, échelle 1: 50 000, Québec.

Chauvin, L., 1979. Géologie des dépôts meubles, région d'Asbestos-Disraeli. Ministère de l'énergie et des ressources, direction générale de la recherche géologique et minérale, DPV-716, Québec.

Cloutier, M., 1982, Géologie et géomorphologie quaternaire de la région de Cowansville-Knowlton-Sutton; UQAM, Montréal, thèse de maîtrise, 143 p.

Doiron, A., 1981. Les dépôts quaternaires de la région de Granby-Waterloo, Québec, cartographie, sédimentologie et stratigraphie; UQAM, Montréal; Thèse de maîtrise, 100 p.

Dubé, C., 1983, Géomorphologie quaternaire et déglaciation à l'ouest de lac Memphrémagog. Mémoire de M.Sc., Département de géographie, Université de Sherbrooke, 139 p.

Gadd, N.R., 1955. Pleistocene geology of the Becancour map-area, Quebec. (Ph.D. thesis): Urbana, University of Illinois, 191 p.

Gadd, N.R., 1960. Surficial geology of Bécancour map-area, Québec, *Geological Survey of Canada, Paper* 59-8, 34 p.

Gadd, N.R., 1964a. Surficial geology of Beauceville map-area, Québec, Geological Survey of Canada, Paper 64-12, 3 p.

Gadd, N.R., 1964b. Moraines in the Appalachian region of Quebec, Geological Society of America Bulletin, volume 75, p. 1249-1254.

Gadd, N.R., 1965. Surficial geology, Chaudière River valley, in Report of Activities, Geological Survey of Canada, Paper 65-1, p. 115-117.

Gadd, N.R., 1967. The pattern of glacial recession in southeastern Quebec (Abstract); Geological Society of America, Northeastern Section Annual Meeting, p.28-29.

Gadd, N.R., 1971. Pleistocene geology of the central St. Lawrence Lowland (with selected passages from an unpublished manuscript "The St. Lawrence Lowland", by J.W. Goldthwait). Geological Survey of Canada, memoir 359.

Gadd, N.R., McDonald, B.C., Shilts, W.W., 1972. Deglaciation of southern Quebec, Commission géologique du Canada, 10-1971, carte 1/ 253,440.

Gadd, N.R., 1976. Quaternary Stratigraphy in southern Quebec, in the Quaternary Stratigraphy of North America (Mahaney, W.C., Editor), Dowden, Hutchinson and Ross (Publishers), Stroudsburg, p. 37-50.

Gadd, N.R., 1978. Surficial geology of Saint-Sylvestre map-area, Quebec. Geological survey of Canada, Paper 77-16.

Girard, F., 2000. Architecture et hydrostratigraphie d'un complexe morainique et deltaïque dans la région de Portneuf, Québec. Mémoire de maîtrise, INRS-Géoresources, Université du Québec

Hardy, F. 1997. Datation par photoluminescence de sédiments glaciolacustres du sud du Québec et corrélations stratigraphiques par déblais de forage. Mémoire de maîtrise, Département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère, UQAM, 128 p.

Huntley, D.J., and Lamothe, M., 2001. Ubiquity of anomalous fading in K-feldspars and the measurement and correction for it in optical dating. *Can. J. Earth Sci.*, Vol.38, pp.1093-1106.

Lamarche, R.Y., 1971. Northward moving ice in the Thetford Mines area of southern Quebec, American Journal of Science, volume 271, number 4, pp. 383-388.

Lamarche, R.Y., 1974. Southeastward, northward and westward ice movement in the Asbestos area of southern Quebec, Geological Society of America Bulletin, volume 85, pp. 465-470.

- Lamothe, M., 1985. Lithostratigraphy and geochronology of the Quaternary deposits of the Pierreville and St-Pierre-les-Becquets areas, Québec. Thèse de Ph.D., University of Western Ontario, London, 227 p.
- Lamothe, M., 1987, Pleistocene stratigraphy in the St. Lawrence Lowland and the Appalachians of southern Quebec: a field guide: Collection Environnement et Géologie, Presses de l'Université de Montréal, 201p.
- Lamothe, M., Parent, M., and Shilts, W.W., 1992, Sangamonian and Early Wisconsinan events in the St. Lawrence Lowland and Appalachians of Southern Quebec, Canada, *in* Clark, P.U. and Lea, P.D., eds., : Geological Society of America, Special Paper 270, p. 171–184.
- Lamothe, M., and Auclair, M., 2000. The fadia method: a new approach in luminescence dating using the analysis of single feldspar grains. *Radiation Measurements*, Vol.32, pp.433-438.
- Larocque, A., 1999. La déglaciation d'une partie du Haut Saint-François, Estrie, Sud du Québec, Département de géographie, Université de Montréal, Thèse de doctorat, 272 p.
- LaSalle, P., Martineau, G., Chavin, L., 1977. Morphologie, stratigraphie et déglaciation dans la région de Beauce-Monts Notre-Dame- Parc des Laurentides, Ministère des Richesse naturelles, direction générale des Mines, DPV-516, Québec.
- Lasalle, P., 1982, Documents manuscrits, MER, Québec.
- LaSalle, P. et Shilts, W.W. 1993. Younger Dryas-age readvance of Laurentide Ice into the Champlain Sea, *Boreas*, v. 22, 25-37.
- Lortie, G., 1975. Direction découlement des glaciers du Pléistocène des Cantons de l'Est, Québec; in: Report of Activities, Part A. ; Geological Survey of Canada, Paper 75-1A, pp. 415-416.
- Lortie, G., 1976. Les écoulements glaciaires wisconsinien dans les Cantons de l'Est et de la Beauce, Québec, Thèse M.A., non publiée, Université McGill, Montréal, 219 p.
- McCormack, R., 1979. Étude hydrogéologique du bassin de la rivière Saint-François. Ministère de l'environnement du Québec, Services des eaux souterraines, Programme de connaissances intégrées, Québec.
- McCormack, R., 1982. Étude hydrogéologique du bassin de la rivière Chaudière. Ministère de l'environnement du Québec, Services des eaux souterraines, Programme de connaissances intégrées, Québec.
- McDonald, B.C., 1966. Pleistocene geology studies, Richmond –Sherbrooke region, southeastern Quebec; in: Report of Activities; Geological Survey of Canada, Paper 66-1, p. 167.

- McDonald, B.C., 1967. Pleistocene events and chronology in the Appalachian region of southeastern Quebec, Canada, unpublished Ph.D. dissertation, Department of Geology, Yale University, 161 p.
- McDonald, B.C., 1968. Deglaciation and differential postglacial rebound in the Appalachian region of southeastern Quebec, *Journal of Geology*, volume 76, pp. 664-677.
- McDonald, B.C., 1969. Surficial geology of La Patrie-Sherbrooke area, Quebec, including Eaton River watershed, Geological Survey of Canada, Paper 69-52, 21 p.
- McDonald, B.C., 1971. Late Quaternary stratigraphy and deglaciation in eastern Canada; in: *The Late Cenozoic Glacial Ages*, K.K. Turekian (Editor); Yale University Press, p. 331-353.
- McDonald, B.C. and Shilts, W.W., 1971. Quaternary stratigraphy and events in southeastern Quebec. *Geological Society of America Bulletin*, v. 82, 683-692.
- Pagé, P., 1999. Les grandes glaciations : l'histoire et la stratigraphie des glaciations continentales dans l'hémisphère Nord. 2^e édition, Montréal, Guérin, 492 p.
- Parent, M., 1987a. The Asbestos-Valcourt and Sherbrooke area ; in : *Pleistocene Stratigraphy in the St. Lawrence Lowlands and the Appalachians of southern Québec : a field guide* ; Collection Environnement et Géologie, volume 4, p. 102-139.
- Parent, M., 1987b. Late Pleistocene stratigraphy and events in the Asbestos-Valcourt region, southeastern Québec, unpublished Ph.D dissertation, Department of Geology, University of Western Ontario, London, 320 p.
- Parent, M., Michaud, Y., Boisvert, É., Bolduc, A., Fagnan, N., Fortier, R., Cloutier, M., et Doiron A., 1998. Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf : géologie et stratigraphie des formations superficielles. Commission géologique du Canada, Dossier public, 3664-a.
- Parent, M., Paradis S.J., Boivin, R., 2010. Légende & notes descriptives pour les cartes des formations superficielles – 1/ 50 000 à 1/ 250 000, version 11, Commission géologique du Canada, Centre Géoscientifique de Québec.
- Ross, M., 2005, Stratigraphie et architecture des formations quaternaires au nord-ouest de Montréal - applications en géologie régionale, Thèse de doctorat, INRS - Eau, Terre et Environnement, Université du Québec
- Schroetter, J.M., 2004. Caractérisation structurale et stratigraphique du complexe ophiolitique de Thetford-Mines: implication géodynamique pour la zone de Dunnage du sud du Québec, Canada. Institut national de recherche scientifique, Eau, Terre et Environnement, Université du Québec, 254 p.

Shilts, W.W., inédit

Shilts, W.W., 1981. Surficial Geology of the Lac Mégantic area, Québec. Geological survey of Canada, memoir 397.

Shilts, W.W., Caron, O., et Lamothe, M., (2007) Late Pleistocene glaciation and deglaciation in the Beauce area, from Saint-Georges to Vallée-Jonction. 99th Annual Meeting NEIGC, 5-7 October 2007, Guide d'excursion, p.53-78.

Simard, G., 1971, Levé hydrogéologique, East-Angus, comté municipal de Compton, Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses Naturelles, 25 p.

Simard, G., 1970, Étude hydrogéologique du bassin de la rivière Eaton, Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses Naturelles, 27 p.

Stewart, D.P. and MacClintock, P. 1964. The Wisconsin stratigraphy of northern Vermont. American Journal of Science, v. 262, p. 108901097.

Tremblay, A. 2007. Camp de cartographie géologique au Complexe ophiolitique de Thetford Mines. Guide d'excursion du camp de terrain, UQAM, 35 p.

Tremblay, A., Castonguay, S., 2002. Structural evolution of the laurentian margin revisited (southern Quebec Appalachians): Implications for the Salinian orogeny and successor basins. Geology, vol. 30, p.79-82.

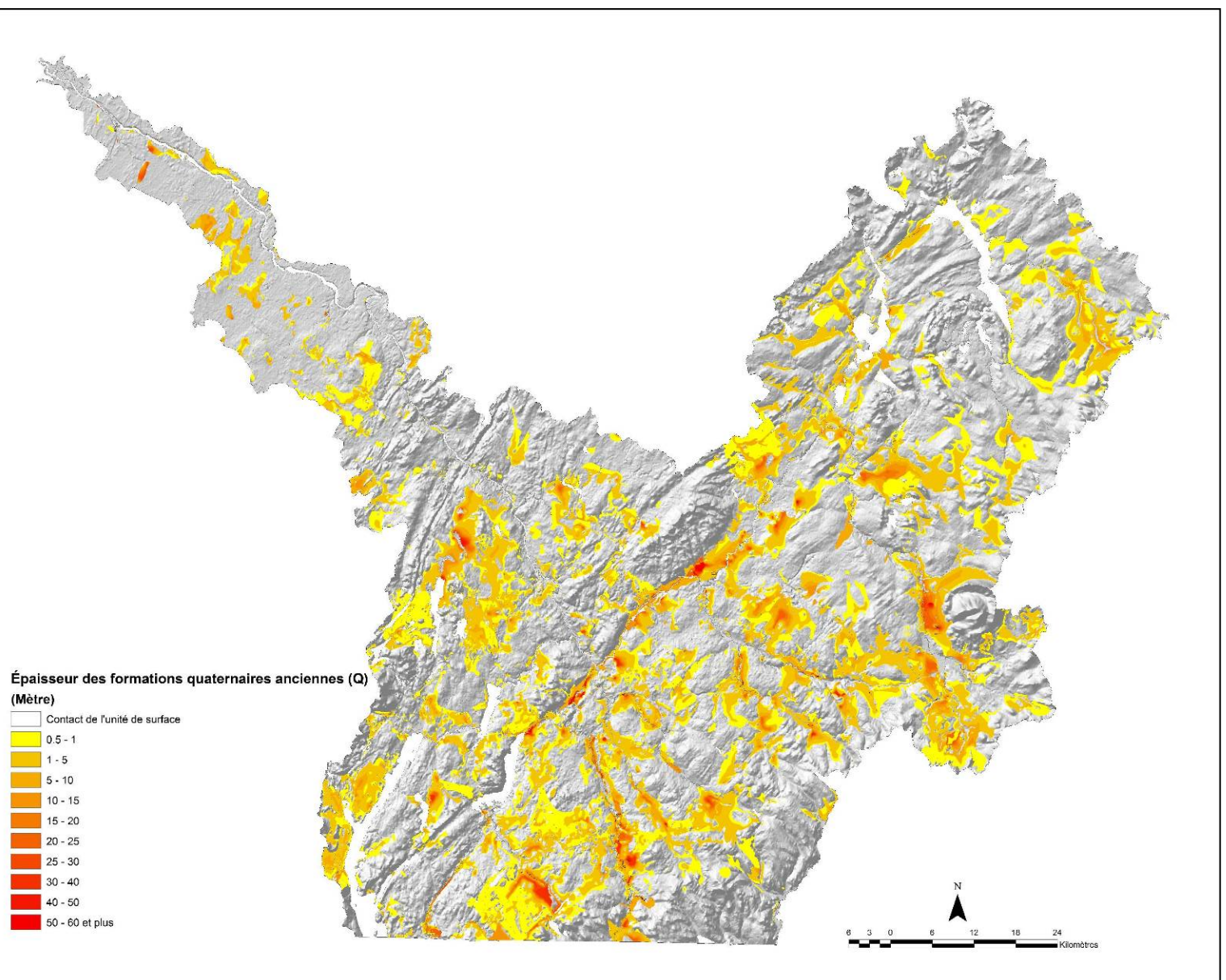
Tremblay, G., 1975, Quaternaire, Régions de Drummondville, Dudswell, Scotstown et Coaticook; MRN, Québec, DPV-434.

Tremblay, T., et Lamothe, M., 2010, 3D hydrostratigraphic modeling using relative calculation method, Châteauguay watershed, Quebec, Canadian Water Resources Journal, Volume 35, Number 4, 377-398.

Tremblay, T., et Lamothe, M., 2005, Géologie des formations superficielles du bassin-versant de la Rivière Châteauguay, rapport final et carte de la géologie de surface, Université du Québec à Montréal.

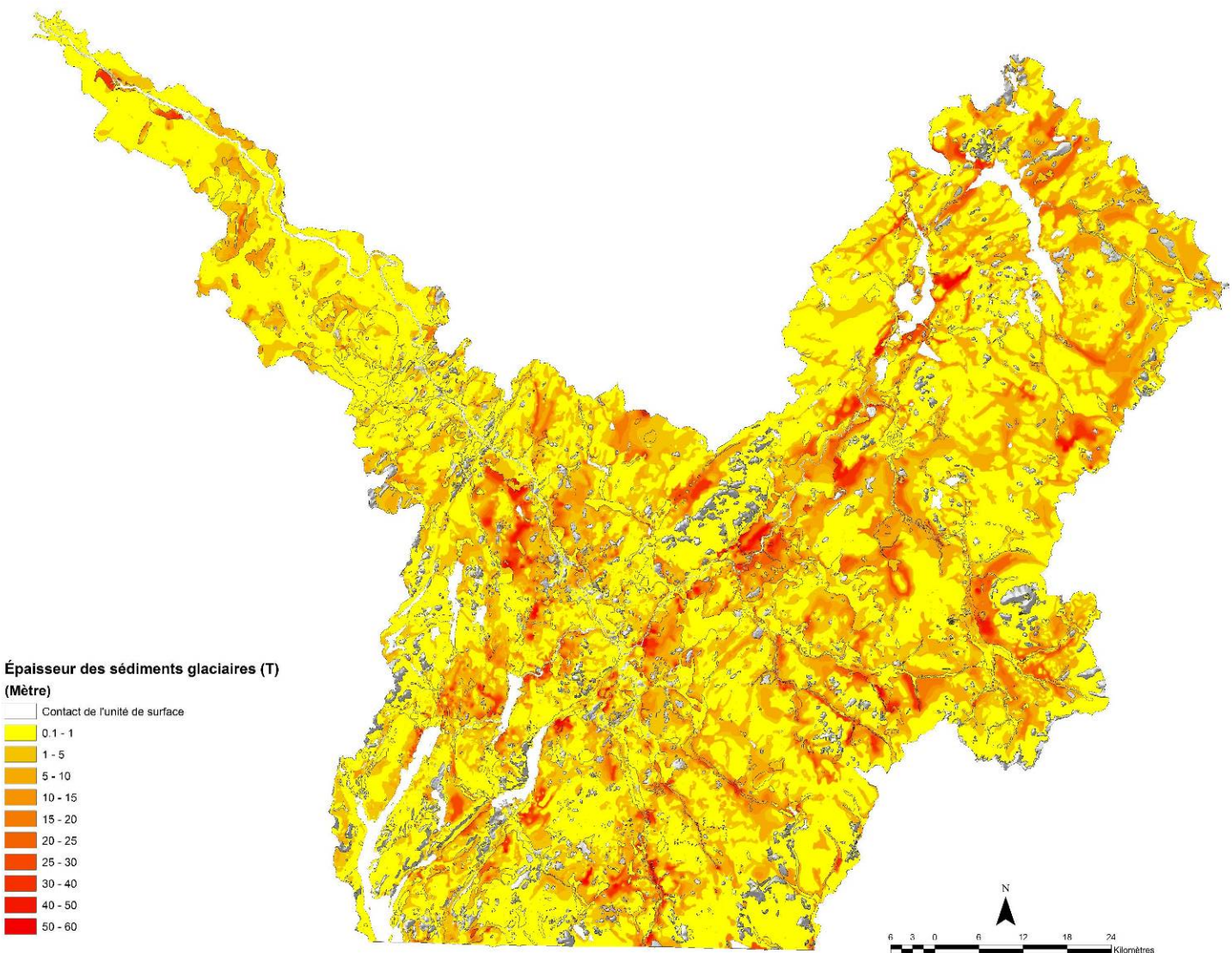
Appendice 1

Localisation et carte isopaque des formations quaternaires anciennes (Q).



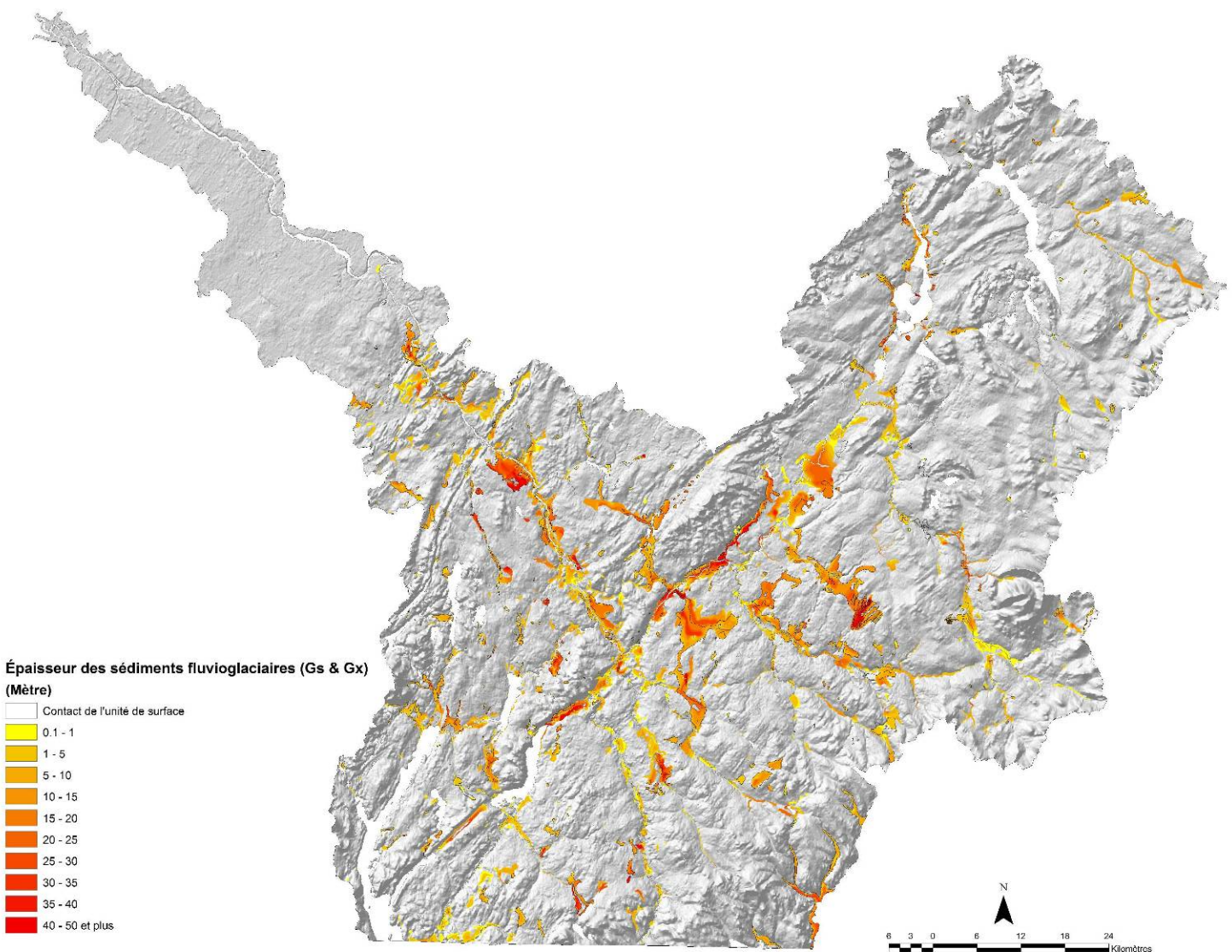
Appendice 2

Localisation et carte isopaque des sédiments glaciaires (T).



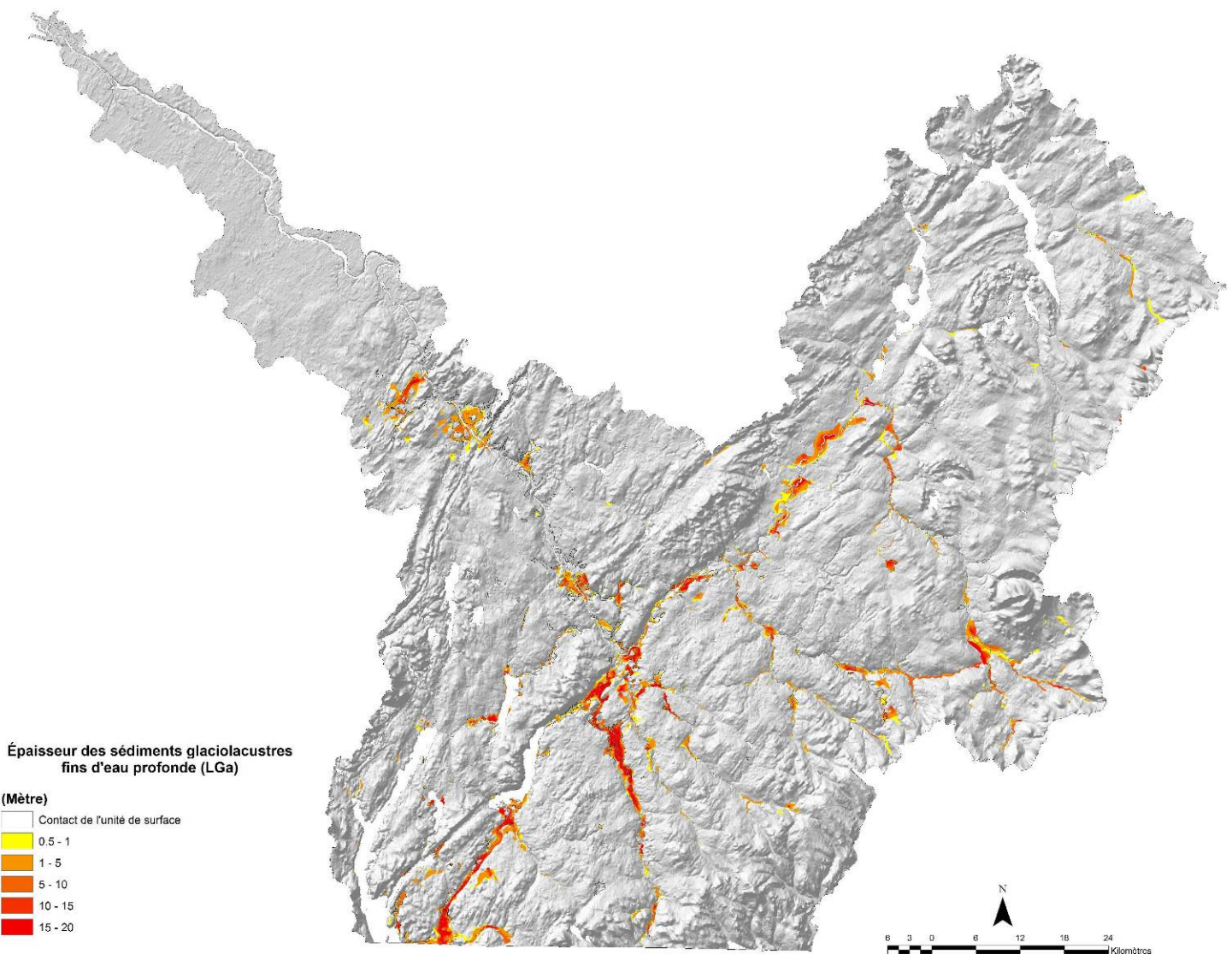
Appendice 3

Localisation et carte isopaque des sédiments fluvioglaciaires (Gs et Gx).



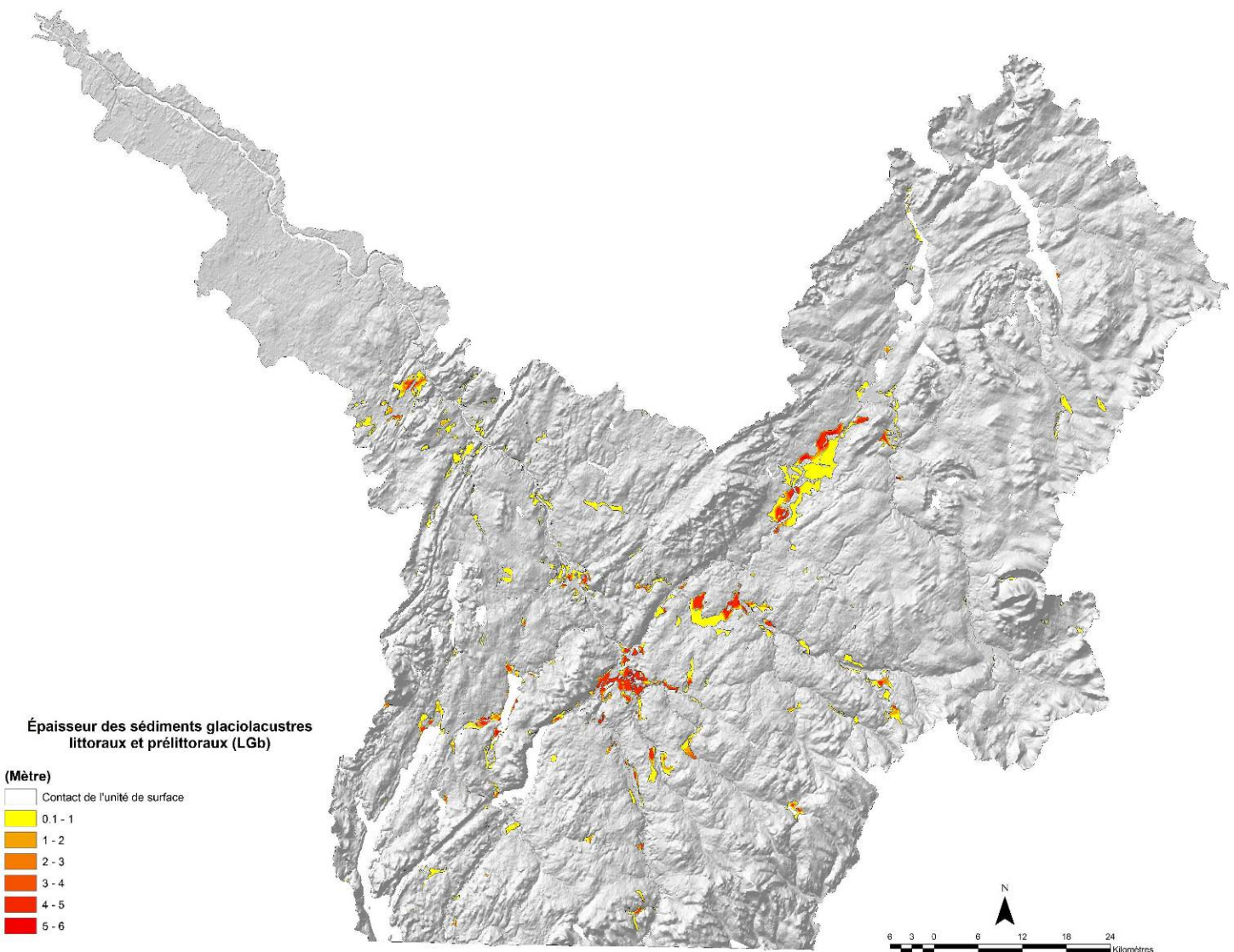
Appendice 4

Localisation et carte isopaque des sédiments glaciolacustres d'eau profonde (LGa).



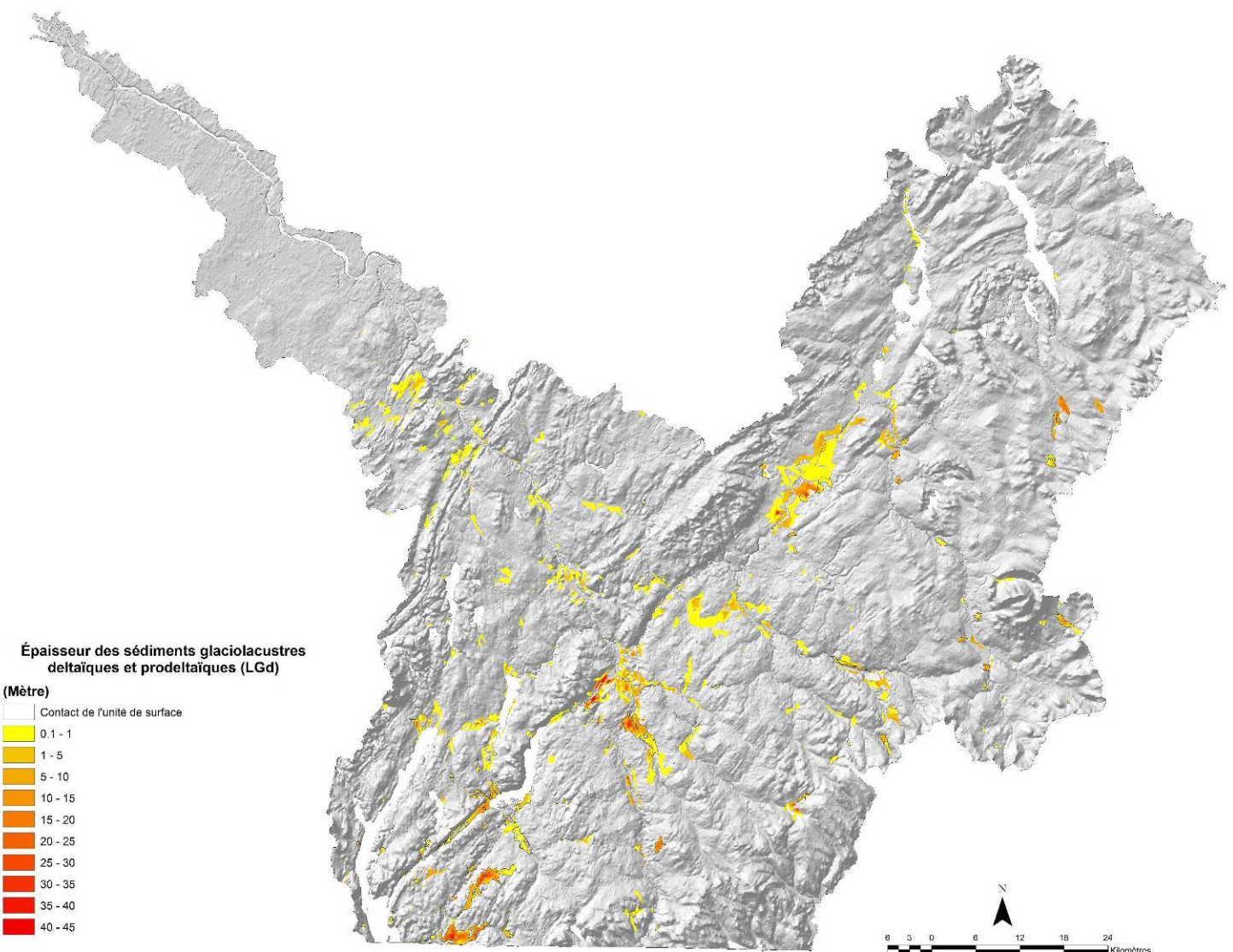
Appendice 5

Localisation et carte isopaque des sédiments glaciolacustres littoraux et pré littoraux (LGb).



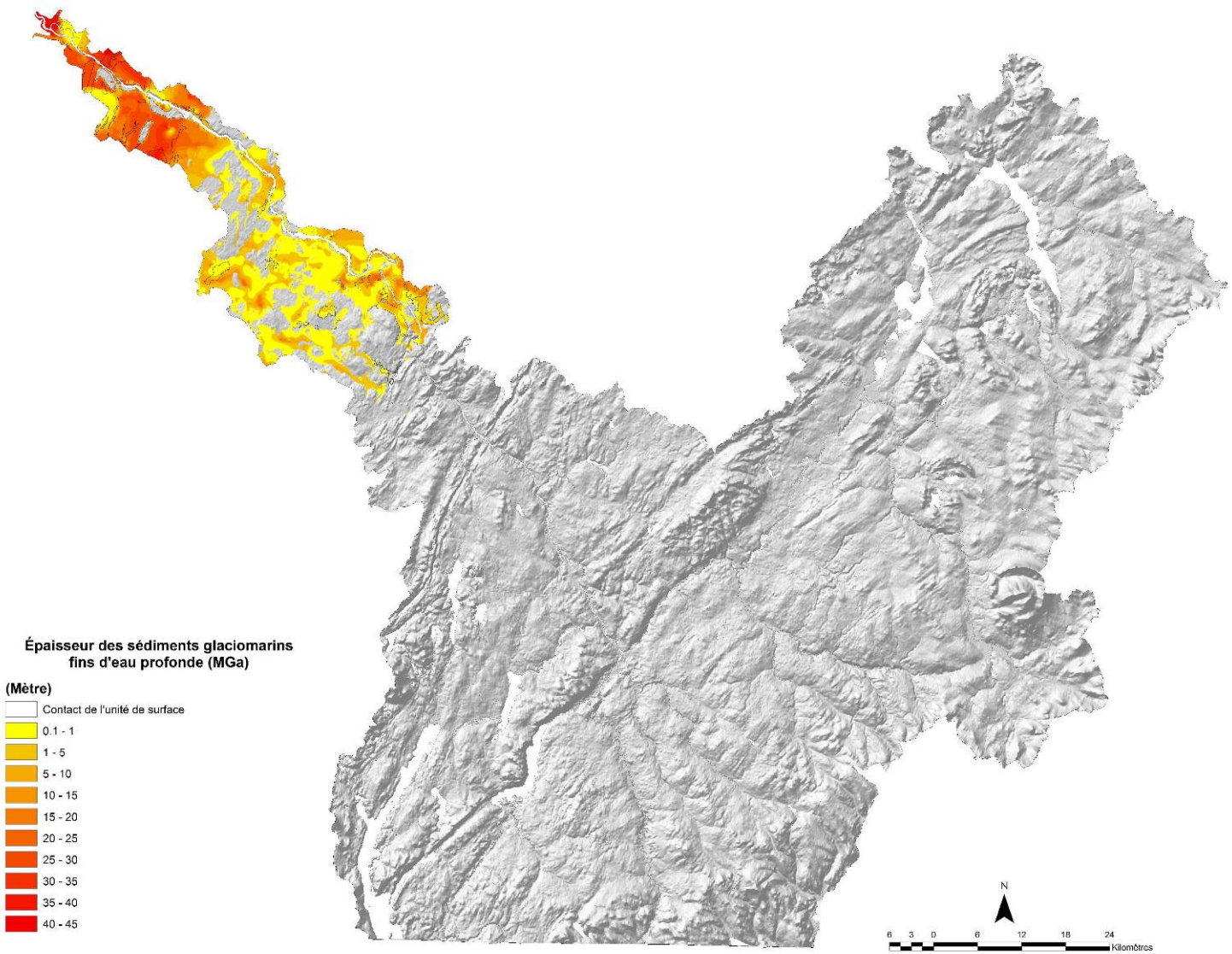
Appendice 6

Localisation et carte isopaque des sédiments glaciolacustres deltaïques et prodeltaïques (LGd).



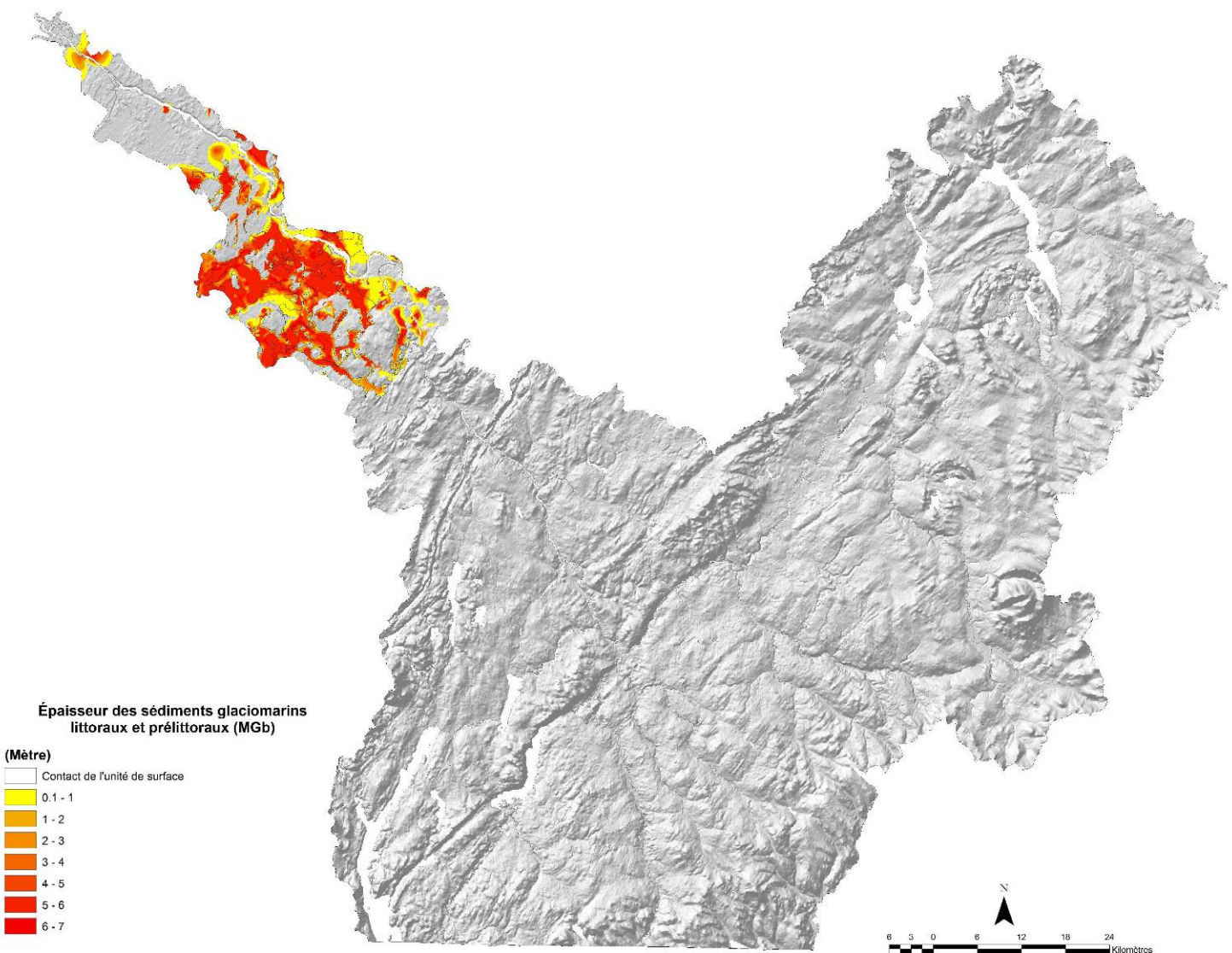
Appendice 7

Localisation et carte isopaque des sédiments glaciomarins d'eau profonde (MGa).



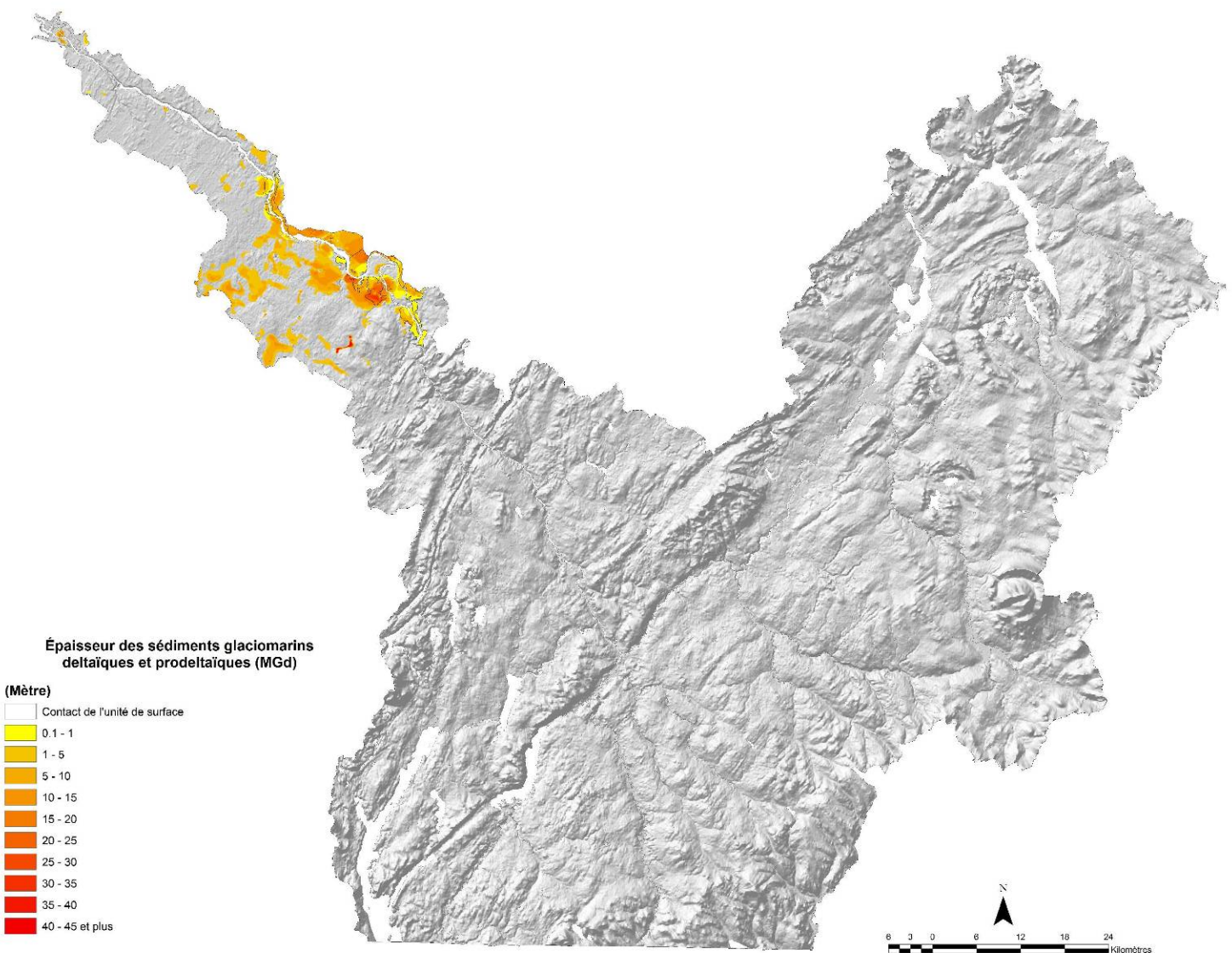
Appendice 8

Localisation et carte isopaque des sédiments glaciomarins littoraux et pré littoraux (MGb).



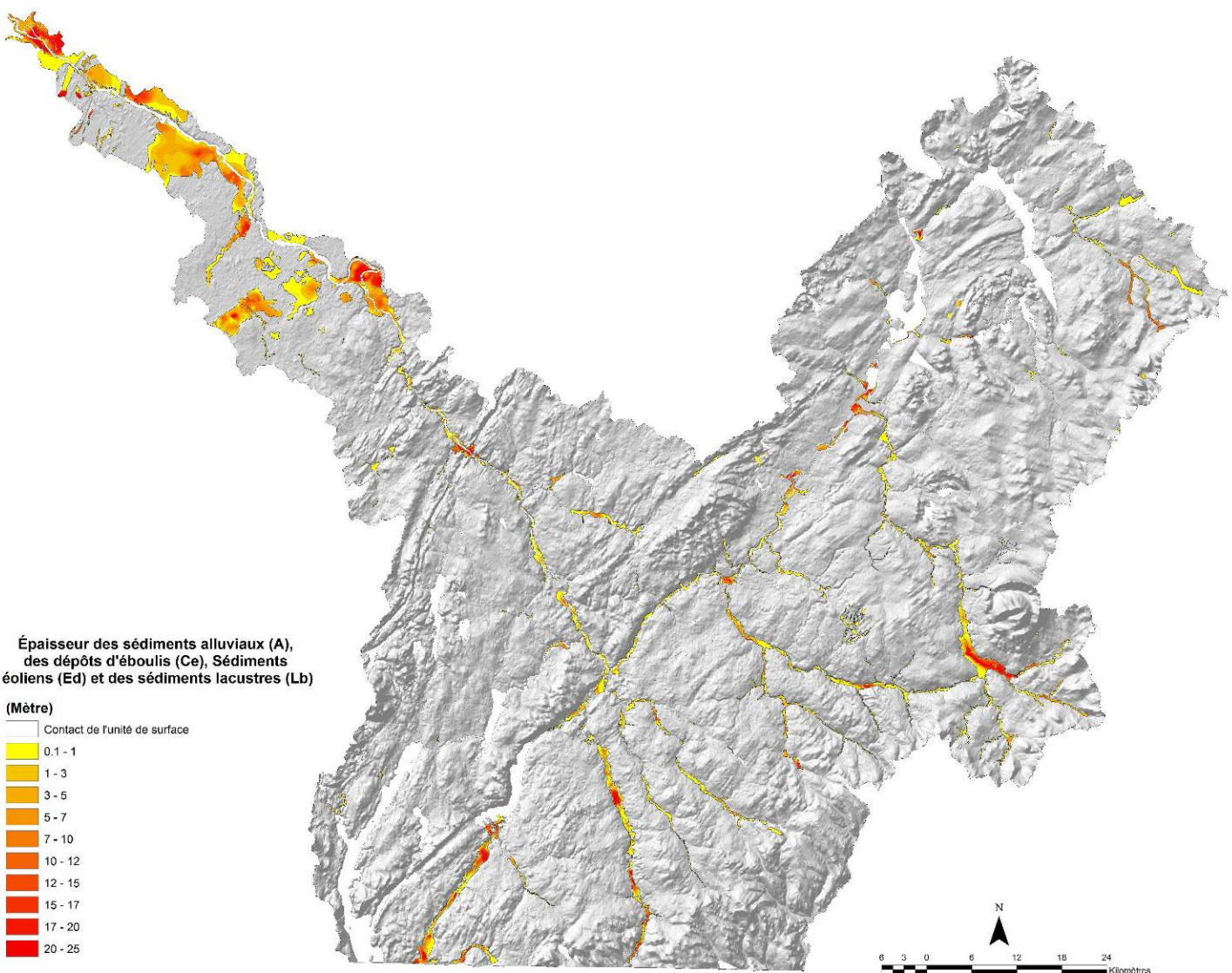
Appendice 9

Localisation et carte isopaque des sédiments glaciomarins deltaïques et prodeltaïques (MGd).



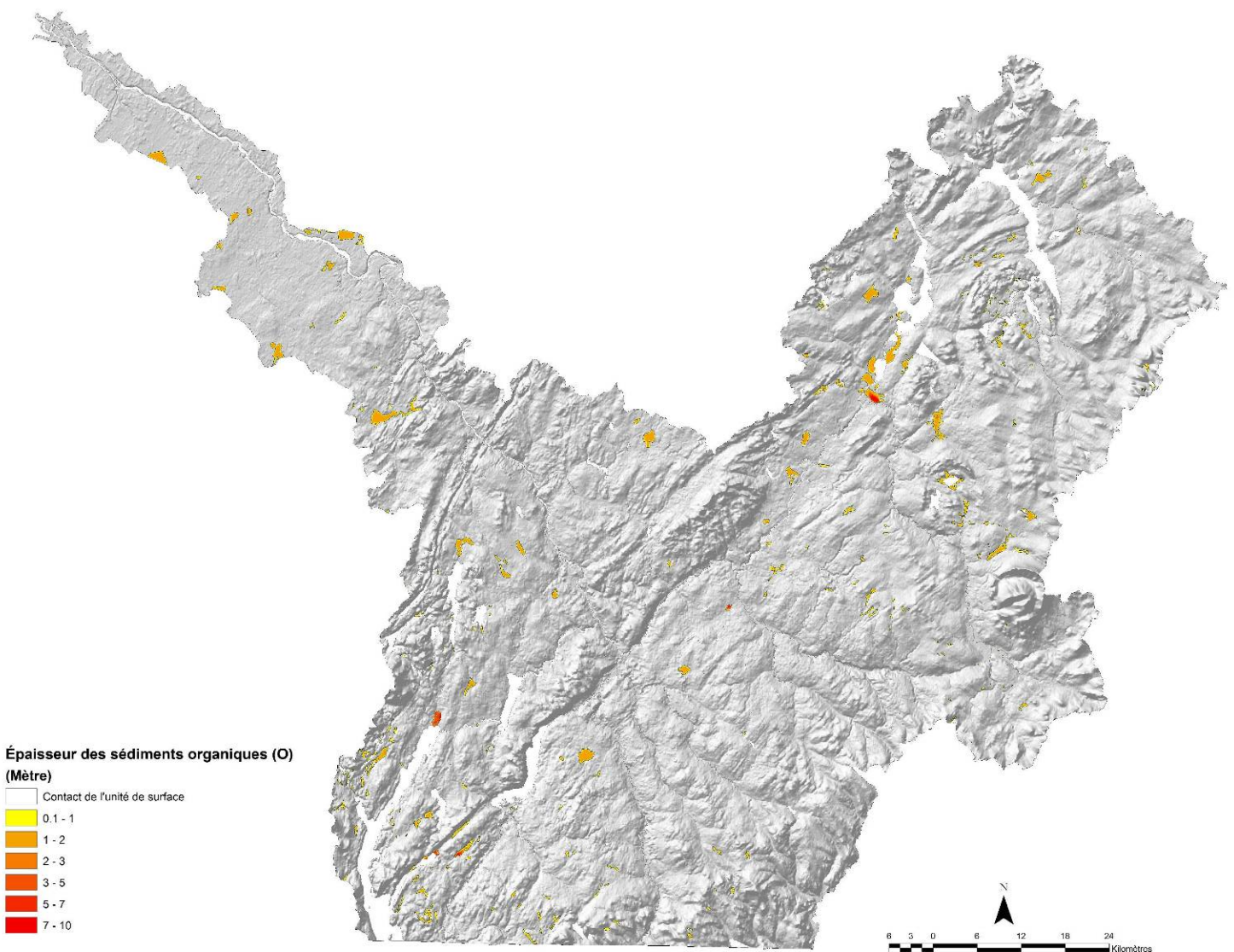
Appendice 10

Localisation et carte isopaque des sédiments alluviaux (Ap, At), des dépôts d'éboulis (Ce), des sédiments éoliens (Ed) et des sédiments lacustres (L).



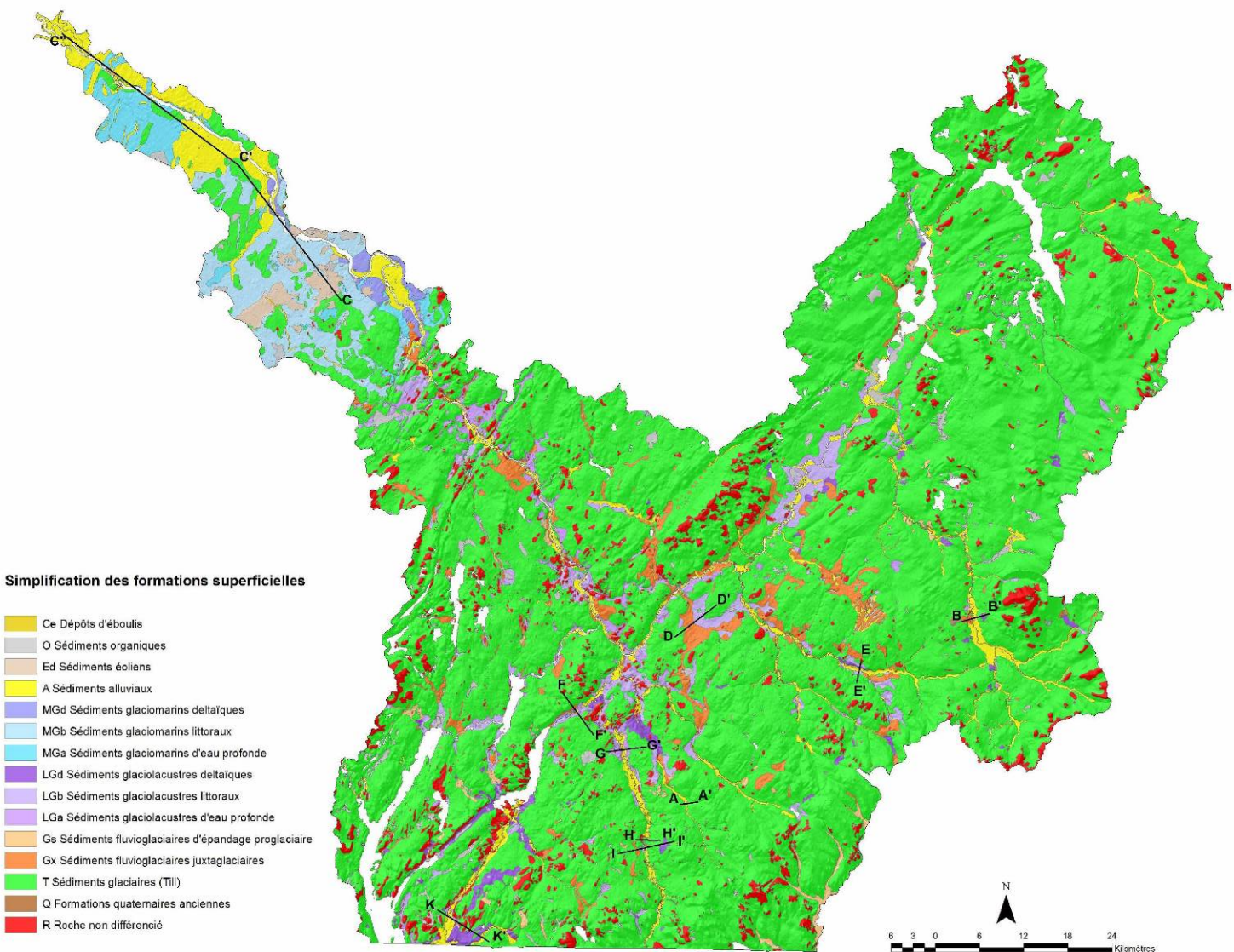
Appendice 11

Localisation et carte isopaque des sédiments organiques (O).



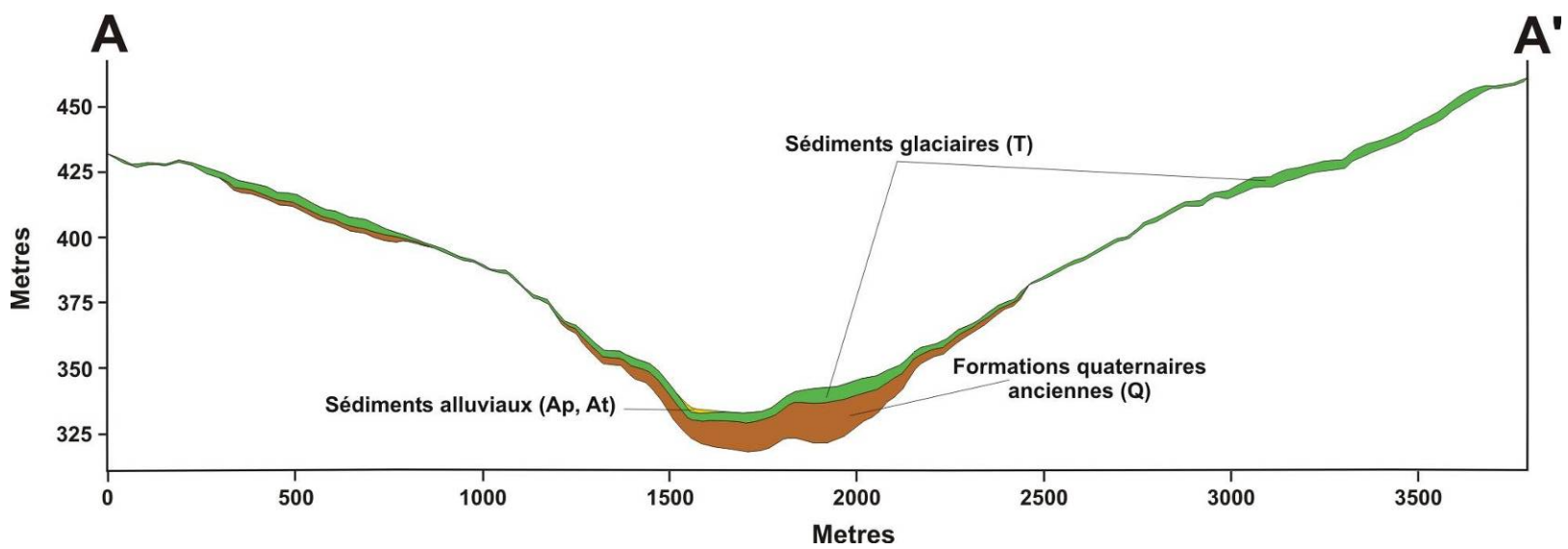
Appendice 12

Localisation des coupes topo-géologiques synthèses du bassin-versant de la rivière Saint-François.



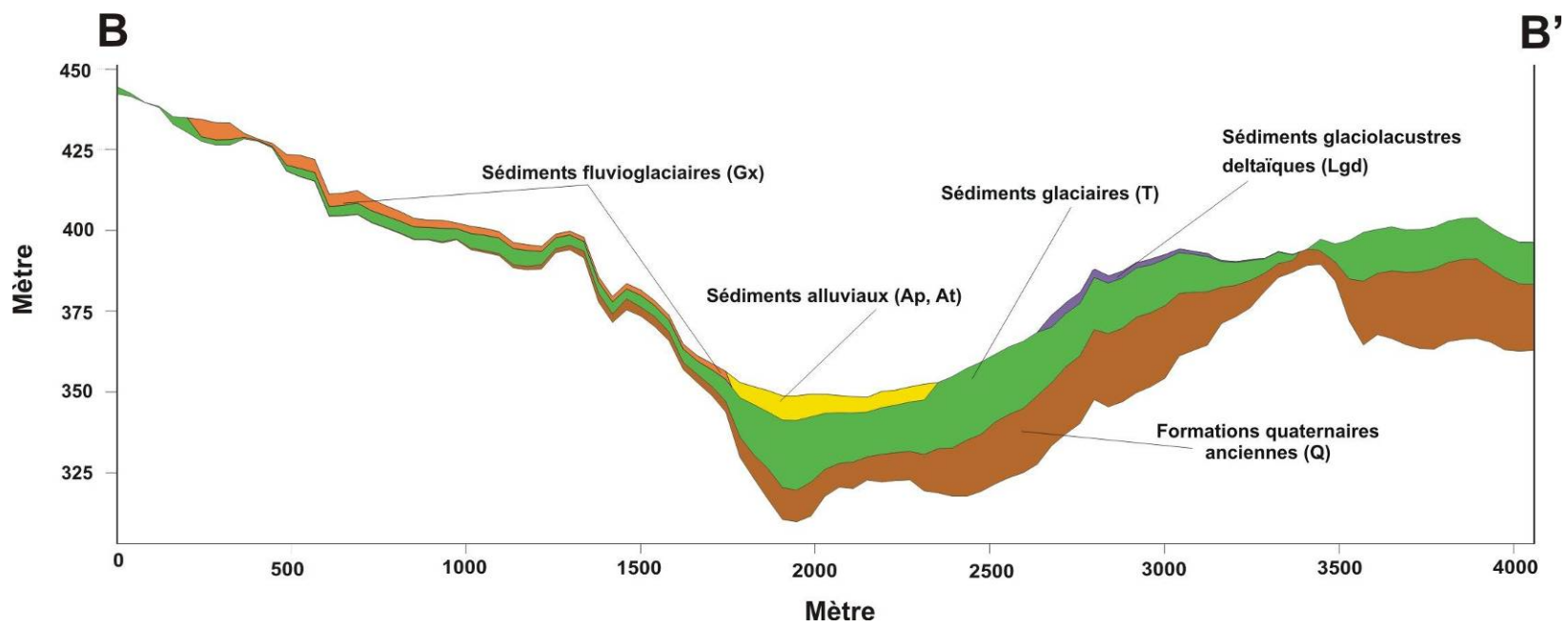
Appendice 13

Coupe topo-géologique de la rivière Moe.



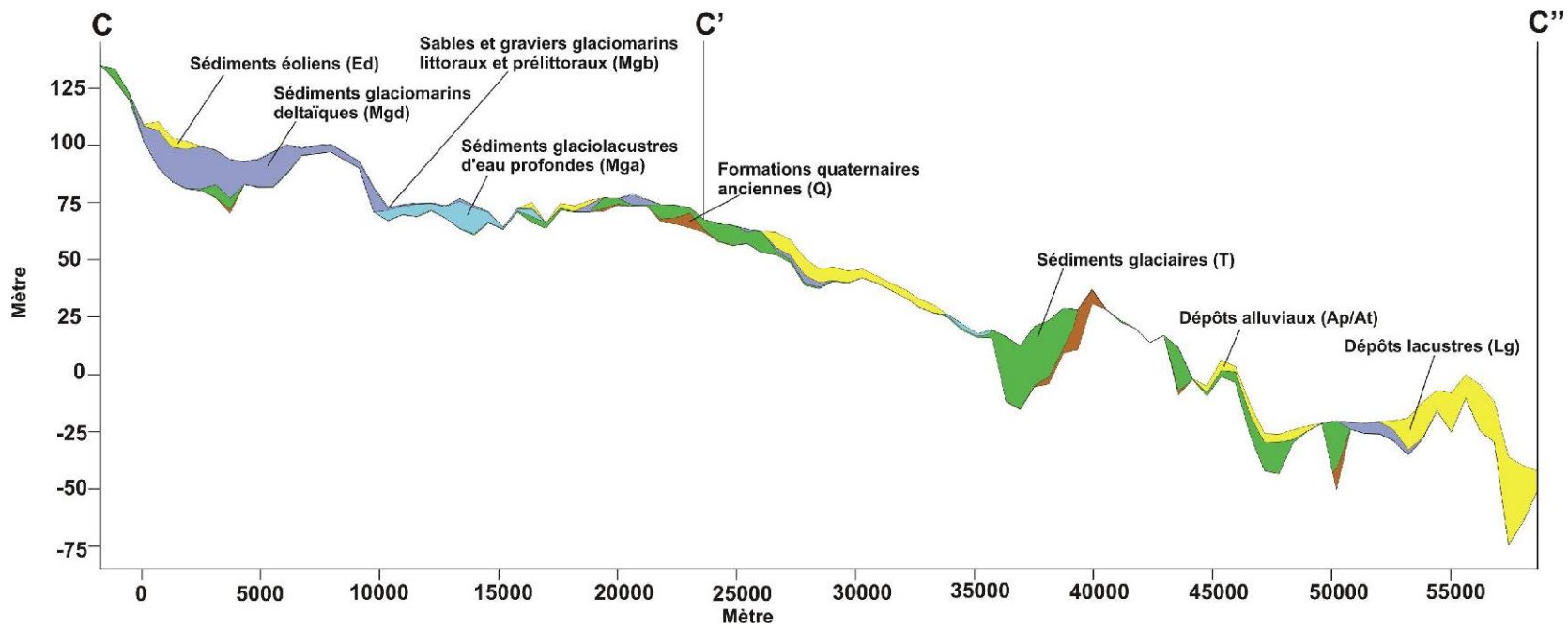
Appendice 14

Coupe topo-géologique de la rivière Saumon.



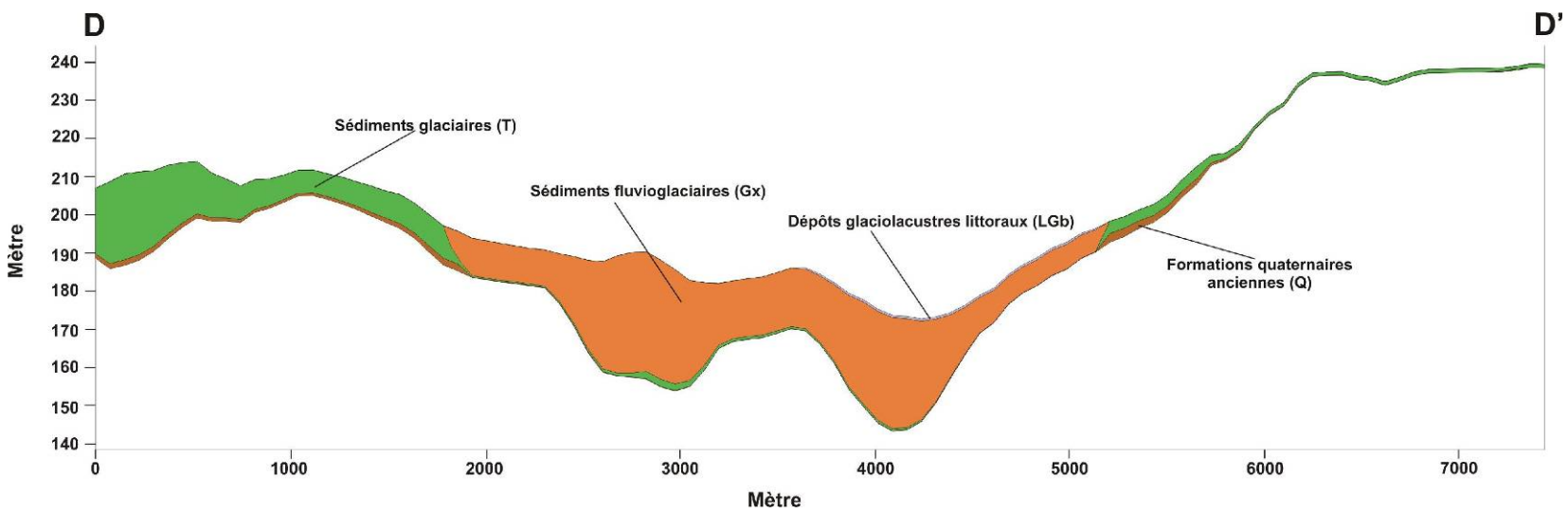
Appendice 15

Coupe topo-géologique des basses-terres du Saint-Laurent.



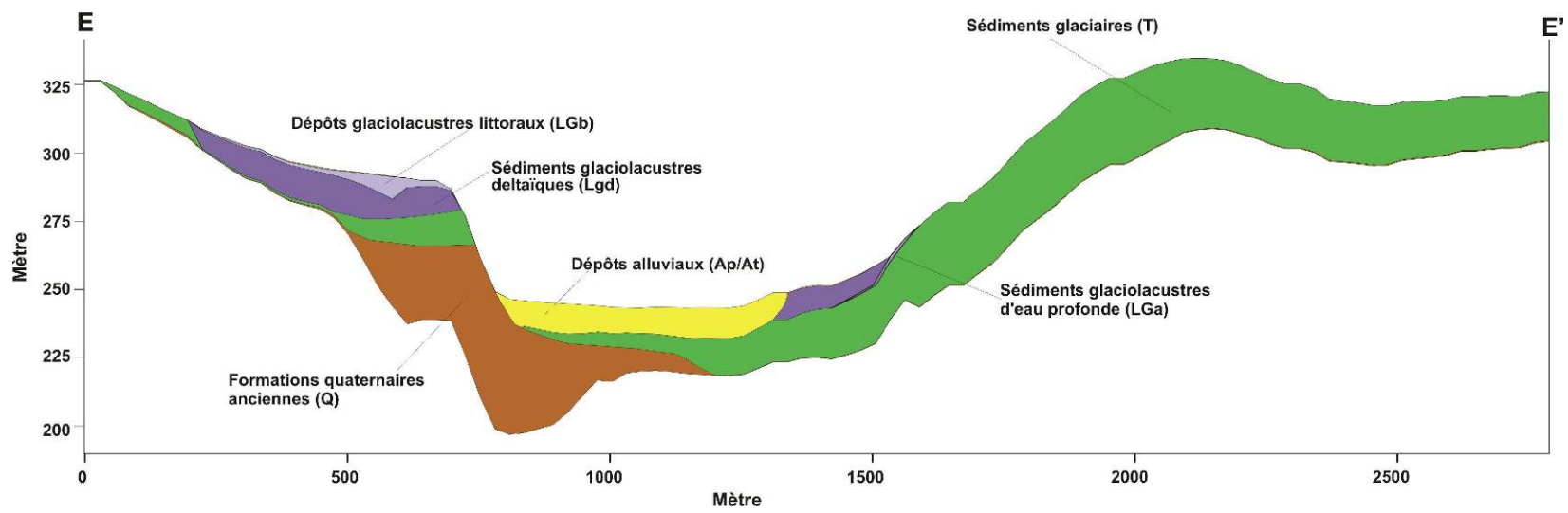
Appendice 16

Coupe topo-géologique de la moraine interlobaire à proximité de Cookshire.



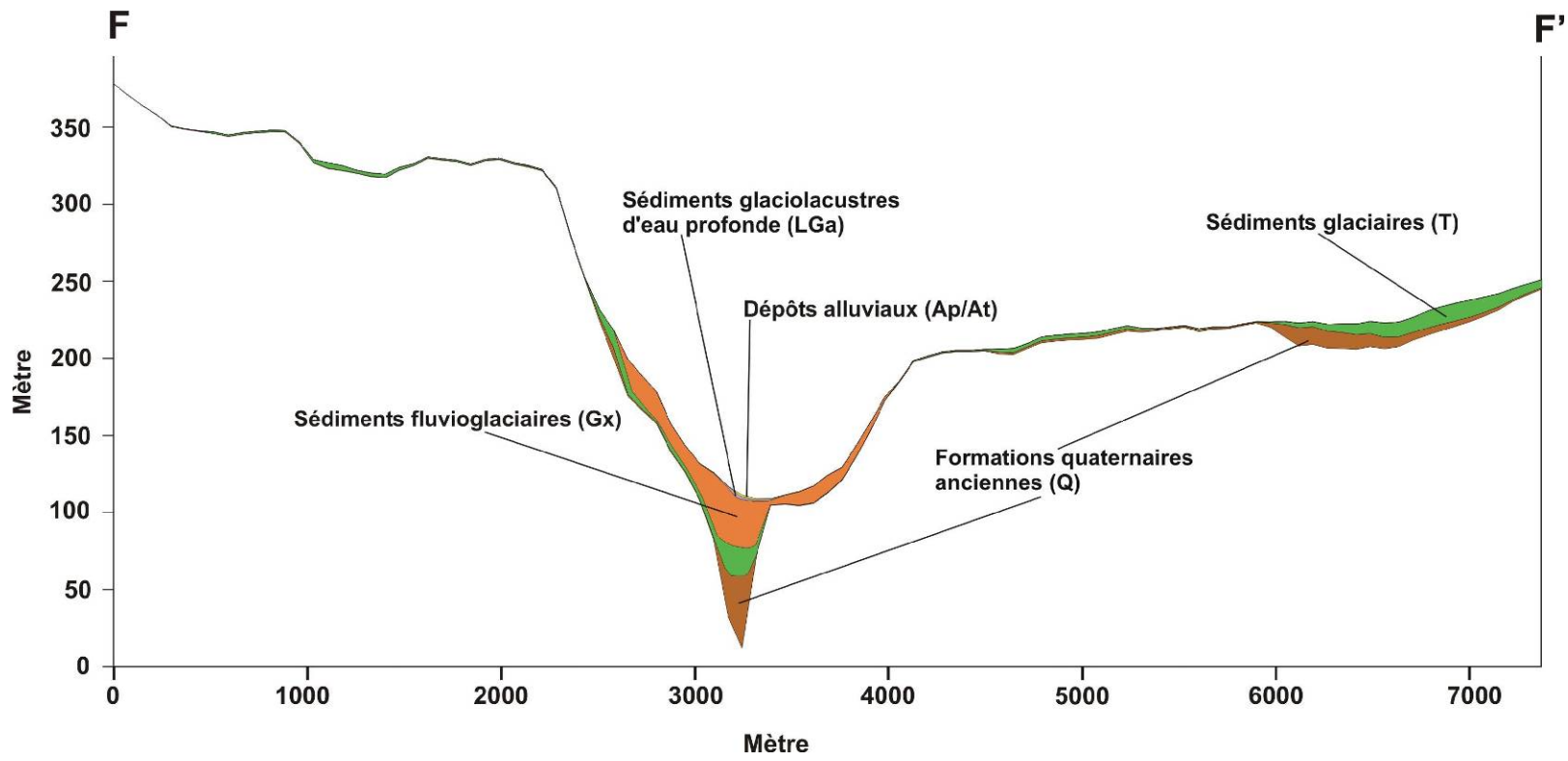
Appendice 17

Coupe topo-géologique de la coupe stratigraphique de la localité de New-Mexico.



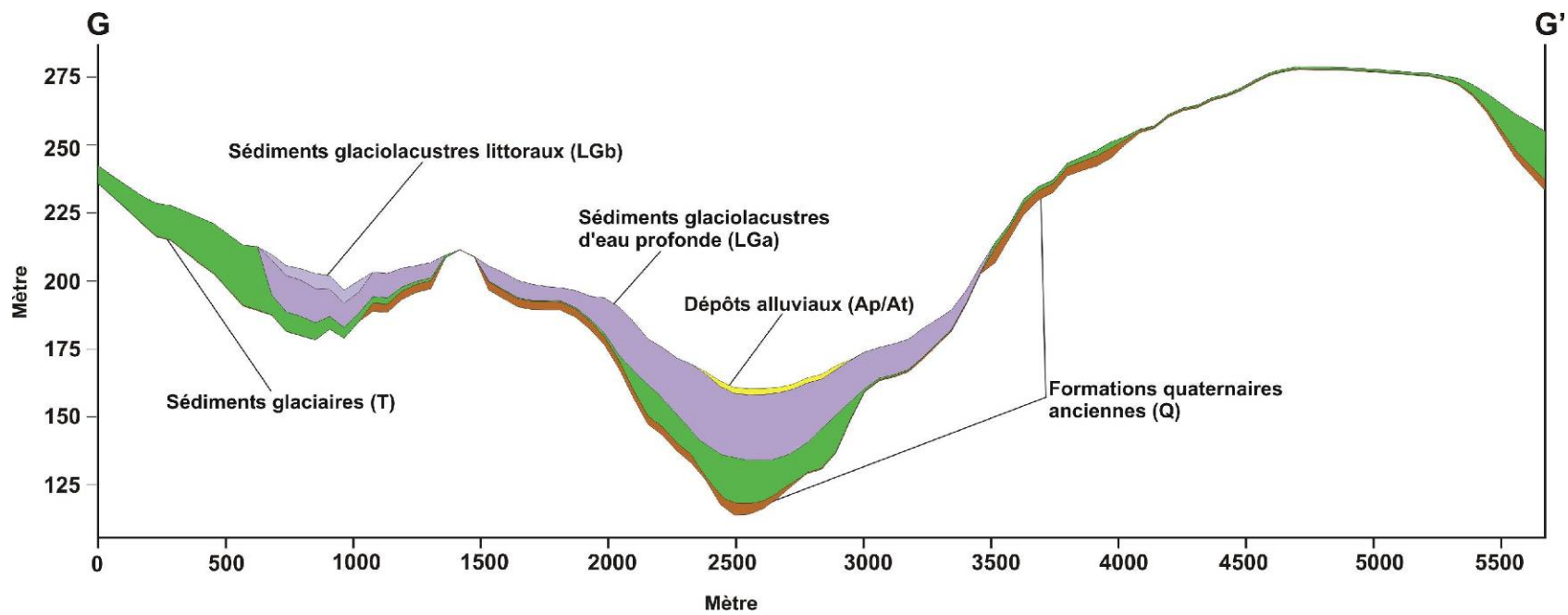
Appendice 18

Coupe topo-géologique des sédiments piégés dans la faille de la Guadeloupe.



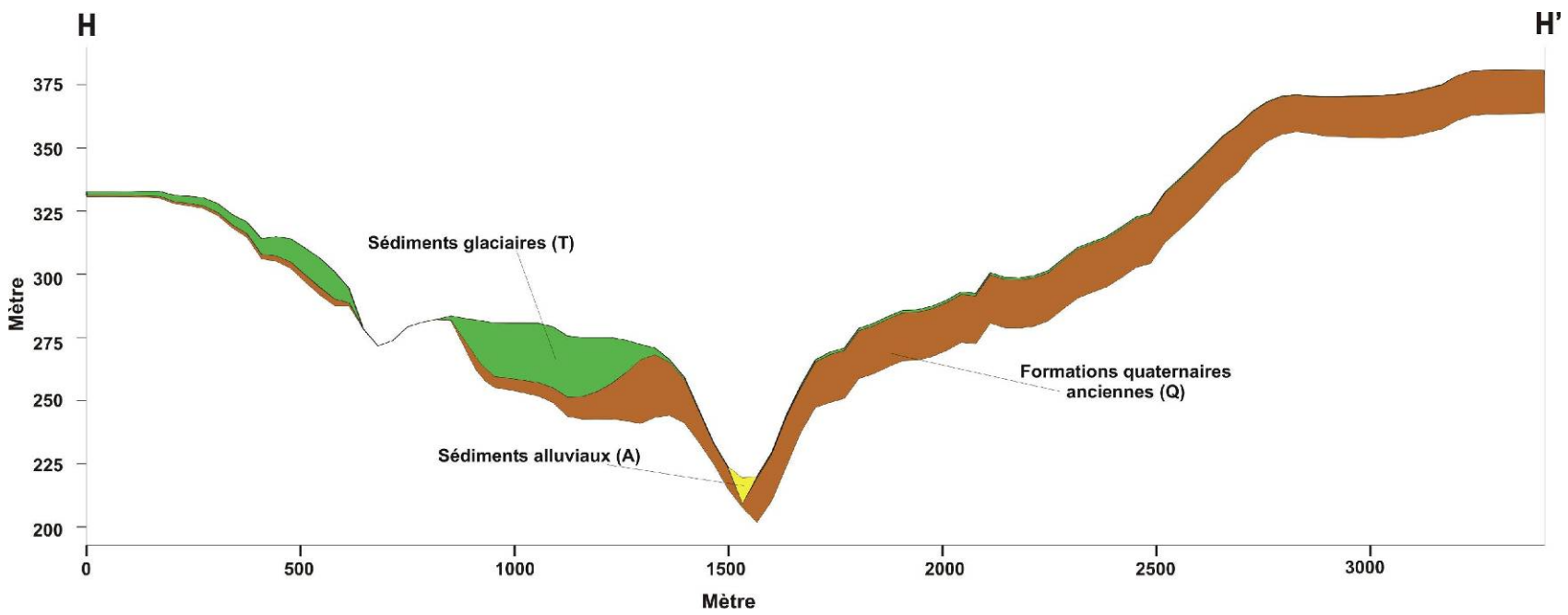
Appendice 19

Coupe topo-géologique dans le secteur de Milby



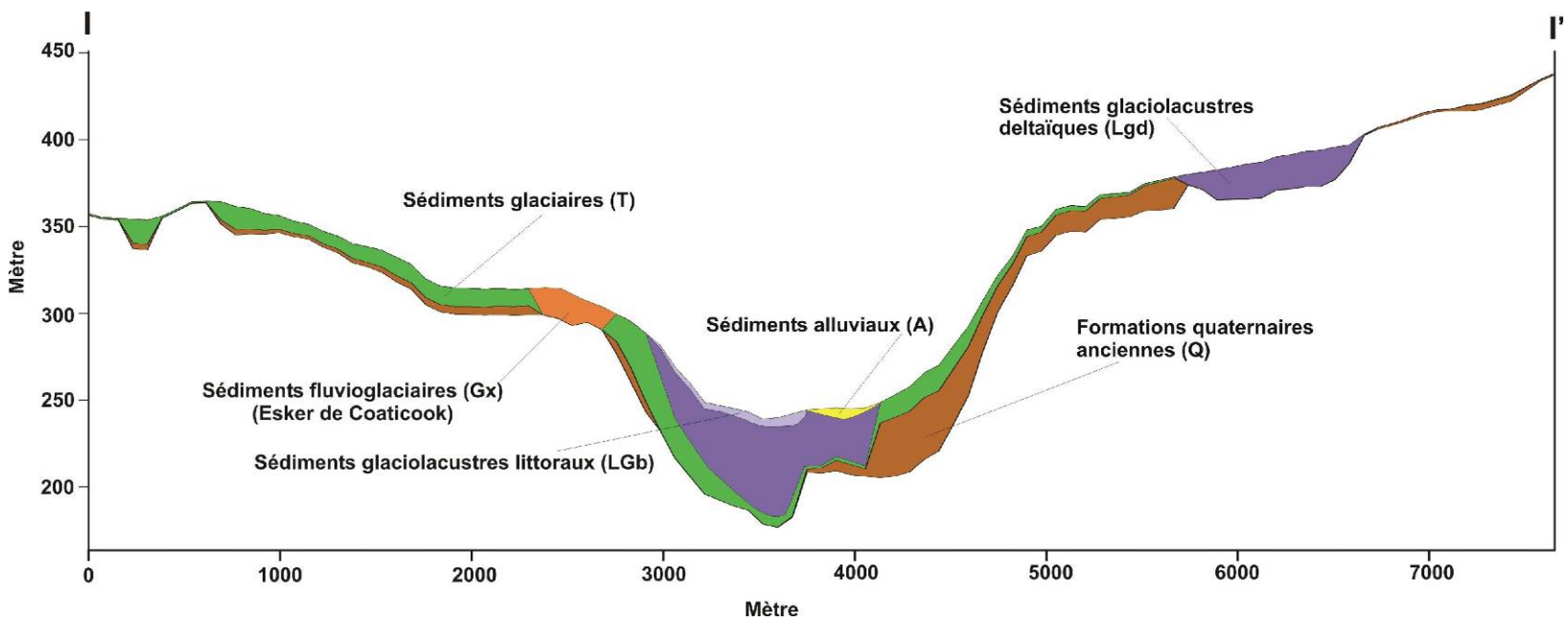
Appendice 20

Coupe topo-géologique dans la ville de Coaticook



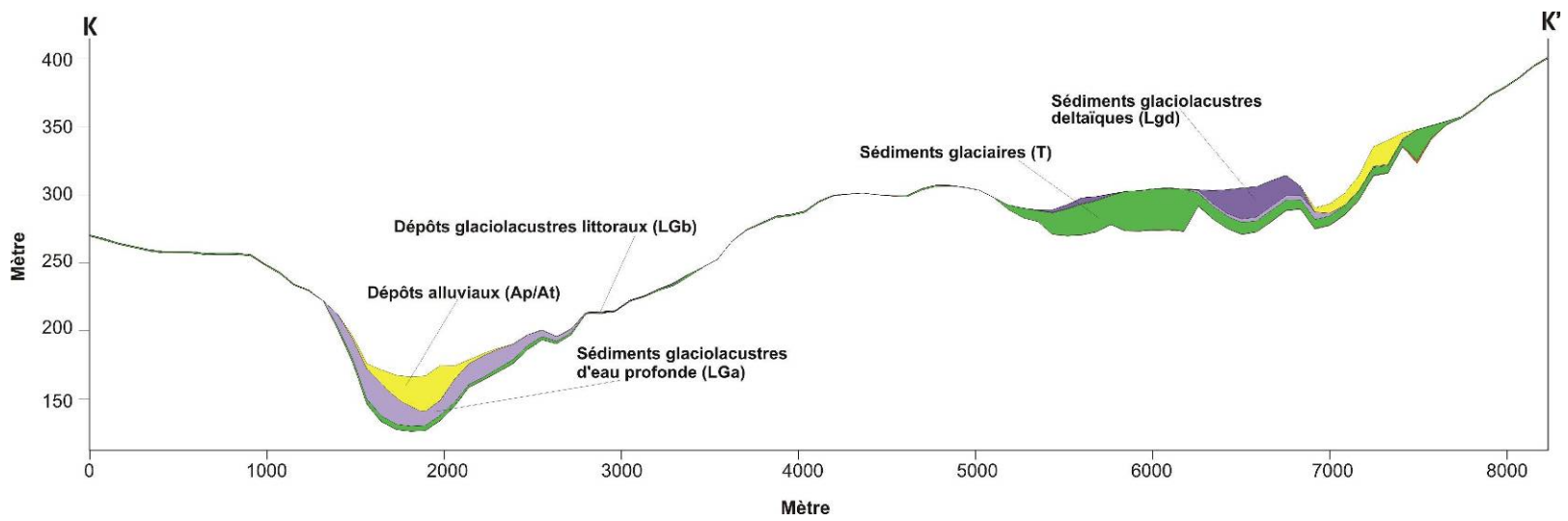
Appendice 21

Coupe topo-géologique de l'esker de Coaticook



Appendice 22

Coupe topo-géologique de la rivière Tomifobia.



Appendice 23

Liste des livrables

Modélisation géologique 3D des sédiments quaternaires du bassin-versant de la rivière Saint-François.

Département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère, Université du Québec à Montréal (UQAM)

Olivier Caron

Ce document contient :

Rapport: MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D DES SÉDIMENTS QUATÉNAIRES DU BASSIN-VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS : résumé du projet

- **Fichiers regroupant le modèle 3d (résolution des mailles 250 x 250m) des formations superficielles du bassin-versant de la rivière Saint-François.**
 - En format texte (CSV) – Notez bien que ces fichiers sont volumineux.
 - Fichier **ST_FRANCOIS_3D_DATAS_DB.csv** (et .xls; ce fichier contient les informations X,Y,Z et d'épaisseurs des unités lithostratigraphiques pour chaque maille du modèle tridimensionnelle)
 - Fichier **ST_FRANCOIS_3D_DATAS_FROM_TO.csv** (et .xls; ce fichier contient les informations géologiques en Z pour chaque maille du modèle tridimensionnelle)

-Les objects suivants sont visualisables à l'intérieur du projet gOcad® :

Projet gOcad : modèle_St_Francois_Vers2009_V1.gprj

Surface :

- 1 (a_lg_ce_ed ; Élévation des unités ; Alluvions, Sédiments lacustres,)
- 2 (o ; Élévation des sédiments organiques)
- 3 (mgb ; Élévation des sédiments glaciomarins littoraux et pré-littoraux)
- 4 (mgd ; Élévation des sédiments glaciomarins deltaïques)
- 5 (mga ; Élévation des sédiments glaciomarins d'eau profonde)
- 6 (lgb ; Élévation des sédiments glaciolacustres littoraux et pré-littoraux)

- 7 (lgd ; Élévation des sédiments glaciolacustres deltaïques)
- 8 (lga ; Élévation des sédiments glaciolacustres d'eau profonde)
- 9 (gs_gx ; Élévation des sédiments fluvioglaciaires)
- 10 (t ; Élévation des sédiments glaciaires)
- 11 (q ; Élévation des formations quaternaires anciennes)
- 12 (r ; Substratum rocheux)

-CARTE_QUATERNAIRE_ST_FRANCOIS.rar : Données cartographiques (SHP) visualisable à partir du logiciel ArcGIS (ESRI)

CARTE_QUATERNAIRE_ST_FRANCOIS.shp

CARTE_QUATERNAIRE_ST_FRANCOIS_SIMPLIFIEE_3D.shp

- **RASTERS_EPAISSEURS_3D_STFRANCOIS.rar** : Différentes unités lithostratigraphiques (raster GRID) visualisable avec le logiciel ArcGIS (Esri) 9.3
 - **ST_FRANCOIS_dz_a_lg_ce_ed** (Épaisseurs des unités ; Alluvions, Sédiments lacustres,)
 - **ST_FRANCOIS_dz_o** (Épaisseurs des sédiments organiques)
 - **ST_FRANCOIS_dz_mgb** (Épaisseurs des sédiments glaciomarins littoraux et pré-littoraux)
 - **ST_FRANCOIS_dz_mgd** (Épaisseurs des sédiments glaciomarins deltaïques)
 - **ST_FRANCOIS_dz_mga** (Épaisseurs des sédiments glaciomarins d'eau profonde)
 - **ST_FRANCOIS_dz_lgb** (Épaisseurs des sédiments glaciolacustres littoraux et pré-littoraux)
 - **ST_FRANCOIS_dz_lgd** (Épaisseurs des sédiments glaciolacustres deltaïques)
 - **ST_FRANCOIS_dz_lga** (Épaisseurs des sédiments glaciolacustres d'eau profonde)
 - **ST_FRANCOIS_dz_gs_gx** (Épaisseurs des sédiments fluvioglaciaires)
 - **ST_FRANCOIS_dz_t** (Épaisseurs des sédiments glaciaires)
 - **ST_FRANCOIS_dz_q** (Épaisseurs des formations quaternaires anciennes)

CARTE_QUATERNAIRE_ST_FRANCOIS.rar : Données cartographiques (SHP) visualisable à partir du logiciel ArcGIS (ESRI)

- **CARTE_QUATERNAIRE_ST_FRANCOIS.shp**
- **CARTE_QUATERNAIRE_ST_FRANCOIS_SIMPLIFIEE_3D.shp**