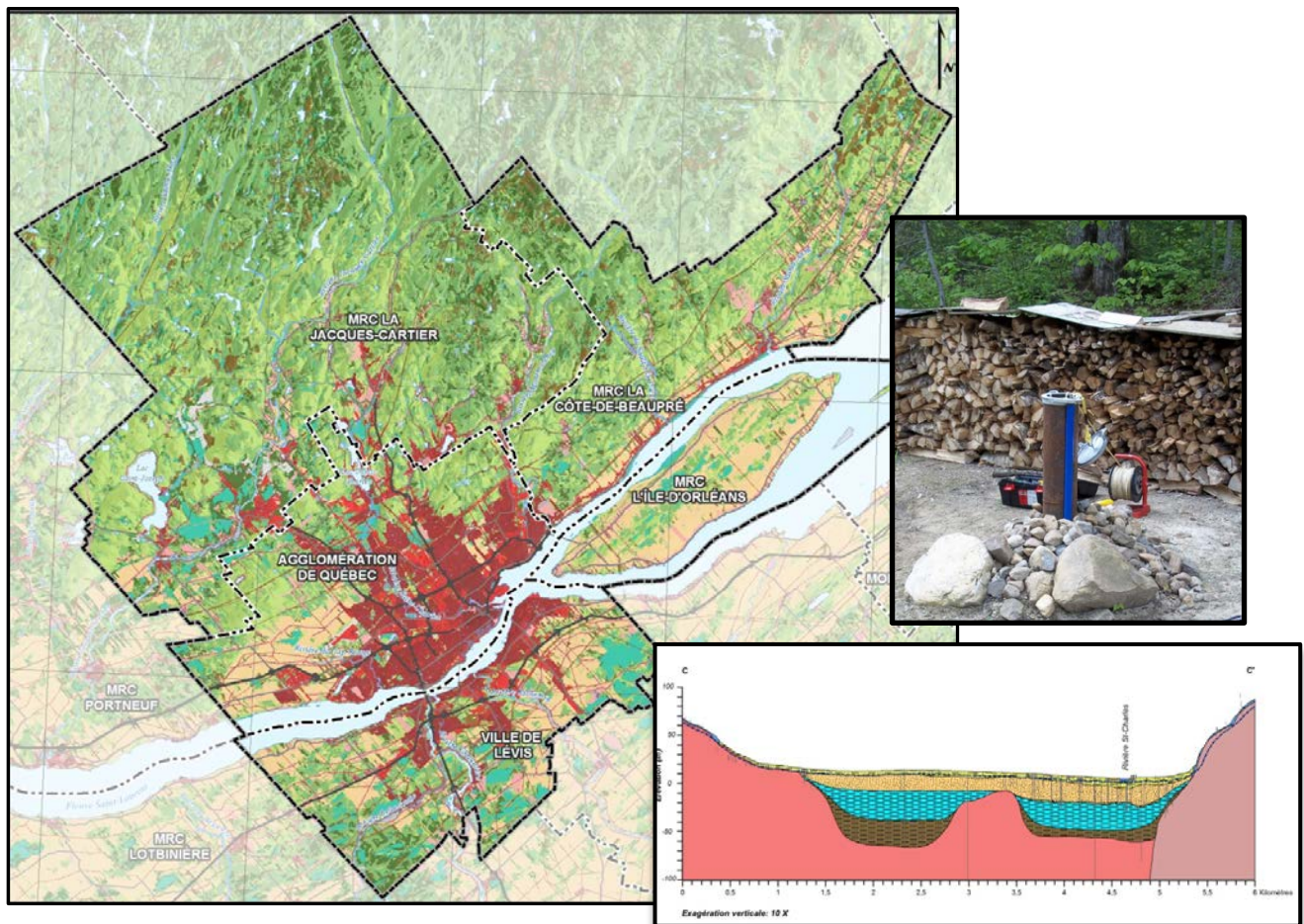


Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (PACES-CMQ)

Rapport final

Soumis par le Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval
au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP)
dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec
(PACES)



31 mars 2013

Mise en garde

Les résultats du projet PACES-CMQ ont été produits à une échelle cartographique régionale afin d'établir le portrait hydrogéologique global de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ). En tout temps, dans le cas de problématiques locales à l'échelle d'une propriété ou d'une aire d'alimentation d'un puits, des études plus détaillées sont nécessaires. L'Université Laval ne se porte pas garante des divergences entre les résultats de cette étude régionale et celles provenant d'investigations détaillées à des études locales.

Figures de couverture

La figure centrale illustre une particularité de la Communauté métropolitaine de Québec, qui est constituée de secteurs fortement urbanisés, incluant une région urbaine dense dans l'Agglomération de Québec et la Ville de Lévis, en opposition à un secteur forestier non peuplé au nord.

La photographie du puits représente l'importance des travaux de terrain dans le cadre de l'étude. Plusieurs travaux ont permis de bonifier les informations hydrogéologiques déjà disponibles sur le territoire et d'accroître la qualité des interprétations et des analyses hydrogéologiques.

La figure du bas à droite est un exemple d'une coupe hydrostratigraphique de l'aquifère du Proto-Saint-Laurent à l'embouchure de la rivière Saint-Charles. Ces coupes permettent de synthétiser l'information géologique et de comprendre les processus naturels d'écoulement des eaux souterraines.

Note au lecteur

L'Université Laval a reçu le mandat de réaliser le Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (PACES-CMQ) ainsi que celui du territoire municipalisé de l'Outaouais (PACES-OUT). Par conséquent, les deux rapports ont été rédigés par la même équipe de travail et le contenu peut être similaire d'un rapport à l'autre.

ÉQUIPE DE RÉDACTION ET DE CARTOGRAPHIE

Université Laval

Marie-Catherine Talbot Poulin, ing.jr, M.Sc., professionnelle de recherche
Guillaume Comeau, ing., M.Sc., professionnel de recherche
Yohann Tremblay, M.Sc., professionnel de recherche
René Therrien, ing., Ph.D., professeur, coordonnateur
Jean-Michel Lemieux, ing., Ph.D., professeur
John Molson, ing., Ph.D., professeur
Richard Fortier, ing., Ph.D., professeur
Pierre Therrien, M.Sc., responsable de travaux pratiques et de recherche
Marie-Michèle Nadeau, étudiante à la maîtrise
Francis Donati-Daoust, étudiant à la maîtrise
Simon Bérubé, étudiant à la maîtrise
Lise Lamarche, Ph.D., post-doctorante

Communauté métropolitaine de Québec

Mylène D'Aoust, agr., conseillère sénior en environnement
Alexandre Bélanger, géogr., conseiller en environnement
André Bouillon, urbaniste, conseiller en aménagement du territoire
Bruno Labonté, coordonnateur en géomatique
Charlotte Ménin, technicienne en géomatique et recherche
Caroline Lavoie, technicienne en géomatique et recherche

Pour citer ce rapport :

Talbot Poulin, M.C., Comeau, G., Tremblay, Y., Therrien, R., Nadeau, M.M., Lemieux, J.M., Molson, J., Fortier, R., Therrien, P., Lamarche, L., Donati-Daoust, F., Bérubé, S. (2013). *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport final*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, mars 2013, 172 pages, 19 annexes, 28 cartes.

Pour nous joindre :



Université Laval
Faculté des sciences et de génie
Département de géologie et de génie géologique

1065, avenue de la Médecine
Québec (Québec) G1V 0A6 CANADA
T : 418-656-2193 F : 418-656-7339
<http://www.ggl.ulaval.ca/>



Communauté métropolitaine de Québec

Édifice Le Delta III
2875, boulevard Laurier
10e étage, bureau 1000
Québec (Québec) G1V 2M2 CANADA
T : 418 641-6250 F : 418-641-6545
<http://www.cmquebec.qc.ca/>

PARTENAIRES



RÉSUMÉ

Le Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (PACES-CMQ) dresse le portrait régional de la ressource en eau souterraine sur le territoire municipalisé de la CMQ et permet ainsi de pallier au manque d'information sur cette ressource. Jusqu'au dépôt de ce rapport, l'information existante sur la ressource en eau souterraine de la CMQ était soit incomplète ou non uniforme selon les secteurs, et il n'existait pas de synthèse régionale des connaissances sur les eaux souterraines. Le présent rapport technique s'adresse à un public avisé qui possède des notions de base en sciences de la terre ou en environnement. Il contient une présentation du milieu naturel et humain du territoire de la CMQ, un inventaire des données acquises dans le cadre du projet, une présentation des contextes géologiques et hydrogéologiques ainsi que l'évaluation des réserves et des utilisations de la ressource en eau souterraine.

La CMQ est le point de rencontre de trois grandes provinces géologiques (le Grenville, la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches) dont les lithologies, la structure et la fracturation sont distinctes. Depuis la dernière période glaciaire du Quaternaire, plusieurs événements géologiques ont mené à la mise en place de différents dépôts meubles et au développement de plusieurs contextes hydrogéologiques.

Dans les Laurentides et sur son piémont, d'importants aquifères de sables et graviers d'origine fluvioglaciaire ou deltaïque, dont l'épaisseur peut atteindre plus de 50 m, sont notamment présents au droit des vallées des rivières Jacques-Cartier, Montmorency et Sainte-Anne. Ces aquifères présentent des conditions variables de confinement, allant de libre à confiné, selon la présence ou non d'horizons de silt peu perméable. Ces aquifères peuvent être très complexes et il est difficile de les cartographier autant à l'échelle régionale que locale. La recharge et la vulnérabilité de ces aquifères sont élevées. À l'exception du cas bien connu de contamination au trichloréthylène (TCE) à Val-Bélair et Shannon, la qualité de l'eau souterraine de ces aquifères est généralement bonne et montre peu ou pas de dépassements des critères de potabilité ou des objectifs esthétiques. Compte tenu de leur transmissivité élevée et de la bonne qualité de leur eau souterraine, ils représentent un bon potentiel d'exploitation tant pour les fins de consommation que pour l'installation de systèmes géothermiques en boucles ouvertes. Plusieurs municipalités de la MRC de La Jacques-Cartier, la MRC de La Côte-de-Beaupré et la Ville de Québec exploitent d'ailleurs ces aquifères pour combler en totalité ou en partie les besoins en eau de leurs résidents.

Ailleurs dans les Laurentides, hors des vallées, l'eau souterraine disponible se trouve dans les fractures du roc grenvillien lorsque que le relief du roc est prédominant et que les aquifères de sables et graviers ne sont plus présents. Les formations de roc fracturé forment des aquifères qui couvrent les deux tiers du territoire municipalisé de la CMQ mais dans des secteurs peu habités. L'eau souterraine de ces aquifères de roc fracturé ne peut généralement être soutirée qu'à des fins domiciliaires, compte tenu de leur faible perméabilité. Leur recharge est élevée et leur vulnérabilité à la contamination est moyenne. La qualité de l'eau souterraine est généralement bonne mais la présence de fluorures, reliée à la composition minéralogique de la roche, est à surveiller tout comme le

manganèse, qui peut causer des désagréments esthétiques. En raison des conductivités thermiques élevées de la plupart des roches grenvilliennes présentes dans les Laurentides, ce secteur de la CMQ offre un bon potentiel pour l'installation de systèmes géothermiques en boucles fermées verticales.

Dans la basse ville de Québec, l'ancien chenal emprunté par le fleuve au moment de la déglaciation est appelé Proto-Saint-Laurent. L'épaisse succession de dépôts meubles de ce secteur comprend principalement des dépôts fins sur lesquels reposent des aquifères de sable atteignant 20 m d'épaisseur à l'embouchure de la rivière Saint-Charles et 30 m à l'embouchure de la rivière Cap-Rouge. Ces aquifères sont non confinés à semi confinés lorsque les dépôts silteux de la rivière Saint-Charles recouvrent l'aquifère sur une plus grande épaisseur. Ces aquifères du Proto-Saint-Laurent sont majoritairement situés en zone urbaine dense, où l'imperméabilisation créée par le bâti (immeubles, stationnements, rues) a pour effet d'augmenter le ruissellement des précipitations et de limiter la recharge de l'aquifère. Ils ne sont pas exploités à des fins de consommation en eau potable. La perméabilité élevée de ces aquifères suggère un potentiel géothermique élevé pour des systèmes en boucles ouvertes. Cependant, même si les systèmes en boucles ouvertes semblent à priori intéressants, la composition physicochimique de l'eau souterraine dans ces aquifères pourrait en limiter l'efficacité en causant, par exemple, le colmatage des crépines des puits géothermiques. Des analyses physicochimiques plus détaillées seraient souhaitables afin d'anticiper de tels problèmes.

Sur la rive sud, la Ville de Lévis se trouve majoritairement sur des dépôts silto-argileux de très faible perméabilité qui recouvrent l'aquifère de roc fracturé. À certains endroits, des aquifères de sables et graviers fluvioglaciers de faible étendue peuvent affleurer ou être enfouis sous les dépôts silto-argileux. Lorsqu'ils sont plus épais, les dépôts silto-argileux confinent les aquifères, entraînant par le fait même une diminution de leur recharge et de leur vulnérabilité à la contamination. La qualité de l'eau souterraine est généralement bonne. Les dépassements du critère de potabilité du baryum et des fluorures sont rares et expliqués par la nature des roches appalachiennes présentes sur la rive sud de la CMQ. Le sodium, le manganèse et les matières dissoutes totales sont les paramètres pouvant entraîner des problèmes récurrents d'ordre esthétique comme un mauvais goût, une mauvaise odeur ou une coloration. La majorité de la consommation de l'eau souterraine à Lévis se fait par des ouvrages de captage individuel, car la capacité de l'aquifère à soutenir un bon débit de prélèvement étant restreinte par la faible étendue des aquifères de sables et gravier de même que par la faible perméabilité des aquifères de roc fracturé. Le potentiel géothermique est relativement faible. Toutefois, la présence de dépôts sableux saturés dans les trois premiers mètres de sols pourrait permettre l'installation de systèmes à boucles fermées horizontales dans quelques secteurs.

À l'île d'Orléans et sur Promontoire de Québec, la faible épaisseur de dépôts recouvrant l'aquifère de roc mène généralement à une recharge et à une vulnérabilité moyenne. L'eau souterraine n'est pas utilisée à des fins de consommation sur le Promontoire de Québec, contrairement à l'ensemble des résidents de l'île d'Orléans. À l'île d'Orléans, l'aquifère de roc est peu perméable et la qualité physicochimique de l'eau souterraine est généralement bonne, mais de fréquents problèmes de contamination bactériologique existent (Dion-Dupont *et coll.*, 2013). Les seuls systèmes géothermiques applicables seraient ceux en

boucles fermées verticales car il n'y a pas d'aquifères de dépôts meubles et peu de dépôts sableux épais.

L'établissement du portrait régional des eaux souterraines sur le territoire de la CMQ a mené à une meilleure connaissance des contextes hydrogéologiques régionaux et de l'exploitation actuelle de l'eau souterraine. La cueillette d'information existante et la réalisation de travaux de terrain supplémentaires ont de plus permis de mettre sur pied une base de données régionale. L'établissement de cette base de données, ainsi la définition des contextes géologiques et hydrogéologiques sont des étapes nécessaires à la mise en place des pratiques d'exploitation durable de la ressource en eau souterraine sur le territoire de la CMQ.

REMERCIEMENTS

L'équipe de réalisation du projet aimerait remercier les partenaires locaux (les organismes de bassins versants, les villes, les municipalités, les municipalités régionales de comtés et la Communauté métropolitaine de Québec) qui ont reconnu la nécessité de l'amélioration des connaissances sur les eaux souterraines de leur territoire. Ils ont appuyé le projet financièrement et logistiquement en facilitant les contacts auprès des municipalités qui étaient une partie prenante de la collecte de rapports déjà existants et de la réalisation des travaux de terrain. Nous remercions chaleureusement les employés municipaux qui ont coopéré dans ces processus. La contribution de la Communauté métropolitaine de Québec a été colossale pour la recherche et la représentation cartographique des thèmes portant sur la présentation du territoire. Nous voulons également mentionner la participation et les échanges faits avec L'Agence de traitement de l'information numérique en Outaouais (L'ATINO), partenaire du projet de l'Université Laval en Outaouais, qui ont servi à l'amélioration des résultats et analyses cartographiques.

Nous voulons souligner la participation des citoyens qui ont permis l'accès à leurs puits pour les travaux d'échantillonnage de l'eau souterraine. Plusieurs organismes publics et privés ont également mis à la disposition du projet des études pertinentes qui ont servi à améliorer la qualité des résultats.

Nous saluons l'initiative du réseau de l'Université du Québec d'avoir créé le Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES), qui est une plate-forme d'échange d'information et de méthodes de traitements, ajoutant à la qualité des produits livrés au MDDEFP. En particulier, l'Institut national de la recherche scientifique a apporté un support dans les aspects de qualité de l'eau et de modélisation de la recharge.

Finalement, le projet n'aurait pas été possible sans la mise sur pied du Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines (PACES) et l'octroi du financement de la part du ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP). Plusieurs professionnel(le)s clé(e)s au sein du MDDEFP ont grandement contribué à l'avancement du projet par leur dynamisme. Nous saluons la volonté du MDDEFP d'acquérir de meilleures connaissances et de doter la province d'outils d'aide à la décision pour faire face aux enjeux actuels et futurs auxquels fait face cette importante ressource qu'est l'eau souterraine.

TABLE DES MATIÈRES

ÉQUIPE DE RÉDACTION ET DE CARTOGRAPHIE	I
PARTENAIRES	II
RÉSUMÉ	III
REMERCIEMENTS	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES TABLEAUX	XII
LISTE DES CARTES ET LIVRABLES	XIII
LISTE DES ACRONYMES	XIV
1 INTRODUCTION	1
1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS	1
1.2 PARTENAIRES ET ÉQUIPE DE RÉALISATION	2
1.3 PRÉSENTATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE	4
1.3.1 Localisation	4
1.3.2 Relief	5
1.3.3 Hydrographie et bassins versants	9
1.3.4 Couverture végétale	13
1.3.5 Milieux humides	15
1.3.6 Pédologie	17
1.3.7 Démographie	19
1.3.8 Affectations du territoire et aires protégées	20
1.3.9 Occupation du sol	22
2 ACQUISITION DE DONNÉES	25
2.1 COMPILATION DE L'INFORMATION EXISTANTE	25
2.2 TRAVAUX DE TERRAIN	27
2.2.1 Investigations hydrogéophysiques	28
2.2.2 Sondages et forages	30
2.2.2.1 Installation de capteurs de pression dans les puits	32
2.2.2.2 Analyses granulométriques	32
2.2.3 Essais hydrauliques	33
2.2.3.1 Essais de pompage de courte durée	33
2.2.3.2 Essais de perméabilité	33
2.2.3.3 Essais d'infiltration	35
2.2.4 Essais de réponse thermique	35
2.2.5 Échantillonnage d'eau souterraine	37
2.3 SAISIE, ARCHIVAGE ET VALIDATION DES DONNÉES	40
2.3.1 Inventaire de la base de données hydrogéologiques	40
2.3.2 Archivage des rapports techniques dans la base de données bibliographiques	42
2.3.3 Protocole de fiabilité et de validation des données	43
2.3.3.1 Cotes de fiabilité	43
2.3.3.2 Critères de validation	44
3 CONTEXTE GÉOLOGIQUE	47
3.1 GÉOLOGIE DU ROC	47
3.1.1 Structure et fracturation	53
3.1.2 Coupes géologiques	53
3.2 GÉOLOGIE DES DÉPÔTS MEUBLES	54

3.2.1	<i>Histoire du Quaternaire et stratigraphie des dépôts meubles</i>	56
3.2.1.1	Rive nord de la CMQ.....	56
3.2.1.2	Rive sud et île d'Orléans.....	59
3.2.1.3	Côte de Beaupré.....	59
3.2.2	<i>Épaisseur des dépôts meubles</i>	59
4	CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	65
4.1	DÉFINITION DES HYDROFACIÈS.....	65
4.2	COUPES HYDROSTRATIGRAPHIQUES.....	66
4.2.1	<i>Coupes hydrostratigraphiques A-A' et B-B' : Vallée de la Jacques-Cartier</i>	67
4.2.2	<i>Coupe hydrostratigraphique C-C' : Delta du Proto-Saint-Laurent</i>	68
4.2.3	<i>Coupe hydrostratigraphique D-D' : Rivière Montmorency</i>	71
4.2.4	<i>Coupe hydrostratigraphique E-E' : Rivière Chaudière</i>	73
4.2.5	<i>Coupe hydrostratigraphique F-F' : Rivière Etchemin</i>	73
4.3	MODÈLE HYDROSTRATIGRAPHIQUE.....	76
4.3.1	<i>Contextes hydrostratigraphiques</i>	76
4.3.1.1	Rive sud.....	77
4.3.1.2	Île d'Orléans.....	77
4.3.1.3	Rive nord : Basses-terres du Saint-Laurent et Laurentides.....	77
4.4	CONFINEMENT ET ÉPAISSEUR DES AQUIFÈRES.....	80
4.4.1	<i>Confinement des aquifères de roc fracturé</i>	81
4.4.2	<i>Confinement et épaisseur des aquifères de dépôts meubles</i>	83
4.4.2.1	Rive sud et l'île d'Orléans.....	83
4.4.2.2	Rive nord.....	84
4.5	PIÉZOMÉTRIE ET ÉCOULEMENT.....	86
4.6	PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES.....	90
4.7	MÉTÉOROLOGIE, HYDROMÉTRIE ET SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE.....	96
4.8	BILAN HYDROLOGIQUE ET RECHARGE DES AQUIFÈRES.....	98
4.8.1	<i>Architecture du modèle HELP®</i>	98
4.8.2	<i>Préparation des données intégrées au modèle HELP®</i>	99
4.8.2.1	Données météorologiques.....	99
4.8.2.2	Données de surface (végétation et occupation du sol).....	100
4.8.2.3	Données sur les sols et la géologie.....	100
4.8.3	<i>Calage des composantes du bilan hydrologique</i>	101
4.8.3.1	Estimation des débits de base des rivières.....	101
4.8.3.2	Fluctuations des niveaux piézométriques de puits d'observation.....	103
4.8.4	<i>Recharge des aquifères</i>	104
4.9	GÉOCHIMIE DE L'EAU SOUTERRAINE.....	108
4.9.1	<i>Portrait géochimique des eaux souterraines</i>	108
4.9.2	<i>Qualité de la ressource</i>	112
4.10	SYNTHÈSE DES CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES.....	121
4.10.1	<i>Les Laurentides</i>	121
4.10.2	<i>Les complexes fluvioglaciaires et deltaïques</i>	123
4.10.3	<i>La couronne nord des Basses-terres du Saint-Laurent</i>	123
4.10.4	<i>Le Proto-Saint-Laurent</i>	124
4.10.5	<i>L'île d'Orléans et le Promontoire de Québec</i>	124
4.10.6	<i>La rive sud</i>	124
5	RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE	127
5.1	VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES.....	127
5.2	RISQUE POTENTIEL DE CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES.....	131
5.3	UTILISATION DE L'EAU SOUTERRAINE.....	134
5.4	POTENTIEL D'EXPLOITATION.....	138
5.4.1	<i>Aux fins de consommation</i>	138
5.4.2	<i>Aux fins de chauffage et climatisation (potentiel géothermique)</i>	142
5.4.2.1	Boucles fermées horizontales.....	142
5.4.2.2	Boucles fermées verticales.....	146

5.4.2.3	Boucles ouvertes	150
5.5	GESTION DURABLE DE LA RESSOURCE	153
6	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	156
6.1	CONCLUSIONS	156
6.1.1	<i>Contextes hydrogéologiques</i>	156
6.1.1.1	Contextes hydrostratigraphiques	156
6.1.1.2	Conditions hydrogéologiques	157
6.1.2	<i>Ressource en eau souterraine</i>	158
6.1.3	<i>Limitations de l'étude</i>	161
6.2	RECOMMANDATIONS	162
7	RÉFÉRENCES	163
ANNEXES		A1
ANNEXE 1 :	CLASSIFICATION DE L'OCCUPATION DU SOL	A3
ANNEXE 2 :	MÉTHODOLOGIE POUR LA RÉALISATION DES TRAVAUX GÉOPHYSIQUES	A7
ANNEXE 3 :	COTES DE FIABILITÉ ET CRITÈRES DE VALIDATION CONTENUS DANS LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES PACES-CMQ	A13
ANNEXE 4 :	MÉTHODOLOGIE POUR LA RÉALISATION DES CARTES D'ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES ET DE TOPOGRAPHIE DU ROC	A19
ANNEXE 5 :	MÉTHODOLOGIE POUR LA CRÉATION DU MODÈLE HYDROSTRATIGRAPHIQUE TRIDIMENSIONNEL (3D)	A25
ANNEXE 6 :	MÉTHODOLOGIE POUR LA RÉALISATION DES CARTES PIÉZOMÉTRIQUES	A37
ANNEXE 7 :	PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES	A45
ANNEXE 8 :	DONNÉES D'ENTRÉE ET RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION AVEC HELP® DE LA RECHARGE ET DES AUTRES COMPOSANTES DU BILAN HYDROLOGIQUE	A49
ANNEXE 9 :	COTES ET DISTRIBUTION SPATIALE DES PARAMÈTRES DRASTIC	A77
ANNEXE 10 :	MÉTHODOLOGIE POUR LE CALCUL DES VOLUMES D'EAU SOUTERRAINE PRÉLEVÉS À DES FINS D'APPROVISIONNEMENT RÉSIDENTIEL, INDUSTRIEL, COMMERCIAL ET INSTITUTIONNEL	A87
ANNEXE E1 :	COUPES INTERPRÉTATIVES DES INVESTIGATIONS HYDROGÉOPHYSIQUES	A93
ANNEXE E2 :	RAPPORTS DE FORAGE ET DE SONDAGE	A95
ANNEXE E3 :	PROTOCOLE DE NUMÉRISATION ET D'ARCHIVAGE	A97
ANNEXE E4 :	PROTOCOLE DE FIABILITÉ ET DE VALIDATION DES DONNÉES DE FORAGE	A99
ANNEXE E5 :	PROTOCOLE POUR LA PRÉPARATION DU LIVRABLE 15 – ESTIMATION DE L'ÉPAISSEUR DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET LIVRABLE 16 – TOPOGRAPHIE DU ROC	A101
ANNEXE E6 :	PROTOCOLE POUR LA PRÉPARATION DU LIVRABLE 19 ET 20 – PIÉZOMÉTRIE DANS LES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET DANS LE ROC	A103
ANNEXE E7 :	PROTOCOLE POUR LA PRÉPARATION DU LIVRABLE 24 – QUALITÉ DE L'EAU (CRITÈRES EAU POTABLE) ET LIVRABLE 25 – QUALITÉ DE L'EAU (OBJECTIFS ESTHÉTIQUES)	A105
ANNEXE E8 :	PROTOCOLE POUR LA PRÉPARATION DU LIVRABLE 22 – VULNÉRABILITÉ DE L'AQUIFÈRE DE ROC RÉGIONAL	A107
ANNEXE E9 :	PROTOCOLE POUR LA PRÉPARATION DU LIVRABLE 23 – INDICE DE DENSITÉ D'ACTIVITÉS ANTHROPIQUES	A109

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 : ROUTES ET LIMITES ADMINISTRATIVES	6
FIGURE 1.2 : MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN.....	7
FIGURE 1.3 : PENTE DU TERRAIN.....	8
FIGURE 1.4 : HYDROGRAPHIE	11
FIGURE 1.5 : BASSINS VERSANTS	12
FIGURE 1.6 : COUVERTURE VÉGÉTALE	14
FIGURE 1.7 : RÉPARTITION DES MILIEUX HUMIDES PAR CLASSE	15
FIGURE 1.8 : MILIEUX HUMIDES	16
FIGURE 1.9 : PÉDOLOGIE.....	18
FIGURE 1.10 : AFFECTATIONS DU TERRITOIRE ET AIRES PROTÉGÉES.....	21
FIGURE 1.11 : OCCUPATION DU SOL.....	23
FIGURE 2.1 : LOCALISATION DES FORAGES, SONDAGES, PUIITS, CAPTEURS DE PRESSIION ET LEVÉS GÉOPHYSIQUES EFFECTUÉS PAR L'UNIVERSITÉ LAVAL	29
FIGURE 2.2 : LOCALISATION DES ESSAIS HYDRAULIQUES ET DE RÉPONSE THERMIQUE.....	34
FIGURE 2.3 : COURBE TYPIQUE DES VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE LORS DE L'ESSAI DE RÉPONSE THERMIQUE.....	36
FIGURE 2.4 : LOCALISATION DES PUIITS ÉCHANTILLONNÉS.....	39
FIGURE 3.1 : LOCALISATION DES PROVINCES GÉOLOGIQUES DE LA RÉGION DE QUÉBEC	47
FIGURE 3.2 : GÉOLOGIE SIMPLIFIÉE DU ROC.....	48
FIGURE 3.3 : HISTOIRE GÉOLOGIQUE.....	50
FIGURE 3.4 : COLONNE STRATIGRAPHIQUE DE LA PLATE-FORME DU SAINT-LAURENT.....	51
FIGURE 3.5 : ÉVÉNEMENTS GÉOLOGIQUES CONDUISANT À LA FORMATION DES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT ET DES APPALACHES	52
FIGURE 3.6 : COUPES GÉOLOGIQUES CONCEPTUELLES ILLUSTRANT LA GÉOMÉTRIE DES FORMATIONS ROCHEUSES ET DES FAILLES EN PROFONDEUR	53
FIGURE 3.7 : GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE (VERSION PRÉLIMINAIRE) ET LOCALISATION DES COUPES HYDROSTRATIGRAPHIQUES.....	55
FIGURE 3.8 : MODÈLE GÉOLOGIQUE CONCEPTUEL DE LA RÉGION DE QUÉBEC POUR UNE SECTION VERTICALE ORIENTÉE DANS LA DIRECTION NORD-SUD	56
FIGURE 3.9 : MODÈLE STRATIGRAPHIQUE SCHÉMATIQUE DE LA RIVE NORD DE QUÉBEC (CONTACT ÉROSIF EN GRAS).....	57
FIGURE 3.10 : ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES	62
FIGURE 3.11 : TOPOGRAPHIE DU ROC	63
FIGURE 4.1 : COUPES HYDROSTRATIGRAPHIQUES A-A' ET B-B'	69
FIGURE 4.2 : COUPE HYDROSTRATIGRAPHIQUE C-C' : DELTA DU PROTO-SAINT-LAURENT, BASSE VILLE DE QUÉBEC	70
FIGURE 4.3 : COUPE HYDROSTRATIGRAPHIQUE D-D' : RIVIÈRE MONTMORENCY.....	72
FIGURE 4.4 : COUPE HYDROSTRATIGRAPHIQUE E-E' : RIVIÈRE CHAUDIÈRE.....	74
FIGURE 4.5 : COUPE HYDROSTRATIGRAPHIQUE F-F' : RIVIÈRE ETCHEMIN	75
FIGURE 4.6 : CONTEXTES HYDROSTRATIGRAPHIQUES	79
FIGURE 4.7 : CONFINEMENT DES AQUIFÈRES DE ROC FRACTURÉ.....	82
FIGURE 4.8 : CONFINEMENT ET ÉPAISSEUR DES AQUIFÈRES DE DÉPÔTS MEUBLES	85
FIGURE 4.9 : PROFONDEUR DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DE L'AQUIFÈRE DE ROC FRACTURÉ	88
FIGURE 4.10 : ÉLÉVATION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DU ROC FRACTURÉ	89
FIGURE 4.11 : DISTRIBUTION STATISTIQUE DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES DISPONIBLES DANS LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES PACES-CMQ ET CLASSÉES PAR HYDROFACIÉS.....	94
FIGURE 4.12 : HISTOGRAMMES DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES DISPONIBLES DANS LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES PACES-CMQ ET CLASSÉES PAR HYDROFACIÉS.....	95
FIGURE 4.13 : EMLACEMENT DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES, HYDROMÉTRIQUES ET DE SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE ..	97
FIGURE 4.14 : COURBE TYPIQUE DES DÉBITS OBSERVÉS ET DÉBITS DE BASE DE LA RIVIÈRE DAUPHINE POUR L'ANNÉE 2008.....	101
FIGURE 4.15 : DISTRIBUTION SPATIALE DE LA RECHARGE DES AQUIFÈRES	106
FIGURE 4.16 : RECHARGE MODÉLISÉE PAR HELP® EN FONCTION DES CONTEXTES HYDROSTRATIGRAPHIQUES	107
FIGURE 4.17 : VARIATION MENSUELLE DES COMPOSANTES DU BILAN HYDROLOGIQUE MODÉLISÉES PAR HELP®	107
FIGURE 4.18 : RÉPARTITION DES TYPES D'EAU.....	109

FIGURE 4.19 : DISTRIBUTION SPATIALE DES GROUPES D'EAU	111
FIGURE 4.20 : DISTRIBUTION SPATIALE DES DÉPASSEMENTS EN BA ET F ⁻	114
FIGURE 4.21 : DISTRIBUTION SPATIALE DES DÉPASSEMENTS EN NA, CL, FE ET MN.....	118
FIGURE 4.22 : DISTRIBUTION SPATIALE DES DÉPASSEMENTS EN AL, SULFURES, DURETÉ ET MDT	119
FIGURE 4.23 : DISTRIBUTION SPATIALE DES DÉPASSEMENTS POUR LE PH	120
FIGURE 4.24 : SYNTHÈSE DES CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES	122
FIGURE 5.1 : SCHEMATISATION DE LA METHODE DRASTIC ET DU POIDS DE CHAQUE PARAMETRE.....	128
FIGURE 5.2 : INDICE DE VULNÉRABILITÉ DRASTIC DES AQUIFÈRES	130
FIGURE 5.3 : DENSITÉ DU RISQUE POTENTIEL DE CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES RELIÉ AUX ACTIVITÉS ANTHROPIQUES ET SITES DU RÉPERTOIRE DES TERRAINS CONTAMINÉS DU MDDEFP.....	133
FIGURE 5.4 : PRÉLÈVEMENT ANNUEL EN EAU SOUTERRAINE PAR MUNICIPALITÉ POUR LA PÉRIODE 2009-2013	137
FIGURE 5.5 : TRANSMISSIVITÉ DES AQUIFÈRES DE DÉPÔTS MEUBLES	141
FIGURE 5.6 : SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES A) EN BOUCLES FERMÉES HORIZONTALES, B) EN BOUCLES FERMÉES VERTICALES ET C) EN BOUCLES OUVERTES (CCÉG, 2011)	142
FIGURE 5.7 : POTENTIEL GÉOTHERMIQUE POUR LES SYSTÈMES EN BOUCLES FERMÉES HORIZONTALES	145
FIGURE 5.8 : POTENTIEL GÉOTHERMIQUE POUR LES SYSTÈMES EN BOUCLES FERMÉES VERTICALES.....	149
FIGURE 5.9 : PENTAGONE DE LA GESTION DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES	155
FIGURE 5.10 : CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES NÉCESSAIRES POUR UNE GESTION DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES	155

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.1 : ÉQUIPE DE RÉALISATION (NOMS EN ORDRE ALPHABÉTIQUE).....	4
TABLEAU 1.2 : BASSINS VERSANTS DE NIVEAU 1 DE PLUS DE 25 KM ² SUR LE TERRITOIRE DE LA CMQ.....	10
TABLEAU 1.3 : SUPERFICIE TERRESTRE DES TYPES DE COUVERTURE VÉGÉTALE PAR MRC, VILLE ET AGGLOMÉRATION (EN KM ²).....	13
TABLEAU 1.4 : POPULATION, SUPERFICIE TERRESTRE ET DENSITÉ DE LA CMQ.....	19
TABLEAU 1.5 : SUPERFICIE DES AFFECTATIONS DE LA CMQ (EN KM ²).....	20
TABLEAU 1.6 : SUPERFICIE DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL (EN KM ²).....	22
TABLEAU 2.1 : SYNTHÈSE DES DONNÉES (OBJETS) RECUEILLIES PAR SOURCE.....	26
TABLEAU 2.2 : SYNTHÈSE DES RAPPORTS OBTENUS PAR SOURCE.....	27
TABLEAU 2.3 : FORAGE, SONDAGE ET INSTALLATION DE PUIITS.....	31
TABLEAU 2.4 : NOMBRE D'ÉCHANTILLONS D'EAU PRÉLEVÉS SELON LE TYPE D'AQUIFÈRE.....	37
TABLEAU 2.5 : PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES MESURÉS ET ANALYSÉS.....	38
TABLEAU 2.6 : NOMBRE ET PROPORTION D'OBJETS DE LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES PACES-CMQ ASSOCIÉS À CHAQUE TYPE D'OBJET.....	40
TABLEAU 2.7 : NOMBRE D'OBSERVATIONS DE LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES PACES-CMQ ASSOCIÉES À CHAQUE TYPE D'OBSERVATION.....	41
TABLEAU 3.1 : RÉSUMÉ DES ÉVÉNEMENTS GÉOLOGIQUES DEPUIS LA DERNIÈRE DÉGLACIATION DANS LE SECTEUR DE LA RIVE NORD DE QUÉBEC.....	58
TABLEAU 4.1 : DÉFINITION DES HYDROFACIÈS.....	66
TABLEAU 4.2 : DÉFINITION DU CONFINEMENT.....	80
TABLEAU 4.3 : SOMMAIRE DES PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DISPONIBLES DANS LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES PACES-CMQ ET CLASSÉES PAR HYDROFACIÈS.....	93
TABLEAU 4.4 : COMPARAISON DES RÉSULTATS DES PARAMÈTRES DU BILAN HYDROLOGIQUE MODÉLISÉ PAR HELP [®] (1980-2009) AVEC CEUX OBTENUS DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES.....	102
TABLEAU 4.5 : PARAMÈTRES HYDRAULIQUES CALIBRÉS POUR LA MODÉLISATION DU BILAN HYDROLOGIQUE.....	103
TABLEAU 4.6 : TYPES D'EAU SELON LA PROVINCE GÉOLOGIQUE.....	108
TABLEAU 4.7 : VALEURS MÉDIANES DES PARAMÈTRES GÉOCHIMIQUES DES GROUPES D'EAU.....	112
TABLEAU 4.8 : SOMMAIRE DES DÉPASSEMENTS DES CRITÈRES DE POTABILITÉ.....	115
TABLEAU 4.9 : SOMMAIRE DES DÉPASSEMENTS DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES.....	116
TABLEAU 5.1 : PRÉLÈVEMENT ANNUEL EN EAU SOUTERRAINE (2009-2013).....	136
TABLEAU 5.2 : ESTIMATION DES VOLUMES EFFICACES D'EAU SOUTERRAINE DANS LES AQUIFÈRES DE DÉPÔTS MEUBLES DES DIFFÉRENTES MUNICIPALITÉS.....	140
TABLEAU 5.3 : CONDUCTIVITÉ THERMIQUE THÉORIQUE DES DÉPÔTS MEUBLES.....	143
TABLEAU 5.4 : CLASSIFICATION DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE POUR LES SYSTÈMES EN BOUCLES FERMÉES HORIZONTALES.....	143
TABLEAU 5.5 : CONDUCTIVITÉ THERMIQUE THÉORIQUE DU ROC.....	147
TABLEAU 5.6 : CLASSIFICATION DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE POUR LES SYSTÈMES EN BOUCLES FERMÉES VERTICALES.....	147
TABLEAU 5.7 : CLASSIFICATION DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE POUR LES SYSTÈMES EN BOUCLES OUVERTES.....	150
TABLEAU 5.8 : PRINCIPALES CONDITIONS GÉOCHIMIQUES DE L'EAU SOUTERRAINE NUISIBLES AU FONCTIONNEMENT DES SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES EN BOUCLES OUVERTES.....	152

LISTE DES CARTES ET LIVRABLES

CARTE 1 :	TOPOGRAPHIE
CARTE 2 :	ROUTES ET LIMITES ADMINISTRATIVES
CARTE 3 :	MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN
CARTE 4 :	PENTE
CARTE 5 :	HYDROGRAPHIE
CARTE 6 :	BASSINS VERSANTS DE PLUS DE 25 KM ²
CARTE 7 :	OCCUPATION DU SOL
CARTE 8 :	COUVERTURE VÉGÉTALE
CARTE 9 :	MILIEUX HUMIDES
CARTE 10 :	AFFECTATIONS DU TERRITOIRE ET AIRES PROTÉGÉES
CARTE 11 :	PÉDOLOGIE
CARTE 12 :	GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE (VERSION PRÉLIMINAIRE)
CARTE 13 :	GÉOLOGIE SIMPLIFIÉE DU ROC
LIVRABLE 14 :	COUPES HYDROSTRATIGRAPHIQUES, DISPONIBLES À LA SECTION 4.2 (FIGURE 4.1 À FIGURE 4.5)
CARTE 15 :	ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES
CARTE 16 :	TOPOGRAPHIE DU ROC
CARTE 17 :	CONTEXTES HYDROSTRATIGRAPHIQUES
CARTE 18A :	CONFINEMENT DES AQUIFÈRES DE ROC FRACTURÉ
CARTE 18B :	CONFINEMENT ET ÉPAISSEUR DES AQUIFÈRES DE DÉPÔTS MEUBLES
CARTE 19 :	PIÉZOMÉTRIE DES AQUIFÈRES DE DÉPÔTS MEUBLES DU DELTA DU PROTO-SAINT-LAURENT
CARTE 20 :	PIÉZOMÉTRIE DU ROC FRACTURÉ
LIVRABLE 21 :	PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES, DISPONIBLES À LA SECTION 4.6 (TABLEAU 4.3, FIGURE 4.11 ET FIGURE 4.12) ET L'ANNEXE 7 (TABLEAU A17 ET TABLEAU A18)
CARTE 22 :	INDICE DE VULNÉRABILITÉ DRASTIC
CARTE 23 :	DENSITÉ DU RISQUE POTENTIEL DE CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES RELIÉ AUX ACTIVITÉS ANTHROPIQUES ET SITES DU RÉPERTOIRE DES TERRAINS CONTAMINÉS DU MDDEFP
LIVRABLE 24 :	QUALITÉ DE L'EAU EN FONCTION DES CRITÈRES DE POTABILITÉ, DISPONIBLE À LA SECTION 4.9.2 (FIGURE 4.20)
LIVRABLE 25 :	QUALITÉ DE L'EAU EN FONCTION DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES, DISPONIBLE À LA SECTION 4.9.2 (FIGURE 4.21, FIGURE 4.22 ET FIGURE 4.23)
CARTE 26 :	PRÉLÈVEMENT ANNUEL EN EAU SOUTERRAINE PAR MUNICIPALITÉ POUR LES UTILISATIONS COMMERCIALE, INDUSTRIELLE, INSTITUTIONNELLE ET RÉSIDENTIELLE (AGRICOLE EXCLUE)
CARTE 27 :	EMPLACEMENT DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES, HYDROMÉTRIQUES ET DE SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE
CARTE 28 :	RECHARGE ANNUELLE MOYENNE DES AQUIFÈRES
CARTE 29A :	POTENTIEL GÉOTHERMIQUE POUR LES SYSTÈMES EN BOUCLES FERMÉES HORIZONTALES (DE 0 À 2 M DE PROFONDEUR)
CARTE 29B :	POTENTIEL GÉOTHERMIQUE POUR LES SYSTÈMES EN BOUCLES FERMÉES VERTICALES (DE 0 À 100 M DE PROFONDEUR)
CARTE 29C :	POTENTIEL GÉOTHERMIQUE POUR LES SYSTÈMES EN BOUCLES OUVERTES

LISTE DES ACRONYMES

Terme général

3D	Tridimensionnel
BAPE	Bureau d'audiences publiques sur l'environnement
BDCG	Base de données des cultures généralisées
BDTQ	Banque de données topographiques du Québec
BNDS	Base nationale de données sur les sols (BNDS)
CCÉG	Coalition canadienne de l'énergie géothermique
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CEP	Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable
CMA	Concentration maximale acceptée
CMQ	Communauté métropolitaine de Québec
CPT	<i>Cone penetration test</i>
C _{sp}	Capacité spécifique
CUBF	Codes d'utilisation des biens-fonds
DRSP	Direction régionale de santé publique
GPS	<i>Global positioning system</i>
GRIES	Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines
ICI	Industries, commerces et institutions
IRDA	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement
K	Conductivité hydraulique
MAMROT	Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec
MDDEFP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec
MNT	Modèle numérique de terrain
MRC	Municipalité régionale de comté
MRN	Ministère des Ressources naturelles du Québec
MTQ	Ministère des Transports du Québec
OBV	Organisme de bassin versant
OE	Objectif esthétique
PACES	Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines
PACES-CMQ	Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec
RPSS	<i>Rotopercussion sounding system</i>
S	Emmagasinement
S.O.	Sans objet
SIEF	Système d'information écoforestière
SIH	Système d'information hydrogéologique
T	Transmissivité
TNO	Territoire non organisé

Unité de mesure

%	pourcentage	L	litre
°C	degré Celsius	m	mètre
µm	micromètre	mg	milligramme
cm	centimètre	mm	millimètre
ka	millier d'année	Mm ³	million de mètre cubique
km	kilomètre	s	seconde
kWh	kilowattheure	W	watt

Nomenclature et élément chimique

Ag	Argent	Mg	Magnésium
Al	Aluminium	Mn	Manganèse
As	Arsenic	Mo	Molybdène
B	Bore	Na	Sodium
Ba	Baryum	NH ₄	Azote ammoniacal
Be	Béryllium	Ni	Nickel
Bi	Bismuth	NO ₂	Nitrite
Br ⁻	Bromure	NO ₃	Nitrate
Ca	Calcium	O.D.	Oxygène dissous
Cd	Cadmium	P	Phosphore inorganique
Cl	Chlorures	Pb	Plomb
Co	Cobalt	pH	Potentiel d'hydrogène
Cr	Chrome	Sb	Antimoine
Cu	Cuivre	Se	Sélénium
Eh	Potentiel d'oxydoréduction	Si	Silicium
F	Fluorure	Sn	Étain
Fe	Fer	SO ₄	Sulfates
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène	Sr	Strontium
HCO ₃	Bicarbonate	Ti	Titane
K	Potassium	U	Uranium
Li	Lithium	V	Vanadium
MDT	Matière dissoute totale	Zn	Zinc

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte et objectifs

En 2002, le gouvernement du Québec s'est doté d'une Politique nationale de l'eau dont le but était d'assurer la protection des ressources en eau et afin de mieux protéger la santé publique et celle des écosystèmes. La Politique visait aussi la gestion de l'eau dans un contexte de développement durable. À ce titre, plusieurs engagements ont été pris par le gouvernement, dont l'inventaire des grands aquifères du Québec (Engagement 5).

C'est dans cette perspective qu'en 2008, le ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), actuellement le ministère de l'Environnement, du Développement durable, de la Faune et des Parcs (MDDEFP), annonçait, par le biais du Bureau des connaissances sur l'eau, la création du *Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES)*. Le présent projet s'inscrit dans ce programme, et plus précisément, dans le deuxième appel d'offre.

Dans le cadre de l'application de la Politique nationale de l'eau, les organismes de bassin versant (OBV) ont également reçu le mandat de produire un Plan directeur de l'eau. Ce plan a pour but la gestion intégrée des ressources en eau. Or, dans la production du Plan directeur, les OBV de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) ont identifié un réel manque de connaissances sur les eaux souterraines de la région.

Le *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (PACES-CMQ)* vise donc à dresser le portrait régional des ressources en eau souterraine sur le territoire municipalisé de la CMQ et ainsi combler le manque d'informations.

Les objectifs généraux de ce projet sont :

- Établir la connaissance sur les ressources en eau souterraine de la région d'étude,
- Léguer des infrastructures de surveillance dans la région pour suivre l'évolution de la qualité et de la quantité des ressources en eau souterraine,
- Former du personnel hautement qualifié et bonifier la compréhension des contextes hydrogéologiques par des projets de recherche d'étudiants de 2e et 3e cycles, et
- Contribuer à utiliser de façon durable les ressources en eau souterraine dans une région urbanisée, à la fois pour l'exploitation de l'eau et pour l'énergie géothermique.

Le projet s'est déroulé sur trois ans, soit d'avril 2010 à mars 2013. La démarche générale du projet comprend trois phases :

- Phase I : Collecte des données existantes (2010-2011),
- Phase II : Travaux de terrain (2011-2012), et
- Phase III : Synthèse et transfert des connaissances (2012-2013).

Le présent rapport constitue une synthèse de tous les travaux effectués durant les trois phases du projet. La consultation des rapports Phase I (Moreno *et coll.*, 2011) et Phase II (Talbot Poulin *et coll.*, 2012) n'est pas nécessaire pour assurer la compréhension du rapport Phase III, mais pourra offrir quelques précisions lorsque ces rapports sont cités dans le texte. Les thèmes abordés dans ce rapport ainsi que les cartes présentées ont été spécifiés par le MDDEFP.

1.2 Partenaires et équipe de réalisation

Le projet a été réalisé par le Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval en collaboration avec la CMQ et principalement financé par le MDDEFP dans le cadre du PACES. Toutefois, la réalisation du projet n'aurait pu avoir lieu sans la participation des partenaires régionaux tels que les villes, les municipalités régionales de comté (MRC), les organismes de bassins versants (OBV) et la CMQ. Le MDDEFP exigeait d'ailleurs que les partenaires contribuent au projet avec un équivalent de 10 % de la valeur totale du projet en nature, et 10 % en espèce. Les partenaires suivants ont participé à la réalisation du projet :

- Communauté métropolitaine de Québec (CMQ),
- Ville de Québec,
- Ville de Lévis,
- Ville de Saint-Augustin-de-Desmaures,
- MRC de La Côte-de-Beaupré,
- MRC de L'Île-d'Orléans,
- MRC de La Jacques-Cartier,
- Organisme de bassins versants Charlevoix-Montmorency,
- Organisme des bassins versants de la Capitale,
- Organisme des bassins versants de la Côte-du-Sud,
- Conseil de bassin de la rivière Etchemin, et
- Corporation du bassin de la Jacques-Cartier.

Les partenaires ont également été impliqués dans les phases I et II, en :

- Identifiant des problématiques reliées aux eaux souterraines,
- Identifiant et fournissant de l'information pertinente déjà existante sur le territoire (rapports, données, cartes), et
- Facilitant les contacts entre l'équipe de réalisation et les intervenants locaux lors des phases de collecte d'information et de réalisation de travaux de terrain.

Le personnel de l'Université Laval et de la CMQ ayant contribué à la réalisation du projet est présenté au Tableau 1.1. La CMQ est un partenaire dont l'implication était plus importante et différait des autres partenaires du projet. Sa majeure contribution se situe au niveau de la production des cartes 1 à 11, 23 et 26. De plus, elle a participé à l'organisation et la coordination de rencontres avec les autres partenaires du projet. Il faut également mentionner l'implication d'autres universités qui, au moment de la création du Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES), comptaient :

- L'Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre, Environnement (INRS-ETE),
- L'Université du Québec à Montréal (UQAM),
- L'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT),
- L'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), et
- L'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC).

Comptant à ce jour plus de membres, le GRIES s'est donné la mission d'accroître la connaissance sur les eaux souterraines et de contribuer à assurer la pérennité de cette ressource importante. Par la rédaction de protocoles méthodologiques partagés entre les universités mentionnées ci-dessus, le GRIES a permis, entre autres, d'assurer une uniformité des produits cartographiques des différentes régions visées par le PACES.

Tableau 1.1 : Équipe de réalisation (noms en ordre alphabétique)

Université Laval				
Professeur	Professionnel(le) de recherche	Étudiant(e) au doctorat	Étudiant(e) à la maîtrise	Auxiliaire de recherche au baccalauréat
Richard Fortier	Guillaume Comeau	Fabien Cochand	Laure-Eloïse Bergeron	Christine Berthiaux
Jean-Michel Lemieux	Lise Lamarche	Tobias Graf	Simon Bérubé	Manuel Cossette
John Molson	Alicia Moreno	Nelly Montcoudiol	Francis Donati-Daoust	Joanie Côté
René Therrien	Marie-Catherine Talbot Poulin		Gabriel Fabien-Ouellet	Alexandra Demers- Roberge
	Pierre Therrien		Penny Fiset	Mélissa Gauthier
	Yohann Tremblay		Marie-Michèle Nadeau	Mélissa Girard
			Arnaud Sterckx	Olivier Lefebvre
				Gary-Charlie-Willy Lépinay
				Alain Marcoux
				Marie-Eve Masi
				Philippe Paradis-Lacombe
				Amélie Plante
				Antoine Rhéaume-Ouellet
				Noémie Simard-Rousseau
				Laurie-Pier Vézina
				Yan Vincent
Communauté métropolitaine de Québec				
Directeur général	Conseiller(ère)	Coordonnateur	Technicienne	
Marc Rondeau	Anne-Marie Cantin	Bruno Labonté	Caroline Lavoie	
	Alexandre Bélanger		Charlotte Ménin	
	André Bouillon			
	Mylène D'Aoust			
	Claude Langlois			
	Gilles Lavoie			

1.3 Présentation du territoire à l'étude

1.3.1 Localisation

La zone ciblée par le présent projet est le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ), qui est partagé entre les régions administratives de la Capitale-Nationale (03) et de Chaudière-Appalaches (12). La Figure 1.1 et la Carte 2 présentent la région à l'étude et ses principales infrastructures de transport. L'information y figurant provient du ministère des Ressources naturelles (MRN) et de la CMQ.

La CMQ s'étend sur une superficie totale de 9 146 km², correspondant aux 28 municipalités qui en font partie ainsi qu'aux territoires non organisés (TNO) aquatiques et terrestres. Les TNO terrestres représentés sont ceux de Lac-Croche, de Lac-Jacques-Cartier et de Sault-au-Cochon ainsi que les TNO aquatiques de la MRC de L'Île-d'Orléans et de la MRC de La Côte-de-Beaupré (en partie).

Dans le cadre de ce projet, seuls les territoires municipalisés et les TNO aquatiques sont traités, ce qui correspond à une superficie de 3 663 km². L'Agglomération de Québec, la

Ville de Lévis, la MRC de La Jacques-Cartier, la MRC de L'Île-d'Orléans ainsi que la MRC de La Côte-de-Beaupré sont représentées.

Sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, la CMQ est entourée par les territoires des municipalités régionales de comté (MRC) de Charlevoix à l'est, de Portneuf à l'ouest, puis du Lac-Saint-Jean-Est et du Fjord-du-Saguenay au nord. Sur la rive sud, la CMQ est ceinturée à l'ouest par la MRC de Lotbinière, à l'est par la MRC de Montmagny et au sud par les MRC de La Nouvelle-Beauce et de Bellechasse.

Deux portions du territoire, soient le bassin versant de la rivière Chaudière (COBARIC et UPA, 2008) et une petite partie du bassin versant de la rivière Jacques-Cartier (Bourque *et coll.*, 1998) ont déjà fait l'objet d'études régionales sur les eaux souterraines. Ces secteurs, indiqués sur la Figure 1.1 et la Carte 2, ont été traités par le PACES-CMQ de la même manière que le reste du territoire.

1.3.2 Relief

Le relief du territoire à l'étude résulte de phénomènes géologiques forts anciens. Modelée par les grandes glaciations du Quaternaire, la région est caractérisée par des paysages et des ensembles physiographiques variés. La topographie est présentée par les courbes altimétriques de la Banque de données topographiques du Québec (BDTQ) du ministère des Ressources naturelles (MRN) à des intervalles de 10 mètres (m) en élévation (Carte 1). Le modèle numérique de terrain (MNT) du MDDEFP est présenté à la Figure 1.2 et à la Carte 3. La pente du sol, calculée à partir du MNT, se trouve à la Figure 1.3 et à la Carte 4.

La portion nord de la CMQ affiche une physiographie typique des Laurentides (ou hautes terres laurentiennes) faisant partie du Bouclier canadien. Le relief y est composé de collines et de montagnes plus ou moins abruptes culminant à 1 020 m d'altitude, entrecoupées de vallées orientées nord-sud aux pentes parfois escarpées. Ces dernières s'ouvrent vers le sud sur un paysage de plaines, de terrasses et de collines allongées d'est en ouest, caractéristique de l'ensemble physiographique des Basses-terres du Saint-Laurent. L'altitude y oscille entre 150 m en amont à 0 m au fleuve Saint-Laurent. Cet ensemble est représentatif de la portion qui longe le fleuve Saint-Laurent sur la rive nord, de toute la rive sud ainsi que de l'île d'Orléans. Des escarpements s'y trouvent aussi et peuvent atteindre plus de 100 m de dénivelé en bordure du fleuve.

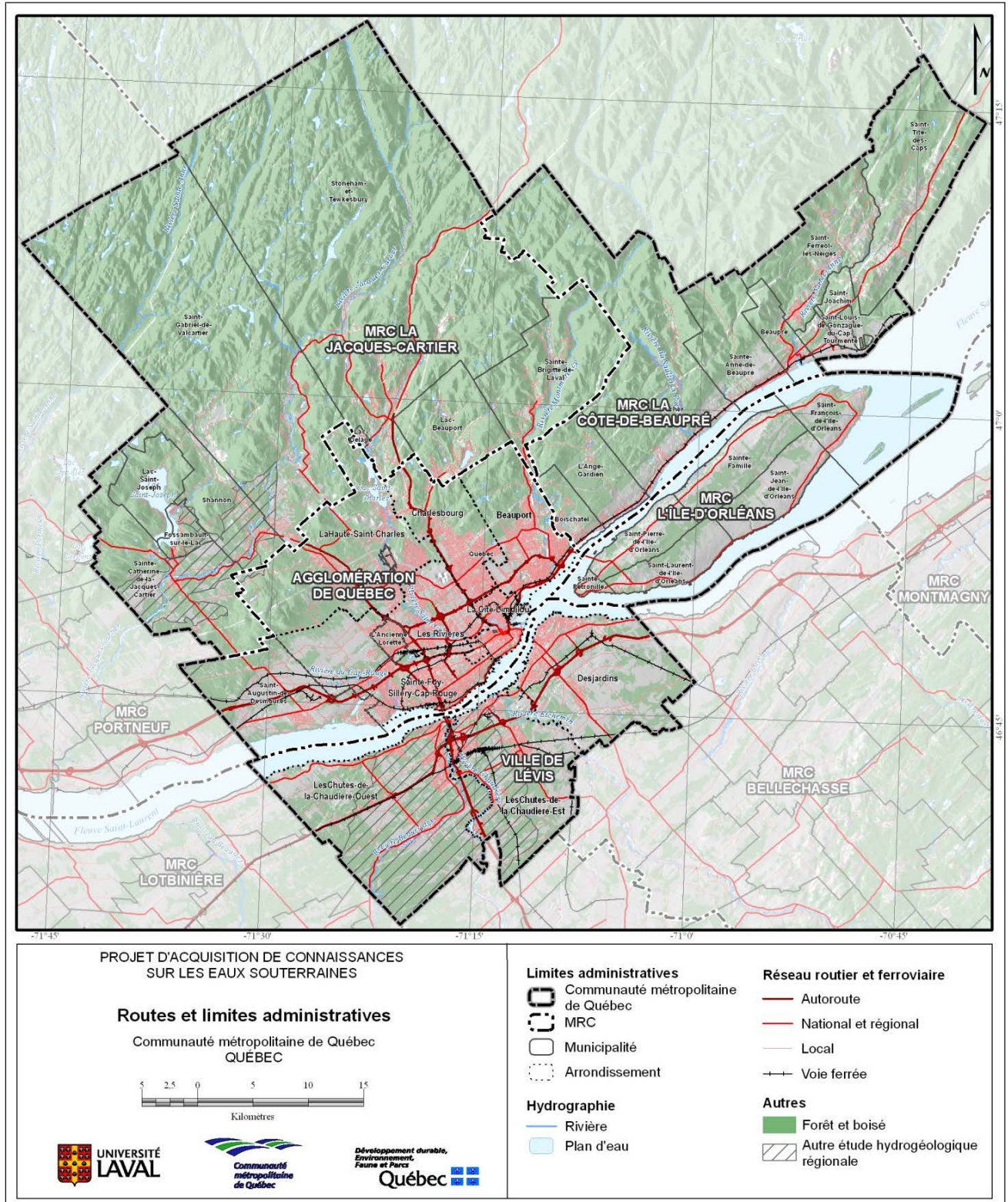


Figure 1.1 : Routes et limites administratives

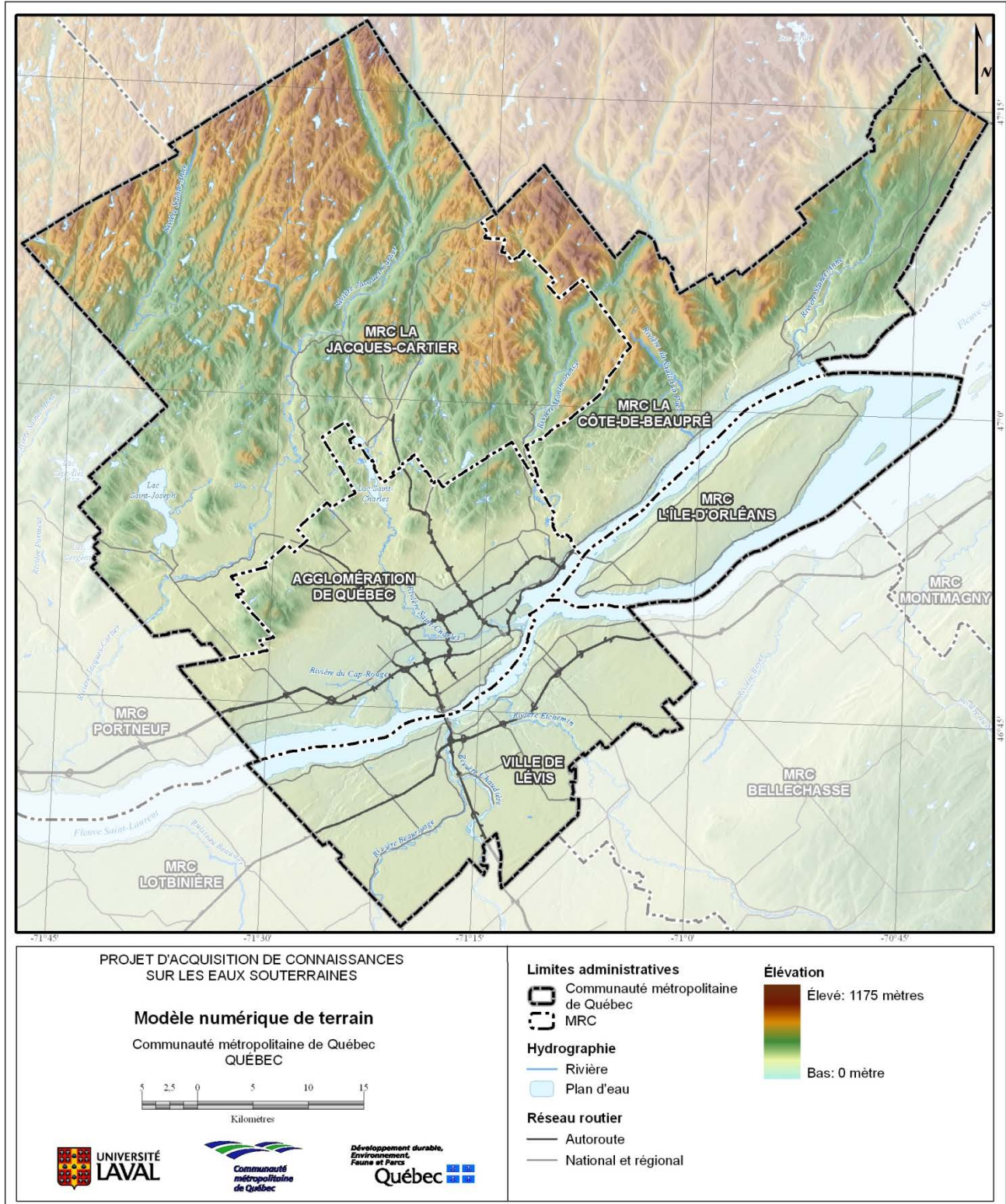


Figure 1.2 : Modèle numérique de terrain

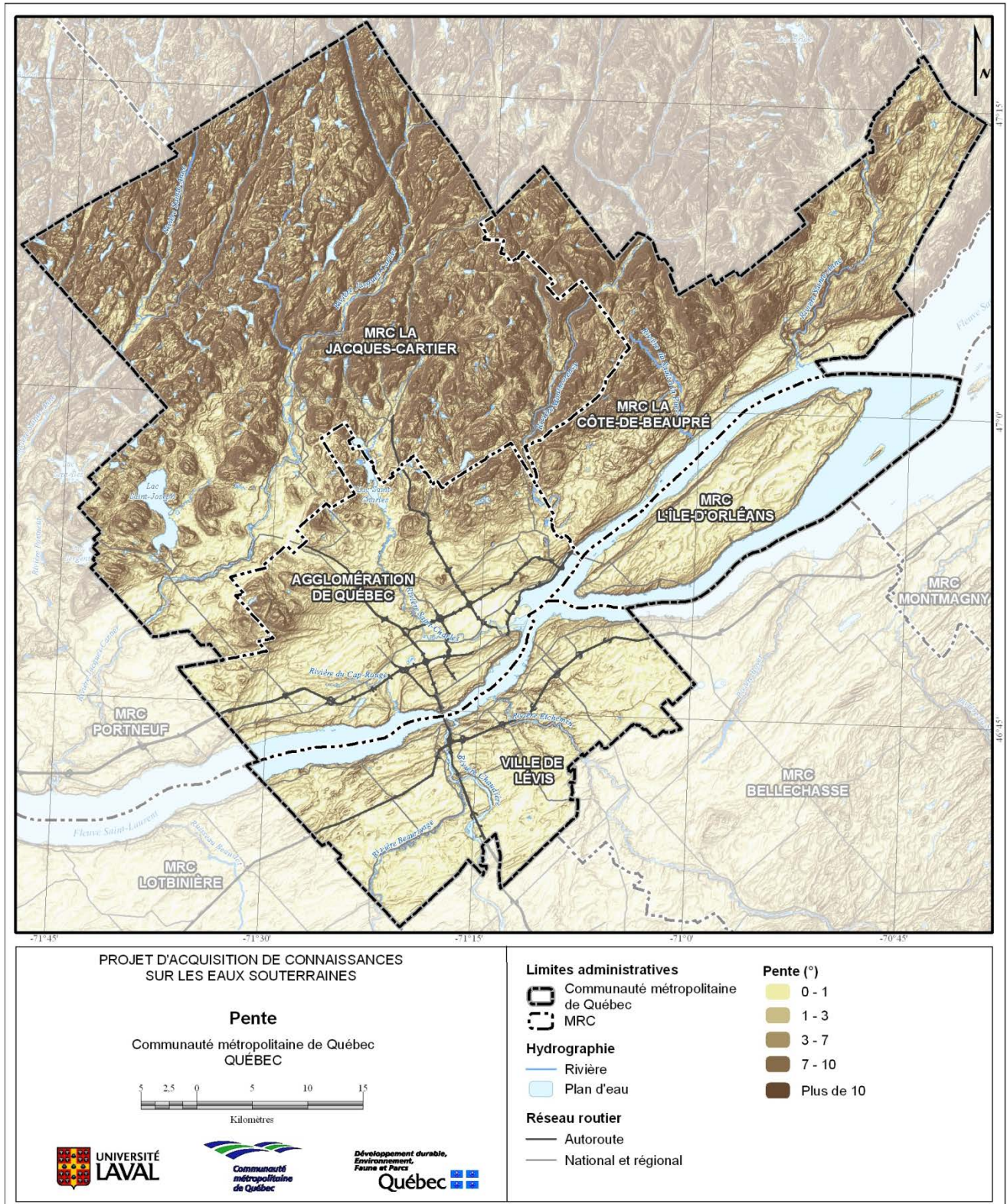


Figure 1.3 : Pente du terrain

1.3.3 Hydrographie et bassins versants

Le réseau hydrographique du territoire à l'étude, dont les informations proviennent de la BDTQ du MRN, est présenté à la Figure 1.4 et à la Carte 5..

Les principaux cours d'eau qui traversent le territoire d'étude sont les rivières Jacques-Cartier, Montmorency, Saint-Charles, Sainte-Anne et Sainte-Anne-du-Nord sur la rive nord ainsi que les rivières Chaudière, Etchemin et à la Scie sur la rive sud. Dans les Laurentides, les cours d'eau coulent généralement de manière rectiligne, directement sur le socle rocheux. Tel qu'observable par les changements de direction d'écoulement à angle droit, le réseau hydrographique y est angulaire puisque contrôlé par les nombreuses failles du Bouclier canadien. Dans les plaines alluviales des Basses-terres du Saint-Laurent, le réseau hydrographique devient dendritique et les cours d'eau sillonnent dans les sédiments meubles. Les activités de drainage (redressement des cours d'eau) ont considérablement modifié la configuration physique de plusieurs bassins versants. Plusieurs cours d'eau intermittents présentent une configuration rectiligne résultant des activités de drainage pour le développement urbain et agricole.

Selon les informations du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) du MDDEFP, 14 bassins versants de plus de 25 km², dont l'exutoire se situe au fleuve Saint-Laurent (niveau 1), occupent le territoire de la CMQ. Ceux-ci sont illustrés à la Figure 1.5 et sur la Carte 6. Le Tableau 1.2 indique, pour chacun de ces bassins versants, leur superficie totale, ainsi que la superficie nette et relative qu'ils couvrent dans la CMQ. De plus, ce tableau indique le débit moyen annuel mesuré à la station de la rivière du bassin versant.

Les 8 organismes de bassins versants ci-dessous partagent la mission d'élaborer et de mettre à jour un plan directeur de l'eau et d'assurer sa mise en œuvre :

- Corporation du bassin de la rivière Jacques-Cartier (CBJC),
- Organisme des bassins versants de la Capitale (OBV-Capitale),
- Organisme de bassins versants Charlevoix-Montmorency (OBV-CM),
- Conseil de bassin de la rivière Etchemin (CBE),
- Organisme des bassins versants de la Côte-du-Sud (OBV Côte-du-Sud),
- Organisme de gestion de bassins versants des rivières Sainte-Anne, Portneuf, La Chevrotière et Belle-Isle (CAPSA),
- Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC), et
- Organisme de bassins versants de la zone du Chêne (OBV du Chêne).

Tableau 1.2 : Bassins versants de niveau 1 de plus de 25 km² sur le territoire de la CMQ

Nom de la rivière	Superficie totale (km ²)	Superficie dans la CMQ (km ²)	Superficie relative dans la CMQ (%)	Débit moyen estimé ^[1] (m ³ /s)
Jacques-Cartier	2 512	841	23,0	61,3
Saint-Charles	546	546	14,9	8,3
Sainte-Anne (La Pérade)	2 717	325	8,9	50,9
Montmorency	1 149	325	8,9	35,0
Sainte-Anne (du Nord)	1 083	219	6,0	24,8
Chaudière	6 689	187	5,1	115,0
Cap-Rouge	79	79	2,2	1,5
À la Scie	85	76	2,1	s.o.
Etchemin	1 470	73	2,0	27,0
Aux Chiens	83	71	1,9	s.o.
Sault-à-la-puce	58	58	1,6	s.o.
Aulneuse	83	38	1,0	s.o.
Portneuf	362	35	1,0	8,5
Beauport	26	26	0,7	s.o.
TOTAL	16 942	2 574	79,3	s.o.

Note : [1] Le débit moyen mesuré à la station hydrométrique le plus en aval d'après les données du MDDEP (2000)
s.o. = sans objet

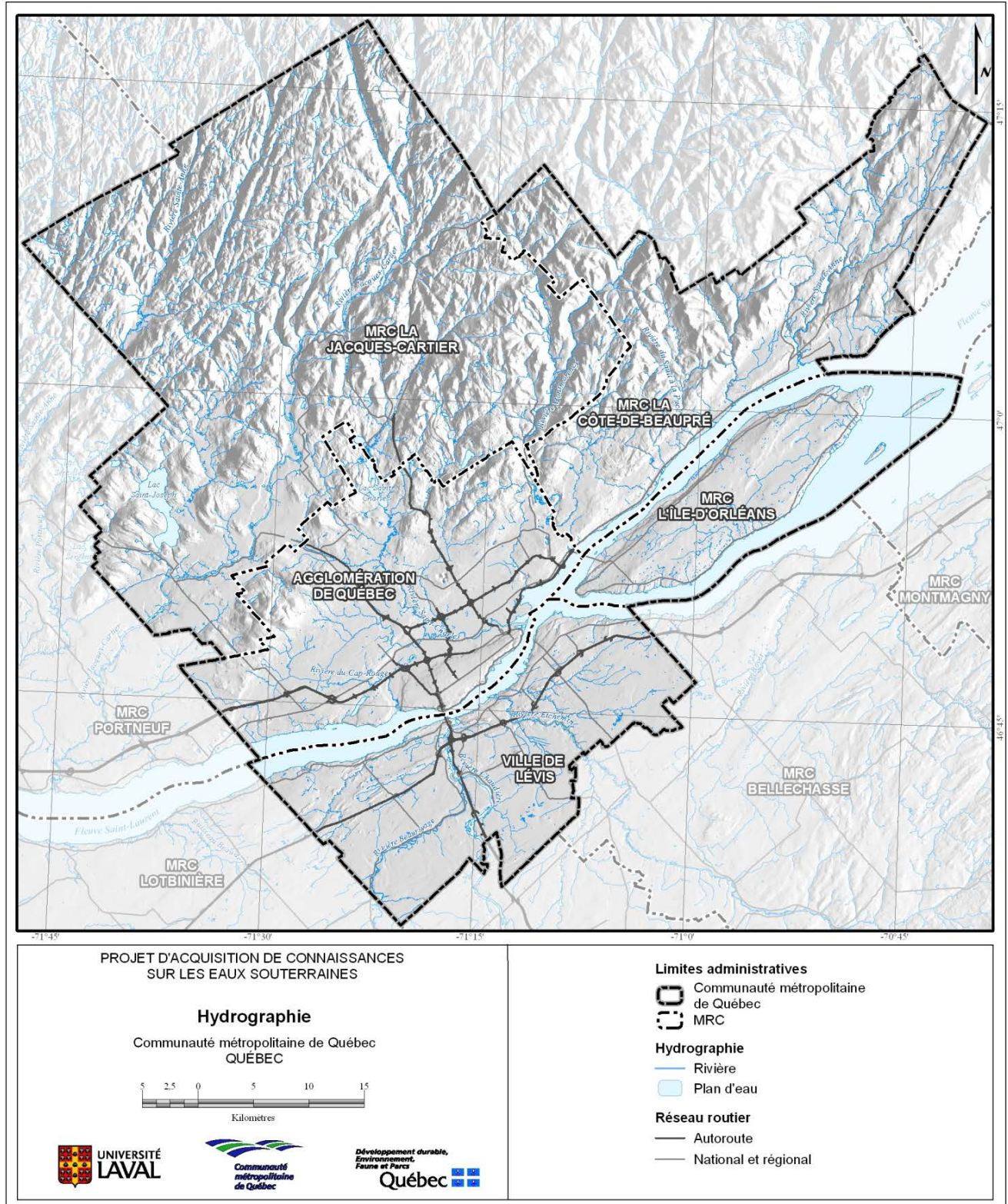


Figure 1.4 : Hydrographie

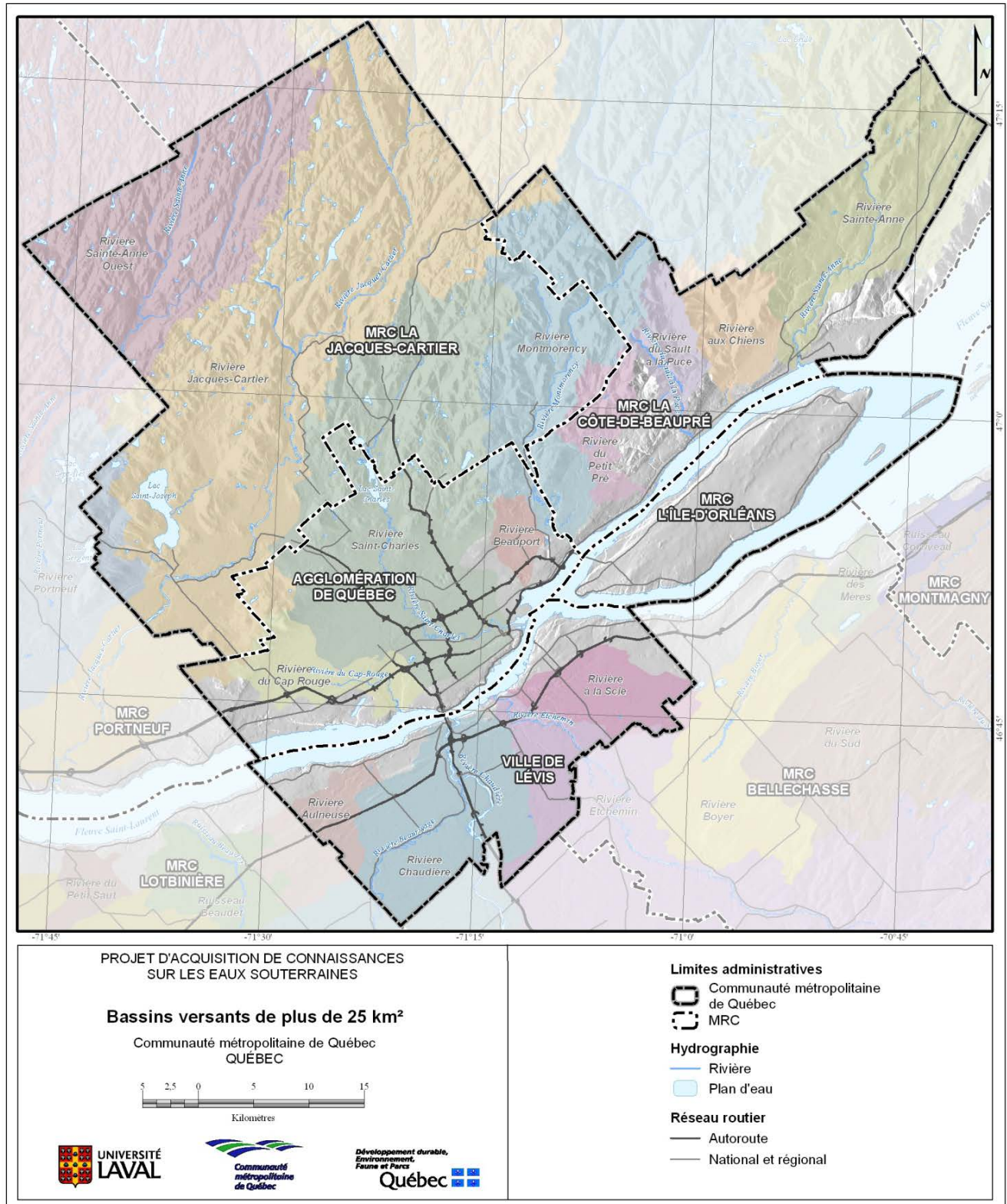


Figure 1.5 : Bassins versants

1.3.4 Couverture végétale

La distribution spatiale de la couverture végétale est présentée à la Carte 8 et à la Figure 1.6. Les données de couvert forestier du Système d'information écoforestière (SIEF) issues du 4^e inventaire forestier du MRN ont été regroupées en trois grandes classes, soit feuillu, résineux et mélangé. Ces trois types de couvert forestier ont été discriminés selon la maturité et la densité des peuplements. Le couvert forestier recouvre 67 % du territoire de la CMQ, soit la majeure partie des MRC de La Jacques-Cartier et de La Côte-de-Beaupré.

Les données de couvert agricole proviennent de la Base de données des cultures généralisées (BDCG) de la Financière agricole du Québec. Elles ont été regroupées en trois classes, soit l'agriculture maraîchère, les grandes cultures agricoles et les autres cultures. Les zones de couvert agricole représentent 10 % du territoire de la CMQ et se retrouvent principalement dans la MRC de L'Île-d'Orléans et dans la Ville de Lévis. Les milieux humides, détaillés à la section 1.3.5, sont définis par Canards illimités Canada. Ils comptent pour 4,6 % du territoire et se retrouvent principalement dans la MRC de La Jacques-Cartier et dans la Ville de Lévis. Les friches et sols dénudés comptent pour du 5% le territoire de la CMQ. Les classes de « parcs et boisés urbains » et « pas de couvert végétal » se retrouvent en zone urbaine dans la Ville de Lévis et dans l'Agglomération de Québec. Le Tableau 1.3 détaille le type de couverture végétale par MRC, ville ou agglomération.

Tableau 1.3 : Superficie terrestre des types de couverture végétale par MRC, ville et agglomération (en km²)

Type de couverture végétale		MRC de La Côte-de-Beaupré	MRC de L'Île-d'Orléans	MRC de La Jacques-Cartier	Ville de Lévis	Agglo. de Québec	CMQ	Proport. CMQ (%)
Couvert agricole	Agriculture maraîchère	17	0,1	4	1	0,0	22	0,7
	Grandes cultures	32	14	4	45	25	120	3,6
	Autres cultures	49	34	15	49	36	183	5,5
Couvert forestier	Arbuste	4	53	190	29	20	295	8,9
	Feuillu jeune	18	102	144	37	51	352	10,6
	Feuillu mature	15	64	192	7	41	319	9,6
	Mélangé jeune	23	142	399	81	57	702	21,1
	Mélangé mature	5	64	189	8	26	291	8,7
	Résineux jeune	1	47	140	13	5	206	6,2
	Résineux mature	0,3	7	34	4	4	50	1,5
Friche et sol dénudé		4	58	55	26	23	167	5,0
Milieu humide		11	17	61	45	18	152	4,6
Parc et boisés urbains		0,1	0,5	1	2	9	13	0,4
Pas de couvert végétal		16	40	76	98	231	461	13,8

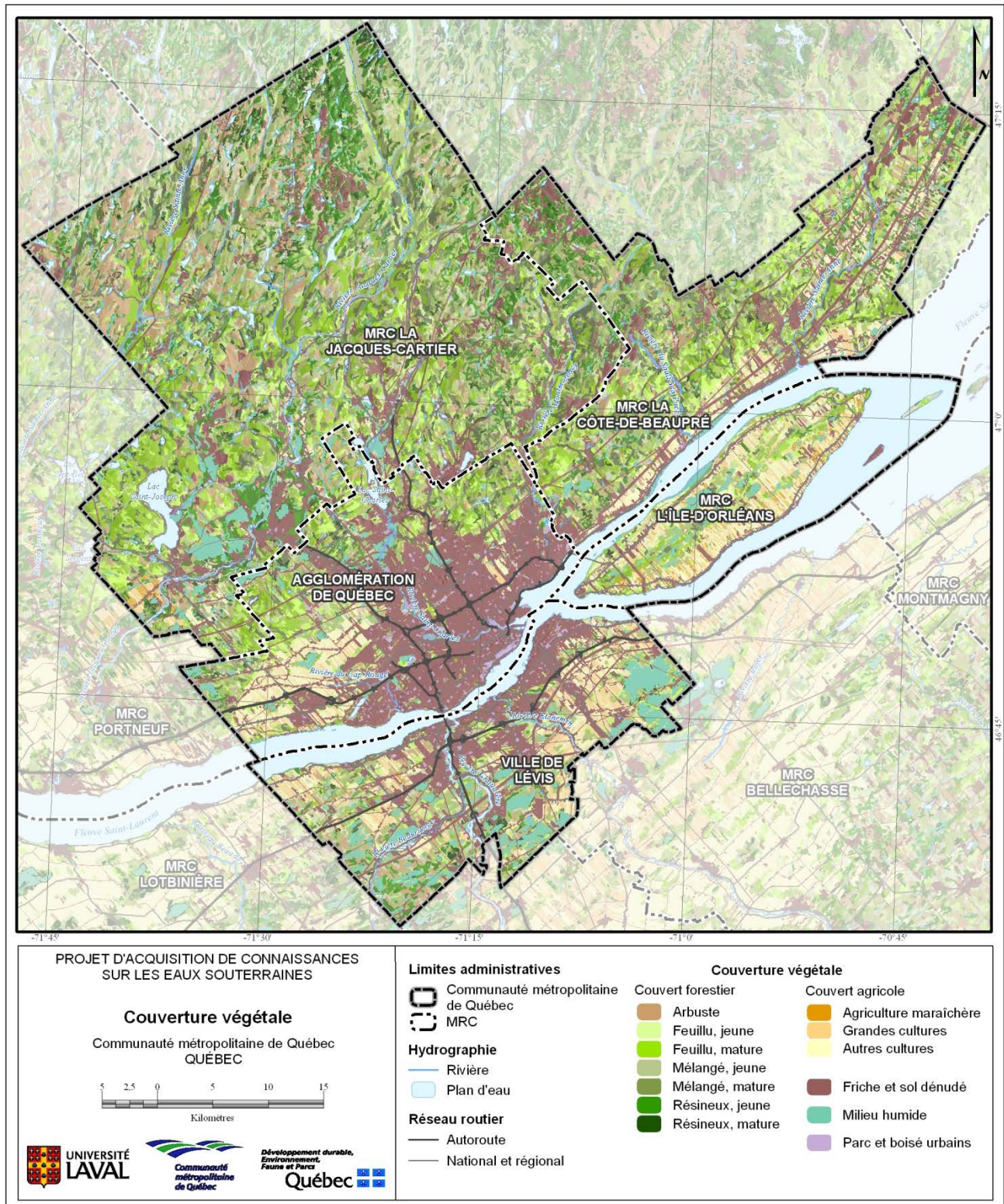


Figure 1.6 : Couverture végétale

1.3.5 Milieux humides

Les milieux humides inventoriés sur le territoire de la CMQ à partir des données de Canards Illimités Canada représentent plus de 190 km² dont 152 km² en milieu terrestre (Figure 1.8 et Carte 9). Les types de milieux humides de la CMQ sont présentés à la Figure 1.7. La tourbière de la Grande Plée Bleue est le plus vaste milieu humide de la zone d'étude et est localisé au sud-est de la Ville de Lévis. Les eaux peu profondes, les marais et les marécages sont concentrés en bordure du fleuve Saint-Laurent.

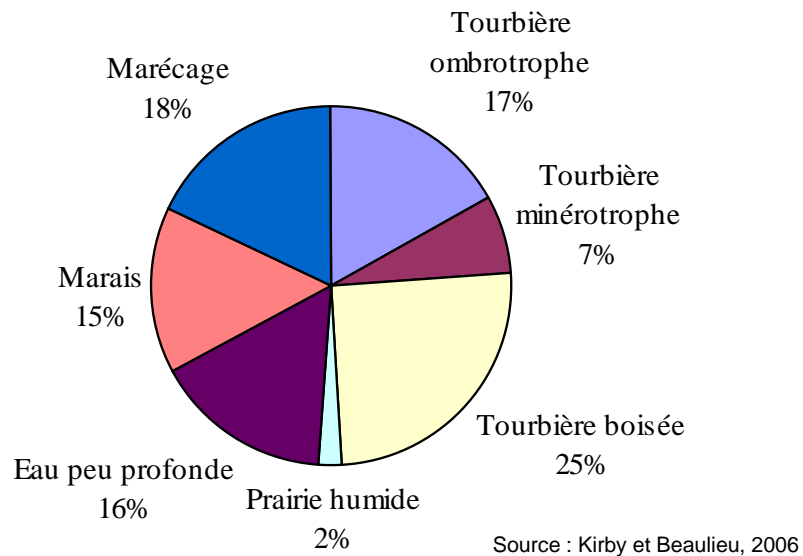


Figure 1.7 : Répartition des milieux humides par classe

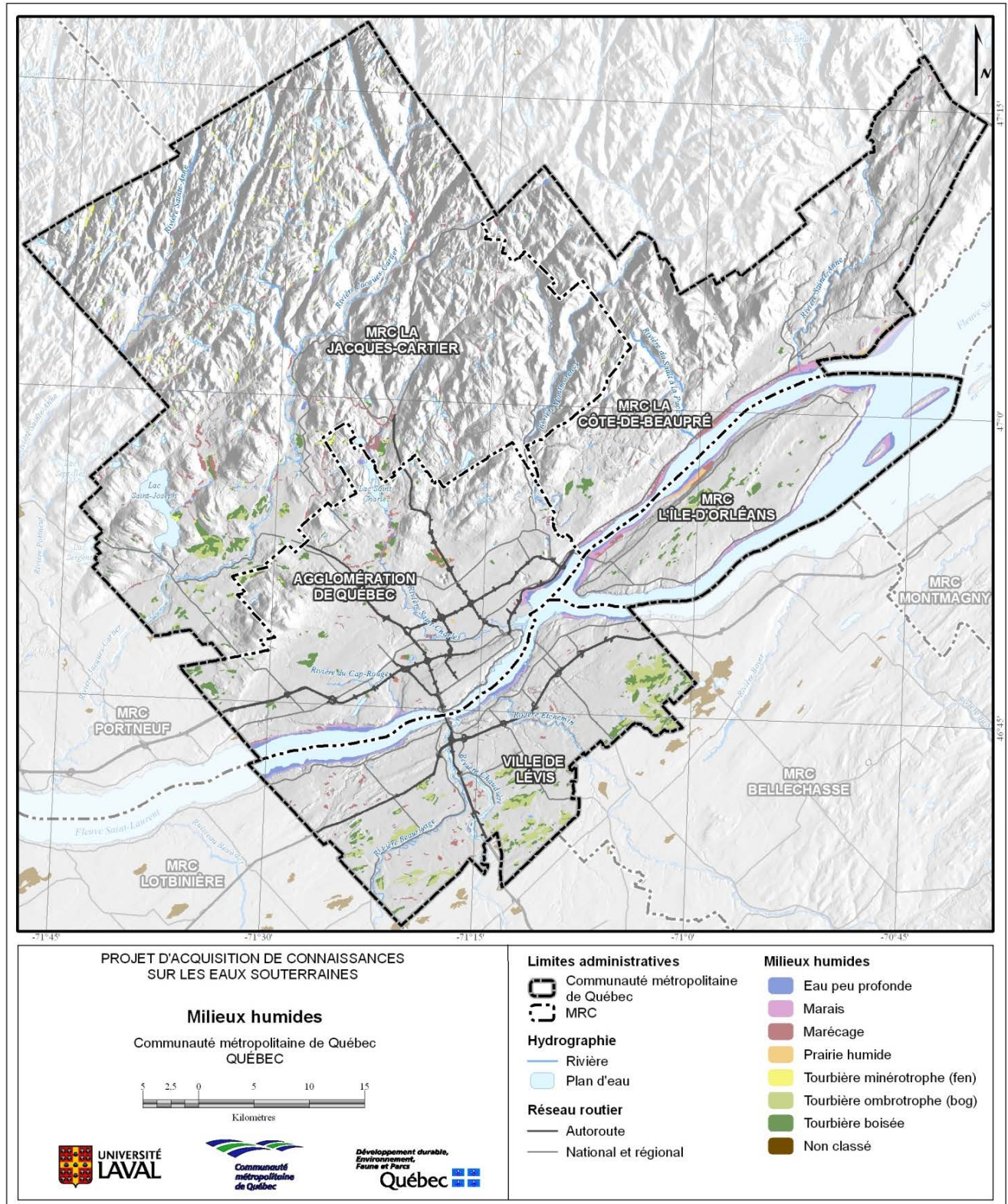


Figure 1.8 : Milieux humides

1.3.6 Pédologie

La pédologie décrit le premier mètre de sols dans une perspective agricole et est présentée à la Carte 11 et à la Figure 1.9. Trois sources de données ont été utilisées afin d'obtenir une couverture complète du territoire. Selon leur fiabilité et leur échelle cartographique, ces trois sources ont été priorisées de la manière suivante :

- La compilation des sols de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) (Lajoie, 1968),
- La Base nationale de données sur les sols (BNDS) d'Agriculture et agroalimentaire Canada (2011), et
- Les sols cartographiés et disponible via le Système d'inventaire écoforestier (SIEF) du 4e décennal du MRN.

Les données de l'IRDA couvrent la majeure partie de la Ville de Lévis et de la MRC de L'Île-d'Orléans et sont disponibles dans les secteurs agricoles tels qu'à Saint-Augustin-de-Desmaures, dans la vallée de la rivière Jacques-Cartier et le long du fleuve pour la MRC de La Côte-de-Beaupré. L'information sur les sols pour les secteurs urbains et forestiers provient principalement du SIEF et, à l'occasion, de la BNDS.

Les unités pédologiques sont cartographiées en fonction de leur texture (argileux, loameux, sableux, graveleux, organiques ou issus des dépôts de tills) (Carte 11 et Figure 1.9) et de la capacité de drainage des sols (très rapidement à très mal drainé) (Carte 11 seulement). Sur la rive nord, des sols de type argileux bien à mal drainés, dominent les Basses-terres du Saint-Laurent. De manière générale, les Laurentides présentent des sols bien à modérément bien drainés issus de dépôts de till sur les plateaux et des sols sableux graveleux ou organiques dans les vallées. Dans la vallée de la rivière Jacques-Cartier, les dépôts sont très rapidement à rapidement drainés. L'île d'Orléans est principalement recouverte de sols loameux avec certaines zones argileuses ou graveleuses. Ces sols ont une capacité de drainage variable, soit de bien à mal drainé. La rive sud comprend une grande diversité de texture et de drainage. Cependant, il est important de mentionner que selon la classification de l'IRDA, un sol graveleux n'a pas nécessairement une proportion élevée en gravier, mais en contient suffisamment pour avoir des implications pour l'agriculture. Les sols de la Ville de Lévis peuvent donc contenir du gravier, mais c'est la proportion de loam qui est dominante. Les sols en bordure de la rivière Chaudière et dans la partie est de Lévis sont très rapidement à rapidement drainés lorsque le roc est à faible profondeur.

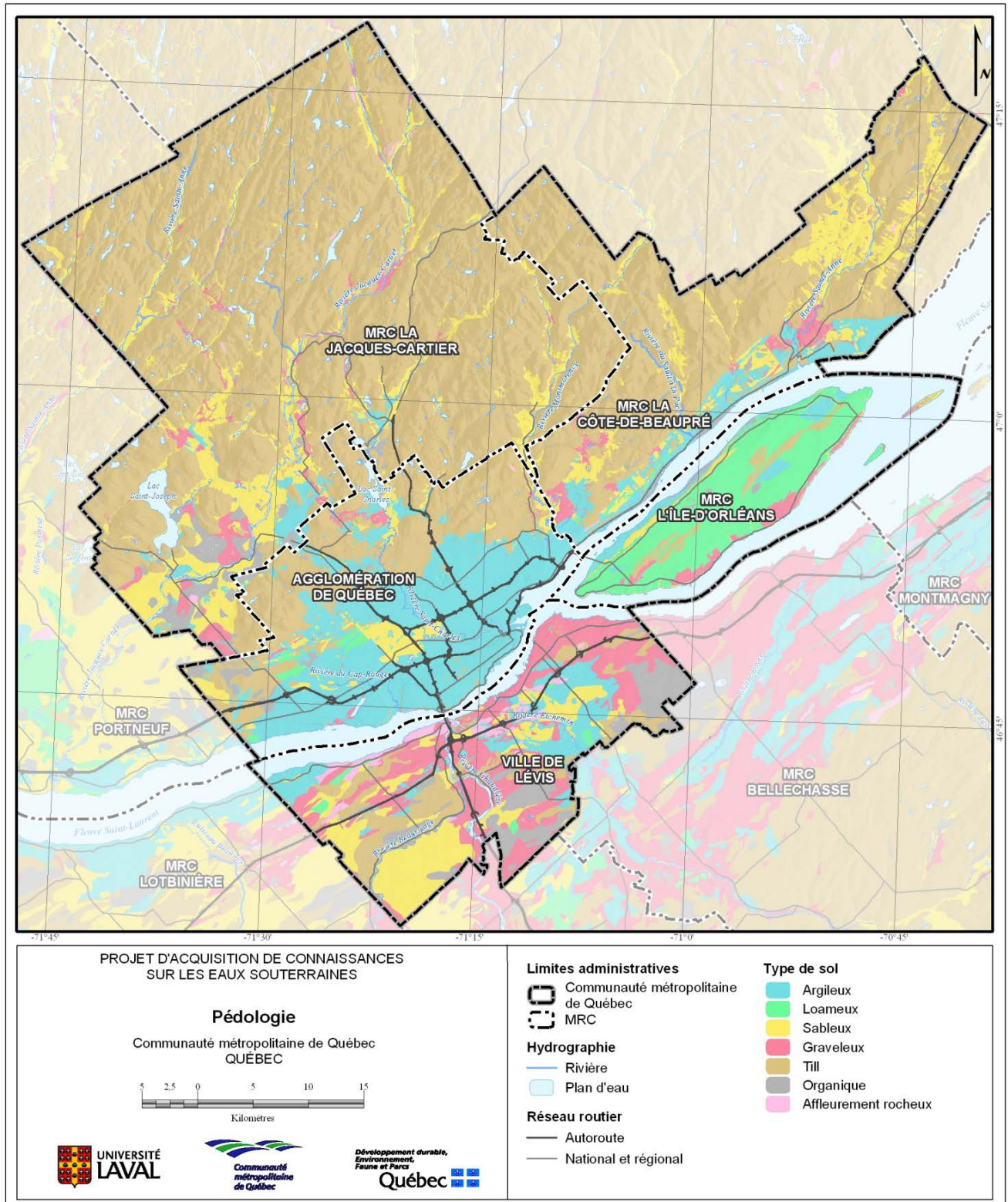


Figure 1.9 : Pédologie

1.3.7 Démographie

La CMQ est habitée par 760 025 personnes selon le dernier recensement de Statistique Canada (2011) (Tableau 1.4). L'Agglomération de Québec et la Ville de Lévis accueillent respectivement 551 508 et 138 769 habitants sur leur territoire, soit 91 % de la population totale de la zone à l'étude. Les municipalités des MRC de La Côte-de-Beaupré, de La Jacques-Cartier et de L'Île-d'Orléans regroupent pour leur part 69 748 habitants, soit 9 % de la population totale de la CMQ. La densité de population varie de 7,5 habitants/km² pour la municipalité de Lac-Saint-Joseph à 2 195 habitants/km² pour la Ville de L'Ancienne-Lorette. La densité moyenne de population pour la CMQ est de 214 habitants/km².

Tableau 1.4 : Population, superficie terrestre et densité de la CMQ

	Population (n hab.)	Superficie terrestre (km ²)	Densité de la population (hab./km ²)
Agglomération de Québec	551 508	547,5	1 007,3
Québec	516 622	454,1	1 137,7
L'Ancienne-Lorette	16 745	7,6	2 194,6
Saint-Augustin-de-Desmaures	18 141	85,8	211,5
Ville de Lévis	138 769	449,3	308,8
MRC de La Jacques-Cartier	36 883	1 508,5	24,5
Fossambault-sur-le-Lac	1 613	11,4	141,7
Lac-Beauport	7 281	61,3	118,8
Lac-Delage	598	1,5	393,4
Lac-Saint-Joseph	251	33,7	7,5
Sainte-Brigitte-de-Laval	5 696	108,7	52,4
Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier	6 319	121,2	52,1
Saint-Gabriel-de-Valcartier	2 933	435,4	6,7
Shannon	5 086	63,7	79,8
Stoneham-et-Tewkesbury	7 106	671,6	10,6
MRC de La Côte-de-Beaupré	26 154	644,4	40,6
Beaupré	3 439	22,7	151,8
Boischatel	6 465	20,9	308,9
Château-Richer	3 834	229,6	16,7
L'Ange-Gardien	3 634	53,5	68,0
Sainte-Anne-de-Beaupré	2 854	62,6	45,6
Saint-Ferréol-les-Neiges	2 964	83,3	35,6
Saint-Joachim et Saint-Louis-de-Gonzague-du-Cap-Tourmente	1 458	42,6	34,2
Saint-Tite-des-Caps	1 506	129,3	11,7
MRC de L'Île-d'Orléans	6 711	192,8	34,8
Sainte-Famille	851	48,5	17,6
Sainte-Pétronille	1 041	4,6	227,3
Saint-François-de-l'Île-d'Orléans	527	29,2	18,0
Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans	923	43,5	21,2
Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans	1 580	35,7	44,2
Saint-Pierre-de-l'Île-d'Orléans	1 789	31,3	57,1
TOTAL CMQ	760 025	3 342,5	227,4

Source : Statistique Canada, 2011.

Note : n = nombre, hab.=habitants

Les perspectives démographiques 2006-2031 de l'Institut statistique de Québec (ISQ, 2009) indiquent que la population devrait augmenter pour toutes les composantes territoriales sauf pour la MRC de L'Île-d'Orléans, qui devrait subir une baisse de 4,6 %. L'augmentation moyenne pour la CMQ prévue est de 13,6 % durant ces 25 années. En comparaison, la population de l'ensemble du Québec devrait croître de 15,8 % pour la même période.

1.3.8 Affectations du territoire et aires protégées

En aménagement ou en urbanisme, l'affectation du territoire représente l'attribution à un territoire d'une utilisation, d'une fonction ou d'une vocation déterminée (MAMROT, 2012). Les grandes affectations du territoire indiquent formellement comment une municipalité ou une MRC entend utiliser son territoire. Dans le cadre de la présente étude, une cartographie sur les affectations du territoire et les aires protégées a été actualisée pour le territoire de la CMQ (Carte 10 et Figure 1.10). Cette information est regroupée en fonction de 9 affectations générales soit l'affectation de conservation, agricole, forestière, récréo-forestière, récréative, industrielle, urbaine, périurbaine et militaire. Le Tableau 1.5 présente les superficies des affectations de l'Agglomération de Québec, de la Ville de Lévis et des MRC de la CMQ. Dans le nord peu habité de la CMQ, les principales affectations prédominantes sont récréo-forestières et forestières alors que, dans le sud, ce sont les affectations agricoles et urbaines qui dominent.

Tableau 1.5 : Superficie des affectations de la CMQ (en km²)

Affectations	MRC de La Côte-de-Beaupré	MRC de La Jacques-Cartier	MRC de L'Île-d'Orléans	Ville de Lévis	Agglom. de Québec	CMQ	Proportion de la CMQ (%)
Agricole	212	64	128	315	125	843	24,6
Récréo-forestière	300	539	0	0	0	838	24,4
Forestière	0	377	57	0	165	599	17,5
Urbaine	38	64	4	74	197	378	11,0
Conservation	42	175	19	16	18	269	7,9
Militaire	0	197	0	0	0	197	5,8
Récréative	80	19	2	8	32	141	4,1
Périurbaine	0	93	0	5	0	99	2,9
Industrielle	0	7	0	25	33	65	1,9

Une aire protégée est un territoire, en milieu terrestre ou aquatique, géographiquement délimité, dont l'encadrement juridique et l'administration visent spécifiquement à assurer la protection et le maintien de la diversité biologique et des ressources naturelles et culturelles associées (MDDEFP, 2013a). Les données sont issues du Système d'information géographique en aménagement du territoire (SIGAT) du MDDEFP et comprennent les aires protégées du MRN, du MDDEFP et de divers autres organismes. La CMQ compte plus de 400 km² d'aires protégées. La majeure partie est comprise dans le Parc national de la Jacques-Cartier, la Réserve nationale de faune du Cap-Tourmente, la Réserve écologique de Tantaré, les Battures de Saint-Augustin-de-Desmaures, la Forêt ancienne du Mont-Wright et la Réserve écologique de la Tourbière-de-Shannon.

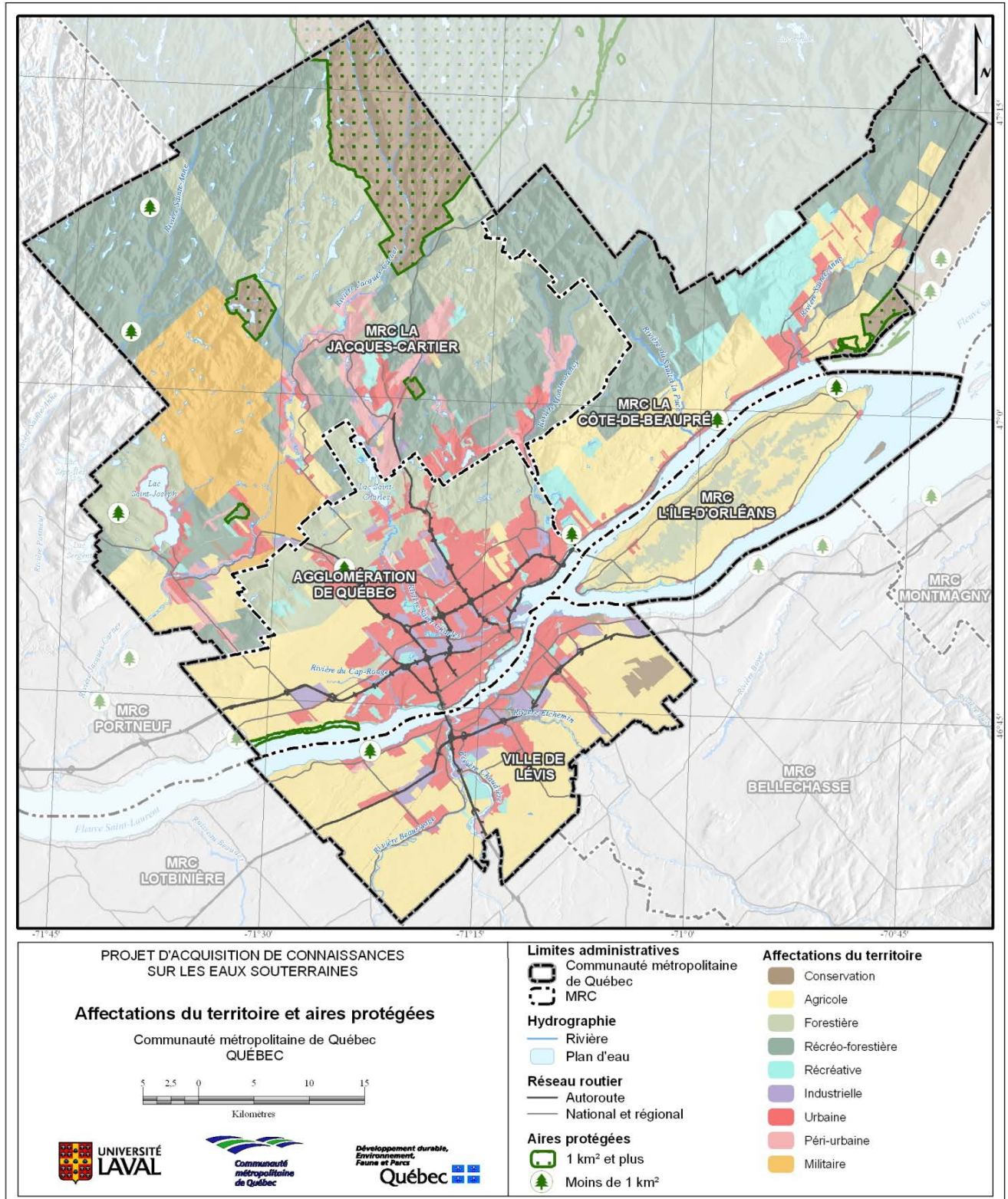


Figure 1.10 : Affectations du territoire et aires protégées

1.3.9 Occupation du sol

L'occupation du sol (Carte 7 et Figure 1.11) renseigne sur les utilisations qui sont faites de la surface du territoire. Une connaissance de l'occupation du sol est utile pour cibler les secteurs où les activités sont susceptibles d'exercer une pression sur la ressource en eaux souterraines et d'en modifier la qualité ou la quantité. La zone urbaine de la région de la CMQ a été détaillée en 4 classes de densité. La méthodologie ainsi que les multiples sources de données pour la production de cette carte sont présentées à l'Annexe 1.

Le Tableau 1.6 indique la superficie des classes d'occupation du sol. Les milieux urbanisés les plus denses se trouvent dans l'Agglomération de Québec et dans la Ville de Lévis où ils occupent 38 % et 21 % de leur territoire respectif. Pour toute la CMQ, le milieu urbanisé couvre environ 11 % du territoire alors que 61 % du territoire est sous un couvert forestier et 9 % est couvert par l'agriculture.

Tableau 1.6 : Superficie des classes d'occupation du sol (en km²)

Occupation du sol		MRC de La Côte-de-Beaupré	MRC de La Jacques-Cartier	MRC de L'Île-d'Orléans	Ville de Lévis	Agglom. de Québec	CMQ	CMQ (%)
Couvert forestier	Feuille	185	384	35	50	100	754	20,6
	Mélangé	229	707	28	101	92	1157	31,6
	Résineux	62	188	1	26	11	289	7,9
Milieu urbanisé	Faiblement dense	16	19	10	26	11	83	2,3
	Moyennement dense	9	19	0,0	23	58	109	3,0
	Dense	2	0,0	0,0	33	100	135	3,7
	Très dense	5	8	2	14	39	68	1,8
Hydrographie		33	45	150	50	50	328	9,0
Agricole		48	23	98	95	61	325	8,9
Friche, régénération et ligne d'énergie		61	64	5	29	24	183	5,0
Milieu humide		17	61	11	45	18	152	4,2
Autre		9	29	4	2	22	67	1,8
Parc et boisé urbain		0,5	1	0,1	2	9	13	0,4

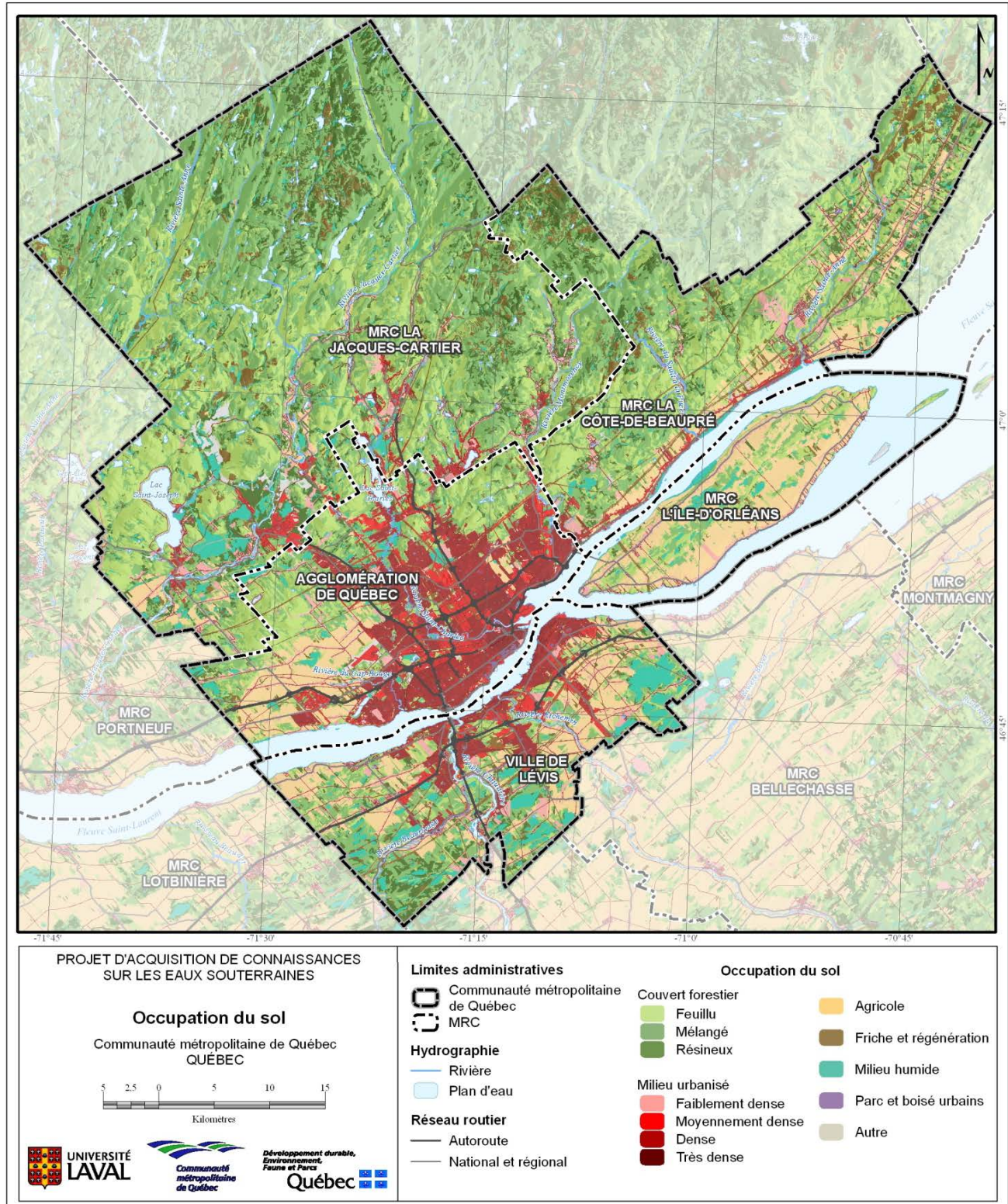


Figure 1.11 : Occupation du sol

2 ACQUISITION DE DONNÉES

Lors de la Phase I (Moreno *et coll.*, 2011) et de la Phase II (Talbot Poulin *et coll.*, 2012) du projet, un effort considérable a été alloué à l'acquisition et la compilation d'informations hydrogéologiques dans une base de données géoréférencées, ci-après nommée base de données hydrogéologiques PACES-CMQ. Cette base de données a servi d'information de base lors des analyses hydrogéologiques effectuées dans le cadre de ce projet ainsi qu'à la production de la plupart des livrables cartographiques. Elle constitue aussi un outil exceptionnel pour la réalisation de projets portant sur les eaux souterraines ou sur d'autres thématiques touchant le domaine des sciences de la Terre. Il faut toutefois aviser le futur utilisateur que la structure finale de la base de données commandée par le MDDEFP diffère quelque peu de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ. La section 2 présente une synthèse de la compilation de l'information existante et des travaux de terrain effectués dans le cadre du projet, en plus de décrire les méthodes de saisie, d'archivage et de validation de ces données.

2.1 Compilation de l'information existante

En plus d'avoir recueilli plusieurs couches de données cartographiques du territoire (section 1.3), plusieurs données ponctuelles en lien avec l'hydrogéologie ont été compilées dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ. Ces informations hydrogéologiques proviennent de diverses sources telles que des bases de données existantes ou de rapports techniques, publiques ou privés. La base de données hydrogéologiques PACES-CMQ contient non seulement de l'information à l'intérieur de la région à l'étude, mais aussi dans les MRC voisines, à l'intérieur des limites des cartes produites pour le projet.

Le Tableau 2.1 résume la provenance des données recueillies au cours du projet en indiquant, pour chaque source, le nombre d'objets colligés (forages, puits, stations de mesure, etc.). Les ministères provinciaux (MDDEFP, MRN et MTQ), par la transmission de leurs différentes bases de données, ont été les principaux fournisseurs d'information hydrogéologique (72,3 % des 25 671 objets). Il faut également mentionner l'apport important de données de la base militaire de Valcartier transmises par le ministère fédéral de la Défense nationale (8,0 %). La Coalition canadienne de l'énergie géothermique (CCÉG) (1,5 %), les organismes de bassins versants opérant sur le territoire de la CMQ (2,1 %) et la Ville de Québec (0,5 %) sont également des sources importantes de données. L'information provenant de rapports techniques (14,7 %) est détaillée au paragraphe suivant.

Tableau 2.1 : Synthèse des données (objets) recueillies par source

Source	Nombre d'objets
Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDEFP	15 362
Rapports techniques de consultants (en majeure partie commandés par les villes et municipalités)	3 797
Défense nationale	2 060
Système d'informations géominières (SIGEOM) du MRN	1 959
Base de données de forage du MTQ	1 255
Organisme de bassins versants Charlevoix-Montmorency	388
Coalition canadienne de l'énergie géothermique (CCÉG)	380
Université Laval	239
Données environnementales de la Ville de Québec	138
Organisme des bassins versants de la Capitale	120
Corporation du bassin de la Jacques-Cartier	24
Base de données du milieu aquatique (BDMA) du MDDEFP	19
Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) du MDDEFP	12
Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG) du MRN	8
Total	25 761

L'information issue de rapports techniques a été recueillie tout au long du projet par une recherche exhaustive auprès du plus grand nombre d'intervenants publics ou privés susceptibles de posséder de tels rapports. Les villes et municipalités de la CMQ ont été des collaborateurs de premier plan à cet effet, bien que certaines aient malheureusement refusé de procéder à un échange de documents. Généralement, une première approche par téléphone était réalisée afin de savoir si un ou plusieurs rapports pertinents étaient disponibles auprès de l'organisation contactée. Au besoin, un représentant de l'équipe PACES de l'Université Laval se déplaçait à leur bureau pour sélectionner les rapports pertinents, en obtenir une copie (numérique ou papier) et pour faire signer l'entente d'utilisation et de diffusion des informations transmises. Les principaux types de rapports consultés ont été :

- Étude hydrogéologique,
- Approvisionnement en eau potable,
- Étude géotechnique,
- Caractérisation environnementale,
- Réhabilitation de site contaminé,
- Étude géophysique,
- Capacité de production d'un aquifère,
- Demande de certificat d'autorisation en vertu de l'article 22 de la Loi sur la qualité de l'environnement (Q-2) (Gouvernement du Québec, 2013a), et
- Demande de certificat d'autorisation en vertu de l'article 31 du Règlement sur le captage des eaux souterraines (Q-2, r.6) (Gouvernement du Québec, 2013c).

Le Tableau 2.2 détaille le nombre de rapports pertinents obtenus de chaque organisme. Cette synthèse indique que la majorité des rapports reçus proviennent de la Ville de Québec (69,4 %), suivis de la Ville de Lévis (16,9 %), du MDDEFP (7,4 %), de certaines MRC et municipalités (3,4 %), des organismes de bassins versants (0,9 %) et d'autres institutions publiques ou privées (2,0 %).

Tableau 2.2 : Synthèse des rapports obtenus par source

Source	Nombre de rapports
Ville de Québec	951
Ville de Lévis	231
MDDEFP	102
Autres MRC et municipalités	46
Organismes de bassins versants	12
Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE)	11
Centre hospitalier affilié universitaire de Québec	6
Université Laval	4
MTQ	3
Institut national de la recherche scientifique (INRS)	2
Aéroport international Jean-Lesage	1
Institut universitaire en santé mentale de Québec	1
Total	1 370

Plus de détails sur les procédures, le type et la provenance de ces données sont présentés dans le rapport de la Phase I du PACES-CMQ (Moreno *et coll.*, 2011).

2.2 Travaux de terrain

L'objectif de la deuxième phase du projet était de réaliser des travaux de terrain permettant de compléter l'information nécessaire pour dresser un portrait de la ressource en eau souterraine à l'échelle régionale. Cette section est une synthèse de l'ensemble des travaux de caractérisation hydrogéologique réalisés par l'Université Laval et qui se sont déroulés entre le printemps 2011 et l'automne 2012 soit :

- Investigations hydrogéophysiques
 - o Tomographie de polarisation provoquée
 - o Géoradar
 - o Tomographie de sismique réfraction
- Forages et aménagements de puits
 - o Forage conventionnel
 - o Sondage *Cone Penetration Test* (CPT) et *RotoPercussion Sounding System* (RPSS)
 - o Installation de capteurs de pression
 - o Analyses granulométriques

- Essais hydrauliques
 - o Essais de pompage de courte durée
 - o Essais de perméabilité
 - o Essais d'infiltration
- Essais de réponse thermique
- Échantillonnage de l'eau souterraine

Le rapport de la Phase II (Talbot Poulin *et coll.*, 2012) donne plus de détails sur les travaux de terrain réalisés dans le cadre du projet.

2.2.1 Investigations hydrogéophysiques

Au cours de la campagne de terrain de l'été 2011, 21 sites ont fait l'objet d'une investigation hydrogéophysique afin de déterminer le type et la continuité des dépôts quaternaires, d'estimer la profondeur au roc et d'optimiser le positionnement des forages à réaliser subséquemment. Les informations obtenues de ces forages ont été ensuite comparées aux levés géophysiques afin d'en valider leur interprétation et produire des coupes hydrostratigraphiques interprétatives plus fiables. La localisation des levés géophysiques dans la CMQ est présentée à la Figure 2.1

Trois méthodes géophysiques ont été utilisées : la tomographie de polarisation provoquée, le géoradar et la tomographie de sismique réfraction. Afin d'améliorer la qualité de l'interprétation des levés géophysiques, la tomographie de polarisation provoquée a été employée la plupart du temps en combinaison avec l'une ou l'autre des deux autres méthodes. En effet, ces méthodes géophysiques sont complémentaires. Il est possible d'inférer la nature des dépôts à partir de la tomographie de polarisation provoquée sans toutefois localiser avec précision les contacts stratigraphiques. Cependant, le géoradar permet de localiser les contacts stratigraphiques et les structures internes sans identifier la nature des dépôts. L'interprétation combinée de la tomographie de polarisation provoquée et du géoradar le long d'une ligne de levé géophysique débouche sur une coupe hydrostratigraphique interprétative du site d'étude. De plus, la tomographie de polarisation provoquée est efficace dans tous les types de dépôts. Par contre, les ondes électromagnétiques émises par le géoradar sont atténuées rapidement dans le sol lorsque la conductivité électrique est élevée tel que dans les couches d'argile. Par conséquent, la profondeur d'investigation du géoradar est très faible dans de tels milieux. Pour la tomographie de sismique réfraction, les ondes sismiques se propagent mal dans les couches de sable et cela limite l'application de cette méthode dans de telles conditions. Pour contourner ce problème, il aurait fallu utiliser une source sismique plus puissante telle que la détonation de dynamite. Étant donné les risques associés à cette utilisation, seule la détonation d'une cartouche à blanc de calibre 12 dans un fusil Betsy, enfoncé à quelques décimètres (dm) sous la surface du sol, a été utilisée comme source sismique.

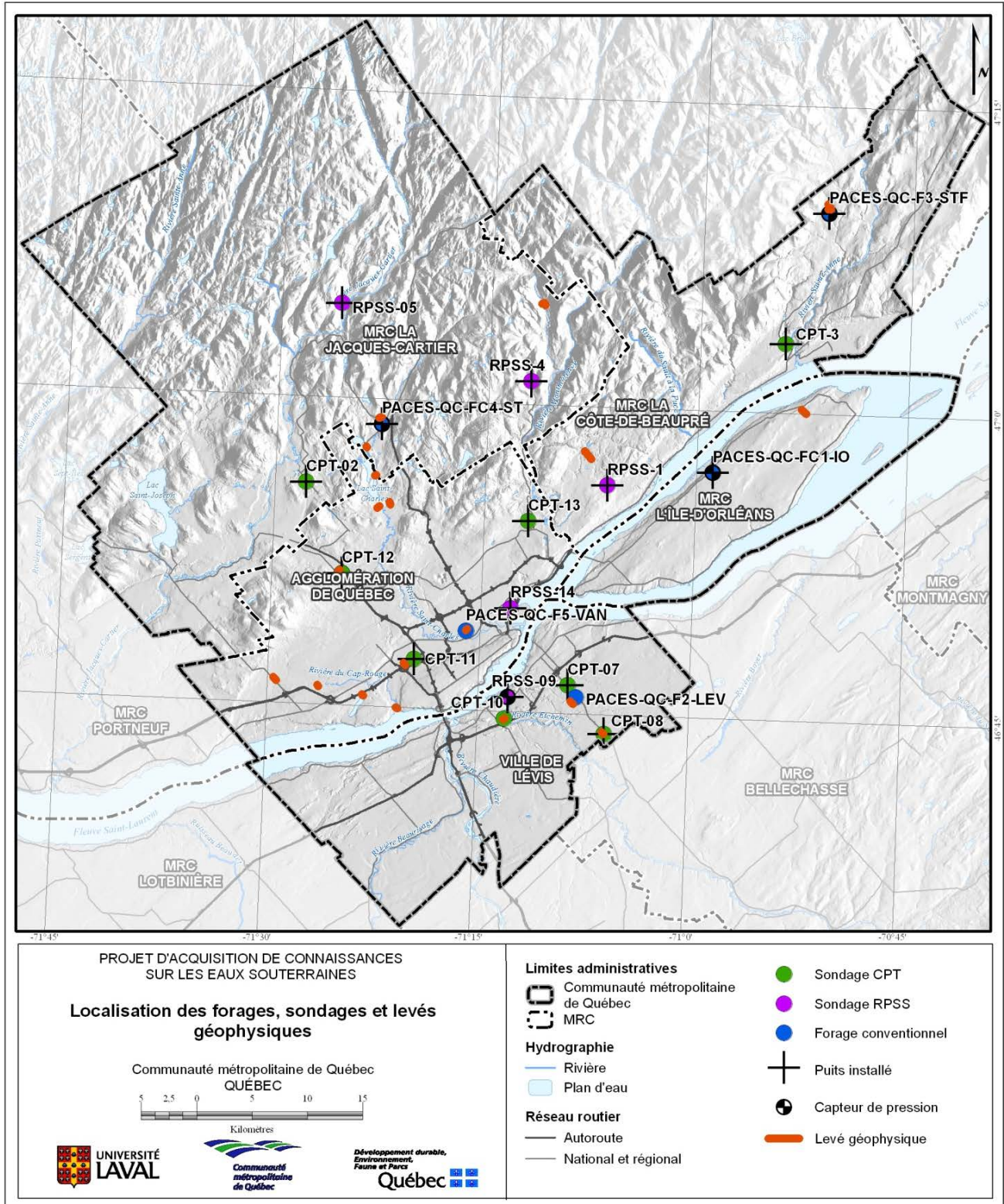


Figure 2.1 : Localisation des forages, sondages, puits, capteurs de pression et levés géophysiques effectués par l'Université Laval

Préalablement à chaque levé effectué, la carte de la géologie des formations superficielles ainsi que les informations de forages disponibles (section 2.3.1) ont été consultées pour estimer la nature et l'épaisseur des dépôts meubles qui recouvrent le socle rocheux. Comme mentionné dans le paragraphe précédent, le choix de la méthode géophysique la plus appropriée pour investiguer un milieu donné dépend de la nature des dépôts alors que la profondeur d'investigation d'une méthode géophysique donnée dépend non seulement de la nature des dépôts, mais aussi de la configuration des équipements utilisés sur le terrain. Pour estimer la profondeur au roc, la profondeur d'investigation doit être suffisante et la configuration des équipements doit être adaptée aux conditions du site. À priori, des informations sur le site d'étude sont donc nécessaires pour optimiser l'investigation hydrogéophysique et atteindre les objectifs. Un résumé de la méthodologie est présenté à l'Annexe 2 et dans le rapport II (Talbot Poulin *et coll.*, 2012).

Les résultats des investigations hydrogéophysiques sont présentés sous la forme de planches qui contiennent l'ensemble des levés géophysiques réalisés à chaque site ainsi que la coupe hydrostratigraphique interprétative de synthèse qui en résulte (Annexe E1).

2.2.2 Sondages et forages

Le principal objectif des forages et des sondages est d'obtenir de l'information sur la nature des dépôts meubles et leurs épaisseurs. Les secteurs ciblés ont été déterminés à partir de l'information tirée des cartes préliminaires Géologie du Quaternaire et Estimation de l'épaisseur des dépôts meubles (Moreno *et coll.*, 2011). Les sondages et forages sont répartis sur l'ensemble du territoire de la CMQ et visent à représenter les différents contextes hydrostratigraphiques de la région et à compléter la couverture des secteurs où l'info est manquante. L'emplacement exact des travaux présentés à la Figure 2.1 dépend toutefois de certaines contraintes logistiques et administratives.

Cinq forages conventionnels d'un diamètre de 15,24 centimètres (cm) ont été réalisés en décembre 2011 et en janvier 2012 par Samson & frères inc. à l'aide de foreuses de type rotatives, modèle Foremost DR-24 et Ingersoll TH-60 (Tableau 2.3). Les déblais de forage ont été prélevés et certains des échantillons ont fait l'objet d'une analyse granulométrique.

Treize (13) sondages ont été réalisés à l'automne 2011 et au printemps 2012. Leur profondeur et leur localisation apparaissent au Tableau 2.3 et à la Figure 2.1. Les sondages *Cone Penetration Test* (CPT) et *RotoPercussion Sounding System* (RPSS) sont respectivement faits par enfoncement et par rotopercussion à l'aide d'une foreuse sur chenilles, modèle Geotech 605D. Cette foreuse appartient à l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) et elle a été opérée par les spécialistes de cet institut.

Lors d'un sondage CPT, un piézocône muni de plusieurs capteurs est enfoncé verticalement dans le sol. Durant la pénétration du piézocône, différents paramètres sont enregistrés en continu tels que la résistance à la pointe, le frottement mobilisé sur le manchon du pénétromètre, les pressions interstitielles générées par le fonçage du cône dans le sol, la résistivité électrique, la teneur en eau et l'inclinaison du pénétromètre. L'interprétation des variations en profondeur de ces paramètres et leur corrélation fournissent un profil détaillé de la stratigraphie. Il est aussi possible de récupérer un

échantillon de sol non remanié en remplaçant le piézocône par un échantillonneur. De tels échantillons ont été prélevés durant les sondages CPT pour en décrire la nature des dépôts pénétrés et échantillonnés. Certains de ces échantillons ont fait l'objet d'analyses granulométriques. Suite à un sondage CPT, un piézomètre peut être installé dans les dépôts meubles. Une profondeur d'environ 40 m peut être atteinte dans des conditions optimales.

Tableau 2.3 : Forage, sondage et installation de puits

Municipalité ou arrondissement	MRC ou Ville	Nom du forage	Profondeur du forage (m)	Matériaux au niveau de la crépine ou trou ouvert
Forages conventionnels				
Sainte-Famille	Île-d'Orléans	PACES-QC-F1-IO	37	roc fracturé
Desjardins	Ville de Lévis	PACES-QC-F2-LEV	14	S.O.
Saint-Ferréol-les-Neiges	Côte-de-Beaupré	PACES-QC-F3-STF	35	dépôts meubles
Stoneham-et-Tewkesbury	Jacques-Cartier	PACES-QC-F4-STO	22	dépôts meubles et roc fracturé
Les Rivières	Ville de Québec	PACES-QC-F5-VAN	29	S.O.
Sondages RPSS				
L'Ange-Gardien	Côte-de-Beaupré	RPSS-01	11	dépôts meubles
Sainte-Brigitte-de-Laval	Jacques-Cartier	RPSS-04	9	dépôts meubles
Stoneham-et-Tewkesbury	Jacques-Cartier	RPSS-05	20	dépôts meubles
Les Chutes-de-la-Chaudière-Est	Ville de Lévis	RPSS-09	14	dépôts meubles
La Cité-Limoilou	Ville de Québec	PPSS-14	6	roc fracturé
Sondages CPT				
Saint-Gabriel-de-Valcartier	Jacques-Cartier	CPT-02	43	dépôts meubles
Beaupré	Côte-de-Beaupré	CPT-03	9	dépôts meubles
Desjardins	Ville de Lévis	CPT-07	16	dépôts meubles
Desjardins	Ville de Lévis	CPT-08	5	dépôts meubles
Les Chutes-de-la-Chaudière-Est	Ville de Lévis	CPT-10	34	S.O.
Sainte-Foy-Sillery-Cap-Rouge	Ville de Québec	CPT-11	10	dépôts meubles
La Haute-Saint-Charles	Ville de Québec	CPT-12 (4,1 m et 14,6 m)	4 et 15	dépôts meubles (aux 2 profondeurs)
Beauport	Ville de Québec	CPT-13	36	dépôts meubles

S.O. : sans objet ; RPSS : RotoPercussion Sounding System; CPT : Cone Penetrometer Test

Les sondages RPSS permettent aussi d'installer des puits d'observation et de prendre des échantillons de sols non remaniés. Cette technique a été utilisée lorsque les dépôts rencontrés étaient trop compacts ou trop grossiers pour effectuer un sondage CPT. Lors du sondage RPSS, certains paramètres mécaniques sont mesurés. Le type de dépôts rencontrés peut être estimé, mais l'obtention d'un profil stratigraphique détaillé n'est pas possible avec ce type de sondage.

Les rapports de forages et de sondages sont à l'Annexe E2. Les descriptions stratigraphiques ont été intégrées à la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ et ont été priorisées lors de l'élaboration des coupes et du modèle hydrostratigraphique tridimensionnel (3D) (section 4.3) en raison de leur plus grande fiabilité.

Dans le cas de trois forages et sondages, il n'y a pas eu d'installation de puits, car aucun aquifère de dépôts meubles n'a été rencontré. Plusieurs puits d'observation ont tout de même été installés dans des dépôts meubles peu perméables (silt, alternances silt-sable). Ainsi, l'installation d'un puits d'observation ne correspond pas nécessairement à la présence d'un aquifère de dépôts meubles (aussi appelé aquifère granulaire).

2.2.2.1 *Installation de capteurs de pression dans les puits*

Des capteurs de pression ont été introduits dans 4 puits installés par l'Université Laval dont la localisation est indiquée à la Figure 2.1. L'objectif de ces installations est de mesurer les variations saisonnières du niveau d'eau et d'estimer les taux de recharge annuelle des aquifères. Pour chaque puits, un capteur était submergé dans l'eau tandis qu'un autre capteur mesurait la pression dans l'air pour corriger les fluctuations de la pression barométrique. Les mesures de pression ont été enregistrées à toutes les heures du 3 février 2012 au 5 février 2013. Elles ont ensuite été transformées en profondeurs d'eau et intégrées dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ. Les puits PACES-QC-F1-IO et PACES-QC-F3-STF, forés sur des terrains municipaux, seront cédés ultérieurement au MDDEFP et intégrés au Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec.

2.2.2.2 *Analyses granulométriques*

L'analyse granulométrique d'un sédiment consiste à déterminer précisément la portion des diverses tailles de particules (sable, silt, argile, etc.). Ces analyses ont été effectuées dans le but d'identifier la nature des dépôts meubles rencontrés lors des sondages et forages. Les résultats d'analyse ont également servi à estimer la conductivité hydraulique (section 4.6) de ces dépôts. Dans le cadre de cette étude, la taille des particules a été définie selon la classification du Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA, 2011).

Plusieurs échantillons de sols ont été prélevés lors des forages (PACES-QC-F3-STF, F4-STO et F5-VAN) et des sondages (tous sauf RPSS-05). Les résultats des 35 analyses granulométriques se retrouvent dans la base de données PACES-CMQ.

Deux méthodes d'analyses ont été utilisées : le tamisage mécanique, effectué dans un laboratoire du Département de génie civil de l'Université Laval et la granulométrie laser, opérée dans un laboratoire du Département de géographie de l'Université Laval. Le tamisage mécanique a été utilisé pour la portion des particules de dépôts ayant un diamètre de plus 80 micromètres (μm). Cette méthode consiste à faire passer un échantillon de sédiment sec à travers une séquence de tamis en agitation, aux mailles de plus en plus fines, et à peser la portion de sédiments recueillis dans chaque tamis. La granulométrie laser est une méthode applicable à la portion des particules au diamètre inférieur à environ 1 mm. Après avoir subi plusieurs prétraitements, un sous-échantillon est incorporé à une solution pour former une émulsion (Cayer, 2010). Cette émulsion est ensuite introduite

dans un granulomètre au laser Horiba®. Cet appareil analyse les patrons de réémission de la lumière à travers l'émulsion pour mesurer la taille des particules. La méthodologie complète est exposée par Cayer (2010) et par le Bureau de normalisation du Québec (CAN/BNQ, 1987). Dans plusieurs cas, une combinaison des deux méthodes a été nécessaire pour produire l'analyse granulométrique complète de l'échantillon.

2.2.3 Essais hydrauliques

Trois types d'essais hydrauliques ont été réalisés dans le but de mieux définir les propriétés hydrauliques des aquifères et des sols : les essais de pompage de courte durée, les essais de perméabilité et les essais d'infiltration. La localisation de ces essais est présentée à la Figure 2.2 et les résultats des essais sont intégrés à la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ. Le rapport de la Phase II du projet (Talbot Poulin *et coll.*, 2012) donne plus d'information sur la méthodologie utilisée pour réaliser les essais.

2.2.3.1 Essais de pompage de courte durée

Des essais de pompage de courte durée ont été réalisés dans plusieurs puits échantillonnés lors des campagnes de terrain des étés 2011 et 2012 (section 2.2.5). Un capteur automatique de pression était inséré dans le puits pendant la durée complète des travaux d'échantillonnage. Ainsi les variations du niveau d'eau souterraine du puits étaient mesurées pendant le pompage et durant la période de remontée du niveau d'eau vers son état initial. Les courbes des mesures des niveaux d'eau en fonction du temps ont ensuite été interprétées par les méthodes de Theis (1935) (solutions pour les aquifères confinés et non confinés) ou de Hantush et Jacob (1955) (solution pour les aquifères semi confinés). Une faible proportion des essais réalisés a pu être interprétée avec succès, car les débits et temps de pompage étaient souvent insuffisants et la géométrie du puits, parfois mal connue (section 4.6). Douze (12) essais ont permis de calculer la capacité spécifique et la transmissivité.

2.2.3.2 Essais de perméabilité

Des essais de perméabilité ont été effectués à l'été 2012 dans des puits installés dans le cadre du projet. Ces essais se font en changeant brusquement le niveau d'eau du puits par le retrait ou l'ajout rapide d'une quantité d'eau dans le puits. Le retour du niveau d'eau à l'état initial est enregistré par un capteur de pression inséré dans le puits pour toute la durée de l'essai. L'interprétation des données, qui fournit une valeur de conductivité hydraulique, a été faite selon la méthode de Bouwer et Rice (1976). Toutefois, ce type d'essai hydraulique ne permet pas d'interprétation adéquate lorsque les dépôts sont très perméables et que le retour à l'équilibre du niveau d'eau est trop rapide ou, à l'inverse, si la remontée du niveau est trop lente. Ainsi, 5 essais de perméabilité ont été interprétés avec succès.

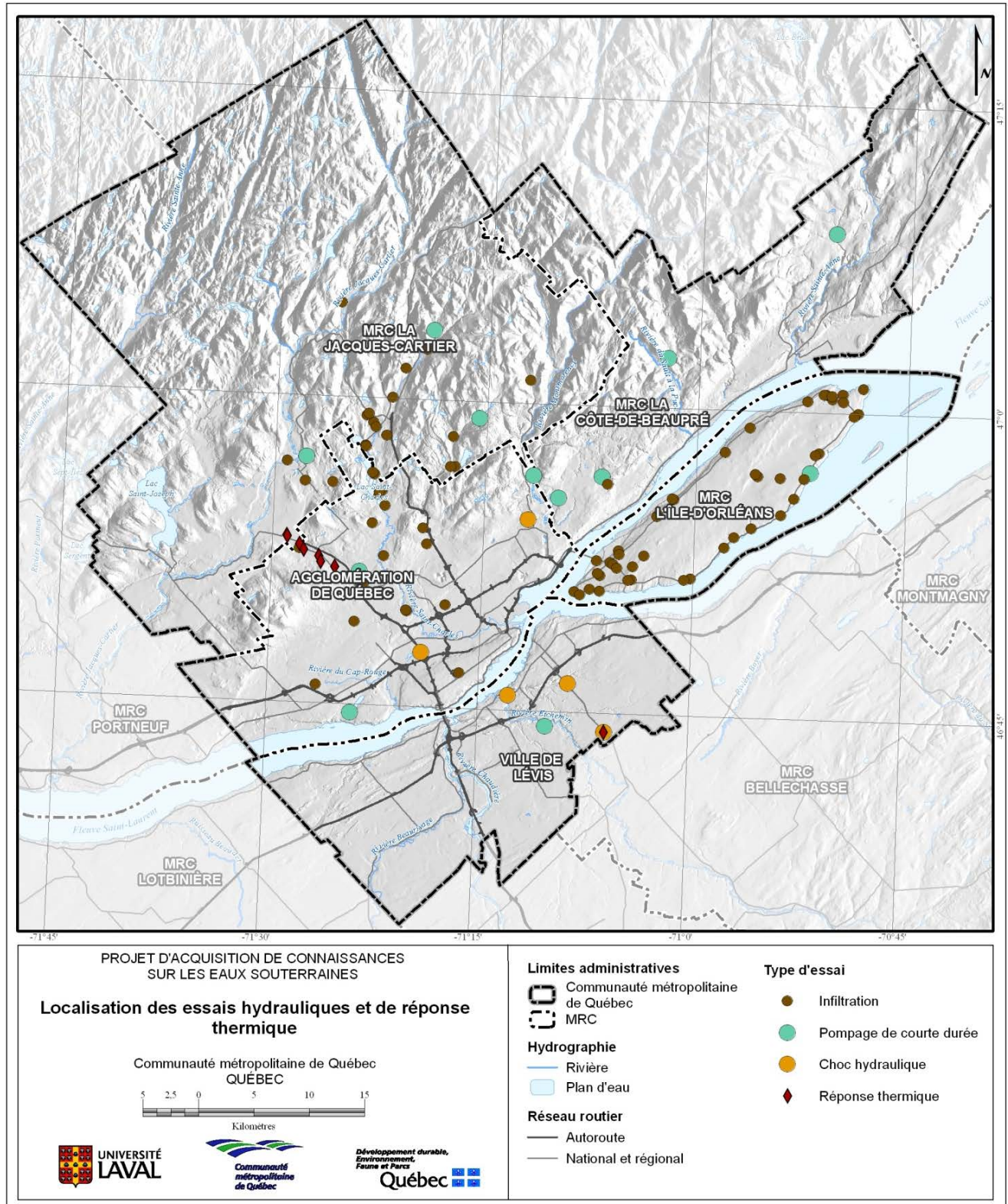


Figure 2.2 : Localisation des essais hydrauliques et de réponse thermique

2.2.3.3 *Essais d'infiltration*

L'essai d'infiltration a pour objectif de mesurer la conductivité hydraulique du sol près de la surface du terrain, à une profondeur allant de 15 à 75 cm. Dans cette étude, un perméamètre de Guelph de Soilmoisture Equipment® (2008) a permis de mesurer le débit d'eau s'infiltrant dans le sol non saturé jusqu'à l'atteinte d'un taux constant. Au cours des étés 2011 et 2012, 82 essais d'infiltration ont été réalisés et interprétés. Ces essais étaient localisés principalement à l'île d'Orléans et dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles.

2.2.4 *Essais de réponse thermique*

Des travaux de terrain ont été réalisés pour déterminer la conductivité thermique des matériaux géologiques formant les aquifères afin d'évaluer le potentiel géothermique sur le territoire de la CMQ. La conductivité thermique, qui est la capacité d'un matériel à conduire la chaleur, a été déterminée à partir de tests de réponses thermiques, selon la méthode présentée par Raymond *et coll.* (2010). L'essai de réponse thermique utilisé consiste à chauffer l'eau dans un puits avec des câbles chauffants. La variation de la température de l'eau souterraine est mesurée directement dans le puits avec un train de capteurs thermiques, modèle iBcod® de AlphaMach inc. Les capteurs sont à tous les 1 m de profondeur et la température est mesurée avant, pendant et après la période de chauffage de l'eau souterraine par les câbles.

Des essais de réponse thermique ont été réalisés dans 9 puits sur le territoire de la CMQ, notamment dans le secteur de Val-Bélair. Chaque essai a duré environ 6 jours et a été réalisé en trois phases distinctes. Durant la première phase de l'essai, la température initiale de l'eau souterraine a été mesurée et variait de 7 à 8°C pour les puits testés. La seconde phase est la période de chauffage et durait de 36 à 40 heures. La troisième phase est la période de retour thermique durant laquelle l'eau souterraine revient à sa température initiale à la suite de l'arrêt du chauffage. Seules les données de température durant la période de retour thermique sont utilisées pour déterminer la conductivité thermique, puisque les variations de températures durant cette période sont plus stables et non influencées par les fluctuations énergétiques du réseau de distribution électrique ou de la génératrice. Afin d'analyser les différents essais de réponse thermique sur une même base comparative, l'énergie introduite par le système de chauffage a été mesurée. Pendant l'essai, la quantité d'énergie injectée est évaluée avec un multimètre qui calcule l'énergie fournie par les câbles chauffants en kilowattheure (kWh). La Figure 2.3 illustre une courbe typique de la réponse thermique enregistrée par un capteur situé dans un puits.

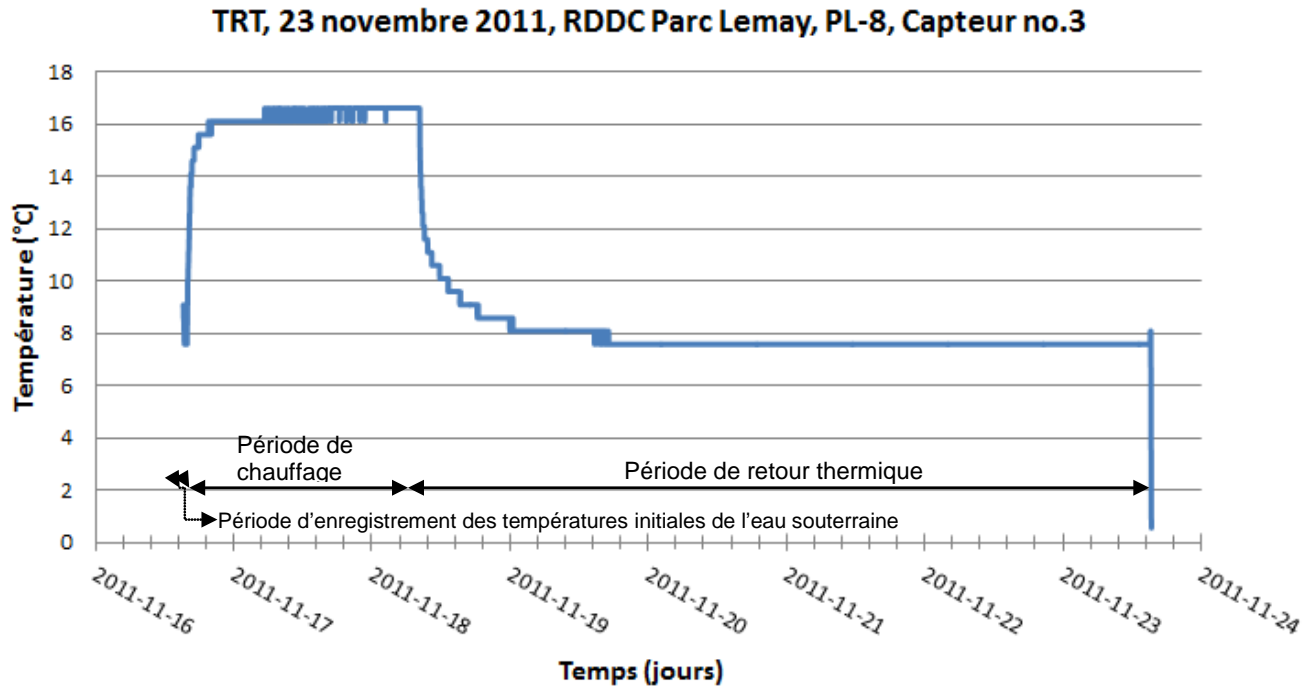


Figure 2.3 : Courbe typique des variations de la température lors de l'essai de réponse thermique

Pour chaque essai, la température mesurée lors de la période de retour est reproduite avec le modèle analytique de la ligne-source (Raymond *et coll.*, 2010). Ce modèle analytique correspond à l'équation ci-dessous qui décrit la variation de la température T_w (T) mesurée par le capteur en fonction du temps t (t) :

$$T_w(t) - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda} [W(u) - W(u_{off})]$$

$$\text{où } u = \frac{r_{bh}^2 \rho c}{4\lambda(t)} \text{ et } u_{off} = \frac{r_{bh}^2 \rho c}{4\lambda(t - t_{off})}$$

où t_{off} est la durée du chauffage (t), T_0 est la température initiale de l'aquifère (T), q est le flux d'injection de chaleur dans le puits par unité de longueur du forage (MLt^{-3}), λ est la conductivité thermique de la formation géologique environnante ($MLt^{-3}T^{-1}$), $W(u)$ est la série de Taylor, r_{bh} est le rayon du forage (L), et ρc est la capacité thermique de la formation géologique environnante ($ML^{-1}t^{-2}T^{-1}$). La conductivité thermique λ et la capacité thermique ρc sont obtenues en reproduisant, avec le modèle, les températures mesurées dans le puits.

Les essais de réponse thermique ont permis de déterminer les valeurs de conductivité thermique des dépôts meubles. Les valeurs mesurées ont été comparées à des valeurs théoriques rapportées dans la littérature mais n'ont pas été utilisées pour le calcul du potentiel géothermique car peu d'essais ont été effectués. Compte tenu des limites techniques de l'équipement, aucun essai de réponse thermique n'a été réalisé à des profondeurs supérieures à 40 m et aucun essai n'a été effectué dans le roc.

2.2.5 Échantillonnage d'eau souterraine

Deux campagnes d'échantillonnage de l'eau souterraine ont été réalisées, l'une à l'été 2011 et l'autre à l'été 2012, pour évaluer la qualité de l'eau en fonction des critères de potabilité du Gouvernement du Québec (2013b) et les critères esthétiques du Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable (CEP, 2012) publiés par Santé Canada. Sur un total de 141 échantillons prélevés (Tableau 2.4), 110 provenaient des aquifères de roc fracturé, 29 des aquifères granulaires (ou de dépôts meubles) et 2 d'aquifères de type indéterminé. La Figure 2.4 identifie la localisation des sites d'échantillonnage en spécifiant le type d'aquifère exploité. Parmi les 140 puits échantillonnés, 7 sont des puits municipaux et 12 sont de nouveaux puits d'observation installés dans le cadre du PACES (section 2.2.2). Les 121 autres puits échantillonnés sont des puits de particuliers ou de commerçants identifiés à partir de la base de données du SIH ou ayant été installés dans le cadre d'autres études.

Tableau 2.4 : Nombre d'échantillons d'eau prélevés selon le type d'aquifère

Ville ou MRC	Aquifère fracturé	Aquifère granulaire	Aquifère indéterminé	Total
Agglomération de Québec	19	14	1	34
Ville de Lévis	16	1	0	17
MRC de La Côte-de-Beaupré	18	7	0	25
MRC de L'Île-d'Orléans	17	0	0	17
MRC de La Jacques-Cartier	40	7	1	48
TOTAL CMQ	110	29	2	141

Les puits ont été échantillonnés suivant le «Protocole d'échantillonnage de l'eau souterraine» de Blanchette *et coll.* (2010) préparé pour les besoins du GRIES. Les paramètres mesurés au moment de l'échantillonnage ont été obtenus avec une sonde YSI Professional Plus®.

Une fois prélevés, les échantillons ont été conservés au frais puis envoyés dans des laboratoires accrédités par le MDDEFP pour l'analyse des paramètres physico-chimiques (Tableau 2.5).

Tableau 2.5 : Paramètres physico-chimiques mesurés et analysés

Paramètres physico-chimiques									
Conductivité électrique					Température				
Matière dissoute totale (MDT)					Oxygène dissout (O.D.)				
Alcalinité totale					Salinité				
Potentiel d'oxydoréduction (Eh)					Potentiel d'hydrogène (pH)				
Métaux dissous									
Al	Sb	Ag	As	Ba	Be	Bi	B	Ca	Cd
Cr	Co	Cu	Sn	Fe	Li	Mg	Mn	Mo	Ni
K	Pb	Se	Si	Na	Sr	Ti	U	V	Zn
Anions									
Bromures			Chlorures			Nitrites-Nitrates			
Sulfates			Fluorures						
Nutriments									
Phosphore total inorganique					Azote ammoniacale				
Autre paramètre inorganique									
Sulfures totaux									

Les analyses des métaux, des anions, des nutriments et des sulfures totaux ont été effectuées par le Laboratoire de physicochimie de la Ville de Québec (Division de la qualité de l'eau, Service de l'environnement) pour la campagne 2011 et par le laboratoire Maxxam Analytique inc. pour les campagnes 2011 et 2012. Aucune analyse bactériologique n'a été réalisée car ce type de paramètres est représentatif de conditions locales au puits de captage et non de la qualité régionale de l'eau souterraine.

Conformément au Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales (MDDEP, 2008), les mesures de contrôle de la qualité de l'échantillonnage suivantes ont été respectées :

- 10 % des échantillons ont été prélevés en duplicata,
- 5 % des échantillons sont des blancs de terrain, et
- 5 % des échantillons sont des blancs de transport.

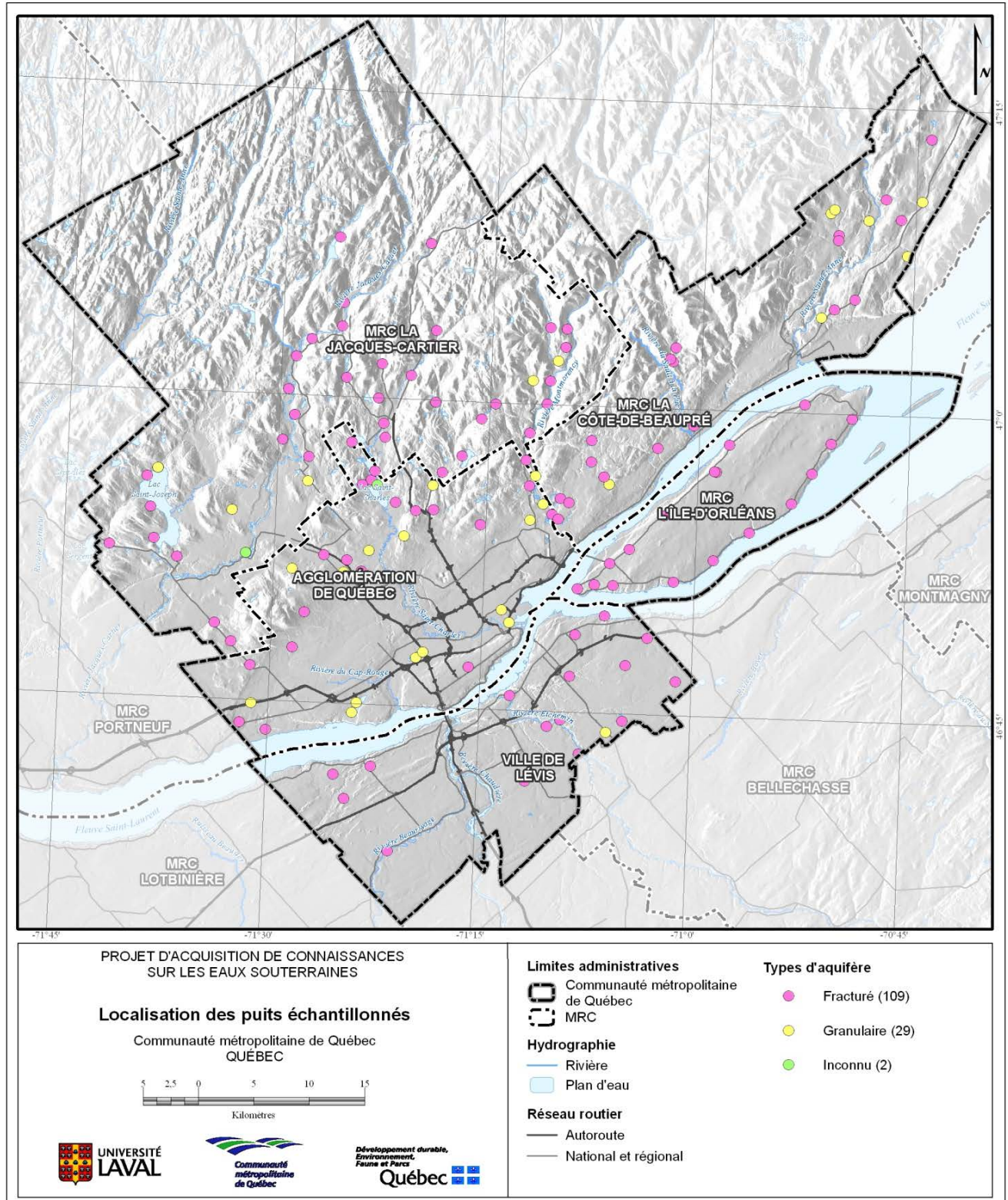


Figure 2.4 : Localisation des puits échantillonnés

2.3 Saisie, archivage et validation des données

2.3.1 Inventaire de la base de données hydrogéologiques

Les données ont toutes été colligées dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ. Comme spécifié précédemment, la structure de cette dernière diffère quelque peu de celle ultimement transmis au MDDEFP. La base de données PACES-CMQ comprend 25 761 objets qui sont distingués selon leur type (Tableau 2.6) et pouvant être associés à de nombreuses observations (Tableau 2.7). Les informations contenues dans cette base de données servent d'intrants à toutes les analyses hydrogéologiques qui seront présentées dans ce rapport. La synthèse de l'information contenue dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ contient non seulement de l'information sur le territoire de la CMQ mais dans les MRC voisines à l'intérieur des limites des cartes produites.

La majorité des types d'objet sont des puits et la majorité de ceux-ci sont des puits privés pour l'approvisionnement des résidences non raccordées à un réseau d'aqueduc. De nombreux trous non aménagés, incluant les trous faits à la pelle mécanique, à la tarière ou par forage, ont aussi servi à rapporter des informations hydrogéologiques utiles. Plusieurs piézomètres conçus pour mesurer le niveau de l'eau souterraine ont été identifiés sur le territoire. Le reste des objets retrouvés dans la base de données sont peu nombreux et correspondent à des points de résurgences d'eau souterraine (ou sources), des stations d'échantillonnage d'eau de surface, des affleurements rocheux et des sondages géophysiques ou géotechniques.

Tableau 2.6 : Nombre et proportion d'objets de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ associés à chaque type d'objet

Type d'objet	Nombre	Proportion (%)
Puits	20 918	81,2
Trou non aménagé	3 674	14,3
Piézomètre	546	2,1
Résurgence d'eau souterraine	24	0,1
Station d'échantillonnage d'eau de surface	242	0,9
Affleurement rocheux	315	1,2
Sondage géophysique	32	0,1
Sondage géotechnique	10	0,0
Total	25 761	100,0

Dans la base de données hydrogéologiques, chaque objet est localisé dans l'espace à l'aide de ses coordonnées géographiques. Comme discuté à la section 2.1, les objets sont aussi classés selon leur source. S'il y a lieu, des informations sur le puits de captage sont également rapportées, entres autres sur son utilisation (approvisionnement en eau potable, irrigation, abreuvement de bétail, pisciculture, géothermie, etc.), le type d'aquifère (granulaire ou roc fracturé) et le niveau de confinement : captif (ou confiné), semi-captif (ou semi confiné) et libre (non confiné). Des données concernant la méthode de forage, la profondeur atteinte, le diamètre du forage et la date de construction sont aussi décrites. Lorsque disponibles, le type de pompe, la crépine, le tubage et la margelle sont compilés.

Plusieurs types d'observation sont rapportés dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ (Tableau 2.7). Dans certains cas, plusieurs observations de même type s'appliquent à un seul objet, tandis qu'à l'inverse, de nombreux objets ne sont pas concernés par certains types d'observation.

Tableau 2.7 : Nombre d'observations de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ associées à chaque type d'observation

Type d'observation	Nombre
Description stratigraphique	20 678
Niveau d'eau	85 079
Essai hydraulique	14 957
Analyse géochimique d'échantillon d'eau	33 671
Analyse granulométrique de sédiments	530

La description stratigraphique des forages comprend, pour chaque séquence stratigraphique, l'épaisseur, la profondeur et la description du matériel rencontré. La description du matériel est aussi codifiée afin d'automatiser et de faciliter les analyses subséquentes.

Les niveaux d'eau proviennent de 14 501 puits ou piézomètres (objets) différents. Plusieurs des niveaux (73,0 %) proviennent de seulement 12 piézomètres ayant plus de 1 000 mesures enregistrées en continu, appartenant au Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec du MDDEFP ou ayant été installés dans le cadre du PACES par l'Université Laval. À chaque niveau d'eau est associé une date et une heure de mesure, de même que des informations portant sur la position du niveau par rapport au sol, sur l'influence du pompage d'un puits sur le niveau, et sur la représentativité d'un niveau statique ou dynamique. Bien entendu, la profondeur de l'eau est rapportée, ainsi que l'identification du repère utilisé.

Les informations sur les essais hydrauliques concernent la date et l'heure, le type d'essai effectué, la méthode d'interprétation, la durée, le débit pompé, les niveaux d'eau statique et dynamique, la référence au puits d'observation et la distance de ce dernier par rapport au puits pompé. Les paramètres hydrogéologiques rapportés sont le coefficient d'emmagasinement, la capacité spécifique, la transmissivité et la conductivité hydraulique.

Une majorité des analyses géochimiques (70,2 %) concernent des échantillons d'eau souterraine qui proviennent de 3 294 puits différents. Les autres analyses géochimiques s'appliquent à des échantillons d'eau de surface. Toutefois, un peu plus de la moitié (55,4 %) des analyses d'eau souterraine appartiennent à seulement 12 puits du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec du MDDEFP, pour lesquels seule la température journalière de l'eau est mesurée. En plus de la date et de l'heure du prélèvement de l'échantillon, plus de 250 paramètres physiques, chimiques, biologiques et de perception de la qualité de l'eau peuvent être associés à chaque observation.

Les analyses granulométriques de sédiments proviennent de 265 forages différents. Pour chaque analyse, la profondeur de l'échantillon récolté dans le forage est identifiée, ainsi que la taille des particules de sédiments selon le pourcentage passant (d_{10} , d_{30} et d_{60}). Les résultats de ces analyses permettent d'estimer la conductivité hydraulique des matériaux.

2.3.2 Archivage des rapports techniques dans la base de données bibliographiques

Les rapports techniques obtenus des différentes sources énumérées à la section 2.1 ont été numérisés et archivés dans une base de données à références bibliographiques du logiciel Endnote[®]. Conformément au Protocole du GRIES (Annexe E3), un numéro d'archivage séquentiel a été attribué à chaque rapport et a été rapporté dans un champ spécifique de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ pour chaque objet compilé. Les cartes annexées aux nombreux rapports recueillis et avec lesquelles des localisations de puits ont été extraites à l'aide d'un géoréférencement avec ArcGIS[®] sont également dans la base de données Endnote[®]. Dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ, il existe un champ informant sur la source des coordonnées géographiques et sur l'échelle à laquelle le géoréférencement a été effectué.

Outre les champs habituels sur l'auteur, l'année et le titre du rapport, la base de données bibliographiques contient des informations additionnelles à partir desquelles il est possible d'effectuer une recherche rapide :

- Numéro d'archivage,
- Propriétaire du rapport (source),
- Contenu pertinent, tel :
 - o Journal de forage ou de tranchée
 - o Description stratigraphique
 - o Coupe stratigraphique
 - o Piézométrie
 - o Caractéristiques de puits ou de piézomètres
 - o Évaluation du besoin en eau
 - o Évaluation de la recharge
 - o Essai hydraulique
 - o Aire d'alimentation d'ouvrage de captage
 - o Périmètre de protection de puits
 - o Vulnérabilité d'aquifère
 - o Mesure géophysique
 - o Analyse chimique d'eau
 - o Analyse chimique de sols
 - o Analyse granulométrique
 - o Modèle d'écoulement
 - o Activité polluante
 - o Essai géothermique
 - o Plan de localisation
- Accessibilité (publique/confidentiel), et
- MRC/ville/municipalité/arrondissement concernés par l'étude.

2.3.3 Protocole de fiabilité et de validation des données

Le Protocole fiabilité et validation des données de forage (Lambert *et coll.*, 2010) (Annexe E4), ci-après nommé Protocole, a été élaboré par le GRIES pour les besoins du PACES. Ce protocole a été suivi en majeure partie lors de l'évaluation et de la sélection des données de la CMQ les plus pertinentes à la réalisation des objectifs du projet.

2.3.3.1 Cotes de fiabilité

La fiabilité des données a tout d'abord été évaluée en attribuant une « cote de fiabilité » pour chaque objet contenu dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ. Elles permettent de qualifier la fiabilité de l'information et de faire un choix dans l'éventualité où des données seraient contradictoires. Ces cotes tiennent compte de la fiabilité de la localisation et l'élévation de l'objet, de même que de la qualité de la source de l'information. Une cote élevée indique un degré d'incertitude élevé sur les données associées à l'objet. Les six cotes de fiabilité sont décrites ci-dessous et une synthèse des valeurs des cotes pour les objets de la CMQ est présentée au Tableau A4 de l'Annexe 3.

La fiabilité sur la source des coordonnées géographiques informe sur la provenance de l'information et indique si une erreur évidente a été constatée et corrigée.

Le degré d'incertitude sur les coordonnées géographiques renseigne sur la précision de celles-ci lorsqu'elles sont rapportées de la source. Les coordonnées sont réputées être plus fiables lorsqu'elles ont été mesurées par arpentage ou à l'aide d'un GPS (*global positioning system*) et moins fiables lorsqu'elles ont été géoréférencées à partir d'une carte ou d'une localisation visuelle.

Le degré d'incertitude sur le géoréférencement consiste en une évaluation effectuée par la personne ayant procédé au géoréférencement de l'objet. Un géoréférencement excellent est attribué lorsque le géoréférencement s'est fait facilement par géocodage ou à partir d'une carte à grande échelle et très détaillée. Inversement, un géoréférencement acceptable indique que la procédure s'est avérée ardue et que la carte utilisée avait une petite échelle et était peu détaillée.

Le degré d'incertitude sur la localisation visuelle est divisé en fonction de l'échelle des plans accompagnant les rapports techniques et contenant des repères visuels (ex. : rivière, route, etc.) permettant d'estimer la localisation des objets. Une plus grande échelle représente un degré d'incertitude élevé et une plus petite échelle un degré d'incertitude faible.

Le degré d'incertitude de l'élévation est réputé être plus fiable lorsque l'élévation a été mesurée par nivellement ou à l'aide d'un GPS et moins fiable lorsqu'elle est extraite par géoréférencement. Par souci d'uniformité et pour simplifier les méthodes d'analyse, les élévations estimées par le modèle numérique de terrain sont employées pour tous les objets lors de la réalisation des objectifs du projet.

Concernant la qualité reliée à la provenance de l'information, les données mesurées par l'Université Laval dans le cadre du PACES sont considérées comme les plus fiables, viennent ensuite par ordre décroissant de fiabilité les données extraites des rapports techniques, les données provenant de diverses compilations et les données du SIH.

Une cote informe également sur l'accessibilité des données sources, à savoir si les valeurs des observations de l'objet peuvent être vérifiées à l'aide des données sources ou non.

2.3.3.2 *Critères de validation*

Plusieurs critères de validation ont été élaborés afin de porter un jugement sur l'exactitude des données, indépendamment de son degré de fiabilité. Lors de la réalisation des analyses hydrogéologiques, ils permettent de sélectionner ou de rejeter les données à utiliser. Les critères de validation portent sur trois aspects :

- la localisation permettant de valider la position de l'objet;
- la validation technique s'assurant que les observations associées à l'objet ne se contredisent pas et sont généralement comparables avec l'information des autres objets à proximité; et
- la validation scientifique obtenue suite à un certain traitement de la donnée impliquant un calcul scientifique.

Les critères de validation concernent parfois l'objet (forage, puits, station de mesure, etc.), parfois les observations associées à l'objet (description stratigraphique, niveau d'eau, essai hydraulique, analyse géochimique, etc.). La plupart des critères de validation sont présentés en détail dans le Protocole et certains autres ont été élaborés par l'Université Laval, tels que décrits ci-dessous. Le Tableau A5 et le Tableau A6 de l'Annexe 3 présentent une synthèse des valeurs des critères de validation des données de la CMQ portant respectivement sur les objets et les observations.

La cohérence de la localisation avec le réseau hydrographique est déterminée à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) en repérant les objets situés dans un cours d'eau ou un plan d'eau.

La cohérence de la profondeur au roc identifiée en forage avec les zones d'affleurement et de till mince de la Géologie du Quaternaire (version préliminaire) (Carte 12) est également évaluée. Cela est fait en vérifiant si un forage indique une faible épaisseur de dépôts meubles lorsque localisé dans un polygone d'affleurement ou de till mince.

Comme il est indiqué à la section 2.3.3.1, les élévations estimées par le modèle numérique de terrain sont employées pour tous les objets dans les analyses hydrogéologiques. Toutefois, la cohérence des altitudes rapportées par la source des données avec le modèle numérique de terrain demeure importante, car elle peut renseigner sur l'exactitude de la localisation de l'objet.

Le critère portant sur la cohérence de la profondeur des forages avec l'épaisseur totale des séquences stratigraphiques permet de constater des erreurs possibles des informations stratigraphiques.

La cohérence de la stratigraphie s'effectue en vérifiant si la description stratigraphique du forage respecte la séquence logique d'une unité de dépôts meubles au-dessus d'une unité de roc, et non le contraire.

Le dernier critère de validation associé aux objets concerne l'identification des doublons stratigraphiques. Afin de ne pas utiliser deux fois la même donnée dans les analyses hydrogéologiques et ainsi de ne pas attribuer un poids artificiellement trop élevé à une même donnée, les doublons sont identifiés à l'aide de la localisation des forages et de leur description stratigraphique. La méthode utilisée correspond à celle décrite en détail dans le Protocole. En résumé, pour être identifiés comme doublon, les forages doivent respecter les critères suivants :

- localisés à moins de 200 m l'un de l'autre,
- différence de profondeur totale de moins de 1 m,
- même nombre de couches dans la séquence stratigraphique,
- même code stratigraphique pour chaque couche de la séquence, et
- différence de l'épaisseur de chaque couche stratigraphique de moins de 0,2 m.

Le critère de validation sur la cohérence des niveaux d'eau s'applique à chaque observation (ou mesure de niveau d'eau) en comparant la profondeur du niveau statique avec la profondeur du niveau dynamique et la profondeur totale du puits.

Les informations associées aux essais hydrauliques sont évaluées par le critère portant sur la cohérence des paramètres hydrogéologiques et des informations servant à estimer la transmissivité. Ce critère s'assure que les paramètres hydrogéologiques rapportés de la source ne se contredisent pas. Il indique également si suffisamment d'informations sont disponibles pour estimer la transmissivité, soit le débit pompé, la durée du pompage et les niveaux d'eau statique et dynamique.

Le seul critère de validation de type scientifique porte sur la balance ionique des analyses géochimiques des échantillons d'eau. Celle-ci se calcule à partir des concentrations en éléments majeurs (anions et cations) et permet d'évaluer la qualité des analyses. Les échantillons ayant une valeur de balance ionique se situant dans l'intervalle de $\pm 10\%$ sont considérés adéquats pour les interprétations de la qualité de l'eau, l'estimation de la dureté et de la matière dissoute totale, ainsi que pour la définition des faciès géochimiques (types d'eau). Ceux en dehors de l'intervalle de bilan ionique acceptable peuvent être utilisés seulement pour établir la qualité de l'eau, mais tout en conservant un regard critique sur le sodium (Na), les chlorures (Cl) et les sulfates (SO₄).

3 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

3.1 Géologie du roc

La région de Québec constitue le point de rencontre de trois provinces géologiques, soit le Grenville, la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches (Figure 3.1). La Province de Grenville, située dans le nord de la CMQ, fait partie du Bouclier canadien et est constituée de roches métamorphiques. La Plate-forme du Saint-Laurent est située au sud de la Province de Grenville et correspond approximativement à la région physiographique des Basses-terres du Saint-Laurent. La Plate-forme du Saint-Laurent est composée de roches sédimentaires très peu déformées. Enfin, les Appalaches, situées dans la portion sud de la CMQ, sont des roches sédimentaires qui ont été déformées par des plissements et dans lesquelles des fractures se sont développées lors de la formation de la chaîne de montagnes. Les prochaines sections décrivent brièvement les événements géologiques ayant mené à la formation de ces trois provinces géologiques. Les différents types de roche (lithologie) qui les composent, les principales structures géologiques et la fracturation sont ensuite décrits. Ces informations apparaissent sur la carte de la géologie simplifiée du roc (Carte 13 et Figure 3.2) qui provient d'une compilation des ouvrages de Globensky (1987), du MRN (2002) et de Lebel et Hubert (1995). La compilation de Castonguay et Nadeau (2012) n'a pas été intégrée dans notre carte, car leurs travaux n'ont été que publiés récemment par la Commission géologique du Canada et ne couvrent pas entièrement la CMQ.

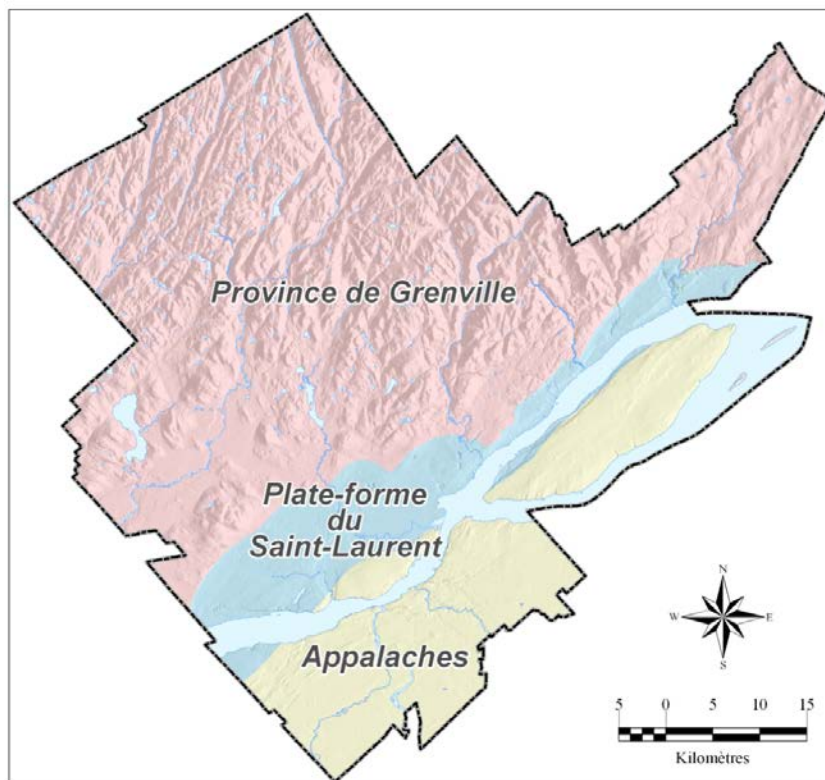


Figure 3.1 : Localisation des provinces géologiques de la région de Québec

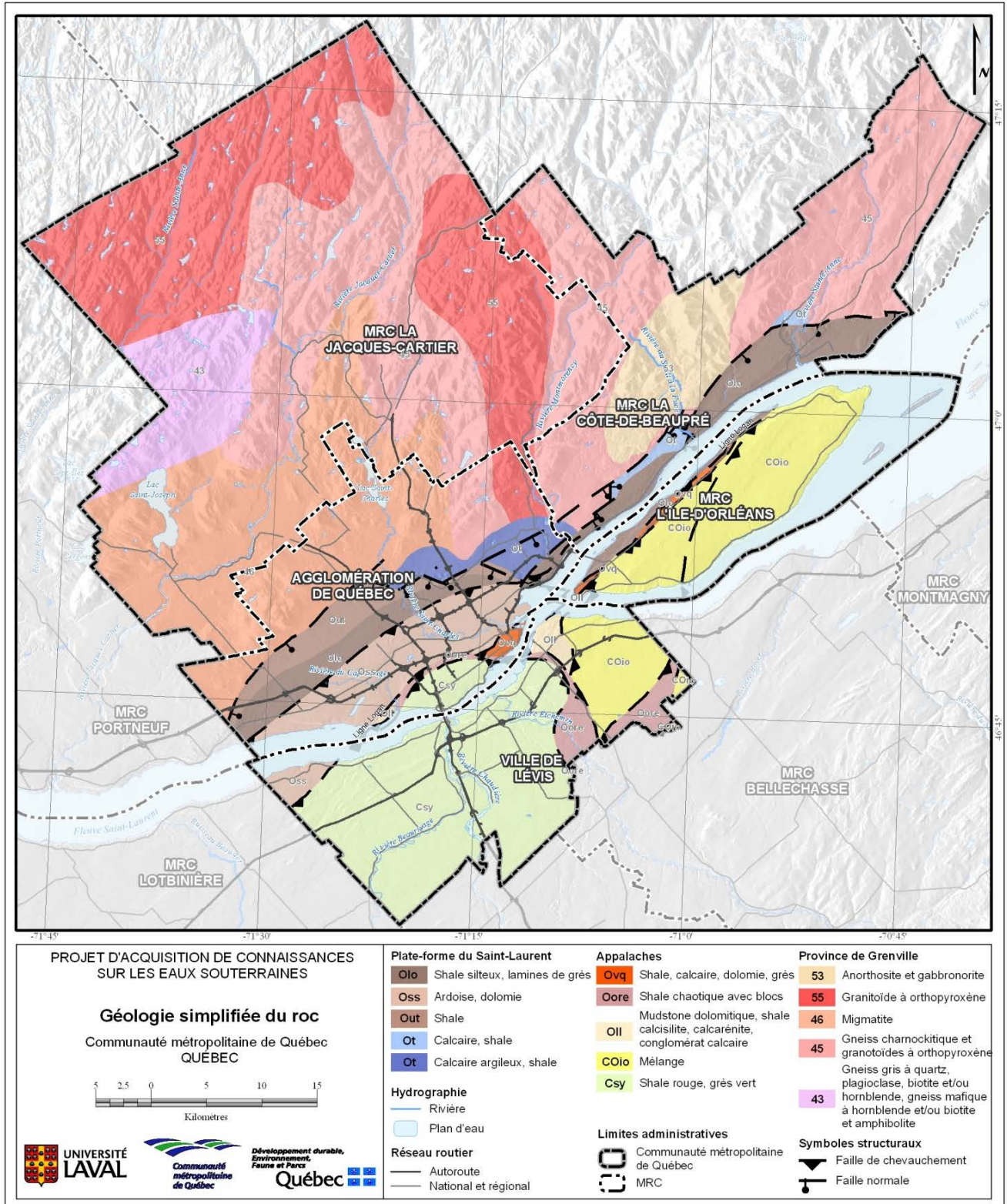
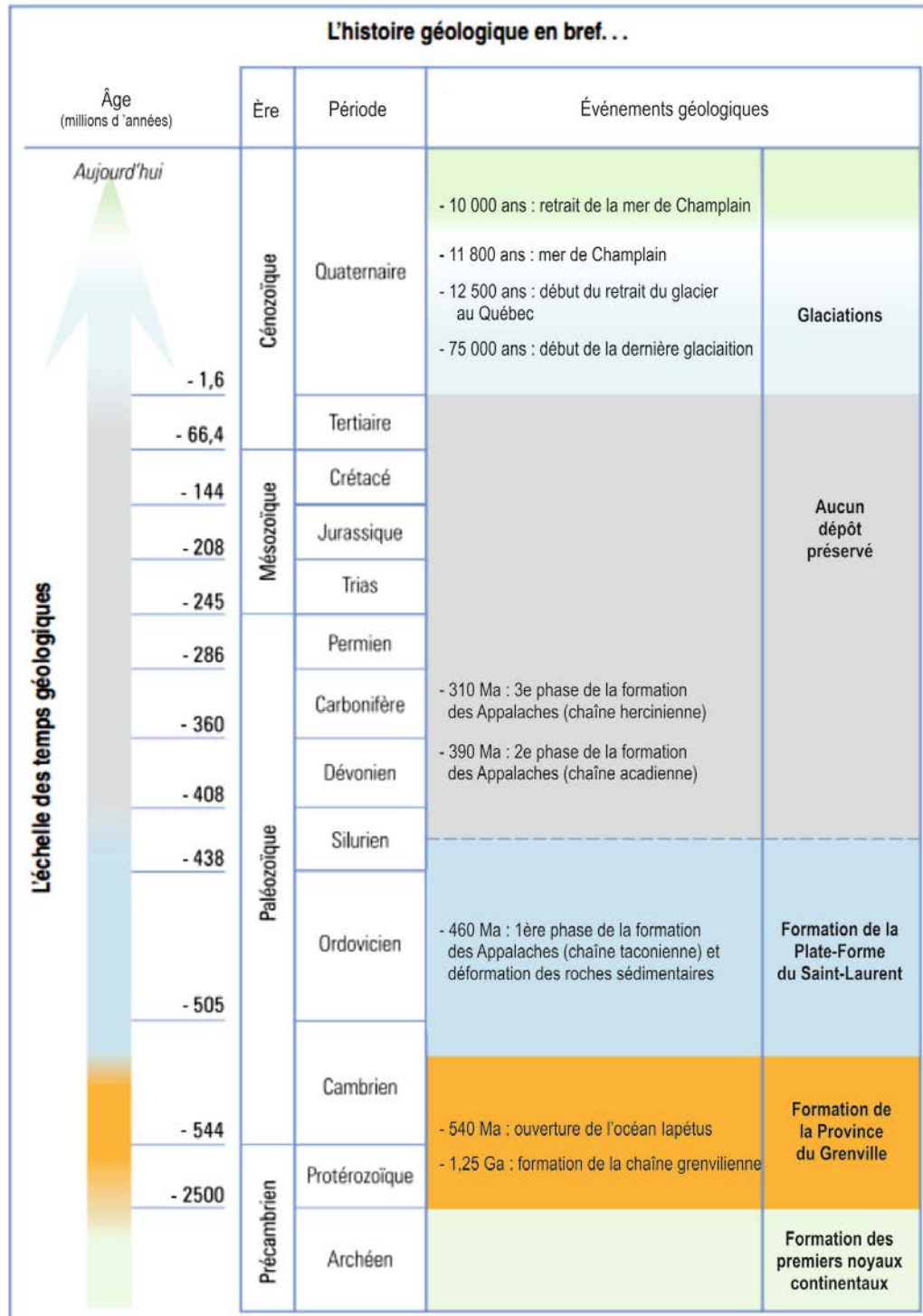


Figure 3.2 : Géologie simplifiée du roc

L'histoire géologique de la région de Québec a débuté il y a entre 1 250 et 900 millions d'années, alors que l'ensemble des masses continentales terrestres était réuni en un seul supercontinent appelé Rodinia. Une collision continentale a créé une imposante chaîne de montagnes, probablement comparable à l'Himalaya aujourd'hui, en marge du Bouclier canadien (Castonguay et Nadeau, 2012). Cette chaîne de montagnes correspond à la Province de Grenville que l'on retrouve dans la région de la CMQ et qui correspond maintenant à la région physiographique des Laurentides. Cette province géologique est principalement composée de grands massifs de roches intrusives métamorphisées de composition felsique à mafique. Ces roches sont les racines de cette ancienne chaîne de montagnes qui ont été exposées à la suite de millions d'années d'érosion. La Province de Grenville affleure dans la portion nord de la CMQ.

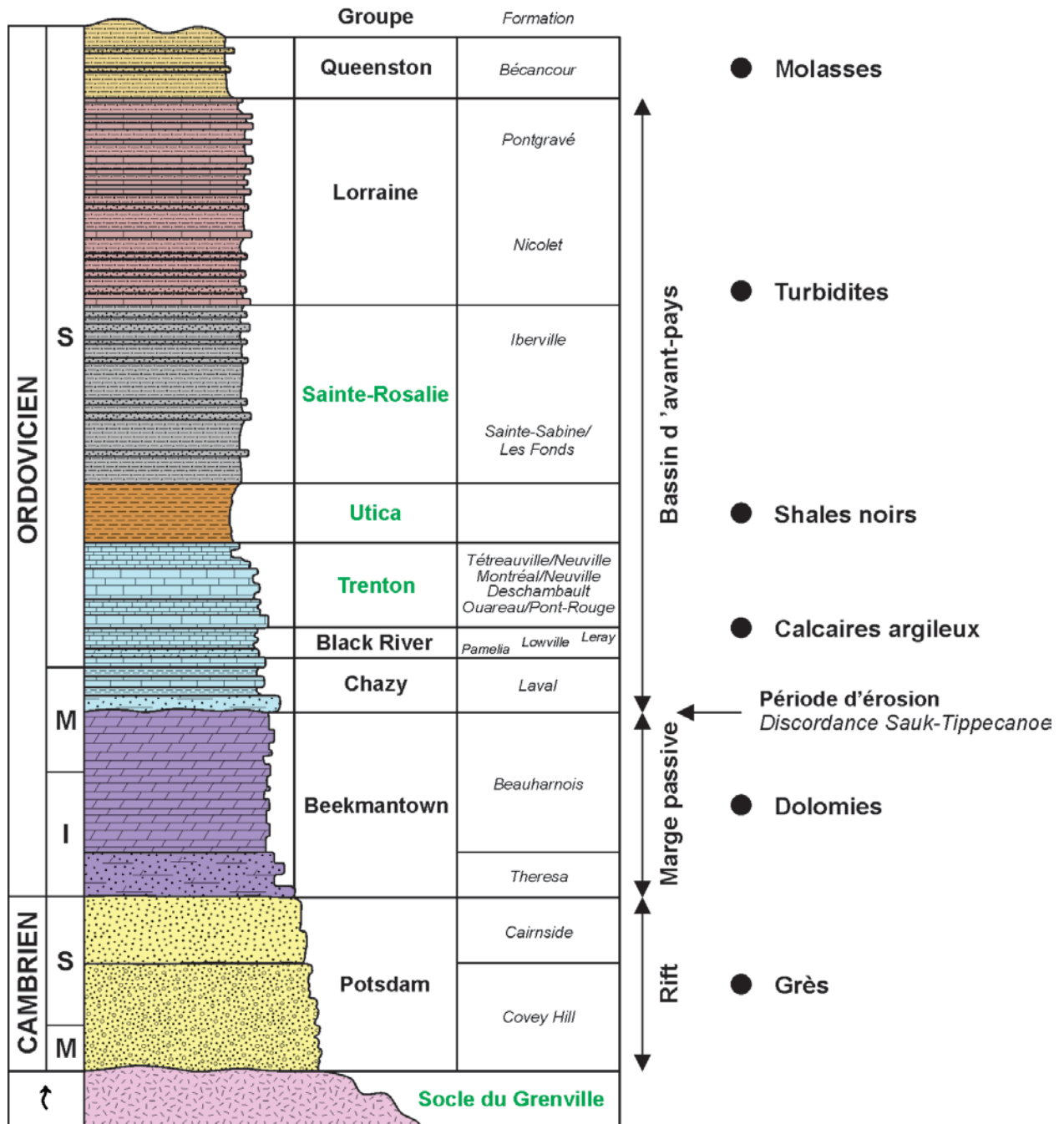
Il y a environ 600 millions d'années, le Bouclier canadien et la région de Québec étaient situés près de l'équateur (Castonguay et Nadeau, 2012). C'est à cette époque que le continent Rodinia s'est fragmenté. Cette division s'est manifestée par la création d'un rift bordé de grandes failles normales (Figure 3.5). Ce rift s'est progressivement élargi pour donner naissance aux masses continentales de Laurentia et de Baltica et à l'océan lapétus, qui pourrait être comparé à l'océan Atlantique actuel. Il y a 540 à 445 millions d'années, des sédiments se sont accumulés sur la marge du bassin océanique et sur la plate-forme continentale. Ces sédiments sont devenus les roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent (Figure 3.3), dont la géologie est décrite en détail par Globensky (1987).

La Plate-forme du Saint-Laurent est composée d'une succession de roches sédimentaires mises en place dans différents environnements de déposition (Figure 3.4). De la base au sommet de la Plate-forme du Saint-Laurent, seuls quelques groupes (Sainte-Rosalie, Utica et Trenton) peuvent être observés sur le territoire de la CMQ (Carte 13). Le Groupe de Trenton est principalement composé de calcaires argileux et de shales. Le Groupe Utica est caractérisé par des shales noirs tandis que le Groupe de Sainte-Rosalie renferme des shales, des grès, des ardoises ainsi que des dolomies.



Source: modifié de Côté et al. (2006)

Figure 3.3 : Histoire géologique



Source : Adaptée de Hofmann, 1972; Globensky, 1987; et Comeau *et coll.*, 2012.

Note : Les formations géologiques dont le nom est en vert sont présentes sur le territoire de la CMQ.

Figure 3.4 : Colonne stratigraphique de la Plate-forme du Saint-Laurent

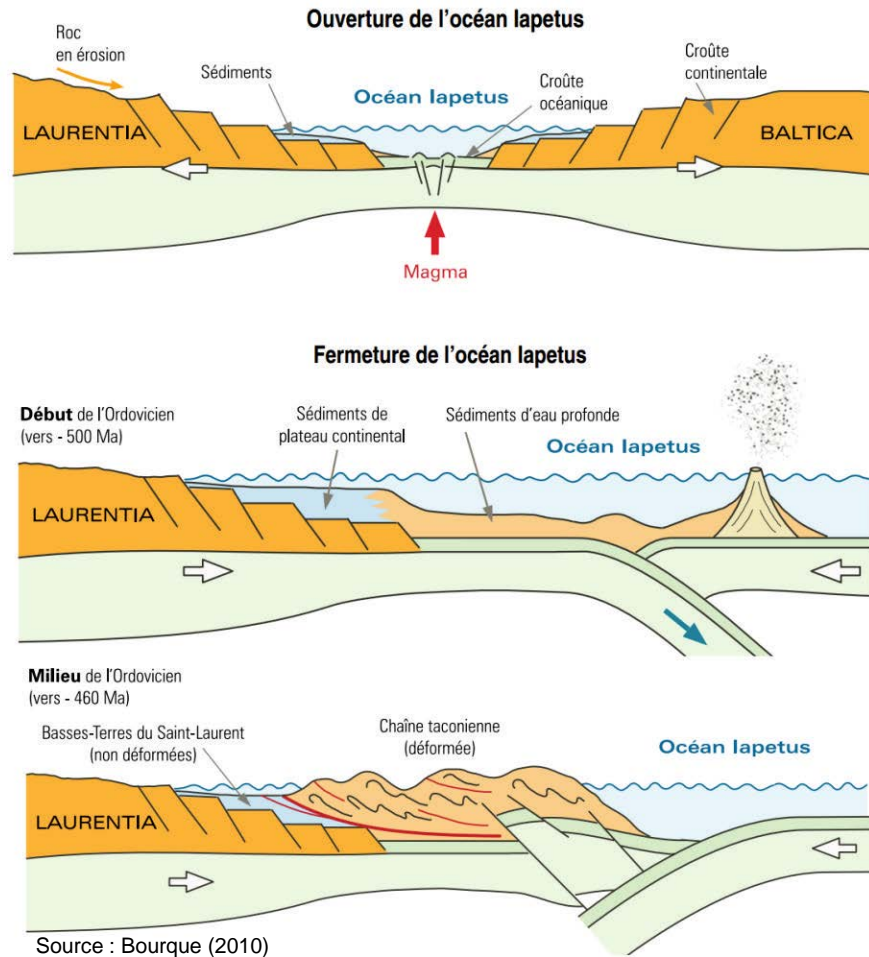


Figure 3.5 : Événements géologiques conduisant à la formation des Basses-terres du Saint-Laurent et des Appalaches

Il y a environ 515 millions d'années, l'océan lapétus se referme progressivement suite à une inversion des mouvements tectoniques (Castonguay et Nadeau, 2012) (Figure 3.5). Entre 490 et 260 millions d'années, plusieurs collisions de blocs continentaux avec la marge du Bouclier canadien se produisent, ce qui comprime et déplace les épaisses séquences de roches sédimentaires du plateau continental et de l'océan lapétus. Les fortes contraintes ont entraîné le développement des failles de chevauchement qui ont mené à l'empilement des séquences de roches sédimentaires et mené à la formation de la chaîne de montagnes des Appalaches. La province des Appalaches est délimitée dans sa partie nord par une zone de failles nommée la ligne Logan. Celle-ci longe le versant nord de la haute ville de Québec et la rive nord de l'île d'Orléans (Figure 3.7).

Dans la région de Québec, les Appalaches sont formées de roches sédimentaires terrigènes (shale, grès et conglomérat) et carbonatées (calcaire et dolomie) d'âge Cambrien et Ordovicien qui ont été déformées de façon répétée. Seuls la Nappe de la Chaudière et le Wildflysh de la rivière Etchemin ne renferment que des roches terrigènes (Carte 12).

3.1.1 Structure et fracturation

La fracturation est causée par des mouvements de déformation de la roche et elle peut se manifester sous la forme de fractures d'extension (joints), de cisaillement ou de failles dans la roche. La fracturation augmente la perméabilité des roches et peut ainsi permettre une circulation d'eau souterraine suffisante pour le captage. Les roches des trois principales provinces géologiques sur le territoire de la CMQ présentent une fracturation variable et ne sont généralement pas assez perméables pour le pompage d'eau souterraine à d'autres utilisations que domiciliaires.

Sur l'ensemble du territoire de la CMQ, mis à part les zones de failles qui affectent la séquence rocheuse de façon importante mais localement, peu d'informations sont disponibles sur la présence de fractures secondaires dans l'ensemble du massif rocheux. Un réseau principal et un réseau secondaire de failles normales ont été cartographiés dans la Province de Grenville. Le réseau principal de failles est orienté dans la direction sud-ouest nord-est et le réseau secondaire est orienté nord-ouest sud-est. Ces failles normales se seraient développées lors de l'ouverture du rift de l'Océan Iapetus.

La Plate-forme du Saint-Laurent est composée de strates de roches peu inclinées affectées localement par de grands plis ouverts. Ces roches comportent un réseau complexe de fractures secondaires verticales de faible extension. Ces fractures verticales sont pour la plupart limitées par des plans de litages qui sont continus sur de grandes distances.

Les Appalaches sont le résultat de nombreux événements complexes de chevauchement, de plissement et de fracturation de la roche. La formation de plis a permis le développement de joints qui contribuent généralement à l'augmentation de la perméabilité dans les crêtes des plis, où l'extension de la roche est maximale.

3.1.2 Coupes géologiques

Afin d'illustrer l'empilement vertical des formations rocheuses, des coupes géologiques conceptuelles sont présentées à la Figure 3.6. Ces coupes permettent d'observer les structures présentes dans la Province de Grenville et d'apprécier les grands systèmes de failles normales et de chevauchement associés à l'ouverture de l'Océan Iapetus et à la formation des Appalaches, respectivement.

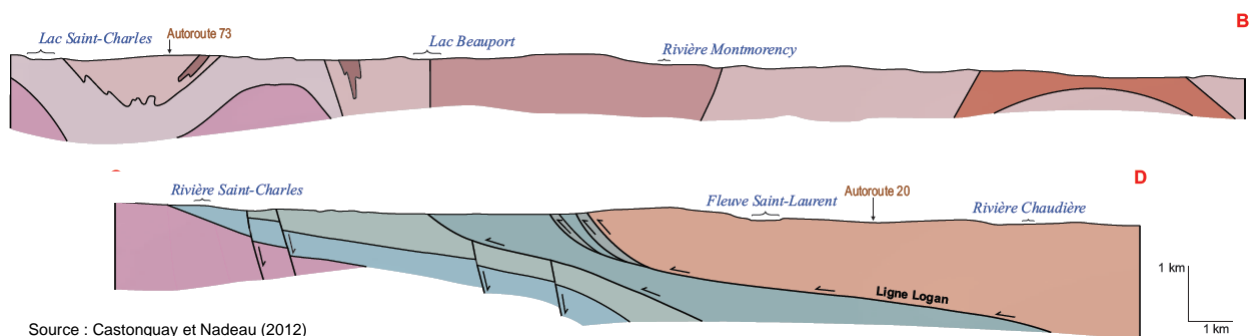


Figure 3.6 : Coupes géologiques conceptuelles illustrant la géométrie des formations rocheuses et des failles en profondeur

3.2 Géologie des dépôts meubles

Les dépôts meubles retrouvés sur le territoire de la CMQ proviennent d'une succession complexe d'événements glaciaires, interglaciaires ou interstadias. Point charnière dans la dynamique fluviale, le secteur de la Ville de Québec est également considéré comme région clé lors des épisodes de glaciation-déglaciation de la vallée du Saint-Laurent. Étant donné sa situation au point de rencontre de trois grandes provinces géologiques et physiographiques, la région de Québec a joué un rôle majeur dans l'évolution quaternaire du Québec méridional. La morphologie régionale du socle rocheux a un impact important tant sur la dynamique glaciaire que sur l'incursion marine qui a suivi. De plus, le seuil de Québec a contrôlé l'incursion des eaux marines de la mer de Goldthwait dans les Basses-terres du Saint-Laurent pour former la Mer de Champlain. Ces conditions se répercutent directement sur la stratigraphie de la région, comme l'illustre le modèle géologique conceptuel de la Figure 3.8.

Les dépôts quaternaires de surface sont présentés dans une carte de compilation (Carte 12, version préliminaire) et une simplification de cette compilation se trouve à la Figure 3.7. Une étude complète de cartographie des dépôts quaternaires a été commandée par le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) et devrait paraître prochainement.

Le secteur au nord de la CMQ est caractérisé par un environnement glaciaire, tandis que les secteurs sud et nord-est ont fortement été influencés par le retrait de la Mer de Champlain. Les hauts plateaux au nord de la zone d'étude sont caractérisés par la présence de dépôts glaciaires sur le roc affleurant à quelques endroits. Les vallées sont majoritairement comblées par des dépôts fluvioglaciaires et par des dépôts glaciolacustres. Les basses terres, sous le niveau marin maximum d'une élévation d'environ 210 m au-dessus du niveau de la mer, regroupent l'ensemble des dépôts marins. À proximité des rivières actuelles, des alluvions sont généralement observées.

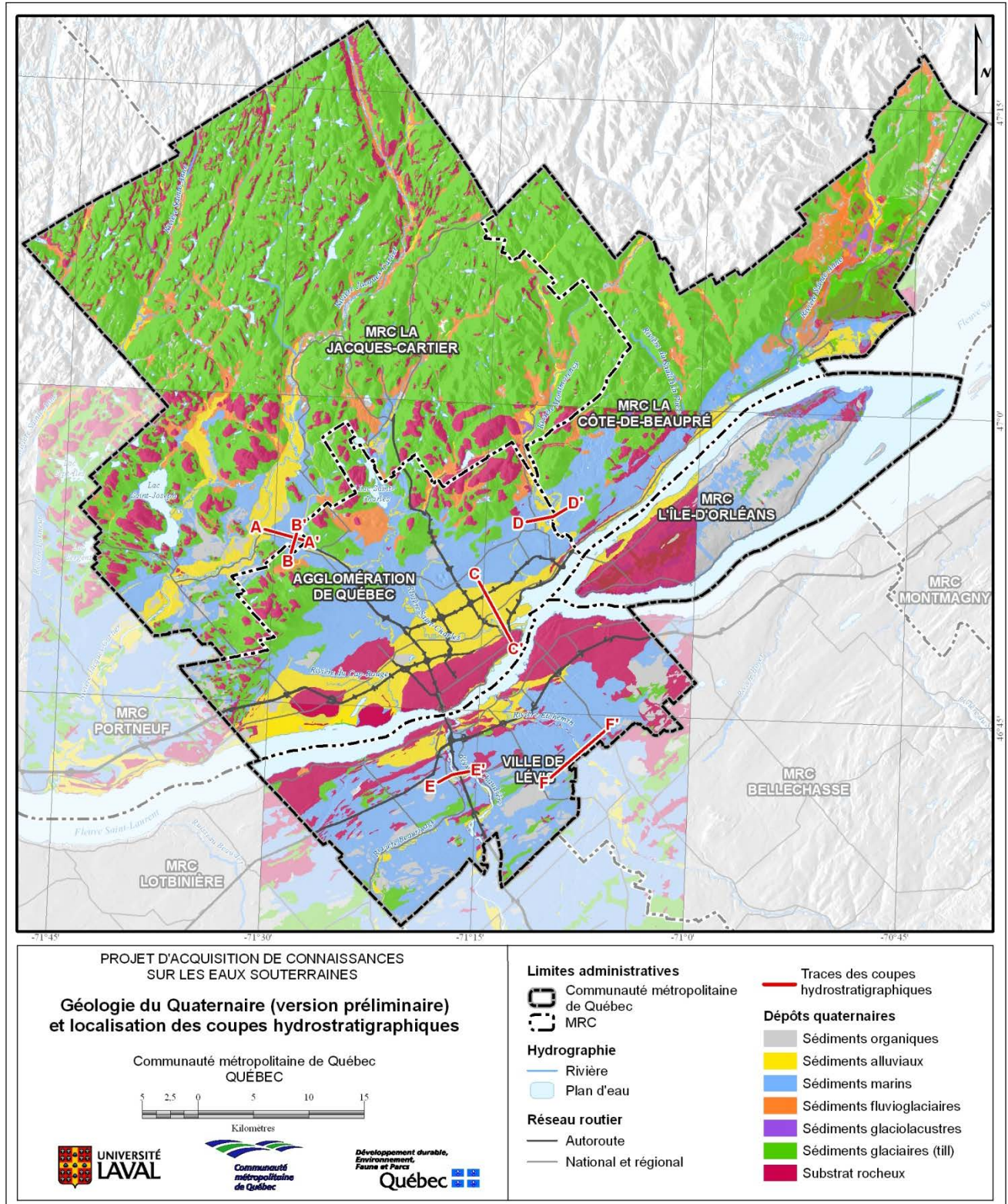


Figure 3.7 : Géologie du Quaternaire (version préliminaire) et localisation des coupes hydrostratigraphiques

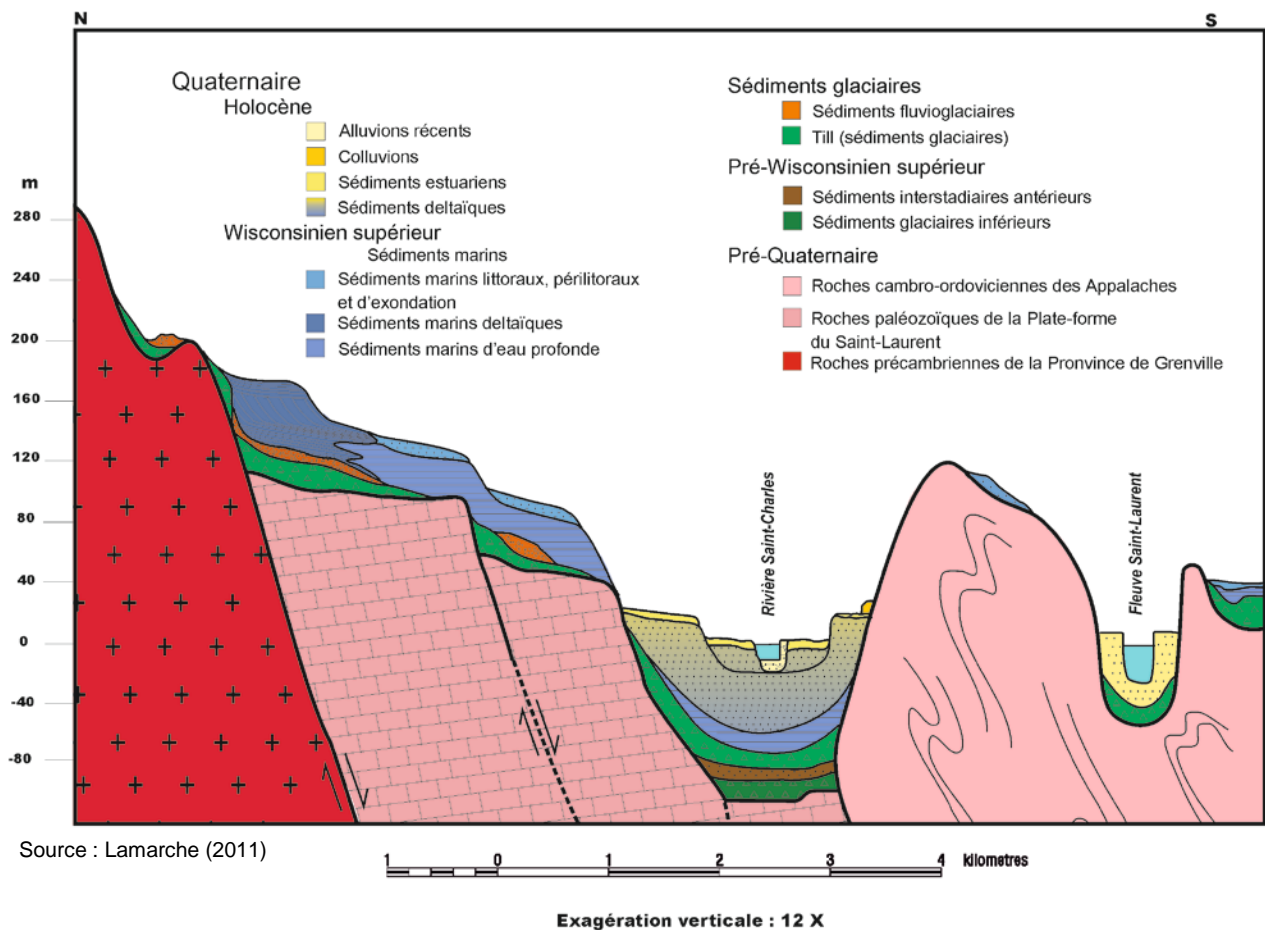


Figure 3.8 : Modèle géologique conceptuel de la région de Québec pour une section verticale orientée dans la direction nord-sud

3.2.1 Histoire du Quaternaire et stratigraphie des dépôts meubles

3.2.1.1 Rive nord de la CMQ

Un modèle stratigraphique schématique des dépôts quaternaires sur la rive nord du fleuve est présenté à la Figure 3.9. À la base, le socle rocheux peut être constitué de roches sédimentaires appalachiennes, de roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent ou de roches ignées et métamorphiques de la Province de Grenville. Une longue période d'érosion a suivi la mise en place de ces différents ensembles géologiques a donné lieu, entre autres, à la formation de la terrasse Micmac, une falaise rocheuse observable de part et d'autre de la zone d'étude et bordant généralement le tracé du fleuve.

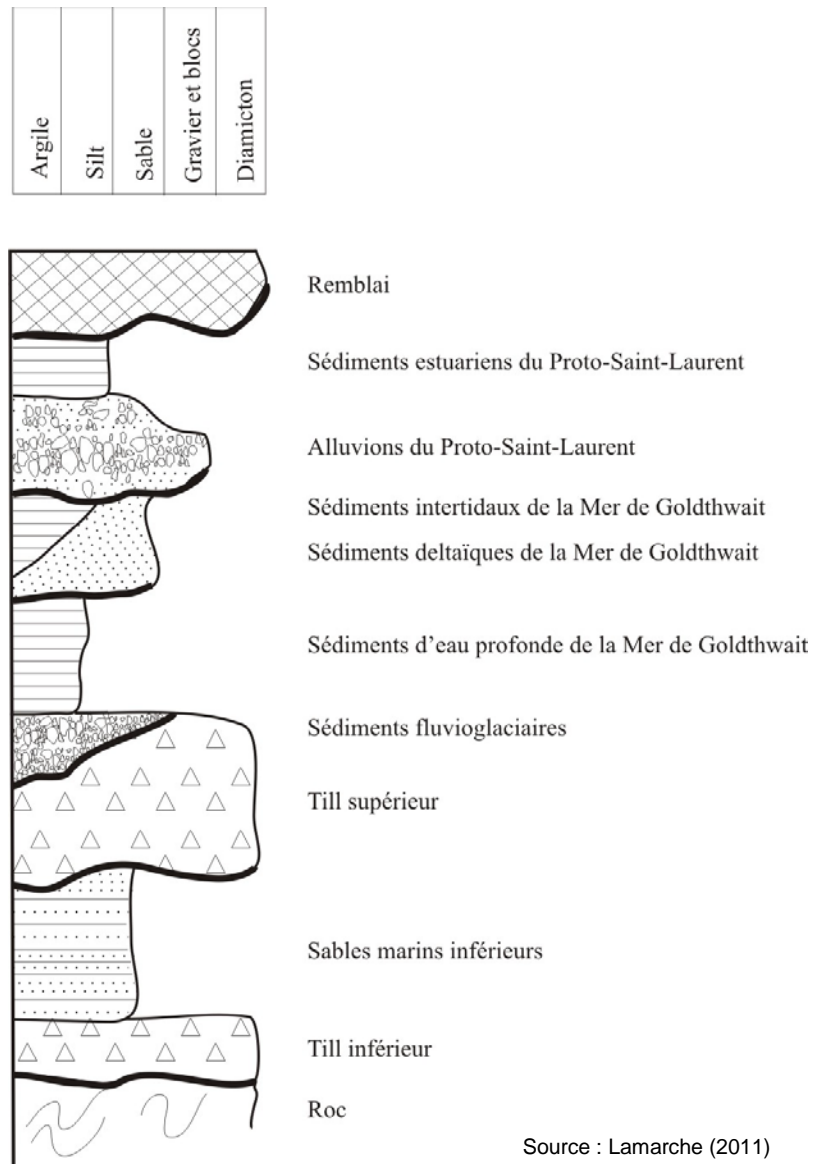


Figure 3.9 : Modèle stratigraphique schématique de la rive nord de Québec (contact érosif en gras)

Peu de sédiments antérieurs à la dernière glaciation ont été préservés sur la rive nord à la hauteur de Québec. Seulement quatre vallées enfouies présentent des dépôts interstadias ou interglaciaires, soit les vallées de la rivière Jacques-Cartier, de la rivière Beauport, du lac Saint-Augustin et du Proto-Saint-Laurent (Lamothe, 1987; Lasalle *et coll.*, 1972). L'unité glaciaire (till inférieur) sous-jacente a été reconnue dans la partie la plus profonde de la basse ville de Québec.

Étant donné sa position stratigraphique, le till supérieur est régionalement mis en corrélation avec le Till de Gentilly. Des dépôts fluvioglaciers y sont également associés dans les différentes vallées du Bouclier canadien. Dans la vallée de la rivière Montmorency et les vallées adjacentes à l'est, des sédiments glaciolacustres mis en place dans les lacs de barrage précèdent forcément l'incursion de la Mer de Goldthwait dans le secteur d'étude.

Le retrait de ce glacier émissaire du détroit de Québec a permis l'incursion d'un bras de mer jusqu'à une élévation de 180 m à 235 m sur la rive nord et jusqu'à environ 190 m sur la rive sud (Gadd, 1971). Les dépôts de la Mer de Champlain recouvrent généralement le till supérieur dans la partie centrale de la vallée sous la limite marine. Dans les parties plus profondes du bassin, la base de la séquence marine est constituée de silts argileux ou de silts sableux laminés à proximité des grands complexes deltaïques. Des grands complexes deltaïques, dont l'élévation s'échelonne de 210 m à 170 m, se sont développés à l'embouchure des rivières majeures, telles les rivières Jacques-Cartier et Montmorency. Un vaste delta enfoui, formé à l'embouchure du Proto-Saint-Laurent dans la Mer de Champlain, un peu au-dessus du niveau marin actuel, constitue le corps sédimentaire le plus tardif déposé en eaux salées dans la région de Québec. Ce delta est constitué de sables et de sables graveleux et il a progradé sur les sédiments fins marins.

Les premières traces de l'incision du Proto-Saint-Laurent dans le seuil de Québec sont les alluvions de terrasses anciennes sous l'élévation de 65 m. Dans la région immédiate de Québec, les plus beaux exemples sont les paléochenaux associés au Lac Saint-Augustin. Au sommet de la séquence stratigraphique, et en discordance sur divers autres sédiments quaternaires ou le roc, se trouvent les dépôts estuariens associés au Proto-Saint-Laurent et surmontés par les dépôts du fleuve actuel. Le Tableau 3.1 résume les événements géologiques depuis la dernière déglaciation dans le secteur de la rive nord de Québec.

Tableau 3.1 : Résumé des événements géologiques depuis la dernière déglaciation dans le secteur de la rive nord de Québec

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

3.2.1.2 *Rive sud et île d'Orléans*

Les sédiments quaternaires présents sur la rive sud de la CMQ reposent sur le socle rocheux constitué de roches métasédimentaires appalachiennes. Une unité de till datant du Wisconsinien supérieur se retrouve à la base de la séquence stratigraphique. Son épaisseur est variable, son étendue est discontinue et ce till a fréquemment été remanié par l'action de la mer. Par endroit, des sédiments fluvioglaciers se retrouvent par-dessus le till supérieur, dans les dépressions rocheuses. L'ensemble de ce territoire se trouve sous la limite d'incursion marine. Dans les parties plus profondes du bassin, la base de la séquence marine est constituée de silts argileux. Des sédiments marins littoraux et pré-littoraux sableux ou silteux recouvrent en partie les sédiments sous-jacents. Au sommet de la séquence stratigraphique, en discordance sur les autres sédiments quaternaires ou le roc, se trouvent les dépôts alluvionnaires laissés par les rivières Beauvillage, Chaudière, Etchemin et le fleuve Saint-Laurent. Par endroit, des sédiments organiques recouvrent les sédiments sous-jacents.

Les sédiments quaternaires de l'île d'Orléans reposent sur le socle rocheux constitué de roches métasédimentaires appalachiennes et, localement sur la rive nord de l'île, de roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent. Les sédiments quaternaires sont généralement peu épais et suivent la même séquence stratigraphique que sur la rive sud de la CMQ.

3.2.1.3 *Côte de Beaupré*

Dans la MRC de La Côte-de-Beaupré, la séquence stratigraphique typique est semblable à celle de la rive nord de la CMQ sous la limite marine. Dans la région de Saint-Ferréol-les-Neiges et de Saint-Tite-des-Caps, un important complexe fluvioglacière deltaïque associé à la présence d'un lac barré a déposé de grandes épaisseurs de dépôts hétérogènes. Des sédiments glaciolacustres plus fins seraient aussi présents dans cette zone.

3.2.2 ***Épaisseur des dépôts meubles***

La base de données hydrogéologiques PACES-CMQ a été utilisée pour estimer l'épaisseur des dépôts meubles en considérant les forages qui ont atteint le roc. Deux techniques d'estimation ont été utilisées : 1) l'interpolation lorsqu'une densité raisonnable de mesures permettait d'appliquer cette technique ou 2) l'attribution de valeurs médianes dans le cas contraire.

L'épaisseur des dépôts meubles a été interpolée à partir des données de forage contenues dans la base de données PACES-CMQ. Le résultat cartographique est présenté sous la forme d'une carte d'interpolation sur une grille régulière avec des cellules de 250 m par 250 m. L'Annexe 4 présente la méthodologie détaillée, modifiée du protocole développé par le GRIES (Annexe E5) pour la réalisation de cette interpolation.

Un processus rigoureux de validation et de sélection a été appliqué afin d'identifier les forages à utiliser pour l'interpolation. Le processus de validation tient compte des doublons et de la cohérence de la localisation et de la profondeur des forages. Certains forages ont été éliminés lors de ce processus. Le territoire a ensuite été divisé en 5 zones selon le

contexte physiographique et géologique : la rive sud, l'île d'Orléans, le Promontoire de Québec, les Basses-terres du Saint-Laurent et les Laurentides. Le processus de validation comprend aussi des analyses statistiques pour chacune de ces zones.

L'épaisseur de dépôts meubles a ensuite été interpolée en considérant séparément les épaisseurs mesurées dans les forages pour chaque zone à l'aide de la méthode d'interpolation objective dite du krigeage ordinaire. Les résultats de ces interpolations ont été validés en les comparant avec la topographie, la géologie du Quaternaire et l'épaisseur des dépôts meubles dans les forages qui n'ont pas atteint le roc. Quatre types de points de contrôle ont été ajoutés aux données de forage afin d'améliorer l'interpolation, soient des points de contrôle le long de levées géophysiques, dans les polygones d'affleurement de la Carte 12 préliminaire de la géologie du Quaternaires, sur les sommets topographiques ainsi qu'à l'endroit de forages qui n'ont pas atteint le roc. Aucune interpolation n'a été réalisée dans la moitié nord des Laurentides, car la densité de forages était insuffisante pour justifier l'emploi de la méthode. Des valeurs médianes d'épaisseur de dépôts meubles, appuyées par l'analyse statistique préalable, ont été attribuées selon le type de dépôts quaternaires présents en surface pour ce secteur.

Les valeurs estimées de l'épaisseur des dépôts meubles ont été finalement soustraites du modèle numérique d'élévation du terrain afin de déterminer l'élévation du socle rocheux et de produire la Carte 16 de la topographie du roc.

La Carte 15 et la Figure 3.10 présentent l'épaisseur des dépôts meubles sur le territoire de la CMQ, tandis que la Carte 16 et la Figure 3.11 illustrent la topographie du roc. Les forages et les points de contrôle utilisés dans l'interpolation y sont aussi identifiés. La qualité de l'interpolation d'un secteur dépend directement de la densité des forages et des points de contrôle dans ce secteur. La limite de l'interpolation est également identifiée sur les cartes. Au nord et dans le secteur du Cap Tourmente, la méthode des valeurs médianes d'épaisseur de dépôts meubles en fonction du type de dépôts quaternaires a été employée au lieu de l'interpolation par krigeage ordinaire.

Sur la rive sud, les dépôts meubles ont comblés les dépressions du roc. Les sédiments sous la limite marine (170 m) se sont déposés horizontalement et ils ont aplani le relief. Typiquement, les dépôts meubles de la rive sud ont une épaisseur de 0,1 à 40 m. Une zone allongée à l'ouest de la rivière Etchemin et perpendiculaire au fleuve Saint-Laurent présente des dépôts ayant jusqu'à 67 m d'épaisseur. Elle se trouve possiblement vis-à-vis une faille de chevauchement (Carte 13) et elle pourrait correspondre à un ancien exutoire fluvioglaciaire. Sur la rive sud, l'élévation de la surface du roc diminue graduellement vers le nord, passant de 100 m à la bordure sud à jusqu'au 0 m près du fleuve Saint-Laurent.

Sur l'île d'Orléans, les dépôts meubles sont généralement très minces, allant de 0,5 à 7 m d'épaisseur. Cependant, trois zones ont des dépôts plus épais de l'ordre de 20 m à Saint-François-de-l'île-d'Orléans, Sainte-Famille et Saint-Laurent-de-l'île-d'Orléans. La surface du roc forme une crête parallèle à l'axe de l'île dans sa portion nord et elle culmine à près de 150 m à l'extrémité sud-ouest.

Sur le Promontoire de Québec, les dépôts sont aussi très minces, entre 0,5 et 4 m d'épaisseur. La surface du roc, au sommet de cet îlot de roc appalachien, est relativement plane, entre 80 et 100 m d'élévation, mais elle présente, en bordure, des escarpements importants pouvant atteindre des dénivelés de près de 100 m.

La zone des Basses-terres du Saint-Laurent se trouve sous la limite de transgression marine et elle est caractérisée par une stratigraphie complexe des dépôts quaternaires. Le roc est relativement plat avec quelques escarpements vis-à-vis les failles normales (Carte 13). L'épaisseur des dépôts meubles, qui varie de 0 à 73 m, est plus importante dans le delta du Proto-Saint-Laurent dans la basse ville de Québec et à l'embouchure de la rivière du Cap-Rouge. Une zone plus épaisse se trouve aussi dans le nord-ouest de l'Agglomération de Québec, près de la rivière Nelson, et une autre un peu au nord de l'embouchure de la rivière Montmorency.

Dans la zone des Laurentides, les reliefs de la surface du sol et du socle rocheux sont plus accidentés. Les dépôts meubles sont généralement minces sur les montages et plus épais dans le creux des vallées. L'épaisseur des dépôts atteint 64 m dans la vallée de la rivière Jacques-Cartier, 47 m dans la vallée de la rivière Montmorency, 38 m près de la rivière Nelson et 31 m près de la rivière des Hurons. Le secteur de Saint-Ferréol-les-Neiges et de Saint-Tite-des-Caps présente des dépôts ayant jusqu'à 47 m d'épaisseur, malgré son altitude élevée et ses fortes pentes. La présence d'un important complexe fluvioglaciaire expliquerait ces divergences.

De manière générale, pour tout le secteur de la rive nord, l'élévation du roc diminue du nord vers le sud, passant de près de 1000 m à la frontière nord de la CMQ à 70 m sous le niveau moyen de la mer dans le secteur de la basse ville de Québec.

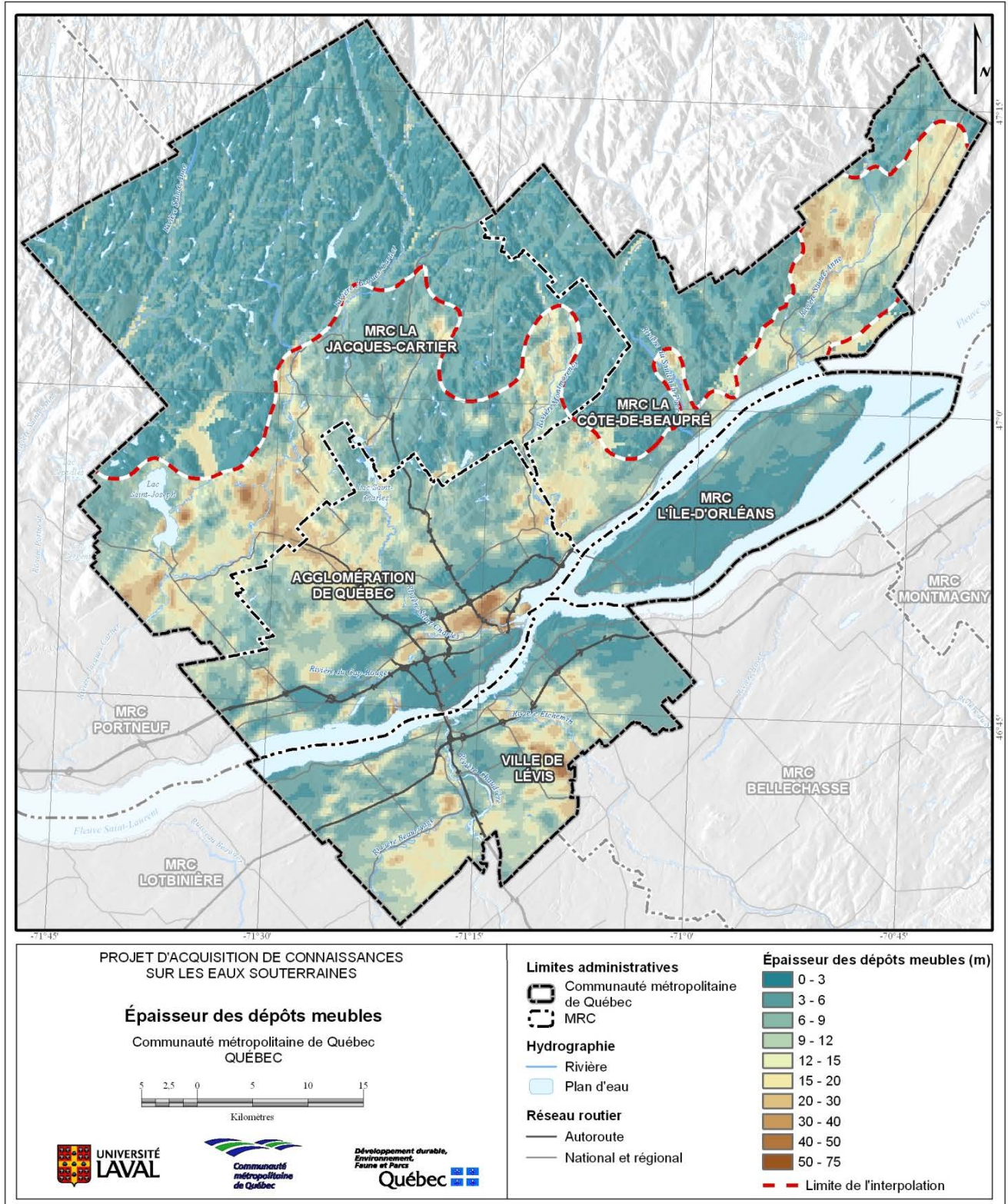


Figure 3.10 : Épaisseur des dépôts meubles

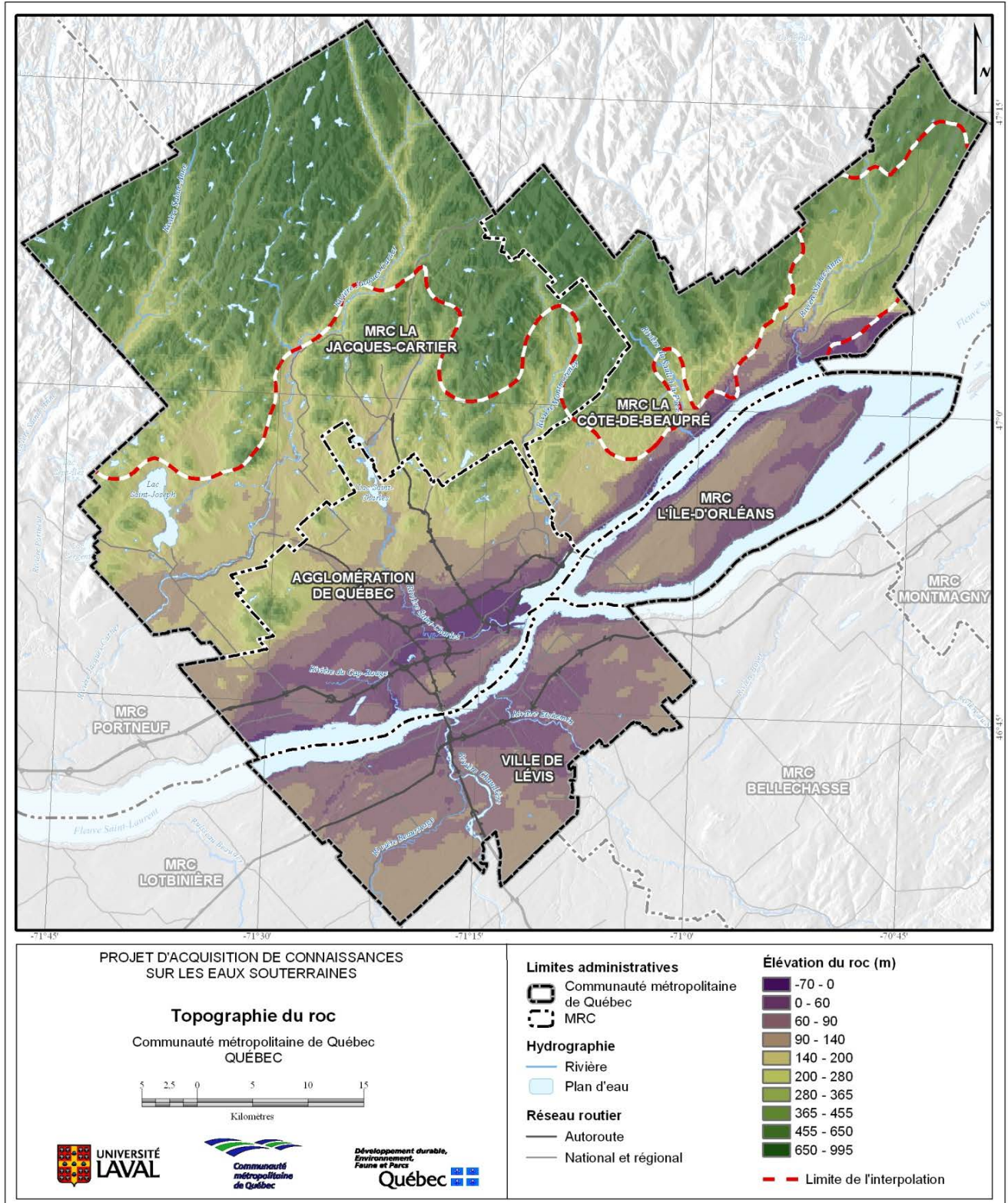


Figure 3.11 : Topographie du roc

4 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

La nature des dépôts géologiques et leur distribution spatiale exercent un contrôle déterminant sur l'écoulement de l'eau souterraine et sa composition géochimique. Sur le territoire de la CMQ, l'histoire géologique de la région a mené à la mise en place de trois provinces géologiques surmontées d'une architecture tridimensionnelle complexe de dépôts meubles d'origine glaciaire et récente. Dans cette section, la distribution spatiale de ces unités géologiques est mise en relation avec la distribution spatiale de l'eau souterraine, sa qualité naturelle et la piézométrie afin de mettre en lumière les grands contextes hydrogéologiques présents sur le territoire de la CMQ.

Dans un premier temps, des hydrofaciès régionaux sont définis pour les dépôts meubles en fonction de leurs propriétés hydrauliques. À l'aide de ces hydrofaciès, des coupes et un modèle hydrostratigraphiques 3D sont préparés. Par la suite, ce modèle est utilisé afin d'évaluer le confinement et l'épaisseur des aquifères de la région. Des cartes de la piézométrie sont ensuite présentées pour chacun des aquifères régionaux, accompagnées d'une compilation des propriétés hydrauliques du roc et des dépôts meubles. La recharge des aquifères est ensuite évaluée et un bilan hydrologique régional est établi. Enfin, le portrait géochimique et la qualité naturelle de l'eau souterraine sont ensuite présentés.

4.1 Définition des hydrofaciès

Sept hydrofaciès ont été définis pour l'élaboration du modèle hydrostratigraphique (Tableau 4.1). Un hydrofaciès est composé de matériau géologique (dépôts ou roches) aux propriétés hydrauliques similaires et ce, sans égard à son mode de déposition. Toutefois, le mode de déposition et l'origine des sédiments permettent de mieux comprendre l'architecture des dépôts. Étant donné la grande variabilité de la granulométrie rencontrée à l'intérieur d'une même unité quaternaire, le mode de déposition ne peut servir à la définition des hydrofaciès.

Une multitude d'informations a permis de définir les hydrofaciès de la région et de représenter les contextes stratigraphiques sous forme de coupes (section 4.2) et d'un modèle 3D (section 4.3). Ces informations sont :

- La géologie du Quaternaire (Carte 12 – version préliminaire),
- Les 20 678 forages de la base de données PACES-CMQ contenant une description de la stratigraphie,
- L'épaisseur des dépôts meubles (Carte 15),
- La pédologie (Carte 11),
- Le modèle numérique de terrain (Carte 3),
- L'interprétation des levés géophysiques réalisés dans le cadre du projet, et
- La revue de la littérature, entre autres les travaux de Lamarche (2011), Lamarche *et coll.* (2012), Blais (2006) et Pagé (1999).

Tableau 4.1 : Définition des hydrofaciès

Hydrofaciès	Conductivité hydraulique	Type de matériel	Principales unités géologiques correspondantes
HF1	Très faible	Silt, argile silteuse (ou matière organique)	Sédiments marins profonds, organiques
HF2	Faible	Silt sableux ou Silt graveleux, Alternances silt/sable	Sédiments marins littoraux, intertidaux, glaciolacustres, till fin, alluvions
HF3	Moyenne	Sable silteux ou Gravier silteux	Sédiments marins littoraux, glaciolacustres, till grossier, alluvions
HF4	Élevée	Sable	Sédiments fluvioglaciaires et deltaïques, alluvions
HF5	Très élevée	Sable et gravier	Sédiments fluvioglaciaires, alluvions
HF6	Variable	Hétérogène (Sable avec horizons silteux discontinus)	Sédiments fluvioglaciaires et deltaïques épais et contenant des horizons silteux fréquents, mais discontinus.
HF7	Très faible à Moyenne	Roc fracturé	Roches de la Plate-forme du Saint-Laurent, des Appalaches et de la Province de Grenville.

4.2 Coupes hydrostratigraphiques

Une coupe hydrostratigraphique est une représentation verticale de la distribution spatiale des unités géologiques et des hydrofaciès retrouvés en profondeur. Les unités géologiques y sont représentées afin d'en apprécier la continuité, l'étendue et l'épaisseur. Les hydrofaciès sont ensuite superposés aux unités géologiques. Les hydrofaciès ne correspondent pas nécessairement aux unités géologiques, tel qu'expliqué à la section 4.1. Les coupes hydrostratigraphiques offrent une représentation simplifiée et visuelle des unités hydrostratigraphiques d'intérêt régional. L'épaisseur de ces unités hydrogéologiques, leur hydrofaciès, leur continuité, leur succession ainsi que le type de contact entre les unités y sont présentés.

La méthodologie utilisée par l'Université Laval pour l'élaboration des coupes hydrostratigraphiques diffère de celle présentée par (UQAC, 2011). Bien que les principes de base de l'analyse soient les mêmes, la méthodologie générale pour la définition des contextes hydrogéologiques et les outils techniques à notre disposition diffèrent significativement. Les étapes menant à la production d'une coupe hydrostratigraphique sont : 1) la détermination de la localisation des coupes ; 2) la représentation verticale des descriptions géologiques au droit des sondages ; et 3) l'interprétation des contacts géologiques entre les sondages. La coupe doit être localisée dans des dépôts quaternaires présentant un intérêt régional et dont la complexité nécessite une représentation verticale. Pour permettre une représentation visuelle adéquate du contexte visé, la coupe doit être perpendiculaire aux principales structures géologiques et physiographiques (rivière, collines, etc.). La présence d'un grand nombre de forages à proximité de la coupe avec des informations stratigraphiques de qualité est primordiale.

La représentation verticale des données a été réalisée avec la localisation, la stratigraphie, la fiabilité et la validité de tous les forages contenus dans la base de données

hydrogéologiques PACES-CMQ. Ces informations ont d'abord été converties dans un fichier en format ArcGIS®, version 9.3. Pour chaque coupe, un fichier contenant les données des forages à proximité de la coupe, les dépôts meubles et l'altitude de la surface du terrain a été créé. La représentation verticale était ensuite générée à partir de ce fichier. L'ensemble des opérations ont été réalisées à l'aide de fonctions ArcGIS® et de codes en Python® développés par l'Université Laval. L'ajustement de la symbologie de la couche produite permettait ensuite de visualiser la granulométrie des dépôts décrits en forages.

La première étape de l'interprétation a consisté à l'élaboration d'un modèle conceptuel de la succession des dépôts, de leur continuité et du type de contact entre les unités, à partir de l'ensemble des données disponibles (carte de la géologie du quaternaire préliminaire, de l'épaisseur des dépôts, de la piézométrie, etc.). Ce modèle a ensuite été comparé à la stratigraphie des forages représentés en tenant compte de la fiabilité et de la précision de l'information stratigraphique. Les contacts entre les unités ainsi que la surface piézométrique ont finalement été tracés.

La localisation des coupes hydrostratigraphiques présentées dans cette section se trouve à la Figure 3.7. Six coupes, représentatives des principaux contextes sont présentées. Une analyse préliminaire a porté sur un plus grand nombre de coupes, mais la piètre qualité des données stratigraphiques ou le faible intérêt régional des dépôts quaternaires présents n'a pas justifié la poursuite de l'analyse sur ces coupes.

4.2.1 Coupes hydrostratigraphiques A-A' et B-B' : Vallée de la Jacques-Cartier

La Figure 4.1 présente deux coupes hydrostratigraphiques perpendiculaires de 4 et 2 km de longueur localisées près de la rivière Jacques-Cartier à Shannon. Elles sont tirées des travaux de Lefebvre *et coll.* (2003) qui ont effectué une étude de caractérisation hydrogéologique détaillée du secteur.

Ces coupes se situent dans des dépôts marins deltaïques pouvant atteindre 45 m d'épaisseur. De la base au sommet, une couche de dépôts fluvioglaciaires sableux et graveleux (HF5) repose sur le roc et son épaisseur diminue vers le centre des coupes. Une mince couche de dépôts marins profonds silteux (HF1), nommée silt glaciomarin sur la coupe, recouvre les sédiments fluvioglaciaires de façon discontinue. Une importante couche de sable et gravier deltaïque (HF5) complète le sommet de la colonne stratigraphique. Ces sédiments deltaïques comprennent localement des couches silteuses prodeltaïques (HF1).

Ces coupes hydrostratigraphiques montrent que la vallée de la rivière Jacques-Cartier, dans ce secteur, est principalement comblée par des sédiments deltaïques marins sableux. Des couches de sédiments silteux, qu'ils soient d'origine marine profonde ou prodeltaïque, se retrouvent fréquemment dans la séquence. Cependant, leur faible étendue et leur discontinuité ne permettent pas d'en détailler la localisation à l'échelle régionale.

À l'échelle régionale, cet aquifère de dépôts meubles est considéré comme étant en lien hydraulique avec l'aquifère de roc, car les couches de silt sont discontinues et n'empêchent pas l'écoulement de l'eau d'un aquifère vers l'autre. Une petite nappe perchée sur une des

couches silteuses prodeltaïques y est représentée. La surface piézométrique est à environ 10 m de profondeur et l'eau souterraine s'écoule vers la rivière Jacques-Cartier.

4.2.2 Coupe hydrostratigraphique C-C' : Delta du Proto-Saint-Laurent

La Figure 4.2 présente une coupe hydrostratigraphique de 6 km située dans la basse ville de Québec. Cette coupe et les suivantes ont été produites par l'Université Laval avec les informations compilées dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ. Dans ce secteur de la vallée de la rivière Saint-Charles, une importante dépression du roc est observée avec une remontée au centre comblée par des dépôts meubles pouvant atteindre 80 m d'épaisseur. Le contact entre les roches des Appalaches du Promontoire de Québec et celles de la Plate-forme du Saint-Laurent est visible au sud-est de la coupe.

Au contact avec le roc se trouvent les sédiments du pré-Wisconsinien supérieur (Lamarche, 2011) constitués principalement de silt sableux ou graveleux (HF2). Des sédiments marins d'eau profonde composés de silt (HF1) recouvrent cette unité. Des sédiments deltaïques du Proto-Saint-Laurent composés de sable (HF4) et d'une mince couche graveleuse à la base (HF5) recouvrent l'unité précédente. En surface, des alluvions d'origines estuarienne et fluviale forment une couche de silt sableux (HF2).

Deux aquifères distincts et séparés par les silts marins profonds sont présents dans ce secteur. Le premier se trouve dans le roc fracturé et l'autre dans la couche de sable d'origine deltaïque. D'après l'interprétation de la coupe, la rivière Saint-Charles serait perchée sur ses alluvions silteux de faible perméabilité. L'aquifère de sable du delta du Proto-Saint-Laurent est un aquifère de dépôts meubles important à l'échelle régionale.

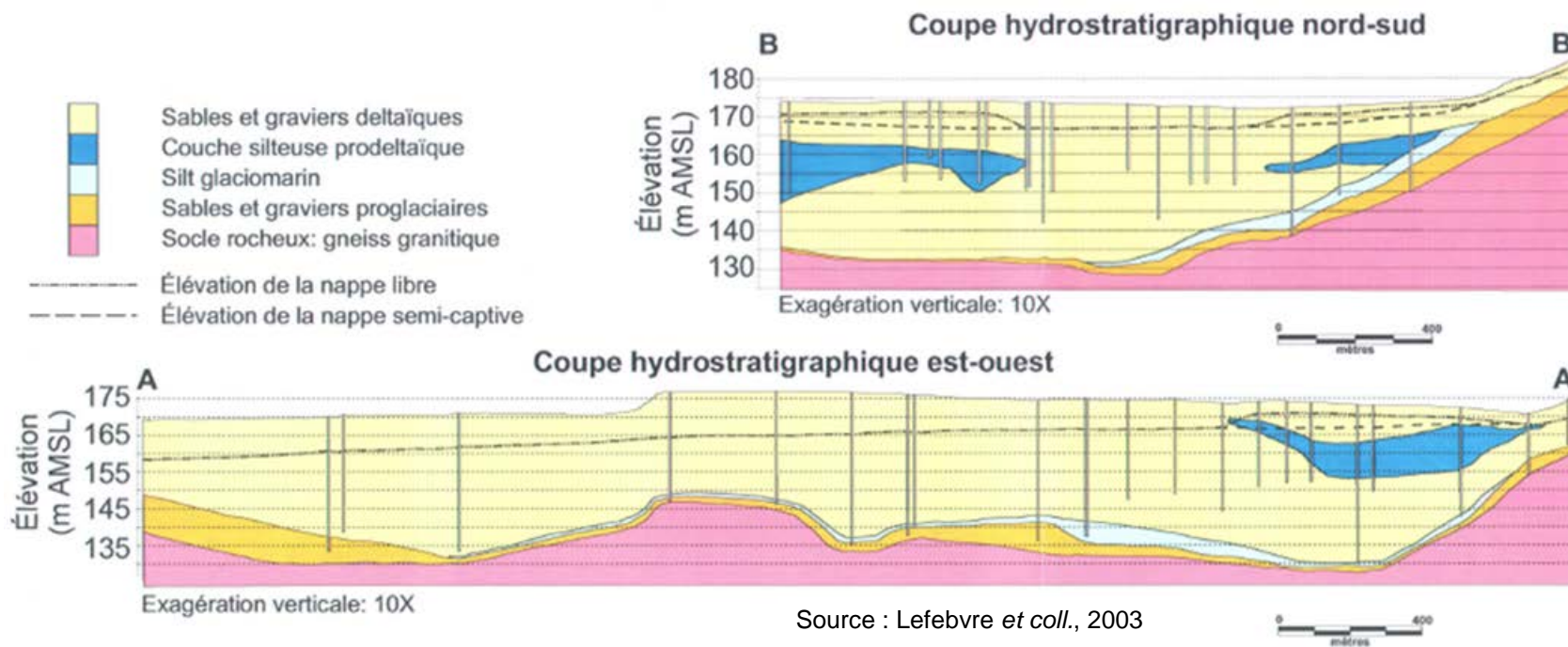


Figure 4.1 : Coupes hydrostratigraphiques A-A' et B-B'

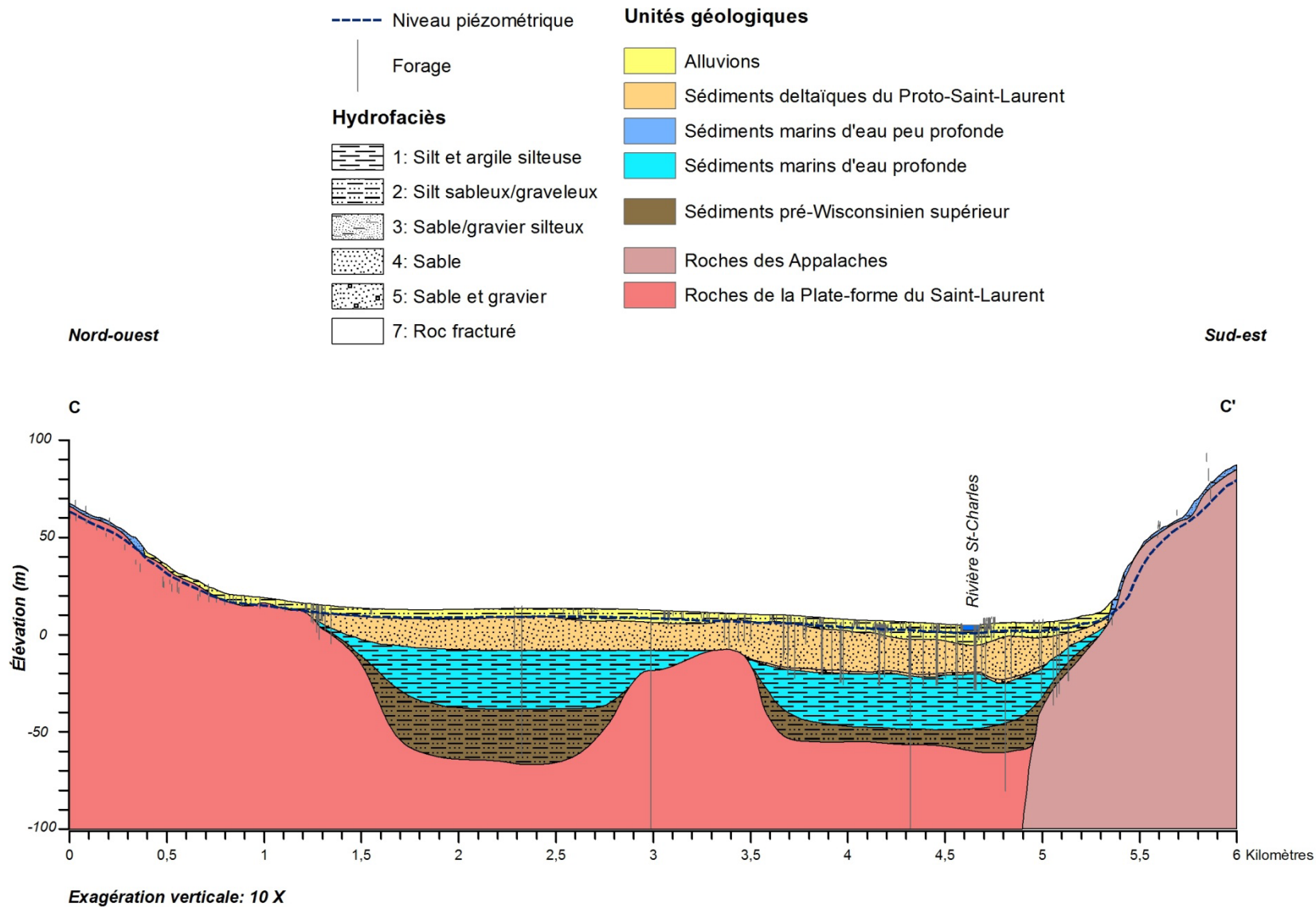


Figure 4.2 : Coupe hydrostratigraphique C-C' : Delta du Proto-Saint-Laurent, Basse ville de Québec

4.2.3 Coupe hydrostratigraphique D-D' : Rivière Montmorency

La Figure 4.3 présente une coupe hydrostratigraphique de 4 km située de part et d'autre de la rivière Montmorency à la limite des roches de la Plate-forme du Saint-Laurent et de la Province de Grenville. Les dépôts les plus épais peuvent atteindre 66 m et se situent à l'extrême ouest de la coupe.

À l'ouest de la rivière Montmorency, le till recouvre le roc par endroit et est sous-jacent à une épaisse couche de sédiments marins d'eau profonde composée principalement de silt (HF1) avec certains horizons de silt sableux et de sable silteux plus près de la surface. En surface, des sédiments marins d'eau peu profonde et, plus près de la rivière, des alluvions forment une couche de sable pouvant atteindre environ 15 m d'épaisseur. Des sédiments fluvioglaciaires composés de sable et gravier viennent combler une dépression dans le roc située sous le lit de la rivière. Dans le secteur est de la rivière Montmorency, les dépôts sont d'origine marine deltaïque. Tout comme dans la vallée de la rivière Jacques-Cartier, il s'agit principalement de sable comprenant des horizons discontinus de silt prodeltaïque. Les sédiments de surface sont constitués de sable d'origine alluvionnaire ou marine.

L'eau souterraine s'écoule vers la rivière Montmorency. Les sédiments deltaïques constituent un aquifère de dépôts meubles en lien hydraulique avec l'aquifère de roc fracturé sous-jacent. Dans le secteur ouest, l'aquifère de roc est confiné par l'épaisse couche de dépôts silteux sus-jacents.

Cette coupe représente bien le contexte du piémont laurentien où les principales rivières de la région ont déposé une épaisse couche de sédiments deltaïques. À l'époque de la déglaciation, le niveau du roc étant plus bas vers l'ouest, des sédiments marins, de granulométrie plus fine, ont été déposés dans un environnement plus profond et moins dynamique. Les sédiments deltaïques, les sédiments marins d'eau profonde et peu profonde sont en contact graduel. Ainsi, la couche de sable silteux, décrite dans la coupe comme étant d'origine marine d'eau profonde, pourrait être aussi interprétée comme une couche de sable silteux d'origine deltaïque par-dessus les sédiments marins profonds.

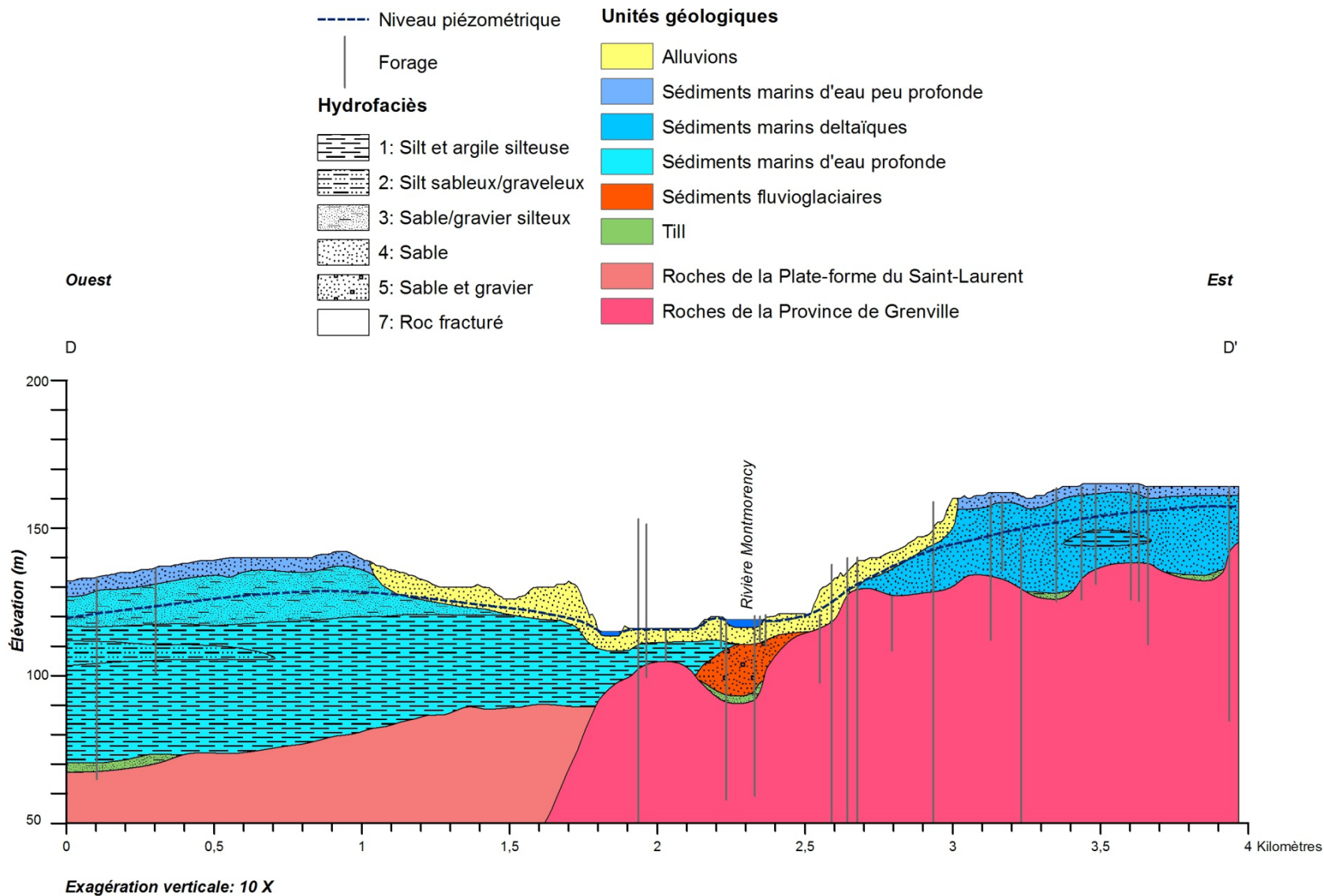


Figure 4.3 : Coupe hydrostratigraphique D-D' : Rivière Montmorency

4.2.4 Coupe hydrostratigraphique E-E' : Rivière Chaudière

La Figure 4.4 présente une coupe hydrostratigraphique de 3 km située de part et d'autre de la rivière Chaudière. Les dépôts meubles reposent sur les roches des Appalaches et peuvent atteindre environ 22 m d'épaisseur.

Le till recouvre le roc en couches très minces et discontinues. Des sédiments marins d'eau profonde, composés de silt argileux contenant parfois du gravier (HF1), recouvrent cette unité. À l'ouest, le silt est recouvert d'une couche de sédiments marins d'eau peu profonde composée de silt sableux (HF2). L'écoulement de la rivière a causé l'érosion d'une partie des sédiments sous-jacents et déposé des alluvions composées de silt sableux (HF2). Des amas de petite envergure de sable et gravier fluvioglaciaire sont présents à l'est de la rivière.

Le niveau piézométrique dans l'aquifère de roc fracturé est présenté sur la coupe. L'eau souterraine s'écoule vers la rivière qui est en contact direct avec le roc. Cet aquifère semble confiné à l'ouest de la rivière et libre à l'est.

Cette coupe est représentative de la succession des dépôts présents sur la rive sud de la CMQ. En effet, dans ce secteur, le till n'est présent que de façon discontinue. Les dépôts marins d'eau profonde recouvrent une bonne partie du territoire. Des amas de dépôts fluvioglaciaires se retrouvent par endroit et sont généralement enfouis sous d'autres types de dépôts.

4.2.5 Coupe hydrostratigraphique F-F' : Rivière Etchemin

La Figure 4.5 présente une coupe hydrostratigraphique de 6,5 km située de part et d'autre de la rivière Etchemin. Les dépôts meubles reposent sur les roches des Appalaches et peuvent atteindre environ 90 m d'épaisseur.

Une couche de sédiments marins d'eau profonde, composés principalement de silt argileux (HF1) et contenant des horizons de sable silteux (HF3) discontinus, recouvre le roc. Cette couche est recouverte de sédiments marins d'eau peu profonde composés de silt sableux (HF2) au sud-ouest de la rivière et de sable silteux (HF3) au nord-est. Des alluvions composées de sable et gravier sont présentes en bordure de la rivière (HF5). Des amas de grande dimension de sable et gravier (HF5) fluvioglaciaire s'étendent perpendiculairement à la coupe.

Le niveau piézométrique dans l'aquifère de roc fracturé est présenté sur la coupe. Dans ce secteur, la rivière Etchemin ne semble pas en lien hydraulique avec l'aquifère de roc compte tenu de l'épaisseur importante de la couche de silt (HF1), qui limite l'écoulement vertical.

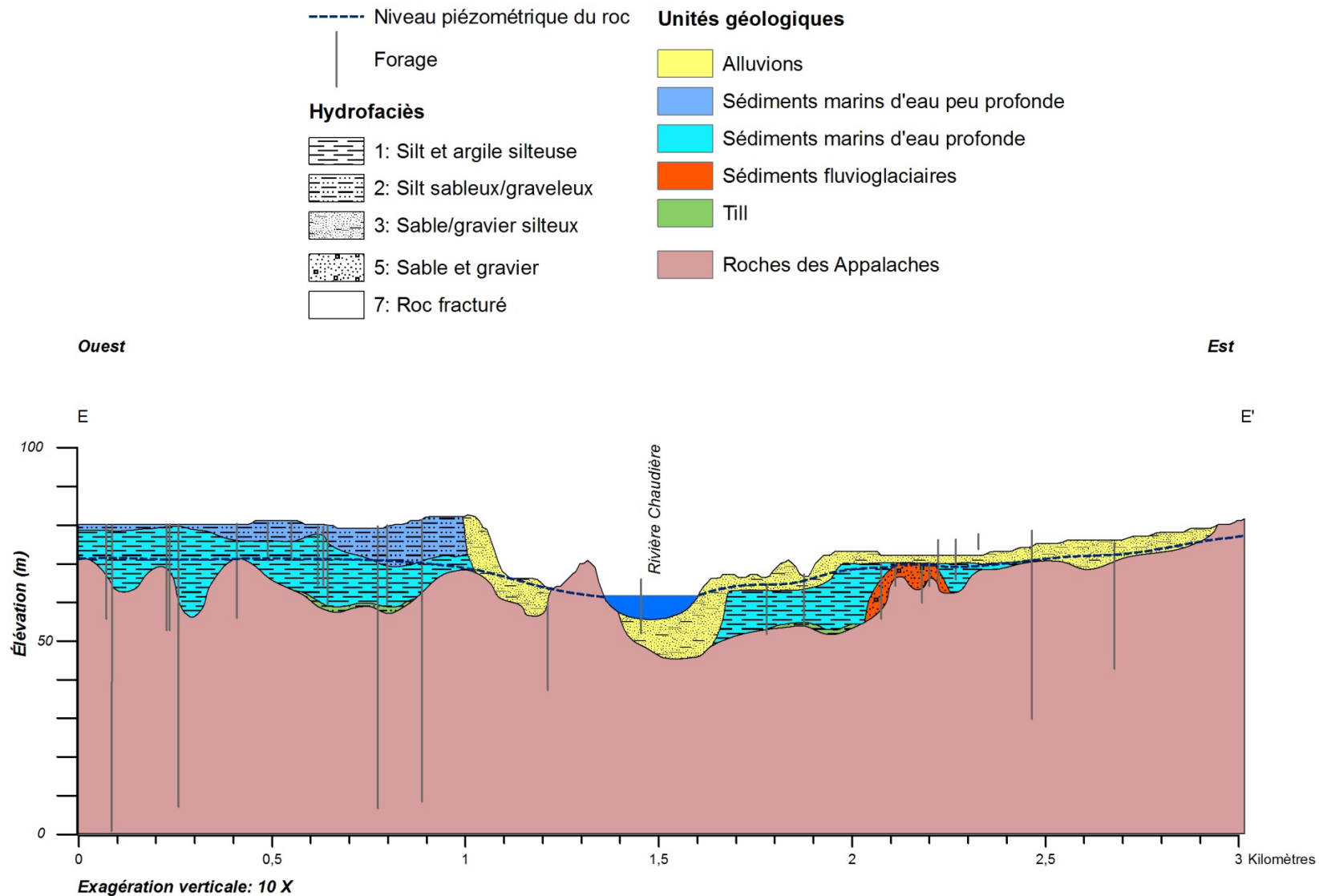


Figure 4.4 : Coupe hydrostratigraphique E-E' : Rivière Chaudière

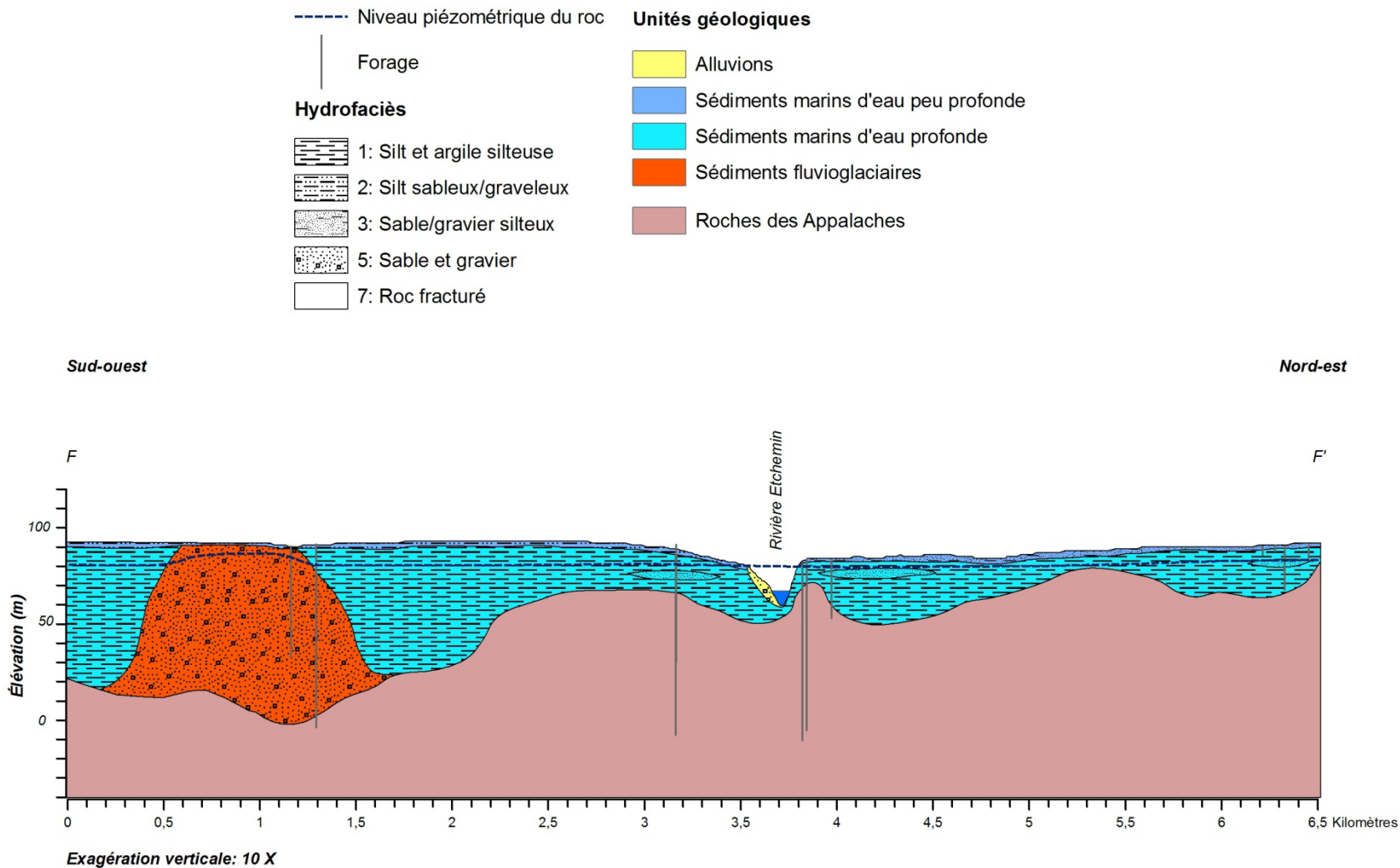


Figure 4.5 : Coupe hydrostratigraphique F-F' : Rivière Etchemin

4.3 Modèle hydrostratigraphique

Un modèle hydrostratigraphique tridimensionnel (3D) a été élaboré dans le but de définir la succession verticale des couches de dépôts jusqu'au roc. Il s'agit d'un modèle simplifié, valide à l'échelle régionale et basé sur l'interprétation de données de sources multiples qui ont été énumérées à la section 4.1. Dans les secteurs où peu de forages sont disponibles, ce modèle est principalement basé sur la géologie du Quaternaire (Carte 12 – version préliminaire) dont la qualité de l'information est aussi variable selon les secteurs. Toutefois, une bonne connaissance conceptuelle de la stratigraphie des dépôts meubles a permis de définir le modèle sur l'ensemble du territoire d'étude, incluant les secteurs moins documentés, avec un niveau de précision régionale.

Le modèle est sous forme de grilles avec des mailles de 250 m par 250 m. Jusqu'à quatre couches de dépôts meubles se superposant verticalement sont définies. Pour chaque couche, le code de l'hydrofaciès et l'épaisseur de la couche sont renseignés. Ce modèle sera utilisé pour définir le contexte hydrostratigraphique, l'étendue et l'épaisseur des aquifères de dépôts meubles ainsi que le degré de confinement des aquifères. Il servira aussi aux calculs de la recharge des aquifères et de l'indice de vulnérabilité. Les différentes lithologies rocheuses sont regroupées et définies par l'hydrofaciès HF7 (roc fracturé) dans le modèle hydrostratigraphique. Les propriétés hydrauliques du roc et des dépôts meubles sont discutées à la section 4.6. La méthodologie permettant d'arriver au modèle 3D ainsi que des cartes représentant les hydrofaciès des 4 couches sont présentées à l'Annexe 5. Sur la majorité du territoire de la CMQ, une ou deux couches de dépôts seulement étaient définies lorsqu'elles étaient suffisantes pour bien décrire la succession verticale des dépôts.

4.3.1 Contextes hydrostratigraphiques

Les contextes hydrostratigraphiques sont une généralisation des empilements d'hydrofaciès de dépôts meubles sur le roc définis par le modèle hydrostratigraphique 3D. Ces empilements typiques ont été établis dans le but de servir d'indicateurs régionaux des conditions hydrogéologiques pouvant être rencontrées dans un secteur. Cette simplification du modèle hydrostratigraphique 3D permet de visualiser en carte les principales successions de dépôts meubles recouvrant le roc.

Les successions d'hydrofaciès ont été extraites du modèle hydrostratigraphique 3D pour chaque maille du territoire de la CMQ. Les 56 successions rencontrées ont été regroupées en 11 classes représentatives de la diversité des contextes. Pour ce faire, des regroupements de successions de couches d'hydrofaciès ont été faits lorsqu'elles étaient de faibles épaisseurs ou avaient des propriétés similaires. Les contextes hydrostratigraphiques sont présentés à la Figure 4.6 et sur la Carte 17. Cette carte représente la succession des hydrofaciès sans égard à leurs épaisseurs.

4.3.1.1 Rive sud

Sept contextes hydrogéologiques différents sont présents sur la rive sud de la CMQ. La partie sud-ouest du territoire est principalement recouverte de *silt sableux ou graveleux sur roc*. Ce contexte correspond généralement à des unités de till fin ou de sédiments marins d'eau peu profonde reposant directement sur le roc. Au nord-est de la zone, c'est un contexte de *sable et gravier silteux sur roc* qui correspond à l'unité de till plus grossier. Les trois contextes, en teintes de bleus, sont des successions ayant à leur base des silts marins d'eau profonde. Au nord-est de la zone, cette unité imperméable constitue toute l'épaisseur des dépôts alors que des dépôts marins d'eau peu profonde (*silt sableux graveleux* ou *sable et gravier*) recouvrent les silts marins d'eau profonde ailleurs sur la rive sud. Les alluvions, qui sont généralement des sables et graviers silteux, se confondent aux sédiments marins d'eau peu profonde ou au till avoisinant. La Figure 4.4, la Figure 4.5 et la Figure 4.6 décrivent plus en détail ces contextes. Sur la rive sud, les dépôts organiques fréquemment présents en surface reposent généralement sur des couches aux propriétés semblables et sont donc confondus avec celles-ci. Ces cinq contextes ne peuvent pas constituer des aquifères de dépôts meubles et leurs propriétés de confinement dépendront largement de l'épaisseur des couches.

Dans trois secteurs, les dépôts meubles sont constitués de *Silt sur sable et gravier sur roc* (orange pâle). Ce contexte est susceptible de constituer des aquifères de dépôts meubles libres ou confinés en fonction de l'épaisseur de la couche de silt au-dessus. Une petite zone de *Sable et gravier sur roc* est présente près du fleuve.

4.3.1.2 Île d'Orléans

Trois contextes hydrogéologiques différents sont présents à l'île d'Orléans. La majorité de l'île est recouverte de *Silt sableux et graveleux sur roc*. Ce contexte correspond à des unités de till, de sédiments marins d'eau peu profonde ou d'alluvions en couches minces. Un contexte de *Sable et gravier (silteux ou non) sur silt sur roc* se retrouve par endroit, là où les dépôts sont plus épais. De petites zones avec un contexte de *Silt ou argile silteuse sur roc* sont présentes localement et incluent les dépôts organiques imperméables de surface.

4.3.1.3 Rive nord : Basses-terres du Saint-Laurent et Laurentides

La rive nord de la CMQ présente des contextes très variés. Toutefois, la majorité du territoire présente un contexte de *Sable et gravier silteux sur roc* (en vert) qui comprend principalement des unités de till grossier et des sédiments marins d'eau peu profonde. Le contexte de *Sable et gravier (silteux ou non) sur silt sur roc* est fréquemment rencontré sous la limite d'incursion marine. Il correspond généralement à des sédiments marins d'eau peu profonde sur des sédiments marins d'eau profonde de granulométrie plus fine. Dans le secteur de Saint-Ferréol-les-Neiges, ce même contexte témoigne d'une succession de dépôts glaciolacustres. Le contexte de *Silt, sur sable, sur silt sur roc*, correspond au delta du Proto-Saint-Laurent décrit plus en détail à la section 4.2.2 par la coupe C-C'. En bordure du delta, le contexte de *Silt sableux ou graveleux sur roc* est identifiable et correspond aux alluvions du Proto-Saint-Laurent.

Le contexte de *Dépôts hétérogènes sur roc* est présent dans le piémont laurentien, en bordure des rivières Montmorency, Jacques-Cartier et, localement, dans d'autres vallées du piémont. Ce contexte, décrit en détail à la section 4.2 par les coupes A-A', B-B' et D-D', correspond aux dépôts deltaïques hétérogènes composés de sable et gravier contenant des horizons de silt discontinus. Le secteur de Saint-Ferréol-les-Neiges et de Saint-Tite-des-Caps présente le même contexte de *Dépôts hétérogènes sur roc*, mais il s'agit de sédiments d'origine fluvioglaciale.

Dans les vallées des Laurentides et localement dans le piémont laurentien, c'est le contexte de *Sable et gravier sur roc* qui prédomine. Ce contexte correspond généralement à des dépôts alluvionnaires ou fluvioglaciaires. À l'embouchure de la rivière Cap-Rouge, ce contexte correspond au delta du Proto-Saint-Laurent. Le contexte de *Silt sur sable et gravier sur roc* se retrouve principalement en bordure des grands complexes fluvioglaciaires ou deltaïques, où les dépôts de sable et gravier sont recouverts de silt d'origine marine. Le contexte de *Dépôt organique sur sable et gravier* ou *Dépôt hétérogène sur roc* se retrouve un peu partout sur le territoire. Des dépôts organiques sont aussi localement représentés par un contexte de *Silt ou argile silteuse sur roc*.

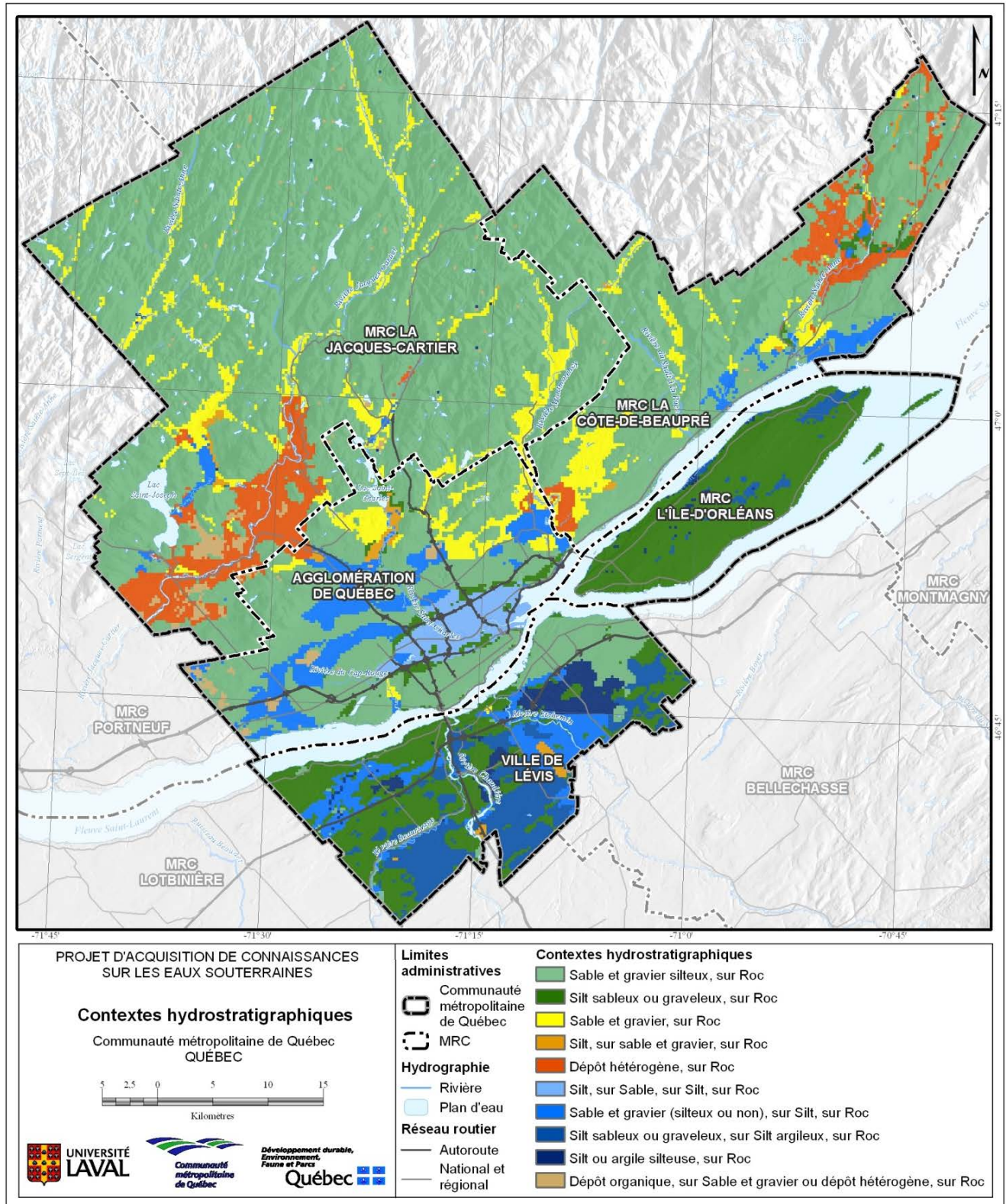


Figure 4.6 : Contextes hydrostratigraphiques

4.4 Confinement et épaisseur des aquifères

Un aquifère est confiné lorsqu'il est situé sous des matériaux géologiques peu perméables. Ce confinement protège l'aquifère en limitant l'infiltration de contaminants venant de la surface du sol. La nature des dépôts meubles reposant sur un aquifère, combinée à leur épaisseur, confère différents degrés de confinement aux aquifères.

Le degré de confinement des aquifères a été déterminé à partir du modèle hydrostratigraphique 3D. Les couches des hydrofaciès HF1 (silt ou silt argileux) et HF2 (silt sableux ou graveleux) ont une faible perméabilité et ont donc des propriétés confinantes lorsqu'elles se retrouvent au-dessus d'un aquifère. Pour chaque maille du modèle, une *Épaisseur confinante* a été calculée à partir de l'épaisseur des hydrofaciès HF1 et HF2. Parce que l'hydrofaciès HF2 est composé de matériaux plus perméables que HF1, un facteur de pondération a été appliqué pour son épaisseur. Il a été supposé que, du point de vue du confinement pour un aquifère, une épaisseur de 5 m de HF1 équivaut à une épaisseur de 8 m de HF2. L'*Épaisseur confinante* pour chaque maille du modèle a donc été calculée de la façon suivante :

$$\text{Épaisseur confinante} = \sum (\text{Épaisseurs des couches HF1} + 5/8 \text{ Épaisseurs des couches HF2})$$

Les couches d'hydrofaciès hétérogènes HF6 peuvent contenir des horizons de silt et pourraient donc avoir des propriétés confinantes. L'analyse de rapports de forages dans les dépôts deltaïques et fluvioglaciaires et des coupes hydrostratigraphiques indique que, en moyenne, environ 1/3 de l'épaisseur des couches HF6 du modèle est composée de silt. Dans le modèle hydrostratigraphique 3D, l'hydrofaciès HF6 ne se retrouve jamais dans la couche de surface. Le confinement a donc été défini comme étant discontinu lorsqu'une épaisseur de 8 m ou plus de HF6 était présente.

Le Tableau 4.2 présente la définition des degrés de confinement en fonction de l'*Épaisseur confinante* ou de l'épaisseur de HF6.

Tableau 4.2 : Définition du confinement

Confinement	Épaisseur confinante
Confiné	5 m et plus
Semi confiné	3 à 5 m
Non confiné	Moins de 3 m
	Épaisseur d'hydrofaciès hétérogène (HF6)
Discontinu	8 m et plus

Les épaisseurs de toutes les couches d'hydrofaciès HF1 et HF2 ont été additionnées, qu'elles soient en contact ou non entre elles. Une brève analyse comparative des résultats a révélé que cette distinction entre les couches en contact et les couches séparées n'apportait que très peu de changement à la définition du confinement.

4.4.1 Confinement des aquifères de roc fracturé

Sur la rive sud, l'aquifère de roc fracturé est confiné et semi confiné en grande partie (Carte 18a et à la Figure 4.7). Sur l'île d'Orléans, le confinement se retrouve localement dans les secteurs où les dépôts meubles sont plus épais. Sur la rive-nord, l'aquifère de roc fracturé dans la Plate-forme du Saint-Laurent est confiné à semi confiné par endroit, notamment en bordure du fleuve à l'est de la Côte de Beaupré, à l'ouest de la rivière Montmorency, dans le delta du Proto-Saint-Laurent et dans les zones de dépôts épais de l'Agglomération de Québec. L'aquifère de roc fracturé de la Province de Grenville est confiné à semi confiné dans les vallées des rivières Nelson et Saint-Charles au nord de l'Agglomération de Québec. Le confinement est généralement discontinu vis-à-vis les grands complexes deltaïques de la rivière Jacques-Cartier, de l'est de la rivière Montmorency et du secteur de Saint-Ferréol-les-Neiges et de Saint-Tite-des-Caps. L'aquifère de roc de la vallée de la rivière aux Pins, dans la partie nord de Shannon, est confiné à semi confiné. Dû à la présence de sols organiques épais, quelques endroits isolés dans le secteur des Laurentides présentent un aquifère de roc fracturé semi confiné à confiné.

La Carte 18a donne une indication du confinement du roc à l'échelle régionale. Dans le cas d'investigation locale, il est préférable d'effectuer une caractérisation hydrogéologique détaillée au droit de la propriété étudiée.

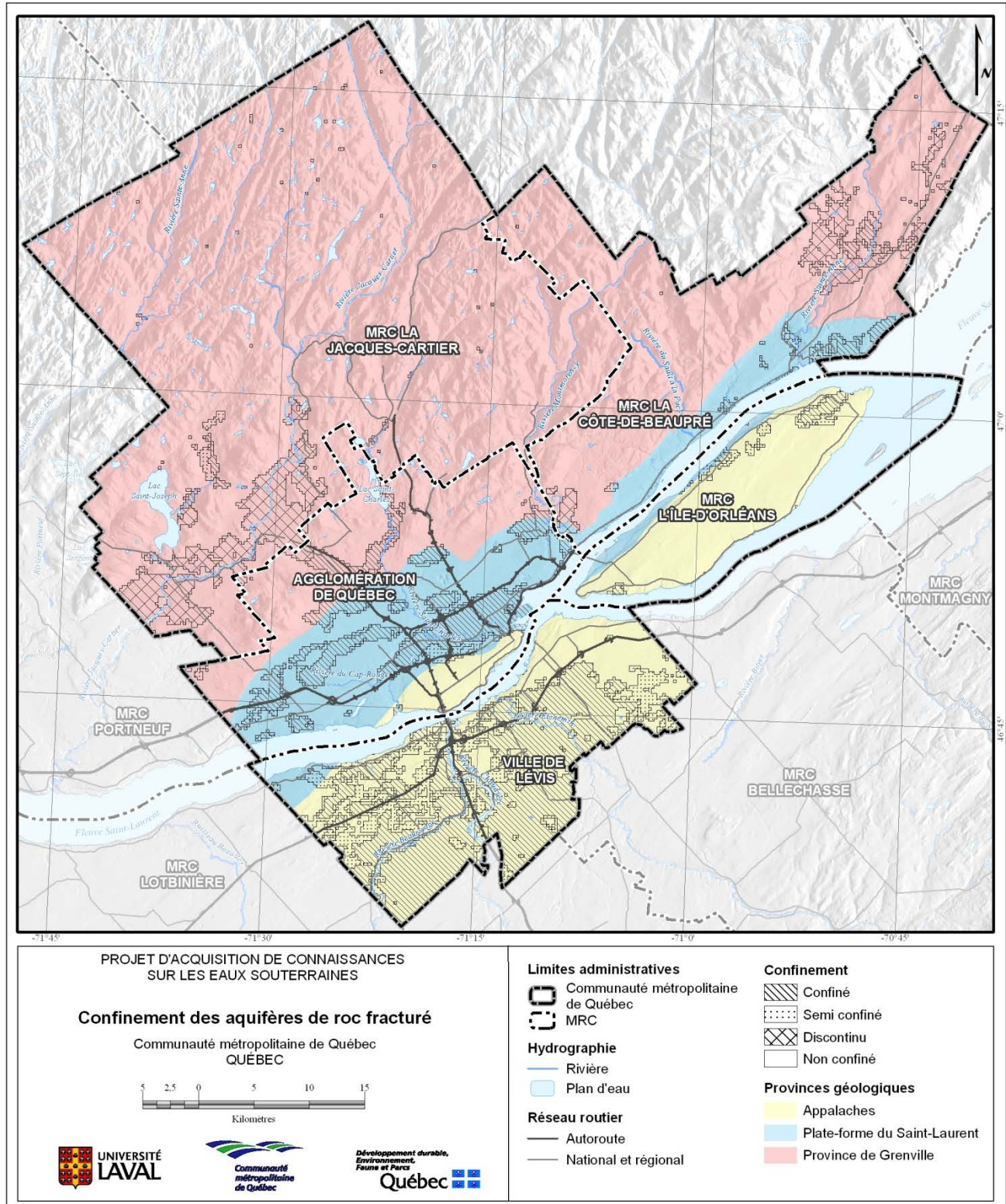


Figure 4.7 : Confinement des aquifères de roc fracturé

4.4.2 Confinement et épaisseur des aquifères de dépôts meubles

L'épaisseur saturée des aquifères de dépôts meubles a été calculée en additionnant les épaisseurs des couches HF4, HF5 et HF6 qui sont saturées en eau, c'est-à-dire sous le niveau piézométrique. Pour l'hydrofaciès HF6, l'épaisseur considérée dans ce calcul correspond au 2/3 de l'épaisseur saturée totale de la couche. Tel que mentionné à la section 4.4, cet hydrofaciès est composé en moyenne de 1/3 d'horizons silteux et de 2/3 de sable et gravier. Pour la suite des analyses, seuls les aquifères de dépôts meubles de plus de 5 m d'épaisseur seront considérés comme des aquifères d'intérêt régional. L'analyse des résultats de ces calculs montre que l'hydrofaciès HF6 représente un aquifère dominant dans la région d'étude.

Le degré de confinement des aquifères de dépôts meubles a été déterminé en analysant les successions des hydrofaciès se situant au-dessus de l'aquifère de dépôts meubles, alors que pour les aquifères de roc fracturé, toute l'épaisseur des dépôts était considérée. L'analyse des successions montrent que :

- Dans tous les cas, les couches aquifères sont superposées et en contact, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas séparées par des couches confinantes; et,
- Les aquifères de dépôts meubles reposent directement sur le roc à l'exception des aquifères du Proto-Saint-Laurent.

Le confinement et l'épaisseur des principaux aquifères de dépôts meubles sont présentés à la Carte 18b et à la Figure 4.8.

4.4.2.1 Rive sud et l'île d'Orléans

Un aquifère de dépôts meubles partiellement enfoui est présent à l'ouest de la rivière Etchemin. Selon le modèle hydrostratigraphique, il s'agit d'une importante épaisseur, pouvant atteindre environ 60 m, de dépôts fluvioglaciers recouverts de dépôts marins tel que montré par la coupe hydrostratigraphique F-F' (section 4.2.5). Le même contexte se retrouve au sud de la rivière Beauvillage, où un aquifère confiné d'étendue restreinte et d'environ 15 m d'épaisseur est présent. Deux aquifères de dépôts meubles non confinés de petite taille sont également présents dans des alluvions. À l'est de la rivière Chaudière, l'épaisseur maximale de l'aquifère est d'environ 13 m tandis que près du fleuve, il peut atteindre une épaisseur de 25 m entre les rivières Chaudière et Etchemin.

À l'île d'Orléans, aucun aquifère de dépôts meubles n'a été décelé avec les forages disponibles.

Comme mentionné à la section 3.2.1.2 les dépôts présents sur la rive sud et sur l'île d'Orléans sont principalement des dépôts marins ou des tills silteux. La présence d'aquifères de dépôts meubles y esont donc rare.

4.4.2.2 *Rive nord*

À l'embouchure de la rivière Saint-Charles, dans la basse ville de Québec, et de la rivière Cap-Rouge, il y a deux aquifères de dépôts meubles dans le delta du Proto-Saint-Laurent. Tel que montré par la Coupe C-C' (section 4.2.2), dans le secteur de la basse ville de Québec, cet aquifère sableux ayant jusqu'à 24 m d'épaisseur est semi confiné par endroit, car recouvert d'une couche d'alluvions silteuses. À l'embouchure de la rivière Cap-Rouge, l'aquifère de dépôts meubles, ayant jusqu'à 30 m d'épaisseur, est non confiné, car les alluvions qui le recouvrent sont plus sableuses.

Plus au nord, les principaux aquifères de dépôts meubles sont généralement non confinés et se retrouvent dans les sables et graviers d'origines alluvionnaires, deltaïques et fluvioglaciaires des rivières Jacques-Cartier (épaisseur maximale de 50 m), Montmorency (34 m), des Pins (31 m) et Hurons (21 m). Les coupes A-A', B-B' et D-D' de la section 4.2 illustrent ces contextes. Les secteurs situés au nord de l'Ange-Gardien (épaisseur maximale de 25 m), au sud du lac Saint-Charles (16 m) et à l'ouest du lac Beauport (19 m) représentent aussi des aquifères de dépôts meubles intéressants.

Plus à l'est, les secteurs de Beaupré, de Saint-Ferréol-les-Neiges et de Saint-Tite-des-Caps comportent d'importants aquifères de dépôts meubles (épaisseur maximale de 30 m), généralement non confinés, dans des sables et graviers d'origine fluvioglaciaire, alluvionnaire ou glaciolacustre.

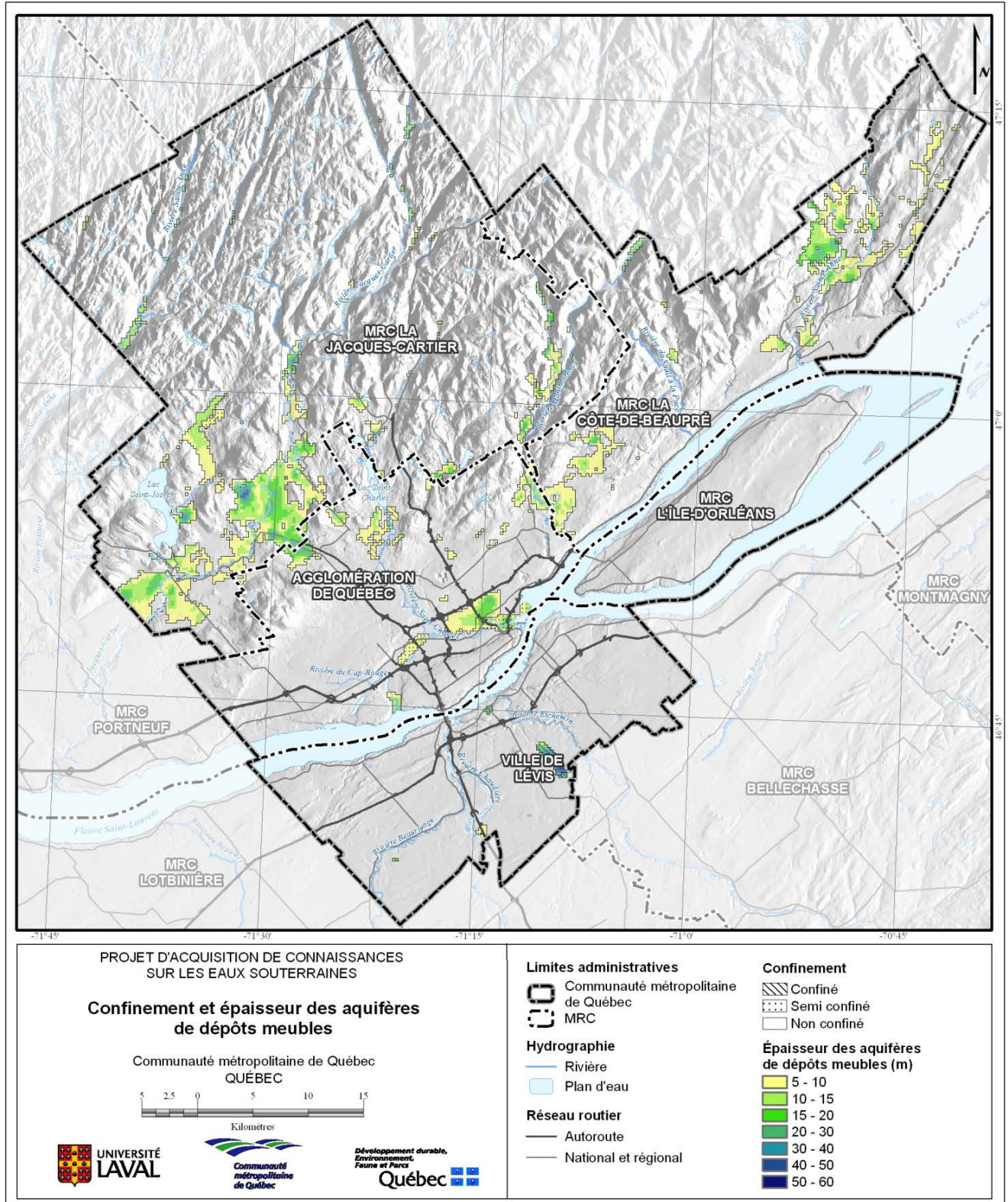


Figure 4.8 : Confinement et épaisseur des aquifères de dépôts meubles

4.5 Piézométrie et écoulement

Une carte piézométrique permet de mieux comprendre l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle régionale. Dans le cadre du PACES-CMQ, deux cartes piézométriques distinctes ont été produites. La piézométrie combinée de l'aquifère de roc et de l'aquifère de dépôts meubles qui sont en lien hydraulique est présentée à la Carte 20 et la Figure 4.10 alors que celle des aquifères de dépôts meubles du Proto-Saint-Laurent, qui eux ne sont pas en lien hydraulique avec l'aquifère de roc, dans l'encadré de la Carte 20.

Les cartes piézométriques ont été produites sur une grille régulière dont la maille est de 250 m par 250 m, en utilisant les niveaux d'eau mesurés dans les puits d'observation de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ. La méthodologie détaillée pour la réalisation de ces produits est présentée à l'Annexe 6 et est inspirée du protocole développé par le GRIES (Annexe E6).

Un processus rigoureux de validation et de sélection des données a été appliqué afin d'identifier les données de niveau d'eau à utiliser lors de l'interpolation. Ce processus tient compte de la cohérence de la localisation des puits et des différentes informations disponibles sur les niveaux d'eau. Les niveaux d'eau conservés ont été séparés en deux sous-échantillons selon le type d'aquifère, soit de dépôts meubles ou de roc fracturé. Des analyses géostatistiques ont ensuite été réalisées pour chacun de ces deux sous-échantillons, qui ont finalement été interpolés séparément en employant la méthode du krigeage ordinaire.

Pour l'aquifère de roc fracturé, il a été possible d'améliorer le résultat de l'interpolation dans le secteur de la rivière Jacques-Cartier en ajoutant à la méthode les nombreux niveaux d'eau mesurés dans les dépôts meubles. En effet, les aquifères de dépôts meubles et de roc sont réputés y être en lien hydraulique. Par contre, la moitié nord des Laurentides n'a pas pu être couverte par l'interpolation, car la densité de mesures était insuffisante. Des valeurs médianes de niveau d'eau ont été attribuées selon trois environnements physiographiques simplifiés : le sommet des collines, le versant des collines et le fond des vallées.

Dans le cas des aquifères de dépôts meubles, où densité de données de niveau d'eau est faible, l'interpolation n'était réalisable que pour certains secteurs. Parmi les aquifères régionaux n'étant pas en lien hydraulique avec l'aquifère de roc, seuls ceux du Proto-Saint-Laurent contenaient une densité suffisante de données de niveau d'eau pour réaliser une interpolation.

Les résultats de l'interpolation des niveaux d'eau de l'aquifère de roc fracturé sont présentés à la Figure 4.9. La profondeur du niveau piézométrique de l'aquifère de roc varie entre 0 et 20 m. Les plus grandes profondeurs de niveau d'eau estimées par interpolation se retrouvent dans les Laurentides où le relief s'accroît et du côté de la Ville de Lévis où les vallées de roc sont comblées par des dépôts meubles.

Les cartes piézométriques ont finalement été obtenues en soustrayant du modèle numérique d'élévation du terrain les grilles régulières d'interpolation du niveau d'eau.

Tel qu'illustrée à la Carte 20 et à la Figure 4.10, la topographie influence la piézométrie du roc fracturé qui s'apparente à une reproduction adoucie du modèle numérique d'élévation du terrain. De plus, les changements importants de la piézométrie ont lieu aux endroits où des variations rapides de la topographie sont observées. Selon les gradients de gravité et de pression, l'eau souterraine s'écoule des hauts piézométriques vers les bas.

Le niveau piézométrique passe de près de 1 000 m à la frontière nord de la CMQ à 0 m en bordure du fleuve Saint-Laurent. Du côté de Lévis, les plus hauts sommets piézométriques sont à des élévations de l'ordre de 100 m et ils se trouvent à la frontière sud où la topographie commence à s'accroître. L'écoulement régional s'effectue donc globalement du sud-est vers le nord-ouest sur la rive sud par rapport à un écoulement du nord-ouest vers le sud-est sur la rive nord. À l'île d'Orléans, l'écoulement est essentiellement radial, soit du centre de l'île vers son contour. Dans la région des Laurentides, les variations plus marquées de la piézométrie, combinées au réseau hydrographique plus dense, illustrent que l'écoulement se fait à une échelle beaucoup plus locale que dans l'Agglomération de Québec ou dans la Ville de Lévis. Par conséquent, le temps résidence de l'eau souterraine dans les aquifères du secteur des Hautes-terres est probablement plus faible qu'ailleurs. Ultiment, le fleuve Saint-Laurent constitue l'exutoire principal de l'eau souterraine de tout le territoire de la CMQ.

La piézométrie des aquifères de dépôts meubles du Proto-Saint-Laurent (Carte 19, en encadré sur la Carte 20) est très similaire à la piézométrie de l'aquifère de roc. Les niveaux piézométriques estimés sont plus élevés en bordure de ces aquifères et plus bas à l'approche de la rivière Saint-Charles puis à son embouchure. Étant donné l'échelle régionale d'étude et considérant l'imprécision des données de niveau d'eau, il est impossible de conclure indubitablement quels aquifères, de roc fracturé ou de dépôts meubles, présentent des niveaux piézométriques plus élevés. Si elle était disponible, cette information permettrait alors de déterminer la direction de l'écoulement vertical, soit du roc vers les dépôts lorsque les niveaux mesurés dans le roc sont plus élevés ou soit des dépôts vers le roc dans le cas contraire.

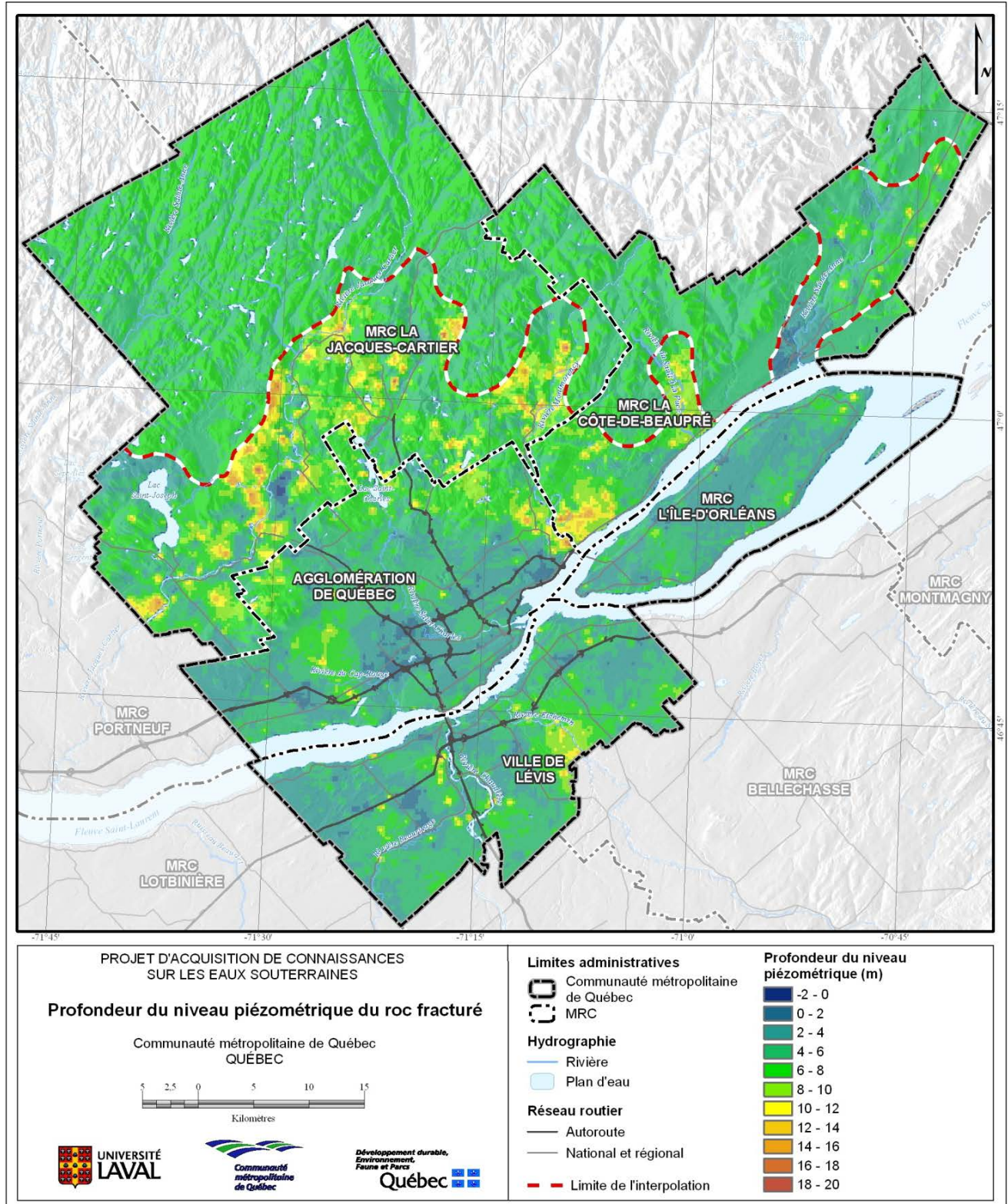


Figure 4.9 : Profondeur du niveau piézométrique de l'aquifère de roc fracturé

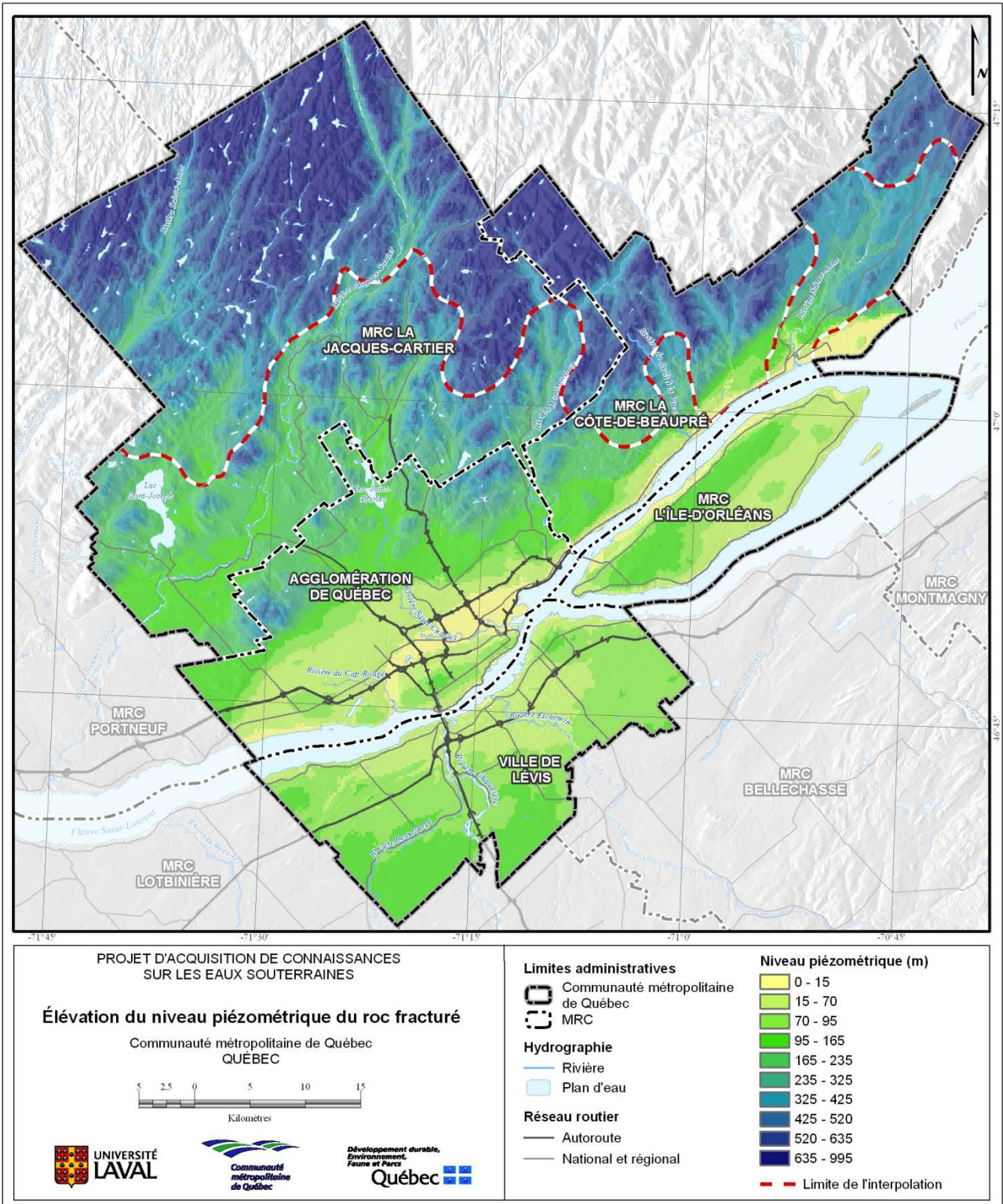


Figure 4.10 : Élévation du niveau piézométrique du roc fracturé

4.6 Propriétés hydrauliques

La connaissance des propriétés hydrauliques des couches géologiques est importante pour quantifier la capacité d'un matériel à permettre l'écoulement de l'eau souterraine. Elle permet d'évaluer si une couche géologique forme un aquifère ou un aquitard qui protège l'aquifère sous-jacent. Les propriétés hydrauliques permettent aussi de mieux comprendre les écoulements préférentiels de l'eau souterraine.

Les propriétés hydrauliques d'intérêt sont l'emmagasinement spécifique, la transmissivité, la conductivité hydraulique et la capacité spécifique. Le coefficient d'emmagasinement (S en m^3/m^3) est le volume d'eau que libère un aquifère par surface unitaire de l'aquifère suite à un abaissement unitaire de la charge hydraulique. Pour les aquifères non confinés, $S = n_d$, où n_d en m^3/m^3 est la porosité de drainage tandis que pour les aquifères confinés, $S = S_s \cdot b$, où S_s en m^{-1} est le volume d'eau qui peut être extrait d'un volume unitaire d'aquifère suite à l'abaissement unitaire de la charge hydraulique et b (en mètres) est l'épaisseur de l'aquifère (en m). La conductivité hydraulique (K en m/s) est la capacité d'un matériel géologique à permettre l'écoulement de l'eau souterraine dans les pores ou les fractures du matériel. La transmissivité (T en m^2/s) est le produit de la conductivité hydraulique et de l'épaisseur saturée de l'aquifère ($T = K \cdot b$, où b (en m) est l'épaisseur de l'aquifère). La conductivité hydraulique et la transmissivité sont estimées par les essais hydrauliques, typiquement à partir de l'analyse de l'abaissement du niveau d'eau (« rabattement » s en mètre) en fonction du temps (t en secondes) induit dans des puits d'observation par le pompage dans un puits. Enfin, la capacité spécifique (C_{sp} ou Q/s en m^2/s) est le rapport entre le débit de pompage dans un puits et l'abaissement de son niveau d'eau (« rabattement » s en mètre) par rapport au niveau sans pompage. La capacité spécifique est une propriété combinée d'un puits et de la formation aquifère et elle ne peut donc pas représenter les caractéristiques intrinsèques de cet aquifère même s'il est courant d'utiliser des transformations pour estimer la transmissivité.

En plus des essais hydrauliques effectués dans les puits visités par l'Université Laval (section 2.2.3), plusieurs autres études ont été consultées pour compléter la base de données hydrogéologiques. Les valeurs de capacité spécifique (C_{sp}) proviennent essentiellement de la base de données du SIH et concernent le roc fracturé, à quelques exceptions près. Les paramètres S , T et K sont généralement issus de rapports techniques pour lesquelles les résultats d'analyse d'essais de pompage étaient disponibles. Quelques données de K découlent soit de l'analyse d'essais de perméabilité, de calcul empirique à partir de la distribution granulométrique des sédiments, ou encore d'essais d'infiltration dans les sols avec un perméamètre.

Pour s'assurer de ne garder que les données adéquates contenues dans le SIH, une série de critères de sélection, inspirés de Nastev *et coll.* (2004), ont été utilisés. Dans un premier temps, les puits présentant des coordonnées géographiques aberrantes ont été supprimés, par exemple les puits localisés au milieu de lacs et de cours d'eau ainsi que ceux crépinés dans les dépôts meubles. Pour éviter une trop grande influence de l'effet capacitif du puits lors de l'essai de pompage, les puits dont le diamètre excède la limite arbitraire de 16,5 cm n'ont pas été retenus. L'effet capacitif se produit lorsque le diamètre du puits est trop grand par rapport à la réponse de l'aquifère au pompage et que la descente du niveau d'eau dans le puits est davantage représentative du pompage de la réserve d'eau du puits plutôt que

de l'eau de l'aquifère qui entre au puits. Aussi, les essais qui ont duré moins de 1 heure, avec un volume d'eau pompée inférieur à 1 m^3 , ont été écartés. Enfin, les essais ayant produit un rabattement supérieur à $1/3$ de l'épaisseur saturée ont également été écartés. D'après Nastev *et coll.* (2004), cette dernière condition sert à s'assurer que l'approximation de Dupuit est respectée, c'est-à-dire que l'écoulement de l'eau vers le puits demeure majoritairement horizontal et que la réponse de l'aquifère n'est pas influencée par une distribution clairsemée des fractures ou par un effet capacitif. En appliquant les critères mentionnés, il est possible de ne conserver que les essais de pompage qui ont significativement mis à contribution l'aquifère, avec un effet de capacité des puits limité.

Quelques études, dont Bradbury et Rothschild (1985), proposent de transformer la capacité spécifique en transmissivité et de calculer ensuite la conductivité hydraulique à partir de l'épaisseur de l'aquifère. Cependant, cette transformation n'a pas été réalisée, car elle ne permet pas d'isoler les propriétés intrinsèques de l'aquifère puisque la capacité spécifique est aussi dépendante de la conception du puits.

Un autre processus de sélection a été effectué pour ne pas accorder un poids statistique trop grand aux puits pour lesquels il existe plus d'un essai hydraulique. Dans ce cas, les essais ont été classés selon le volume d'aquifère sollicité et seul le résultat de l'essai portant sur le plus grand volume a été retenu. Le classement est, du volume le plus élevé au volume le plus petit : l'essai de pompage avec puits d'observation, l'essai de pompage sans puits d'observation, l'essai de perméabilité (*slug test*), l'essai de capacité spécifique et l'estimation de K à partir d'une analyse granulométrique. Dans le cas où plusieurs essais ont été effectués pour le même puits, mais à des profondeurs différentes, les paramètres hydrauliques des essais étaient conservés, car ils pouvaient permettre de caractériser deux matériaux géologiques différents.

Afin d'associer correctement les paramètres hydrauliques à l'unité stratigraphique correspondante, le matériel décrit à la profondeur de l'essai a été rapporté. Dans le cas où plusieurs couches étaient décrites pour la profondeur correspondante de l'essai, les paramètres hydrauliques étaient attribués à la couche dominante, généralement celle ayant la granulométrie la plus grossière et l'épaisseur la plus importante au niveau de l'essai. Pour les dépôts meubles, le code granulométrique associé au type de dépôts dans la base de données hydrogéologiques était converti en hydrofaciès selon les catégories définies à la section 4.1. Pour le roc, les forages étaient écartés de l'analyse statistique lorsque la lithologie décrite en forage ne correspondait pas à celle qui était cartographiée (Carte 13).

La compilation et la validation des données existantes et de celles acquises par les travaux de terrain ont permis d'établir un sommaire des informations disponibles dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ pour le roc fracturé (Annexe 7), défini par l'hydrofaciès HF7, de même que pour les autres hydrofaciès qui caractérisent les dépôts meubles (Tableau 4.3). Ces tableaux montrent le nombre de données disponibles, la moyenne géométrique et l'écart-type des paramètres S, C_{sp} , T et K qui ont été sélectionnés et validés.

Le Tableau A17 indique qu'un faible nombre de données de K sont disponibles pour les formations de roc fracturé (29 valeurs) en comparaison avec les données validées de capacité spécifique des puits au roc (634 valeurs). Même en regard des nombreux essais de capacité spécifique des puits au roc, il est difficile de s'appuyer sur l'analyse statistique du Tableau A17 pour conclure lesquelles des formations des Appalaches, de la Plate-forme du Saint-Laurent ou de la Province de Grenville présentent un plus grand potentiel d'exploitation des aquifères de roc fracturé. Les valeurs moyennes des propriétés hydrauliques du roc sont donc confondues et rapportées au Tableau 4.3 pour caractériser l'hydrofaciès HF7. Ces valeurs moyennes serviront au calcul de la recharge et de la vulnérabilité des aquifères (section 4.8). Dans le Tableau A18, les statistiques ont été réalisées sur les propriétés hydrauliques, mais cette fois-ci, en les classant selon la lithologie dominante décrite au niveau du trou ouvert au roc. Le nombre de données disponibles est inférieur par rapport au Tableau A17 car l'information sur la lithologie n'était pas disponible pour tous les forages contenant une propriété hydraulique.

Les propriétés des autres hydrofaciès, telles que définies à la section 4.1, sont présentées au Tableau 4.3, à l'exception de l'hydrofaciès HF6 qui regroupe différents types de dépôts. Dans le cas des dépôts meubles (HF1 à HF5), les données de conductivité hydraulique sont assez nombreuses et les paramètres statistiques obtenus sont cohérents avec les valeurs typiques de la littérature (Freeze et Cherry, 1979), sauf pour l'hydrofaciès HF1 qui n'est représenté que par 4 données de K. Il est commun d'avoir peu de valeurs pour les dépôts à texture plus fine, car les essais hydrauliques qui y sont pratiqués sont souvent très longs à compléter et que l'intérêt est souvent porté vers la définition des propriétés des matériaux géologiques plus perméables. L'écart-type des hydrofaciès est d'environ un ordre de grandeur et est jugé raisonnable en raison de la variabilité granulométrique au sein des hydrofaciès, plus particulièrement pour HF2 qui regroupe des dépôts de till (Figure 4.11). La distribution statistique des conductivités hydrauliques des hydrofaciès peut également être consultée sous forme de graphique en boîte (Figure 4.11) ou d'histogrammes (Figure 4.12).

Tableau 4.3 : Sommaire des propriétés hydrauliques disponibles dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ et classées par hydrofaciès

Hydrofaciès		Emmagasinement S			Capacité spécifique C _{sp}			Transmissivité T			Conductivité hydraulique K		
Cod e	Définition	n (-)	μ _g (m ³ /m ³)	σ _{log} (log m ³ /m ³)	n (-)	μ _g (m ² /s)	σ _{log} (log m ² /s)	n (-)	μ _g (m ² /s)	σ _{log} (log m ² /s)	n (-)	μ _g (m/s)	σ _{log} (log m/s)
HF1	Silt, argile silteuse	-	-	-	1	3x10 ⁻⁵	-	-	-	-	4	3x10 ⁻⁷	1,1
HF2	Silt sableux/graveleux	-	-	-	1	8x10 ⁻⁵	-	2	4x10 ⁻⁵	1,1	39	2x10 ⁻⁷	1,6
HF3	Sable/gravier silteux	3	2x10 ⁻³	1,9	13	9x10 ⁻⁴	0,2	9	5x10 ⁻⁴	1,0	278	3x10 ⁻⁵	1,1
HF4	Sable	9	3x10 ⁻³	0,5	2	5x10 ⁻³	0,3	11	1x10 ⁻²	0,4	118	9x10 ⁻⁵	0,9
HF5	Sable et gravier	11	7x10 ⁻⁴	0,6	20	7x10 ⁻⁴	0,5	19	1x10 ⁻³	0,8	56	1x10 ⁻⁴	0,8
HF7	Roc fracturé	11	2x10 ⁻⁴	0,7	634	6x10 ⁻⁵	0,7	34	1x10 ⁻⁴	0,9	29	5x10 ⁻⁷	1,3

où **n** : nombre d'échantillons; **μ_g** : moyenne géométrique; **σ_{log}** : écart-type du logarithme de la valeur.

Note : L'hydrofaciès 6 (dépôt hétérogène) n'est pas représenté.

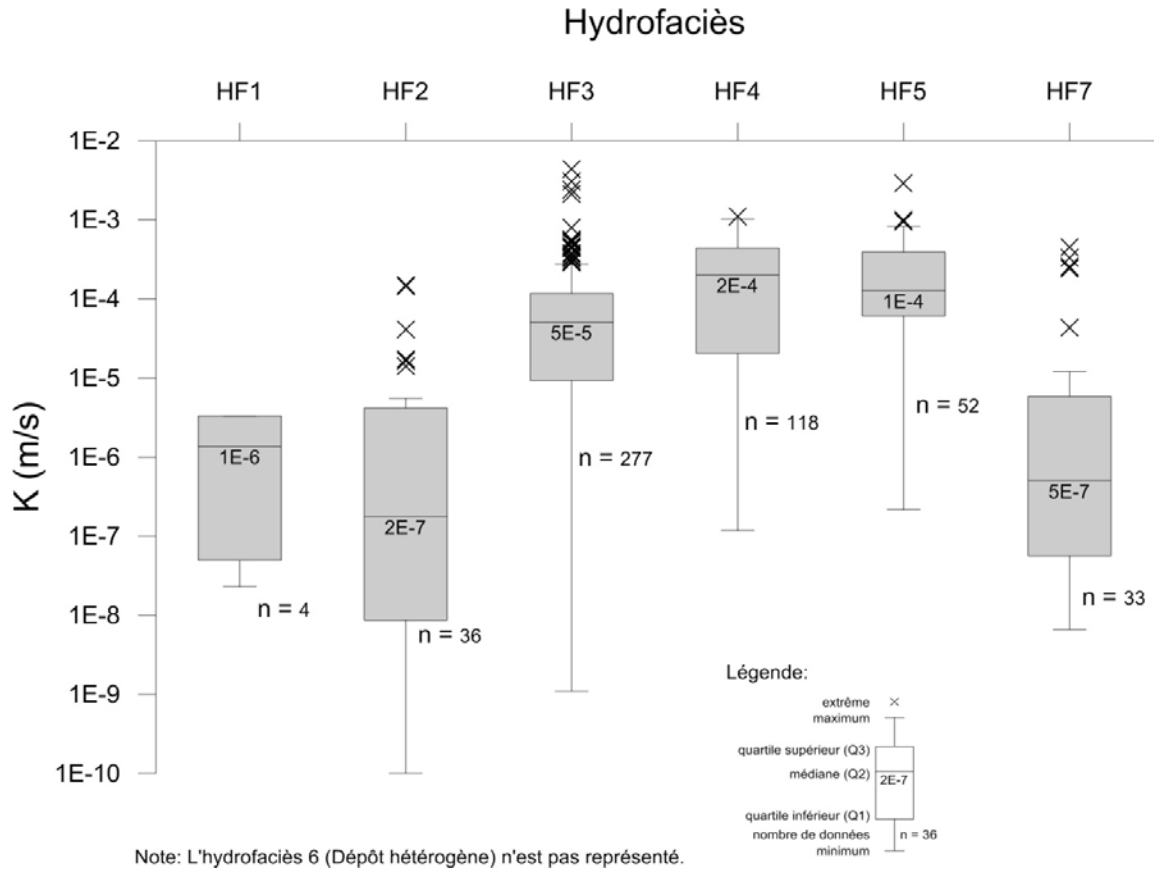


Figure 4.11 : Distribution statistique des conductivités hydrauliques disponibles dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ et classées par hydrofaciès

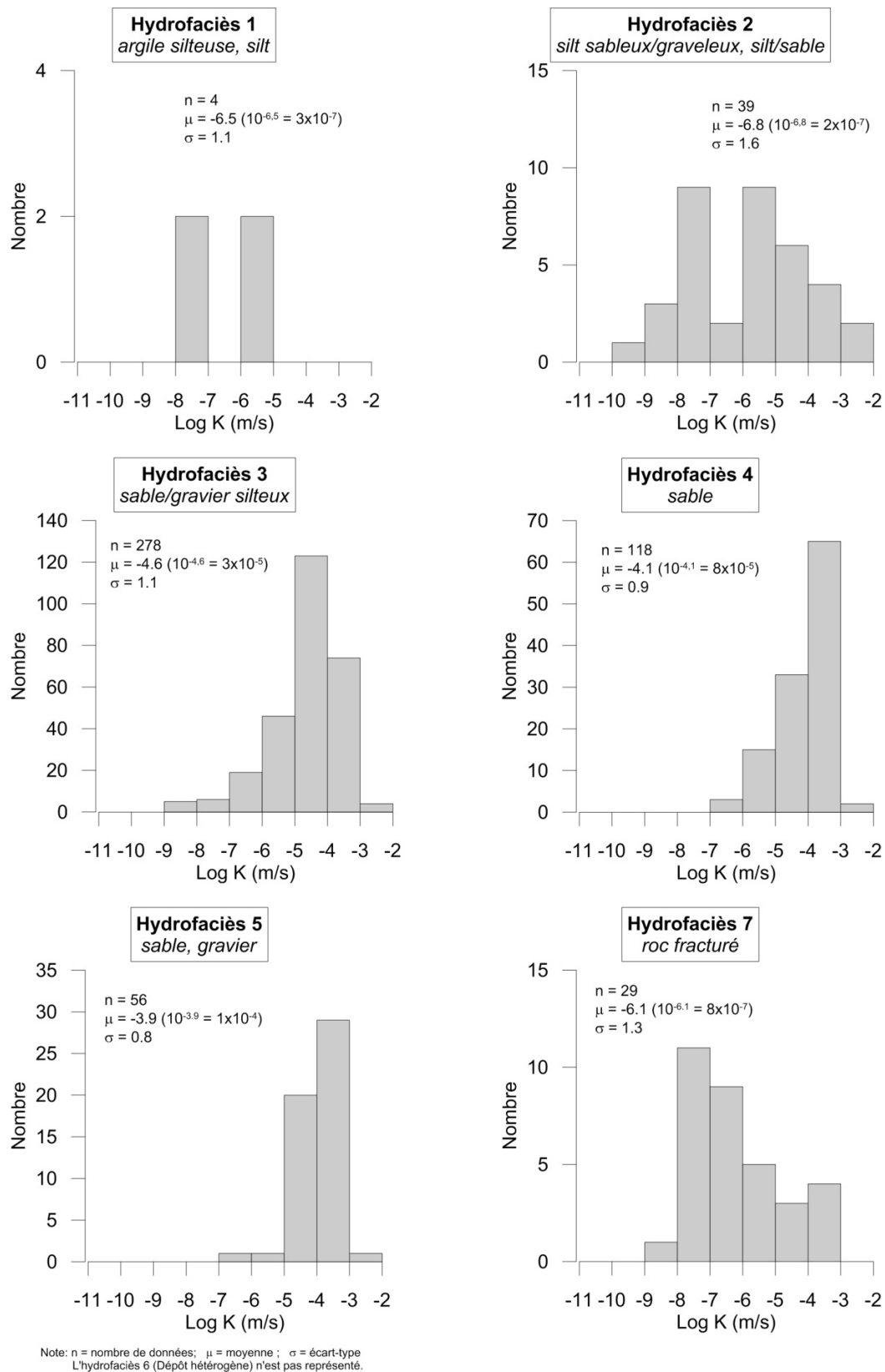


Figure 4.12 : Histogrammes des conductivités hydrauliques disponibles dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ et classées par hydrofaciès

4.7 Météorologie, hydrométrie et suivi piézométrique

La Carte 27 et la Figure 4.13 présentent l'emplacement des stations météorologiques, hydrométriques et piézométriques sur le territoire de la CMQ. Certaines stations sont en activité alors que d'autres sont aujourd'hui fermées, mais leurs données sont toujours disponibles.

Les stations météorologiques font parties du Programme de surveillance du climat du MDDEFP (12 actives et 36 inactives) et du réseau d'Environnement Canada (2 actives). Les stations hydrométriques sont celles du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) du MDDEFP (13 actives et 9 inactives) et d'Environnement Canada (8 inactives). La plupart des stations mesurent le débit des cours d'eau et d'autres uniquement leur niveau. Les 3 puits appartenant au Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec du MDDEFP (2002) sont aussi représentés sur la Carte 27. Deux puits d'observation installés dans le cadre du PACES-CMQ seront transférés au MDDEFP et intégrés dans son réseau de suivi.

Ces données météorologiques, hydrométriques et de suivi piézométrique ont servi à l'analyse du bilan hydrologique et au calcul de la recharge des aquifères et seront discutées à la section 4.8.2.

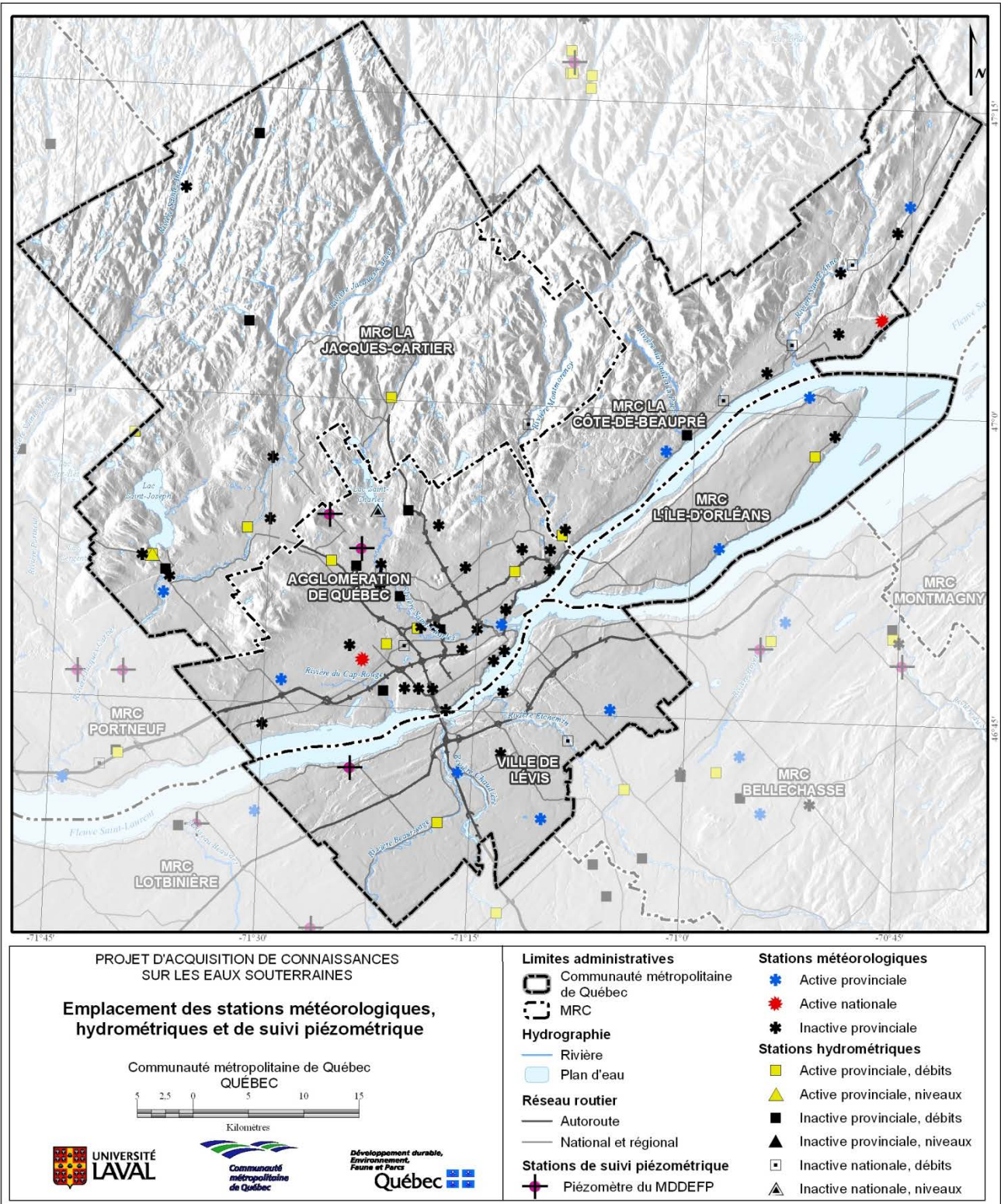


Figure 4.13 : Emplacement des stations météorologiques, hydrométriques et de suivi piézométrique

4.8 Bilan hydrologique et recharge des aquifères

L'établissement d'un bilan hydrologique permet de quantifier la contribution des différentes composantes du cycle de l'eau. Ces principales composantes sont les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement et la recharge des aquifères. En hydrogéologie, la recharge permet de connaître les taux de renouvellement des aquifères et constitue un premier pas vers la gestion durable de la ressource en eau souterraine.

Dans le cadre de cette étude, les composantes du bilan hydrologique ont été estimées sur tout le territoire grâce au modèle numérique HELP[®] (*Hydrologic Evaluation of Landfill Potential*) conçu par Schroeder *et coll.* (1994). En plus d'expliquer l'architecture du modèle HELP[®], les prochaines sous-sections traiteront brièvement des étapes menant à la cartographie de la recharge des aquifères du territoire de la CMQ, soient la préparation des données à intégrer au modèle, le calage des composantes du bilan hydrologique et, finalement, l'évaluation de la recharge des aquifères.

4.8.1 Architecture du modèle HELP[®]

À la base destinée pour la conception ou l'évaluation de l'efficacité des sites d'enfouissement, le modèle HELP[®] a été appliqué dans plusieurs études hydrogéologiques régionales (Carrier *et coll.*, 2013 ; Tecslut, 2008 ; Scibek *et coll.*, 2007 ; Croteau, 2006 ; Gogolev, 2002 ; Jyrkama *et coll.*, 2002). Ces études ont démontré le principal avantage de l'utilisation du modèle, qui est sa capacité à estimer les composantes du bilan hydrologique sur un territoire complet lorsqu'un nombre suffisant de données existent.

Le modèle HELP[®] simule l'infiltration verticale unidimensionnelle (1D) de l'eau dans la zone non saturée des dépôts. Le territoire de la CMQ a été divisé en cellules de 250 m par 250 m, représentant chacune une colonne stratigraphique sur laquelle un bilan hydrologique est estimé. Pour le modèle, la recharge est définie comme la quantité d'eau qui a traversé la colonne stratigraphique pour se rendre jusqu'au premier aquifère rencontré. Dans le cadre de cette étude, la recharge est donc caractéristique de l'aquifère de roc fracturé, à moins qu'un aquifère régional de dépôts meubles n'ait été identifié (Carte 18b). Tout comme les autres composantes du bilan hydrologique, la recharge est calculée pour les 30 années de simulation sur une base journalière en se basant sur l'équation générale suivante :

$$R = P - R_{surf} - R_{hyp} - ET + \Delta s$$

où R correspond à la recharge de l'aquifère, P à la précipitation (pluie et neige), R_{surf} au ruissellement de surface, R_{hyp} au ruissellement hypodermique, ET à l'évapotranspiration et Δs à l'emmagasinement interannuel d'eau dans l'aquifère.

4.8.2 Préparation des données intégrées au modèle HELP®

Le modèle HELP® nécessite l'intégration de plusieurs données concernant la météorologie, la végétation et l'occupation du sol, ainsi que des informations sur les sols et la géologie (roc et dépôts meubles).

4.8.2.1 Données météorologiques

Les données météorologiques sont intégrées au modèle sur une base journalière (température moyenne, précipitation totale et radiation solaire moyenne), trimestrielle (humidité relative) et annuelle (vitesse du vent et période de croissance des végétaux). Les données d'entrée du modèle peuvent être consultées à l'Annexe 8.

Dans le cadre de l'étude, la modélisation a été effectuée avec des données climatiques journalières sur une période de 30 années, soit de 1980 à 2009 inclusivement. Deux zones météorologiques, comparables à la classification des bioclimats faite par Gerardin et McKenney (2001), ont été définies pour bien représenter les conditions météorologiques de la région physiographique des hautes terres et de celle des basses terres. La zone des hautes terres est sous l'influence d'un climat de type subpolaire, humide avec une saison de croissance de durée moyenne tandis que la zone des basses terres est qualifiée de climat modéré, subhumide avec une longue saison de croissance (Gerardin et McKenney, 2001).

Les données journalières de précipitation totale et de températures minimales et maximales ont été produites par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) à partir des données du Programme de surveillance du climat du MDDEFP. Ces données sont issues de récents travaux (Poirier *et coll.*, 2012) disponibles à l'échelle du Québec sur un maillage régulier de 0,1 degré en longitude et latitude. Pour les besoins du modèle, la température moyenne calculée entre les températures minimales et maximales a été retenue. Étant donné l'absence de stations de mesures de la radiation solaire, ces données ont été générées avec un module d'HELP® (WGEN) s'appuyant sur les travaux de Richardson et Wright (1984). Selon les données fournies par le CEHQ, la moyenne annuelle des précipitations pour la période 1980-2009 est 1370 et 1259 mm/an pour les zones des hautes terres et des basses terres, respectivement. Pour la même période, la température moyenne journalière est minimale en janvier (-14,7°C pour les hautes terres et -13,1°C pour les basses terres) et maximale en juillet (16,1°C et 18,2°C, respectivement).

Les stations météorologiques de l'Aéroport Jean-Lesage et de la Forêt Montmorency ont servi à définir les valeurs d'humidité relative et de vitesse annuelle moyenne des vents. Les dates de début et de fin de la saison de croissance des végétaux ont été établies d'après l'Atlas agroclimatique du Québec (Agrométéo Québec, 2012).

4.8.2.2 *Données de surface (végétation et occupation du sol)*

Plusieurs cartes produites dans le cadre du projet ont servi à la préparation et à l'intégration des données de surface sur la profondeur racinaire maximale, l'indice de surface foliaire, la distance latérale au réseau de drainage ainsi que le coefficient de ruissellement.

La profondeur racinaire maximale ainsi que l'indice de surface foliaire ont été établis pour chacune des classes de couverture végétale (Carte 8). Ces deux paramètres servent à l'estimation de la quantité d'eau participant à l'évapotranspiration des plantes.

Les distances latérales au réseau drainage sont établies à partir de classes simplifiées de l'occupation du sol (Carte 7), principalement les milieux urbains (égouts pluviaux), agricoles (fossés de lignes et drains) et forestiers (réseau hydrographique naturel). Combinés avec la pente (Carte 4), ces données ont un impact sur le ruissellement hypodermique.

La combinaison de la pente (Carte 4), de l'occupation du sol (Carte 7) et du groupe hydrologique des sols de surface sert à définir le coefficient de ruissellement de surface. Ce coefficient est pris en compte dans le calcul du ruissellement de surface.

4.8.2.3 *Données sur les sols et la géologie*

La colonne stratigraphique pour chacune des cellules du modèle comprend toutes les couches situées au-dessus du toit de l'aquifère, c'est-à-dire les couches non saturées. Cela comprend 1 à 6 couches pédologiques, 1 à 4 couches de dépôts meubles et parfois 1 couche de roc. Pour chaque couche, son épaisseur, sa porosité totale, sa capacité au champ, son point de flétrissement et sa conductivité hydraulique verticale saturée sont exigées par le modèle. De plus, le type de couche doit être défini selon les 3 possibilités suivantes :

- Type 1 : Couche de percolation verticale,
- Type 2 : Couche de drainage latéral, et
- Type 3 : Couche imperméable.

Pour la pédologie, une base de données cartographiques transmise par l'IRDA a été reliée à leur base de données tabulaires qui renfermait les différentes propriétés physiques des sols nécessaires pour la modélisation HELP®. Quelques propriétés manquantes ont été complétées par la Base nationale de données sur les sols (BNDS) (AgriCan, 2012), par des rapports pédologiques (Laplante, 1962; Raymond *et coll.*, 1976; Rompré et Gagnon, 2000, 2001; Tabi *et coll.*, 1990) ou par des équations empiriques développées par Saxton et Rawls (2006). L'épaisseur totale des couches pédologiques dépasse rarement 1 m, tandis que celle des unités géologiques est inférieure à 20 m.

Les dépôts meubles ont été représentés grâce au modèle hydrostratigraphique (section 4.3) en ne conservant que les séquences de la surface jusqu'au toit du premier aquifère rencontré. Les conductivités hydrauliques ont été déterminées à l'aide de l'analyse des valeurs disponibles dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ (Tableau 4.3) ainsi qu'une revue de la littérature (Croteau, 2006; Tecsub, 2008).

4.8.3 Calage des composantes du bilan hydrologique

En raison des incertitudes issues des différentes approches d'évaluation de la recharge, il est recommandé d'utiliser plusieurs méthodes pour contraindre son estimation (Scanlon *et coll.*, 2002). Cette étape, appelée le calage du modèle, a été réalisée à l'aide de l'estimation des débits de base des rivières ainsi que des fluctuations des niveaux piézométriques de certains puits d'observation.

4.8.3.1 Estimation des débits de base des rivières

Les débits de base des rivières ont été estimés par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) pour plusieurs stations hydrométriques (Poirier, 2012). Le débit de base peut servir à estimer la recharge de l'aquifère (Scanlon *et coll.*, 2002) ainsi que d'autres composantes du bilan hydrologique (Figure 4.14). L'utilisation des débits de base pour estimer la recharge est favorisée dans le processus de calage car ces données sont disponibles pour plusieurs années et la valeur de recharge estimée est représentative d'une grande superficie du territoire, correspondant à la grandeur du bassin versant de la station de mesure.

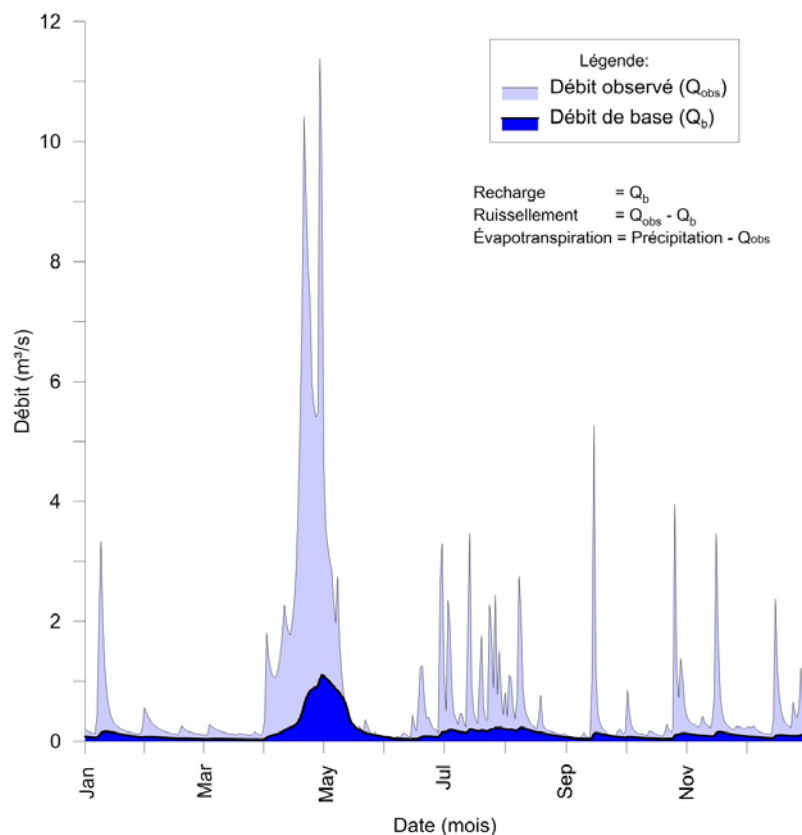


Figure 4.14 : Courbe typique des débits observés et débits de base de la rivière Dauphine pour l'année 2008

Sur le territoire de la CMQ, le bilan hydrologique a été calé pour les secteurs des Laurentides, du piémont et de l'île d'Orléans, à l'aide des mesures de débits aux stations hydrométriques des rivières Montmorency, Nelson et Dauphine, respectivement (Tableau 4.4). Pour comparer les résultats de chaque composante du bilan modélisée par HELP[®], ces résultats ont été additionnés pour l'ensemble des cellules se trouvant à l'intérieur du bassin versant de chaque station hydrométrique. Le Tableau 4.4 indique que la recharge modélisée est similaire aux valeurs de débit de base estimées par le CEHQ pour l'ensemble des 3 bassins versants, avec des variations de 0 à 3 % (Tableau 4.4). Dans l'ensemble, les composantes du bilan sont comparables pour la station de la rivière Nelson. Cependant, HELP[®] surévalue l'évapotranspiration de 11 et 8 % par rapport aux résultats des stations hydrométriques de la Rivière Montmorency et Dauphine. À l'opposé, le ruissellement modélisé est inférieur aux résultats des mêmes stations. Il faut noter que seulement le tiers du bassin versant de la station Montmorency se trouve dans la CMQ et qu'il n'a pas été jugé adéquat de modifier les paramètres d'entrée du modèle. Pour la rive sud, les résultats d'estimation des débits de base ont quand même été consultés pour la station hydrométrique de la rivière Boyer, même si cette dernière est située à l'extérieur de la CMQ. La moyenne de la recharge estimée par les débits de base est de 75 mm/an pour les années 1997 à 2010, ce qui est du même ordre de grandeur que les résultats obtenus dans des conditions similaires à Lévis. Aucune station hydrométrique du CEHQ n'est disponible en zone urbaine et aucun calage n'a pu être effectué.

Tableau 4.4 : Comparaison des résultats des paramètres du bilan hydrologique modélisé par HELP[®] (1980-2009) avec ceux obtenus des stations hydrométriques

Composantes du bilan hydrologique	Rivière Nelson (S = 64.4 km ²) mm/an (% des précipitations)		Rivière Montmorency (S = 1 101.7 km ²) mm/an (% des précipitations)		Rivière Dauphine (S = 26.5 km ²) mm/an (% des précipitations)	
	Méthode débits*	Modèle HELP [®]	Méthode débits^	Modèle HELP [®]	Méthode débits#	Modèle HELP [®]
Précipitation totale	1297 (100%)	1370 (100%)	1367 (100%)	1370 (100%)	1258 (100%)	1259 (100%)
Recharge	453 (35%)	445 (32%)	473 (35%)	477 (35%)	146 (12%)	181 (14%)
Ruissellement de surface	298 (23%)	364 (27%)	497 (36%)	333 (24%)	595 (47%)	355 (28%)
Ruissellement hypodermique		9 (1%)		4 (0%)		111 (9%)
Évapotranspiration	547 (42%)	552 (40%)	397 (29%)	554 (40%)	516 (41%)	613 (49%)
Emmagasinement	-	-3 (0%)	-	2 (0%)	-	-1 (0%)

Notes : * : Pour l'année 1987

^ : Pour les années 1980-2009, excluant 1981

: Pour les années 1980-2009, excluant 1991, 1992, 1994, 2005-2007 et 2009.

S : Superficie du bassin versant de la station

4.8.3.2 Fluctuations des niveaux piézométriques de puits d'observation

Cette méthode d'évaluation repose sur l'hypothèse que les augmentations des niveaux de l'eau souterraine sont dues à l'eau qui atteint l'aquifère et qui contribue à la recharge (Scanlon *et coll.*, 2002; Healy et Cook, 2002). La méthode consiste à additionner toutes les augmentations notables de niveaux de la nappe et de les multiplier par la porosité de drainage S_y , avec l'équation :

$$R = S_y \sum \Delta h / \Delta t$$

où R est la recharge estimée, S_y est la porosité de drainage (*specific yield*), $\sum \Delta h / \Delta t$ est la somme des différences de niveaux piézométriques Δh sur la période de temps Δt considérée. Les valeurs de S_y ont été déterminées à partir de Johnson (1967). Un seul puits de suivi de niveau de la nappe libre a pu être utilisé sur le territoire de la CMQ, car cette méthode ne s'applique qu'aux puits crépinés dans un aquifère non confiné, ne subissant pas l'influence d'un pompage et dont les niveaux d'eau souterraine sont à de faibles profondeurs. De plus, cette méthode d'estimation est très sensible à la valeur de S_y , qui est particulièrement difficile à établir et peut être très variable pour les aquifères de roc fracturé avec une porosité de drainage très faible. Aucun puits installé dans le roc fracturé n'a donc servi à calibrer le modèle HELP[®].

Dans l'aquifère de dépôts meubles du delta de la rivière Jacques-Cartier, deux puits de suivi piézométrique ont permis d'estimer la recharge de l'aquifère à près de 300 mm pour l'année 2007. Cette valeur est similaire à la valeur de la recharge modélisée par HELP[®] à l'endroit des puits. Sur le territoire de la CMQ, 3 puits font partie du Réseau de suivi piézométrique du MDDEFP. Cependant, la méthode d'estimation de la recharge n'a pu être appliquée, car l'aquifère est soit confiné ou non représentatif de conditions régionales. Les quatre puits d'observation réalisés par l'Université Laval présentent également des conditions de confinement non propices à l'application de la méthode d'estimation, tout comme un des puits qui a été installé dans le roc fracturé. Suite aux travaux de calage, les paramètres qui sont retenus pour la modélisation de la recharge sont présentés au Tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Paramètres hydrauliques calibrés pour la modélisation du bilan hydrologique

Hydrofaciès		Porosité totale	Capacité au champ	Point de flétrissement	Conductivité hydraulique saturée verticale
Code	Définition	n (m ³ /m ³)	Cc (m ³ /m ³)	Pf (m ³ /m ³)	K _v (m/s)
HF1	Silt, argile silteuse, dépôt organique	0,45	0,40	0,30	2x10 ⁻⁹
HF2	Silt sableux/graveleux	0,399	0,318	0,27	2x10 ⁻⁷
HF3	Sable/gravier silteux	0,47	0,25	0,10	1x10 ⁻⁶
HF4	Sable	0,42	0,17	0,05	9x10 ⁻⁵
HF5	Sable et gravier	0,44	0,19	0,12	5x10 ⁻⁴
HF6	Hétérogène	0,42	0,17	0,05	9x10 ⁻⁵
HF7	Roc fracturé	0,05	0,04	0,035	5x10 ⁻⁷

4.8.4 Recharge des aquifères

Les résultats d'estimation de la recharge des aquifères avec le modèle numérique HELP[®] sont présentés de diverses manières. La Carte 28 et la Figure 4.15 montrent la distribution spatiale de la recharge moyenne sur la période de simulation (1980-2009) tandis que la Figure 4.16 présente les quartiles de la recharge moyenne en fonction des contextes hydrostratigraphiques de la CMQ tels que cartographiés pour le projet (Carte17 et Figure 4.6). De plus, il est possible de comprendre la variation moyenne mensuelle de chaque composante du bilan hydrologique à l'aide de la Figure 4.17. L'Annexe 8 peut être consultée afin de voir la répartition spatiale de chaque composante dans le bilan hydrologique : l'évapotranspiration (Figure A19), le ruissellement de surface (Figure A20), le ruissellement hypodermique (Figure A21) et la recharge (Figure 4.15 et Figure A22).

Dans les Laurentides, la distribution spatiale de la recharge (Carte 28 et Figure 4.15) illustre des taux de renouvellement des aquifères plus importants et qui varient généralement entre 400 et 500 mm/an tels que l'indiquent les quartiles du contexte 3 (Figure 4.16). Ce contexte est d'autant plus important, car il représente près du deux tiers (64 %) du territoire étudié. Les précipitations plus importantes (+110 mm/an) dans la zone des hautes terres par rapport à la zone des basses terres, ainsi que la perméabilité accrue des dépôts de surface qui s'y trouvent expliquent que la recharge y soit plus élevée. De plus, la radiation solaire plus faible et la plus courte saison de croissance des végétaux font en sorte que moins de précipitation participe à l'évapotranspiration et plus d'eau est disponible pour la recharge. Quelques zones des Laurentides montrent des taux de recharge plus faibles, notamment dans le fond des vallées où la densité urbaine est accrue et dans les épentes où le terrain est plus en pente. Ces deux situations ont pour effet d'augmenter le ruissellement de surface et par conséquent, de diminuer la recharge. Ces zones sont représentées en grande partie par les contextes 1 et 2 (Figure 4.16), pour lesquels la recharge varie entre 400 et 525 mm/an. Les dépôts organiques, représentés par le contexte 9 (Figure 4.16), semblent limiter la recharge à moins de 100 mm/an dans le secteur de la rivière Jacques-Cartier.

Dans la zone des basses terres, la recharge est moins importante, d'abord en raison des précipitations sont moins importantes. L'effet combiné de l'urbanisation, qui augmente le ruissellement, et la présence de dépôts meubles de faible perméabilité limitent aussi l'infiltration et réduisent la recharge. En effet, entre le tiers et le deux tiers des précipitations (environ 400 à 800 mm/an) seraient évacuées à la surface du sol par ruissellement dans la zone urbanisée de Québec et de Lévis (Figure A20 de l'Annexe 8). Les sols et dépôts quaternaires des basses terres sont plus silteux et argileux, ce qui accentue le ruissellement et, par conséquent, diminue l'eau disponible pour la recharge de l'aquifère. C'est le cas pour les contextes 8 et 10 (Figure 4.16), ce qui limite généralement la recharge à des taux de 50 à 100 mm/an. Ces contextes sont situés autant à Lévis, à Québec, à l'île d'Orléans qu'à Cap-Tourmente. De façon générale, le ruissellement hypodermique (Figure A21 de l'Annexe 8) est accentué dans ces contextes, car l'eau s'écoule latéralement à l'interface entre le premier mètre de sols perméables et les dépôts silto-argileux imperméables sous-jacents, pour ensuite faire émergence dans les réseaux de drainage. Pour le contexte hydrostratigraphique 6, retrouvé à Lévis et à l'île d'Orléans, le taux de recharge varie entre 150 et 300 mm/an. Cette variation provient de l'occupation du sol

variable pour cette zone, qui comprend à la fois un milieu urbain et un milieu agricole. Dans le cas des aquifères de dépôts meubles du Proto-Saint-Laurent (Contexte 7 de la Figure 4.16), la recharge est de l'ordre de 140 à 220 mm/an. Tel que mentionné précédemment, aucune mesure réelle (stations hydrométriques ou puits de suivi piézométrique) en zone urbaine ne permet de valider ces résultats avec un niveau de confiance aussi élevé qu'ailleurs sur le territoire.

La Figure 4.17 permet de mieux comprendre la contribution des composantes du bilan hydrologique au cours d'une année. Les courbes représentent les moyennes mensuelles de toutes les cellules de la CMQ pour les 30 années de simulation. La température de l'air est déterminante dans la modélisation de la recharge. Lorsque la température passe au-dessus du seuil de congélation (0°C), les précipitations accumulées sous forme de neige deviennent disponibles pour le ruissellement, l'évapotranspiration et l'infiltration. Cela explique qu'à partir du mois d'avril, le ruissellement de surface et hypodermique sont très élevés, car les sols sont gorgés d'eau et la capacité de percolation de l'eau vers l'aquifère est à son maximum tel qu'illustré par la courbe orange (Figure 4.17). Le retard d'environ un mois entre la fonte de la neige et l'augmentation de la recharge est causé par le temps nécessaire à l'eau de fonte pour s'infiltrer dans le sol et atteindre l'aquifère. Au mois de juillet, l'évapotranspiration devient la composante dominante du bilan hydrologique, car la température et la radiation solaire sont à leur apogée. Jusqu'en septembre, la recharge est fortement dépendante de ce processus d'évapotranspiration et des événements de précipitations. Plus tard en automne, la diminution de l'ensoleillement et le début de la saison de dormance des végétaux réduisent l'évapotranspiration et la recharge augmente à nouveau pendant une courte période automnale, jusqu'au gel du sol. Ces deux sommets de recharge des aquifères, observés à la fonte du couvert nival et à l'automne, sont typiques au Québec.

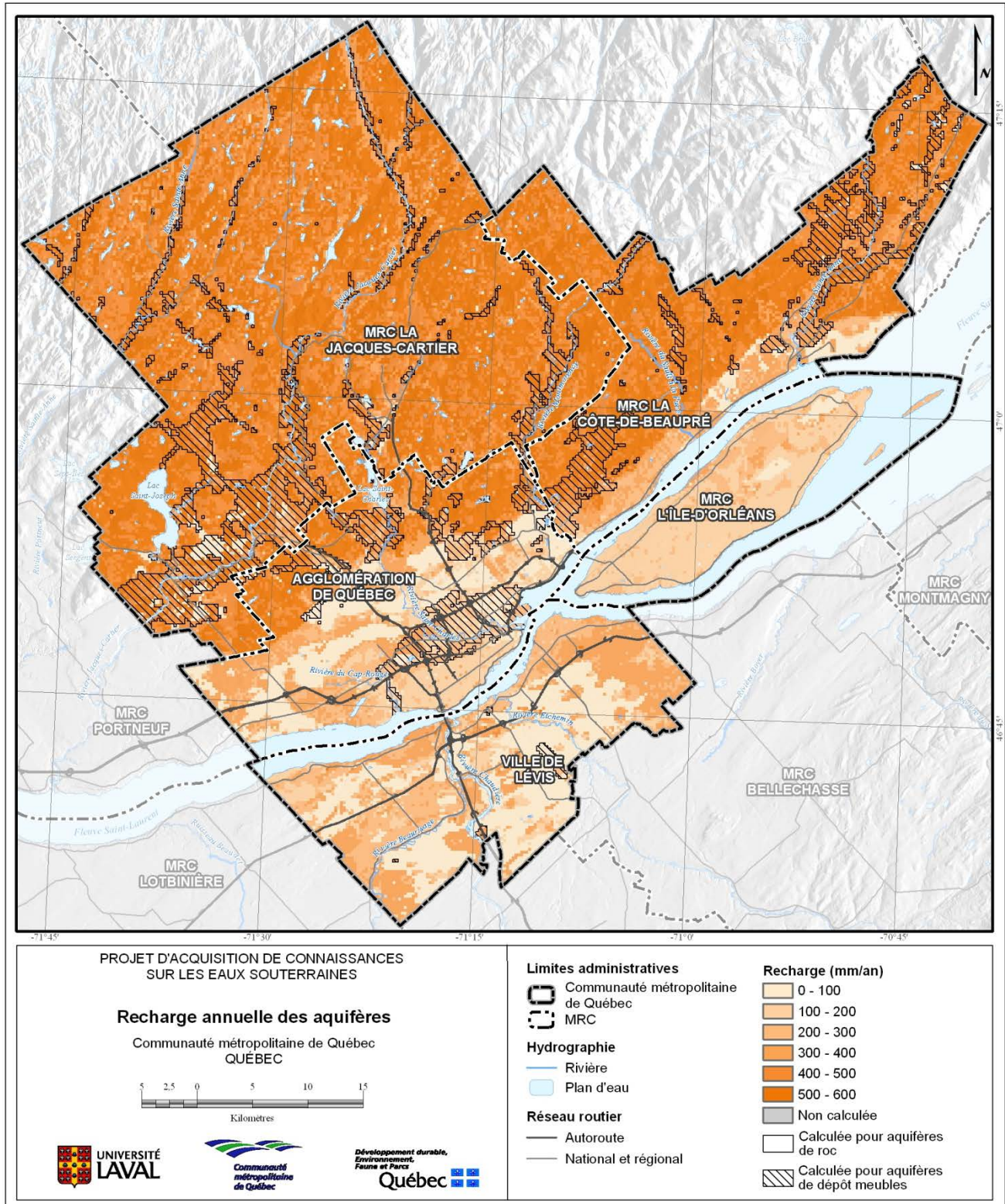


Figure 4.15 : Distribution spatiale de la recharge des aquifères

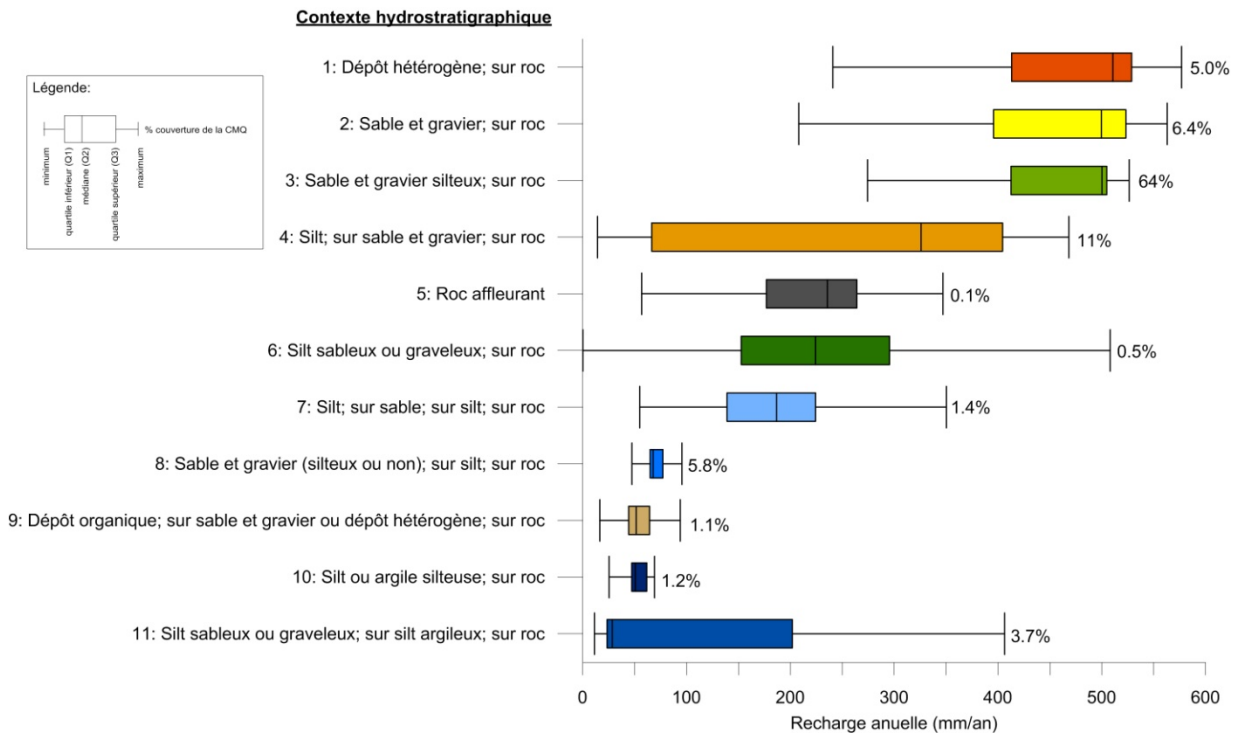


Figure 4.16 : Recharge modélisée par HELP® en fonction des contextes hydrostratigraphiques

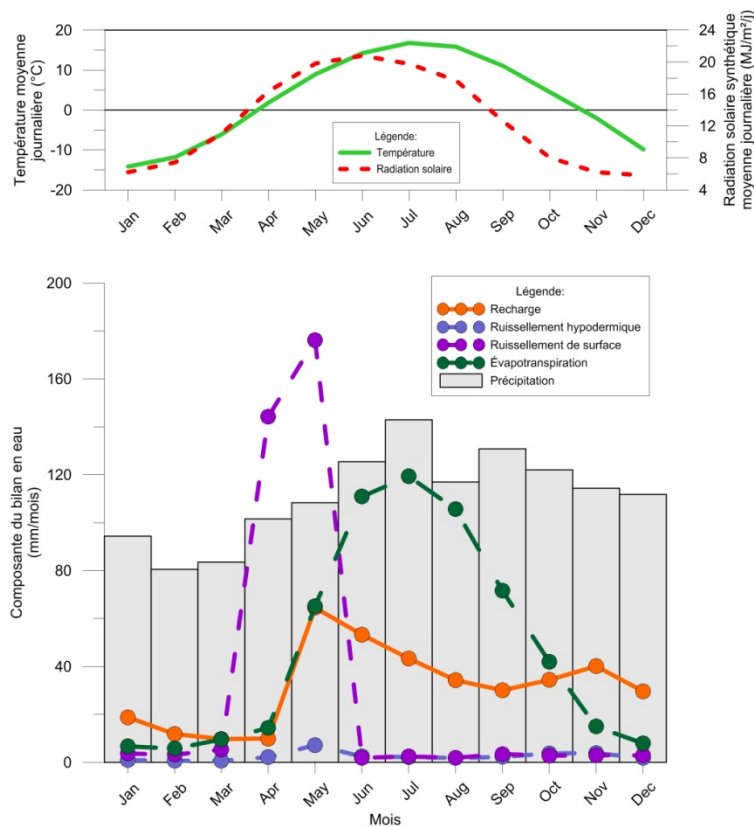


Figure 4.17 : Variation mensuelle des composantes du bilan hydrologique modélisées par HELP®

4.9 Géochimie de l'eau souterraine

4.9.1 Portrait géochimique des eaux souterraines

La détermination des types d'eau, ou faciès géochimiques, permet de comprendre l'évolution des eaux souterraines et les différents contextes hydrogéologiques. L'eau qui s'infiltré dans le sol est une eau souterraine jeune et peu évoluée, dont la composition chimique ressemble à celle de l'eau de pluie. À l'opposé, l'eau souterraine contenue dans certains aquifères peut s'être infiltrée il y a des centaines, voire des milliers d'années. C'est une eau souterraine plus vieille et évoluée, dont la composition chimique est différente de celle de l'eau de pluie suite à la dissolution de minéraux contenus dans les dépôts meubles et les roches. L'eau évoluée aura donc une concentration en solides dissous plus élevée que l'eau peu évoluée.

Les types d'eau, ou faciès géochimique, sont définis à partir des concentrations des ions majeurs retrouvés habituellement dans les eaux, c'est-à-dire le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le potassium (K), le sodium (Na), le bicarbonate (HCO_3), les sulfates (SO_4) et les chlorures (Cl). Le faciès Ca- HCO_3 représente des eaux jeunes et fraîches associées à des zones de recharge, alors que le faciès Na-Cl définit des eaux plus évoluées et différenciées ou des eaux d'origine marine. Les autres faciès représentent des eaux d'évolution intermédiaire où les cations évoluent du Ca vers le Mg-K et le Na et les anions du HCO_3 vers le SO_4 et le Cl.

Sur le territoire de la CMQ, le faciès le plus commun (46% des échantillons) est le Ca- HCO_3 , qui est associé à des zones de recharge. Il se retrouve presque qu'exclusivement sur la rive nord du Saint-Laurent, dans la province géologique de Grenville. À l'opposé, les faciès dominants à l'île d'Orléans et à Lévis sont sodiques, de type Na- HCO_3 et Na-Cl, ce qui implique un plus haut niveau d'évolution géochimique des eaux circulant dans la Plate-forme du Saint-Laurent ou dans les Appalaches. La Figure 4.18 et le Tableau 4.6 montrent la répartition des types d'eau sur le territoire en fonction des provinces géologiques.

Tableau 4.6 : Types d'eau selon la province géologique

Types d'eau	Grenville	Appalaches	Plate-forme du Saint- Laurent	Total	
Ca- HCO_3	53	4	2	59	46%
Mixte- HCO_3	2	0	0	2	2%
Na- HCO_3	7	21	4	32	25%
Ca- SO_4	1	2	0	3	2%
Ca-Cl	5	2	0	7	6%
Mixte-Cl	0	0	1	1	1%
Na-Mixte	0	1	0	1	1%
Na-Cl	12	8	2	22	17%

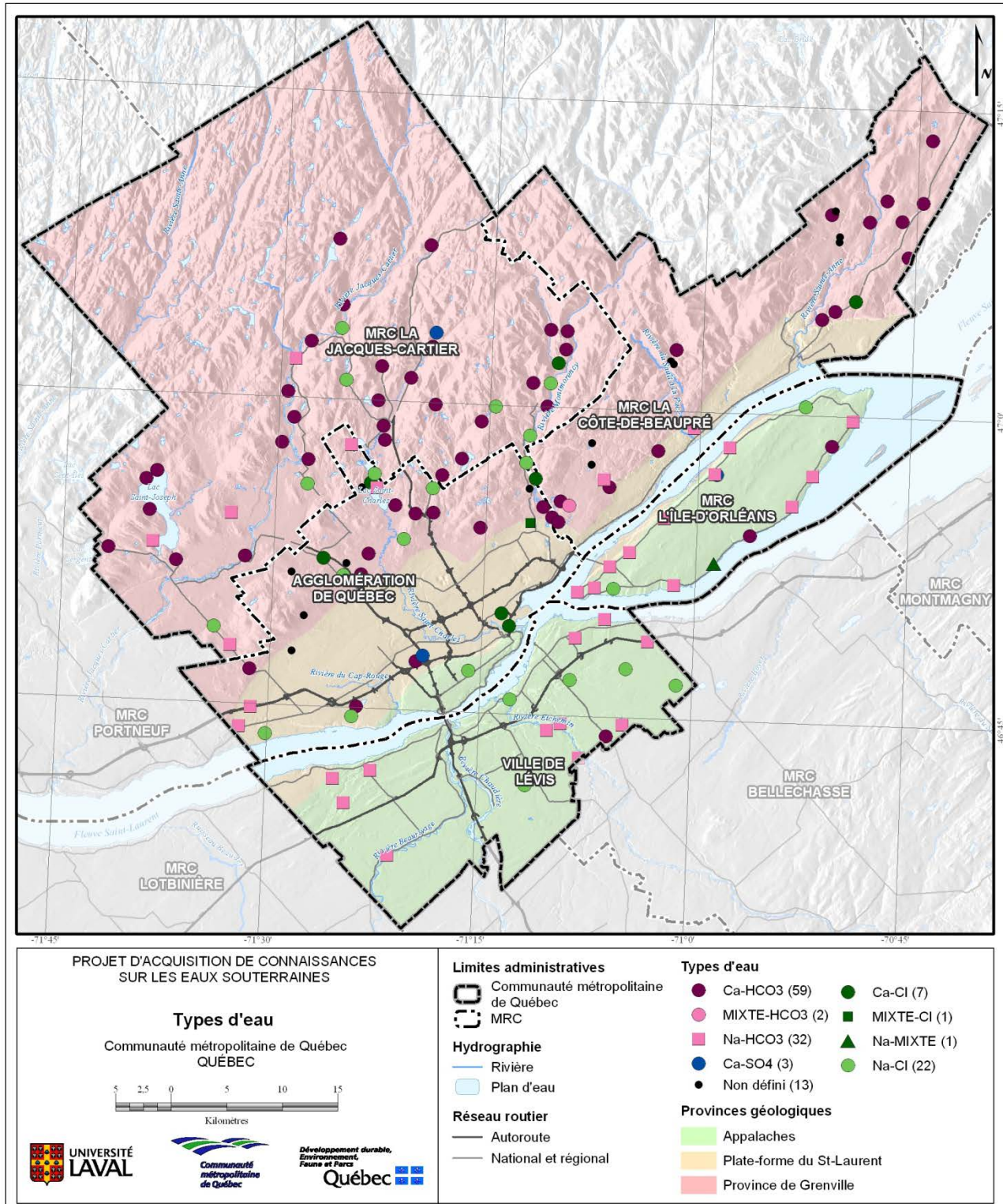


Figure 4.18 : Répartition des types d'eau

La définition des types d'eau, à elle seule, ne permet pas de dresser un portrait géochimique complet des eaux souterraines de la CMQ. Ainsi, une analyse plus approfondie des données géochimiques a été réalisée dans le cadre d'un projet de maîtrise (Nadeau, 2013), dont les résultats sont présentés sommairement ci-dessous.

À partir d'une analyse statistique multivariante, les données recueillies au cours des campagnes d'échantillonnage ont été analysées et divisées en 8 groupes, dont la répartition spatiale est montrée sur la Figure 4.19. Au nord, les eaux des groupes G2 et G5 représentent le domaine laurentien (zone en vert). Ce sont des eaux de type Ca-HCO₃ associées aux zones de recharge, qui sont donc très pauvres en éléments dissous. Les deux groupes se distinguent principalement par leur niveau d'acidité, le groupe G2 étant acide et le groupe G5 plus alcalin. De plus, en raison de ses pH acides, les eaux du groupe G2 contiennent de faibles quantités de métaux dissous (plomb, zinc et cuivre).

Plus au sud, à Lévis et à l'île d'Orléans, les eaux appalachiennes (zone en rouge) des groupes G4 et G6 montrent une plus grande évolution géochimique. Elles sont très sodiques et principalement de type Na-HCO₃ et Na-Cl. Les deux groupes sont alcalins et ont des potentiels d'oxydoréduction faibles. Ils se caractérisent aussi par d'importantes concentrations en matières dissoutes totales. Le groupe G4 se distingue par sa dureté élevée (Ca et Mg en grandes concentrations) alors que G6 ne contient pas de calcium et semble être caractéristique des eaux souterraines à l'île d'Orléans.

Entre les deux domaines précédents se trouvent les eaux transitionnelles des groupes G8, G1 et G7 (zone en bleu). Bien qu'elles soient peu évoluées, ces eaux n'ont pas une signature typique des zones de recharge, car elles contiennent une certaine quantité d'éléments en solution. Les eaux alcalines du groupe G8, qui semblent être les moins évoluées des trois groupes, ont de grandes concentrations en fluorure. Le groupe G7 est, quant à lui, caractérisé par les plus grandes concentrations en nitrite-nitrate et par des pH acides. Tout comme le groupe G2, le groupe G7 contient aussi de faibles concentrations de plomb, zinc et cuivre dissous en raison des pH acides.

Finalement, le groupe G3 correspond aux eaux dans le secteur urbanisé et présente un niveau d'évolution intermédiaire. Il se différencie des autres groupes par sa dureté et ses concentrations importantes en fer et en manganèse. Tout comme les eaux du domaine appalachien, les eaux du groupe G3 sont riches en matières dissoutes totales.

Le Tableau 4.7 résume les caractéristiques chimiques de chacun des groupes. Les valeurs représentent les concentrations médianes. Pour chaque paramètre présenté, la valeur du groupe présentant la plus grande et la plus petite médiane est respectivement en gras ou soulignée.

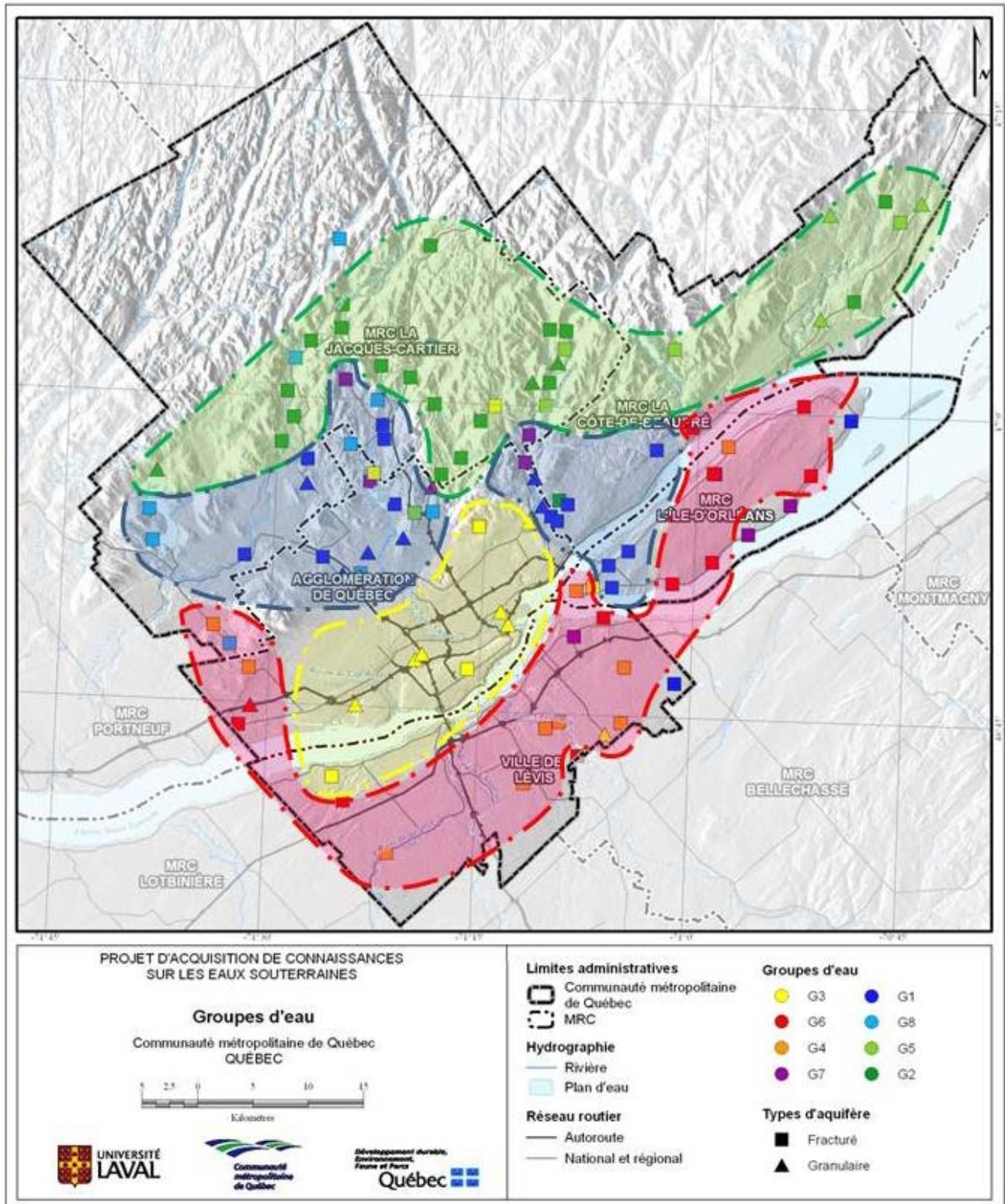


Figure 4.19 : Distribution spatiale des groupes d'eau

Tableau 4.7 : Valeurs médianes des paramètres géochimiques des groupes d'eau

Paramètre	G2	G5	G8	G1	G7	G3	G4	G6
	n = 23	n = 8	n = 10	n = 21	n = 9	n = 13	n = 10	n = 11
pH	6,62	8,24	8,89	7,66	<u>6,17</u>	7,35	9,00	9,56
MDT	<u>21,5</u>	24,8	38,1	56,6	71,7	139,7	157,0	97,5
O. D.	7,77	8,85	1,34	3,41	7,74	1,69	<u>0,33</u>	0,90
Eh	374	151	156	319	386	154	<u>-13</u>	67
Na	3,7	<u>2,7</u>	14,6	14,7	31,2	61,2	142,6	117,6
Ca	13,0	15,5	12,5	17,5	19,8	21,0	28,8	<u>0,7</u>
Mg	2,48	2,12	1,34	3,86	4,54	6,93	5,17	<u>0,14</u>
Cl	4,0	<u>1,0</u>	4,4	17,0	36,0	66,4	97,7	31,0
SO4	6,06	<u>4,80</u>	8,18	17,00	21,00	19,09	20,00	19,00
HCO3	92,3	52,4	122,3	62,8	<u>46,1</u>	162,9	62,2	64,1
K	0,60	<u>0,46</u>	0,75	1,64	2,12	1,80	2,29	1,10
Sr	<u>0,045</u>	0,067	0,145	0,163	0,228	0,495	1,116	0,042
Fe	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	6,67	0,05	0,05
F	<u>0,130</u>	0,156	2,090	0,150	0,140	0,185	1,160	0,570
NO2-NO3	0,467	0,210	0,045	0,270	1,810	0,050	<u>0,023</u>	0,030
NH4	0,05	0,05	0,13	0,05	0,11	0,23	0,29	0,14
Ba	<u>0,001</u>	0,002	0,004	0,008	0,050	0,150	0,429	0,057
B	0,0025	0,0025	0,0253	0,0103	0,0183	0,0423	0,3142	0,1782
Br	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,25	0,05	0,05
Mn	0,0033	<u>0,0004</u>	0,0023	0,0009	0,0032	0,6542	0,0304	0,0029
Cu	0,00700	0,00025	0,00072	0,00025	0,01700	0,00025	0,00025	0,00025
Pb	0,00028	0,00005	0,00008	0,00005	0,00072	0,00005	0,00005	0,00005
Zn	0,0104	0,0044	0,0025	0,0025	0,0188	0,0069	0,0057	0,0025
Si	5,62	7,32	4,44	4,27	4,25	7,06	4,38	<u>4,04</u>

Note: n : Nombre d'échantillons

en gras : Valeur médiane maximale pour un même paramètre en comparant chaque groupes;

en souligné : Valeur médiane minimale pour un même paramètre en comparant chaque groupes

La signature géochimique de chacun des groupes et leur répartition spatiale sur le territoire suggèrent que les eaux de recharge proviennent de l'eau de pluie et que leur composition chimique est influencée par la nature du roc et des dépôts meubles. Au centre de la zone d'étude et à Lévis, les eaux de recharge se semblaient être mélangées avec les eaux marines de l'ancienne Mer de Champlain piégées dans les aquifères, en particulier dans ceux qui sont confinés ou semi confinés. La recharge des eaux de la rive sud s'effectuerait dans les hauts topographiques plus au sud de la zone d'étude, dans le piémont appalachien (Benoit et coll., 2011).

4.9.2 Qualité de la ressource

Afin de définir la qualité de l'eau souterraine dans les aquifères de la CMQ, les résultats analytiques ont été comparés aux normes et recommandations en vigueur au Québec. Les normes de potabilité proviennent du *Règlement sur la qualité de l'eau potable* (Gouvernement du Québec, 2013b) et sont sous forme de concentration maximale acceptée (CMA). Pour les objectifs esthétiques (OE), les valeurs de référence proviennent des *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada* du Comité fédérale-provincial-territorial sur les eaux potables (CEP, 2012). Dans le texte qui suit, les

échantillons « PACES » réfèrent aux échantillons prélevés dans le cadre du projet alors que les échantillons « BD » réfèrent aux autres données existantes compilées dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ. La méthodologie et la préparation des résultats sont en accord avec le protocole du GRIES (2012) disponible à l'Annexe E7.

Les critères de potabilité sont établis pour des substances qui, consommées en trop grande quantité, pourraient avoir des effets néfastes sur la santé humaine. Le Tableau 4.8 présente le sommaire des dépassements des critères de potabilité. Pour les échantillons PACES, seuls les fluorures (12,9 %) et le baryum (1,4 %) et présentent des dépassements (Figure 4.20) qui pourraient être d'origine naturelle. Dans le cas du baryum, une trop grande consommation pourrait entraîner des maladies cardiovasculaires ou une augmentation de la pression artérielle. À petite dose, le fluorure prévient la carie mais, à grande dose, il peut causer la fluorose dentaire (CEP, 2012). Les échantillons BD présentent quelques dépassements pour 6 paramètres : le baryum (4,9 %), plomb (1,9 %), l'arsenic (1,8 %), les fluorures (1,6 %), le chrome (1,4 %) et le cadmium (0,2 %). Globalement, il existe peu de dépassements critères de potabilité des eaux de la CMQ, qui peut être qualifiée de bonne pour la consommation.

La qualité bactériologique de l'eau souterraine n'a pas été étudiée dans le cadre du PACES-CMQ car la présence de bactéries ou de coliformes reflète une problématique locale, à l'échelle du puits et de son environnement immédiat. Une étude récente menée par Dion-Dupont *et coll.* (2013) a démontrées que 43 % et 16 % de 660 puits échantillonnés à l'île d'Orléans à l'été 2012 dépassait les normes d'eau potable pour les coliformes et les bactéries *Escherichia coli* (*E. coli*), respectivement. À titre indicateur, 192 puits ont été échantillonnés ailleurs dans la CMQ et les dépassements y sont moins fréquents pour les mêmes paramètres : 10 % pour les coliformes totaux et 5 % pour les bactéries *E. coli*. De manière générale, les cas des contaminations bactériologiques émanant de cette étude semblent être deux fois plus fréquents dans le cas d'un puits de surface en comparaison avec un puits tubulaire. En région rurale, lorsqu'il n'y a pas de réseau d'égouts sanitaires, la bactérie *E. coli* peut être associée aux installations septiques plus ou moins adéquates des résidences isolées ou aux épandages excédentaires de fumier ou de lisier sur les terres agricoles (Gouvernement du Québec, 2004).

La présence potentielle de pesticides dans l'eau souterraine n'a également pas été étudiée dans le cadre du PACES-CMQ. Les pesticides utilisés majoritairement en milieu agricole, mais aussi en milieu urbain (pelouse, aménagement paysager, golf, etc.) représentent une source de contamination des eaux souterraines. Les pesticides font l'objet d'un suivi par le MDDEFP près de cultures de pommes de terre et de maïs ainsi qu'à proximité des vergers et de bleuetières (MDDEFP, 2013d).

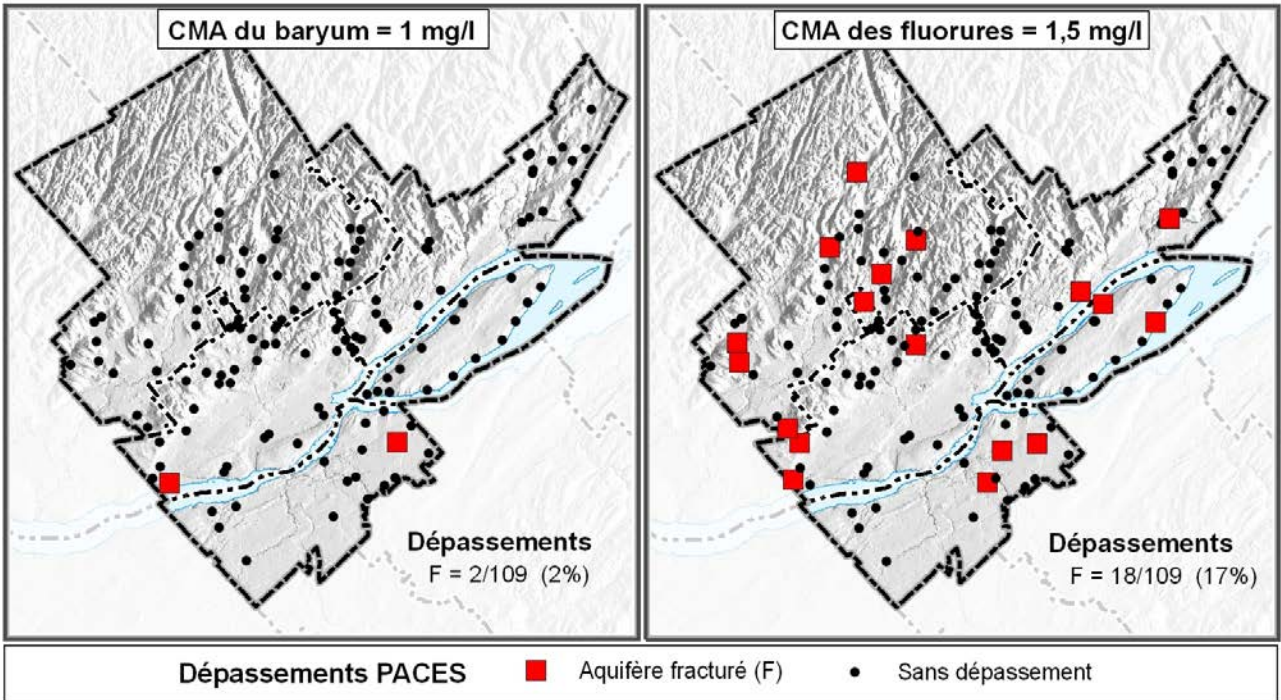


Figure 4.20 : Distribution spatiale des dépassements en Ba et F⁻

Tableau 4.8 : Sommaire des dépassements des critères de potabilité

Paramètre	CMA ^a (mg/l)	Échantillons PACES						Échantillons BD					
		N échantillon	Quartile 25 (mg/L)	Quartile 50 (mg/L)	Quartile 75 (mg/L)	N dépassement (mg/L)	N dépassement (%)	N échantillon	Quartile 25 (mg/L)	Quartile 50 (mg/L)	Quartile 75 (mg/L)	N dépassement (mg/L)	N dépassement (%)
As	0,01	140	0,0005	0,0005	0,0005	0	0	1770	0,002	0,002	0,002	31	1,8
B	5	140	0,0025	0,0148	0,0552	0	0	65	0,025	0,030	0,080	0	0
Ba	1	140	0,001	0,009	0,107	2	1,4	1728	0,045	0,135	0,295	85	4,9
Cd	0,005	140	0,0001	0,0001	0,0001	0	0	1840	0,0001	0,0001	0,0001	4	0,2
Cr	0,05	140	0,00025	0,00025	0,00025	0	0	216	0,0009	0,0028	0,0100	3	1,4
F	1,5	140	0,110	0,217	0,557	18	12,9	1724	0,06	0,11	0,26	27	1,6
NO₂-NO₃	10	140	0,038	0,145	0,561	0	0	538	0,09	0,31	1,00	0	0
Pb	0,01	140	0,00005	0,00008	0,00025	0	0	1849	0,001	0,001	0,001	35	1,9
Sb	0,006	140	0,0005	0,0005	0,0005	0	0	23	0,0005	0,0005	0,0030	0	0
Se	0,01	140	0,0005	0,0005	0,0005	0	0	39	0,0005	0,0005	0,0010	0	0
U	0,02	140	0,0005	0,0005	0,0005	0	0	1599	0,0002	0,0004	0,0008	0	0

Note : ^a : Concentration maximale acceptée d'après le Règlement sur la qualité de l'eau potable (Gouvernement du Québec, 2013b)
N : nombre

Tableau 4.9 : Sommaire des dépassements des objectifs esthétiques

Paramètre	OE ^a (mg/l)	Échantillons PACES						Échantillons BD					
		N échantillon	Quartile 25 (mg/L)	Quartile 50 (mg/L)	Quartile 75 (mg/L)	N dépassement (mg/L)	N dépassement (%)	N échantillon	Quartile 25 (mg/L)	Quartile 50 (mg/L)	Quartile 75 (mg/L)	N dépassement (mg/L)	N dépassement (%)
Al	0,1	140	0,0005	0,0013	0,0042	6	4,3	26	0,008	0,008	0,014	0	0
Cl	250	140	2	13	45	9	6,4	2185	7	19	15	88	4,0
Cu	1 ^b	140	0,00025	0,00059	0,00448	0	0	1901	0,002	0,010	0,038	2	0,3
Dureté totale	200	109	25	49	85	5	4,6	432	36	68	137	49	11,3
Fe	0,3	140	0,05	0,05	0,05	17	12,1	2129	0,1	0,1	0,3	485	22,8
Mn	0,05	140	0,001	0,005	0,024	24	17,1	1753	0,010	0,029	0,136	726	41,4
MDT	500	109	134	194	391	21	19,3	82	182	264	360	6	7,3
Na	200	140	3	13	65	13	9,3	1784	8	25	80	67	3,8
pH	6,8-8,5 ^b	138	6,75	7,66	8,79	69	50,0	501	6,84	7,70	8,30	171	34,1
SO ₄	500	140	6	11	21	1	0,7	1847	6	13	24	0	0
Sulfures totaux	0,05	140	0,01	0,01	0,01	11	7,9	98	0,01	0,02	0,05	24	24,5
Zn	5	140	0,0025	0,0065	0,0111	0	0	1846	0,004	0,040	0,010	0	0
Température (en °C)	15	138	8	9	10	0	0	7	6	6	7	0	0

Note : ^a : D'après les Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Tableau sommaire (CEP, 2012).

^b : D'après le Règlement sur la qualité de l'eau potable (Gouvernement du Québec, 2013b)

N : nombre

Les objectifs esthétiques sont définis pour les paramètres ayant un impact sur les caractéristiques esthétiques de l'eau (couleur, odeur, goût), mais n'ayant pas d'effets néfastes reconnus sur la santé humaine. Les paramètres dont la présence peut entraîner la corrosion ou l'entartrage des puits ou des réseaux d'alimentation en eau sont aussi visés par ces objectifs. Le Tableau 4.9 présente les dépassements des objectifs esthétiques. Dans les échantillons PACES, des dépassements sont observés pour le pH (50,0 %), la matière dissoute totale (19,3 %), le manganèse (17,1 %), le fer (12,1 %), le sodium (9,3 %), les sulfures (7,9 %), les chlorures (6,4 %), la dureté (4,6 %), l'aluminium (4,3 %) et les sulfates (0,7 %). Les échantillons « BD » présentent généralement les mêmes dépassements.

Les dépassements en Na-Cl (Figure 4.21) se retrouvent presque exclusivement dans la Plate-forme du Saint-Laurent et dans les Appalaches, sous la limite d'incursion marine (210 m d'élévation sur la rive nord). Seulement 2 dépassements apparaissent dans la province de Grenville. Plusieurs sources de Na-Cl existent, incluant les sédiments marins datant de la Mer de Champlain, la roche en place, le sel déglaçant des routes, les sites d'enfouissement et les dépôts à neige. La Mer de Champlain est cependant la source la plus probable de Na-Cl. Les dépassements en Na-Cl vont de paire avec les dépassements en matières dissoutes totales (Figure 4.22) et sont ainsi caractéristiques d'une évolution avancée des eaux souterraines.

Le fer, le manganèse et le pH sont les paramètres présentant le plus de dépassements. La distribution spatiale des concentrations de fer et manganèse sont similaires. L'ensemble des puits échantillonnés dans la basse ville de Québec montre des dépassements en Fe et en Mn. C'est aussi dans ce secteur que sont localisés 3 des 5 dépassements des normes de dureté (Figure 4.22). L'eau souterraine dans ce secteur n'est cependant pas utilisée pour alimenter la population. Le secteur est essentiellement desservi par un réseau d'aqueduc municipal s'approvisionnant principalement en eaux de surface (section 5.3).

Les dépassements pour l'aluminium sont dispersés sur le territoire, mais ont été retrouvés uniquement dans les aquifères fracturés. Les dépassements pour les sulfures sont localisés dans la partie ouest de la CMQ, tant dans les aquifères de dépôts meubles que de roc fracturé. Finalement, la distribution des dépassements pour le pH (Figure 4.23) illustre que les eaux de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches sont plutôt basiques. C'est aussi dans ces aquifères que les eaux sont les plus alcalines et réductrices. À l'opposé, les eaux plus acides se retrouvent presque exclusivement dans la province de Grenville.

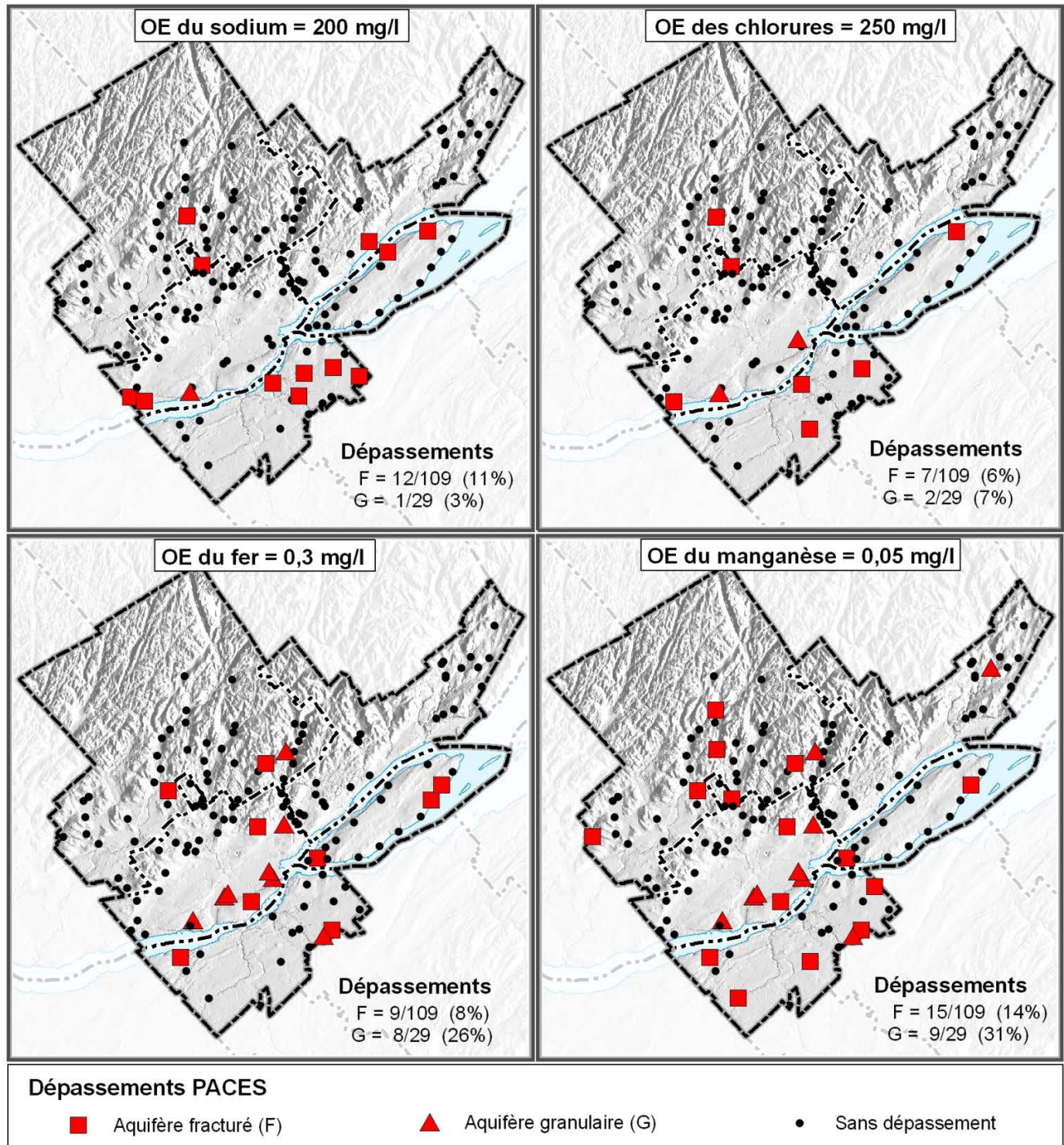


Figure 4.21 : Distribution spatiale des dépassements en Na, Cl, Fe et Mn

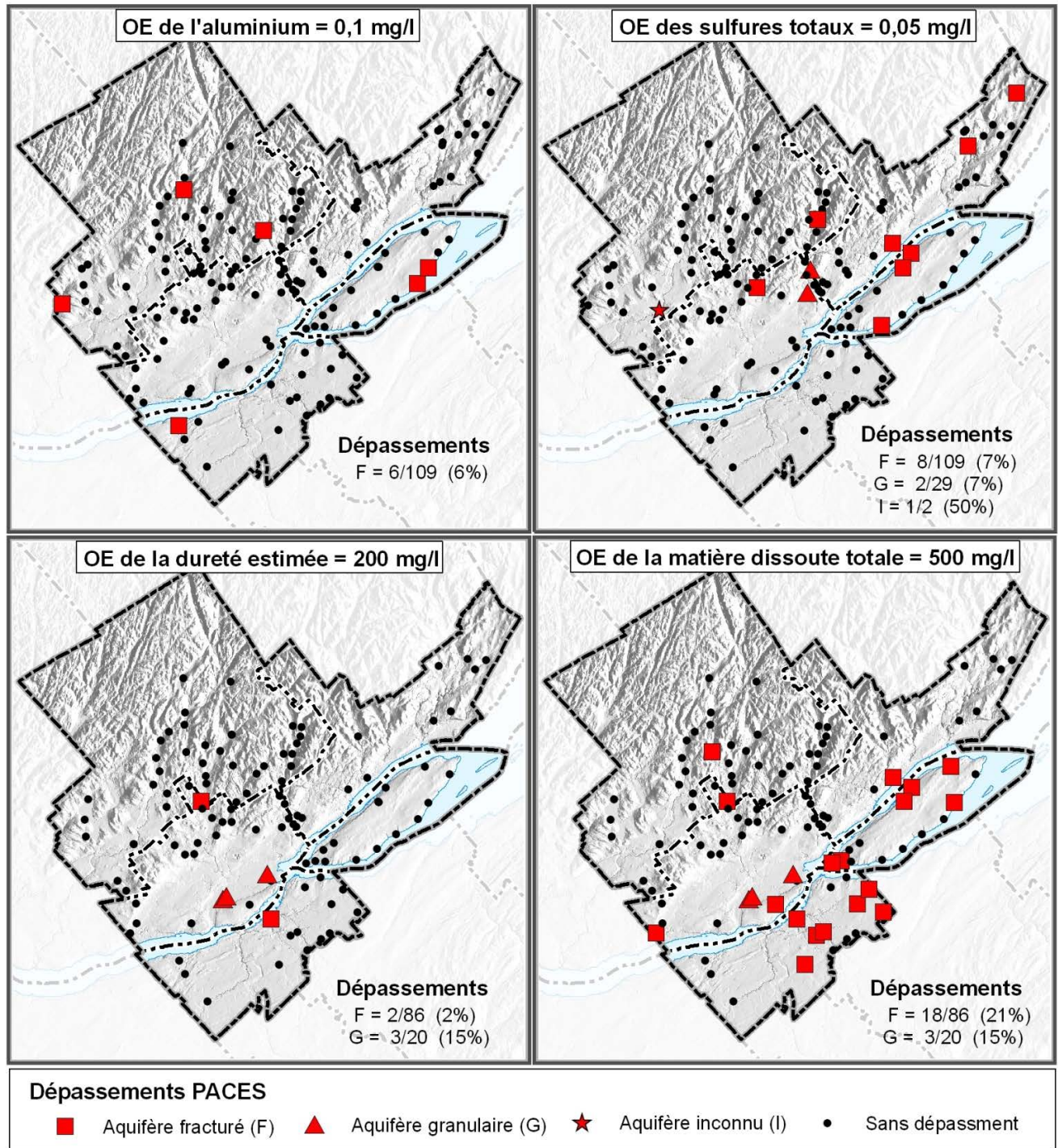


Figure 4.22 : Distribution spatiale des dépassements en Al, Sulfures, Dureté et MDT

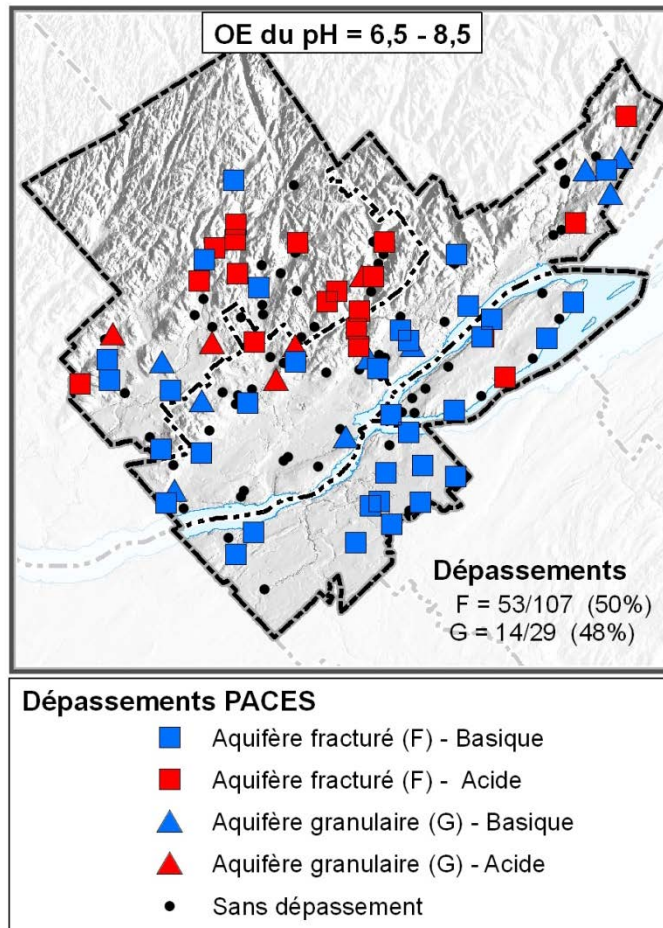


Figure 4.23 : Distribution spatiale des dépassements pour le pH

À partir de l'analyse des résultats issus des campagnes d'échantillonnage des eaux souterraines de la CMQ, les dépassements des normes de potabilité ou esthétiques semblent être d'origine naturelle. La nature du roc et des dépôts meubles ainsi que l'incursion de la Mer de Champlain peuvent expliquer les dépassements en Ba, F, Na, Cl, Mn, Fe, Al, sulfures, dureté et MDT. Le pourcentage d'échantillons montrant des dépassements des critères de potabilité est faible, la qualité naturelle des eaux souterraines de la CMQ peut donc être considérée comme bonne.

4.10 Synthèse des contextes hydrogéologiques

Les sections 4.1 à 4.9 ont décrit les étapes menant à la compréhension des contextes hydrogéologiques. Un regroupement des unités géologiques en hydrofaciès, la construction de coupes et l'élaboration d'un modèle 3D ont été réalisés afin de mieux comprendre les contextes stratigraphiques. Ces analyses ont permis de localiser les aquifères régionaux de dépôts meubles ou de roc fracturé puis d'évaluer leur niveau de confinement. La piézométrie, les propriétés hydrauliques, les taux de recharge des aquifères de même que la qualité de l'eau souterraine qu'ils contiennent ont également été examinés. À la lumière des résultats et discussions qui ont porté sur ces différents volets, la compréhension des systèmes aquifères de la CMQ peut être synthétisée en six grands contextes hydrogéologiques (Figure 4.24) :

1. Les Laurentides
2. Les complexes fluvioglaciaires et deltaïques
3. La couronne nord des Basses-terres du Saint-Laurent
4. Le Proto-Saint-Laurent
5. L'île d'Orléans et le Promontoire de Québec
6. La rive sud

4.10.1 Les Laurentides

Le contexte hydrogéologique des Laurentides, portant le même nom que la région physiographique dans laquelle il se trouve, est présent dans la partie nord de la CMQ et reflète les conditions prévalant sur près du deux tiers du territoire étudié. Des dépôts de tills, composés de sable et gravier silteux, y sont généralement minces et ont des perméabilités moyennement élevées. Par conséquent, ces dépôts ne confinent pas l'aquifère de roc fracturé sous-jacent. Cet aquifère est caractérisé par des perméabilités très faibles à moyennes qui dépendent de l'ouverture, de l'espacement et de la connectivité des réseaux fractures au sein du roc. L'eau souterraine s'écoule dans ces réseaux de fractures et son écoulement est sous l'influence des variations topographiques. À l'échelle locale, l'écoulement se fait des zones de recharge de l'eau souterraine sur les hauts topographiques vers les zones de résurgence dans les cours d'eau circulant entre les collines. Les taux de recharge de l'aquifère de roc des Laurentides sont parmi les plus élevés de la région de la CMQ, car cette portion du territoire bénéficie notamment, d'une plus grande quantité de précipitation et de la présence de sols perméables. La recharge élevée a pour effet de renouveler l'eau souterraine qui peut résider plus ou moins longtemps dans l'aquifère selon les conditions hydrauliques variables du roc (densité, ouverture, connectivité des fractures). Ainsi, l'eau souterraine est très peu évoluée et donc, peu chargée en ions majeurs.

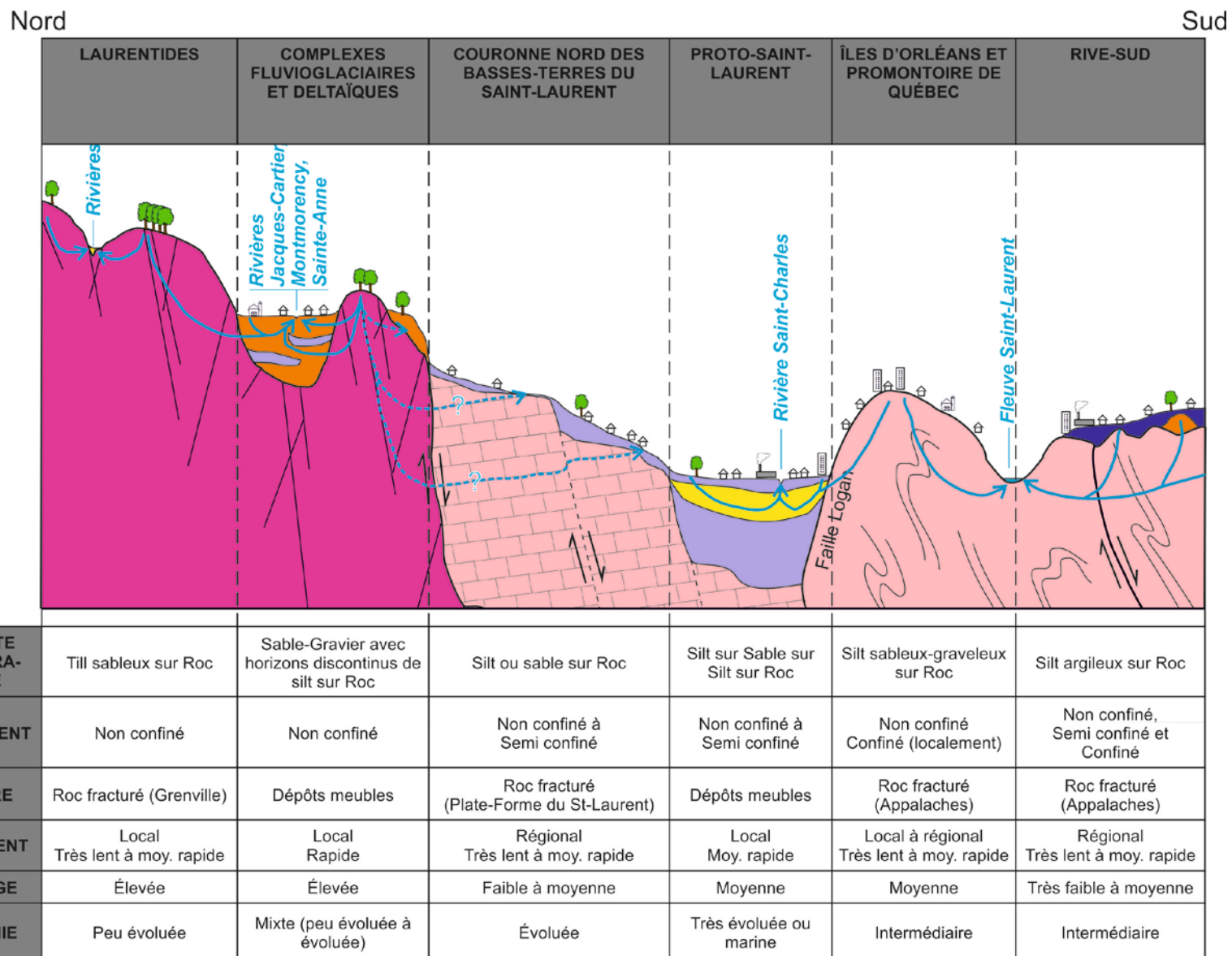


Figure 4.24 : Synthèse des contextes hydrogéologiques

4.10.2 Les complexes fluvioglaciaires et deltaïques

Les complexes fluvioglaciaires et deltaïques sont également localisés dans le nord de la CMQ, dans la région physiographique des Laurentides et sur le piémont laurentien. Ce contexte hydrogéologique représente les grands ensembles sédimentaires déposés dans les anciennes vallées glaciaires creusées dans le socle rocheux de la Province de Grenville et débouchant sur la Plate-forme du Saint-Laurent. Ces complexes sont particulièrement importants dans les vallées des rivières Jacques-Cartier, Montmorency et Sainte-Anne. Les dépôts meubles sont généralement composés de sable et/ou de gravier d'épaisseur variable et ils constituent un bon aquifère compte tenu des conductivités hydrauliques élevées à très élevées. Les dépôts sont généralement plus minces au nord de la CMQ et peuvent atteindre 50 m et plus à l'approche du piémont. Lorsqu'ils sont plus épais, ces complexes peuvent contenir des horizons de silt prodeltaïque d'épaisseurs variables et discontinus. Ces horizons peuvent alors mener à des conditions hydrogéologiques complexes et difficiles à caractériser autant à l'échelle locale que régionale. Ainsi, il est possible de retrouver localement des aquifères de dépôts meubles non confinés, parfois perchés sur les silts, tout comme des aquifères semi confinés à confinés sous ces horizons silteux de faible perméabilité. Régionalement, ces complexes aquifères semblent en lien hydraulique avec le roc sous-jacent. La structure interne de ces ensembles sédimentaires peut mener à des directions d'écoulement souterrain fort complexes. La recharge de l'aquifère dans ce contexte est la plus élevée de la région de la CMQ, car la perméabilité des dépôts en surface favorise l'infiltration des précipitations dans le sol jusqu'à l'aquifère. Une grande variabilité des conditions de confinement expliquerait également que la signature géochimique soit caractéristique d'une eau jeune à évoluée, dépendant des différents parcours empruntés par l'eau dans le sous-sol.

4.10.3 La couronne nord des Basses-terres du Saint-Laurent

La couronne nord des Basses-terres du Saint-Laurent est un contexte présentant des dépôts de sable silteux, silt sableux et silt argileux ayant une perméabilité moyenne à très faible. Lorsque peu perméables, ces dépôts d'origine marine agissent comme une couche qui, selon son épaisseur, confine ou non l'aquifère sous-jacent de roc fracturé de la Plate-forme du Saint-Laurent. Ces unités de roc fracturé, constituées de calcaire silteux, shale et lamines de grès, ont des perméabilités similaires à celles de la Province de Grenville, c'est-à-dire très faibles à moyennes. L'eau souterraine s'écoule à partir du sommet des collines pour faire résurgence à des distances moyennes au niveau des cours d'eau ou directement dans le fleuve Saint-Laurent. La perméabilité moyenne à très faible des dépôts recouvrant l'aquifère de roc, combinée à des précipitations plus faibles que dans le nord de la CMQ et à l'imperméabilisation des sols provenant de l'urbanisation, diminuent considérablement la recharge de l'aquifère de roc. Bien que peu d'analyses géochimiques aient été obtenues dans ce contexte à cause d'une faible disponibilité de puits, cette zone offre une transition entre les eaux de recharge des Laurentides et les eaux souterraines généralement plus évoluées des Basses-terres du Saint-Laurent.

4.10.4 Le Proto-Saint-Laurent

Le contexte du Proto-Saint-Laurent est situé dans la basse ville de Québec et à l'embouchure de la rivière Cap-Rouge. Ce contexte est caractérisé par un empilement de silt sur sable sur silt sur roc. Les aquifères de dépôts sableux de perméabilité élevée peuvent atteindre une épaisseur maximale de 24 m à l'endroit de la rivière Saint-Charles et 30 m à l'embouchure de la rivière Cap-Rouge. De manière générale, ces aquifères sont non confinés, mais peuvent être semi confinés où les alluvions silteuses de faible perméabilité sont plus épaisses. Cet aquifère de roc est présent sous cette succession de dépôts meubles. Il est majoritairement confiné et il est composé d'ardoise et dolomie de la Plate-forme du Saint-Laurent. Dans les aquifères sableux, l'eau souterraine s'écoule vers la rivière Saint-Charles ou la rivière Cap-Rouge, puis vers le fleuve Saint-Laurent. Ces aquifères se rechargent à un taux moyen en raison de la densité du milieu urbain ainsi que de la faible perméabilité des dépôts de silt en surface. La composition hydrogéochimique des aquifères de dépôts meubles suggère que l'eau souterraine qui y circule est très évoluée ou d'origine marine.

4.10.5 L'île d'Orléans et le Promontoire de Québec

Dans le contexte hydrogéologique de l'île d'Orléans, l'unité hydrostratigraphique dominante est un silt sableux et graveleux de faible perméabilité, ayant une épaisseur généralement inférieure à 7 m. Par endroit, où les dépôts sont plus épais, il est possible de distinguer des petites zones de silt ou d'argile silteuse qui confinent localement le roc fracturé, seul aquifère exploitable sur l'île. Les roches qui composent cet aquifère sont un mélange de shale et de grès typique des Appalaches, avec des perméabilités très faibles à moyennes selon l'intensité de fracturation. L'eau souterraine s'écoule radialement, du centre de l'île vers son contour, pour faire résurgence au fleuve Saint-Laurent. Le taux de recharge de l'aquifère est moyen en comparaison avec les autres contextes hydrogéologiques de la région. Un niveau d'évolution géochimique intermédiaire est observé sur le pourtour de l'île où sont localisées la plupart des habitations. Cela signifie que le temps de résidence de l'eau souterraine est relativement élevé, et donc que l'écoulement est plutôt lent en regard de la faible distance de parcours entre la zone d'infiltration et la résurgence au fleuve.

4.10.6 La rive sud

Le contexte hydrogéologique de la rive sud montre quelques variabilités. Cependant, le contexte stratigraphique dominant est caractérisé par des unités silto-argileuse de faible à très faible perméabilité, parfois recouverte d'un dépôt plus sableux de perméabilité moyenne. Quoique des unités fluvioglaciaires sableuses aient été identifiées sur la rive sud, l'aquifère régional prédominant est l'unité de roc fracturé composé d'un mélange de roches sédimentaires des Appalaches, tels que des shales, grès, conglomérats et calcarénites. Comme les autres aquifères fracturés de la CMQ, la perméabilité du roc varie de très faible à moyenne. L'aquifère de roc de la rive sud est majoritairement confiné, mais peut être semi confiné à libre lorsque le roc est subaffleurant, notamment dans la partie nord-ouest de Lévis où les dépôts sont également plus sableux. L'écoulement régional s'effectue du sud-est vers le nord-ouest en direction du fleuve Saint-Laurent. La recharge dans le

contexte de la rive sud varie de très faible à moyenne, compte tenu des différents degrés de confinement de l'aquifère rocheux et de la densité urbaine de certains secteurs. L'eau souterraine montre une évolution géochimique intermédiaire, ce qui est cohérent avec les conditions de confinement de l'aquifère. L'eau souterraine prend ainsi source à plus grande distance, circule plus longtemps dans les fractures du roc et se charge en ions.

5 RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

5.1 Vulnérabilité des aquifères

La vulnérabilité d'un aquifère correspond à sa sensibilité à toute contamination provenant de la surface du sol. Dans le cadre du présent mandat, le caractère « intrinsèque » de la vulnérabilité a été cartographié. Le calcul de la vulnérabilité intrinsèque repose sur le rôle que jouent les horizons géologiques situés entre l'aquifère et la surface du sol (MENV, 2004) et fait abstraction du type de contaminant et de ses propriétés. Pour l'aménagement du territoire, la cartographie de la vulnérabilité à l'échelle régionale permet de cibler les secteurs à protéger des activités anthropiques qui sont susceptibles de contaminer l'eau souterraine à partir de la surface du sol.

Dans le cadre de l'étude PACES-CMQ, la vulnérabilité a été calculée selon la méthode DRASTIC (Aller *et coll.*, 1987) tel que recommandé par le MDDEFP. Cette méthode, dont l'utilisation est répandue, est d'ailleurs citée dans l'article 13 du Règlement sur la qualité de l'eau potable (Q-2, r.40) (Gouvernement du Québec, 2013b) et dans l'article 25 du Règlement sur le captage des eaux souterraines (Q-2, r.6) (Gouvernement du Québec, 2013c) de la Loi sur la qualité de l'environnement. La méthode DRASTIC prend en compte les sept paramètres suivants, qui sont aussi illustrés à la Figure 5.1 : 1) la profondeur de l'aquifère ($D = \text{groundwater depth}$), 2) la recharge ($R = \text{net recharge}$), 3) le milieu aquifère ($A = \text{Aquifer media}$), 4) le type de sol ($S = \text{soil media}$), 5) la pente ($T = \text{topography}$), 6) l'impact de la zone vadose ($I = \text{Impact of vadose zone media}$) et 7) la conductivité hydraulique de l'aquifère ($C = \text{hydraulic conductivity}$). Une cote et un poids sont attribués à chaque paramètre et la vulnérabilité est la somme des cotes attribuées aux différents paramètres multipliées par leur poids :

$$\text{Vulnérabilité} = D_R D_w + R_R R_w + A_R A_w + S_R S_w + T_R T_w + I_R I_w + C_R C_w$$

où l'indice R représente la cote (rating) et l'indice w, le poids (weight) de chaque paramètre tel qu'illustré à la Figure 5.1. La vulnérabilité calculée avec l'équation ci-dessus peut varier entre 23 et 226. Plus la valeur est élevée, plus un aquifère est vulnérable à la contamination.

Pour chacun des sept paramètres, l'Annexe 9 présente l'attribution des cotes sous forme de tableau et leur distribution spatiale sur le territoire sous forme de figure. La vulnérabilité a été calculée selon le protocole proposé par le GRIES (Rivard *et coll.*, 2012) (Annexe E8), à l'exception du calcul des paramètres « D » et « I ». La profondeur de l'aquifère « D » a été déterminée à partir de la profondeur de la surface piézométrique (Figure 4.9) uniquement lorsque l'aquifère est non confiné. Lorsque l'aquifère est semi confiné ou confiné, la profondeur correspondant au sommet de l'aquifère a été considérée. Dans la CMQ, ces cas particuliers sont notamment observés à l'endroit des aquifères du Proto-Saint-Laurent, ainsi qu'à Lévis où l'aquifère de roc est souvent confiné. Pour la zone vadose (paramètre « I »), la cote a été attribuée selon la nature de la couche la moins perméable et qui restreint davantage la percolation verticale, tel qu'établi par Aller *et coll.*

(1987). Ainsi, le calcul du paramètre « I » diffère du protocole du GRIES qui suggère plutôt de pondérer cette cote selon toutes les couches de la zone vadose.

Comme pour l'estimation de la recharge (section 4.8), la vulnérabilité est évaluée pour le premier aquifère rencontré à partir de la surface. Si aucun aquifère de dépôts meubles d'importance régionale n'a été identifié, la vulnérabilité s'applique alors à l'aquifère de roc fracturé.

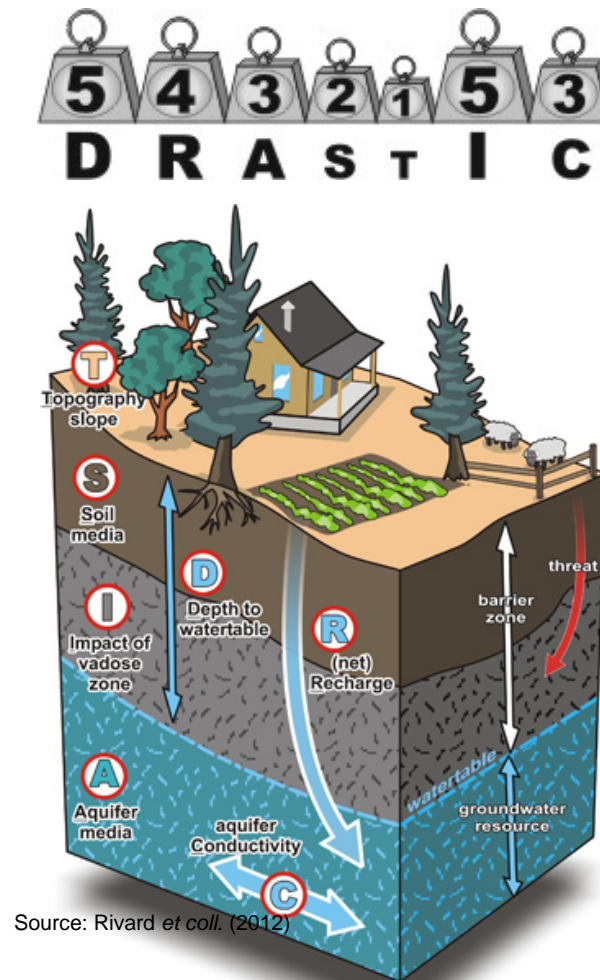


Figure 5.1 : Schématisation de la méthode DRASTIC et du poids de chaque paramètre

L'indice de vulnérabilité DRASTIC calculé sur le territoire de la CMQ varie de 43 à 191 (Figure 5.2). Dans le nord de la MRC de La Jacques-Cartier, sur les plateaux des Laurentides recouverts de till, l'indice est généralement moyen, entre 120 et 139. Dans les vallées, où l'on retrouve des aquifères sableux perméables, l'indice de vulnérabilité est élevé, variant de 140 à 191 tout comme dans le piémont laurentien, au droit des grands complexes de sédiments deltaïques ou fluvioglaciaires. Ces zones vulnérables se situent dans les vallées des rivières Jacques-Cartier, Montmorency, des Pins, des Hurons ainsi que de la rivière Jaune.

Tout comme dans La MRC de La Jacques-Cartier, l'indice de vulnérabilité de la MRC de La Côte-de-Beaupré est généralement moyen entre 120 et 139 sur les plateaux des Laurentides et plus élevé dans les vallées. Les secteurs de Boischatel et de L'Ange-Gardien présentent des zones très vulnérables avec un indice allant jusqu'à 187 sur le piémont laurentien dans le delta de la rivière Montmorency et dans un complexe de sédiments fluvioglaciaires sableux traversé par les rivières Ferrée, du Petit-Pré et de la Retenue à Château-Richer. À Saint-Ferréol-les-Neiges, la vulnérabilité est très élevée dans les sédiments fluvioglaciaires sableux au nord de l'Avenue Royale. Dans les vallées des rivières Sainte-Anne et des Chenaux, la vulnérabilité varie de très élevée à faible. Plus bas en altitude, en bordure du fleuve, à Saint-Louis de Gonzague du Cap-Tourmente et à Saint-Joachim, la présence des sédiments marins d'eau profonde et de très faible perméabilité diminue par endroit la vulnérabilité des aquifères rocheux à des indices allant de 56 à 80. Le même indice de faible vulnérabilité est observable à la limite de Sainte-Anne de Beaupré et de Château-Richer alors que le reste de la côte de Beaupré a une vulnérabilité moyenne.

Dans l'Agglomération de Québec, la présence des sédiments marins d'eau profonde de très faible perméabilité diminue la vulnérabilité des aquifères à des indices de 43 à 80 dans les vallées des rivières Charland, Lorette, Nelson, du Berger et Montmorency ainsi qu'au nord-ouest de L'Ancienne-Lorette et au centre de la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures. Sur le piémont laurentien, certaines zones de l'Agglomération de Québec sont très vulnérables avec des indices allant jusqu'à 187, soit au sud-ouest du Lac-Saint-Charles, à l'ouest de la rivière Montmorency dans le secteur nord de l'agglomération et dans la vallée de la rivière Nelson près de Saint-Gabriel-de-Valcartier. Le reste de l'Agglomération de Québec affiche une vulnérabilité moyenne de 80 à 160.

À l'île d'Orléans, la vulnérabilité est généralement moyenne avec des valeurs de 120 à 140. À Saint-François-de-l'île-d'Orléans, un secteur moins vulnérable (minimum de 62) est présent, car cette zone est protégée par des sédiments marins d'eau profonde. Une petite zone très vulnérable (162) est présente au sud-ouest de Sainte-Famille.

À Lévis, le centre du secteur présente de faibles indices de vulnérabilité de 47 à 100 aux endroits où une épaisse couche de sédiments marins d'eau profonde est présente alors que le reste de la rive sud a des indices moyens de 100 à 160. Localement, l'indice de vulnérabilité peut être plus élevé, jusqu'à 178, à l'endroit du corps fluvioglaciaire à l'ouest de la rivière Etchemin.

Les paramètres ayant le plus de poids dans l'évaluation de la vulnérabilité sont la profondeur de l'aquifère «D», l'impact de la zone vadose «I» et la recharge «R». Ces trois paramètres dépendent largement de la nature des dépôts de surface. Ainsi, cette carte de vulnérabilité présente de nombreuses similitudes avec celle des contextes hydrostratigraphiques (Carte 17). Toutefois, d'importantes variations de vulnérabilité sont observables plus localement, et ce dans tous les secteurs de la région. La grande diversité physiographique et géologique de la CMQ explique cette variabilité et fait ressortir l'importance des études locales détaillées pour mieux définir l'hydrogéologie d'un secteur et la vulnérabilité locale des aquifères.

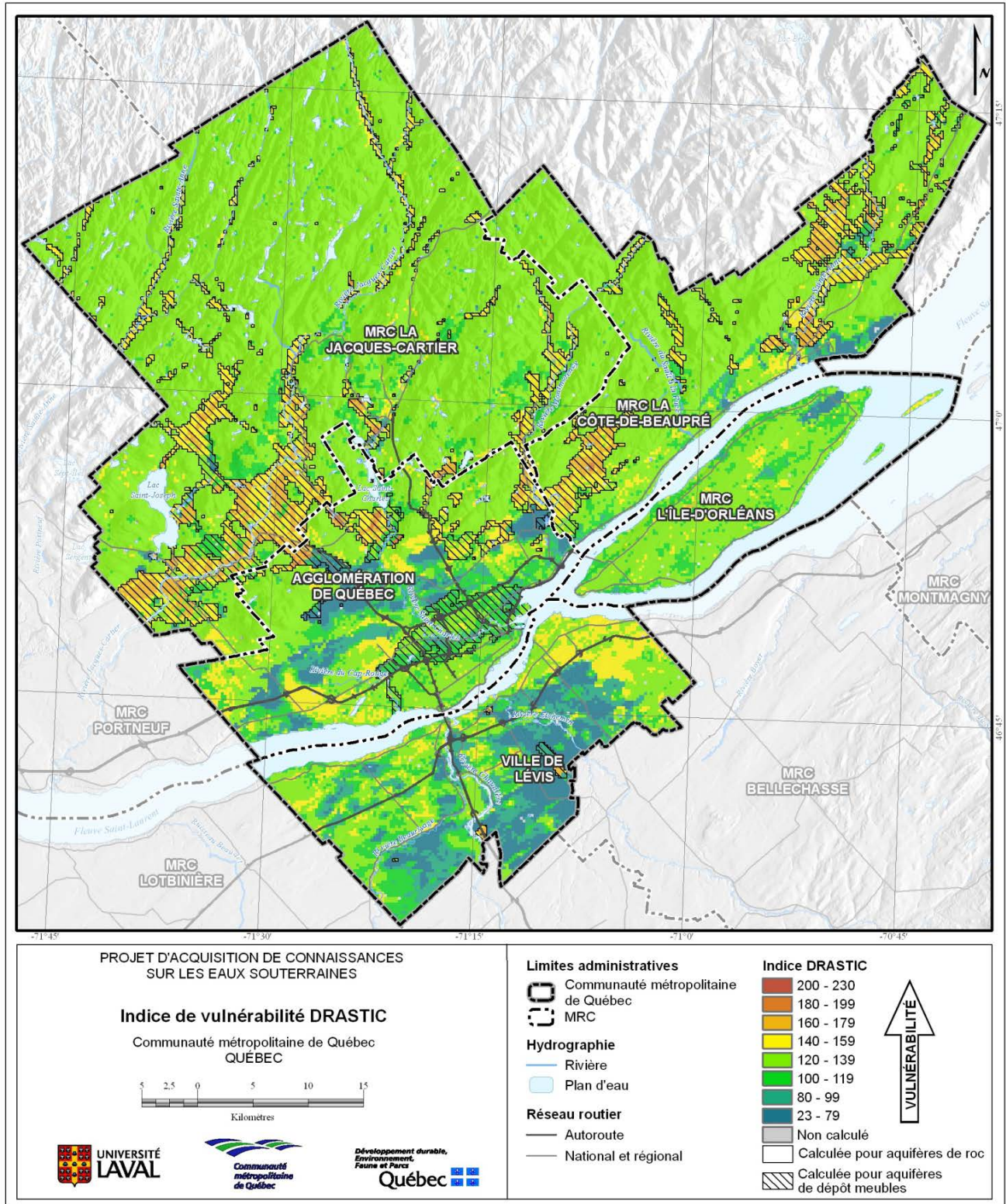


Figure 5.2 : Indice de vulnérabilité DRASTIC des aquifères

5.2 Risque potentiel de contamination des eaux souterraines

Les activités anthropiques représentent souvent une source potentielle de contamination des eaux souterraines. L'analyse qui suit présente une synthèse régionale de la pression potentiellement exercée sur la qualité de l'eau souterraine par les activités anthropiques.

La densité du risque potentiel de contamination des eaux souterraines relié aux activités anthropiques est présentée à la Carte 23 et à la Figure 5.3. Pour arriver à cette représentation, chaque type d'activité institutionnelle, commerciale et industrielle jugée pertinente a été évalué et un indice de risque potentiel lui a été attribué conformément au Protocole de l'UQAT et INRS (2013) préparé pour les besoins du GRIES (Annexe E9). Cet indice de risque représente uniquement le risque intrinsèque lié à l'activité. Il ne tient donc pas compte de la vulnérabilité des aquifères qui a été cartographiée à la section 5.1. Les sites contaminés contenus dans le Répertoire des terrains contaminés du MDDEFP (2013c) sont aussi présentés sur la carte selon le(s) milieu(x) affecté(s), soit les sols et/ou les eaux souterraines. Pour la représentation cartographique, les sites réhabilités à un niveau A ou B ont été exclus. Cet inventaire est partiel et ne contient pas les sites contaminés des terrains fédéraux.

Les données utilisées pour la détermination de l'indice de risque potentiel relié aux activités anthropiques proviennent de la base de données des rôles d'évaluation du ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du Territoire (MAMROT, 2011) ainsi que des rôles d'évaluation des villes et MRC (2011 et 2012). Les codes d'utilisation des biens-fonds (CUBF) ont été extraits de ces bases de données pour connaître la nature de l'activité. Pour chaque activité jugée pertinente, des cotes sont attribuées en fonction des paramètres suivants :

- toxicité des produits présents,
- quantité de produits manipulés,
- superficie de la zone d'impact de l'activité, et
- fréquence des rejets possibles vers l'environnement.

Un indice de risque potentiel relié à l'activité est calculé à partir de ces 4 cotes. Cet indice est attribué au centroïde du lot de chaque activité. Afin d'obtenir une représentation plus régionale et moins nominative, un calcul de densité, avec un rayon de recherche de 3,5 km, a été effectué à l'aide du logiciel ArcGIS[®]. Pour la préparation de cette carte, les activités agricoles et les activités résidentielles avec installations septiques ont été exclues de la liste des CUBF, en raison du manque d'information sur la nature exacte des activités agricoles et sur la localisation des réseaux d'égouts sanitaires. La méthodologie détaillée du protocole du GRIES peut être consultée à l'Annexe E9.

La Carte 23 et la Figure 5.3 présentent la densité du risque potentiel relié aux activités anthropiques et les sites contaminés du répertoire du MDDEFP (2013c). À première vue, la densité de ce risque correspond approximativement à la densité d'urbanisation du territoire. Le risque est donc plus élevé dans les centres industriels et commerciaux urbains des villes de Québec et de Lévis. Les 603 sites répertoriés sur le territoire de la CMQ par le MDDEFP représentent une contamination dans divers milieux : 456 pour les sols, 5 pour l'eau souterraine et 142 pour la combinaison de ces deux milieux. Le secteur de la base militaire

de Valcartier est présenté en hachure sur la carte pour faire ressortir qu'il est sous l'autorité fédérale. Les sites contaminés dans ce secteur ne se retrouvent donc pas dans l'inventaire du MDDEFP. De plus, dans ce secteur, la validité de la méthode d'analyse de la densité du risque potentiel relié aux activités anthropiques, qui est basée sur les données du MAMROT, n'est pas assurée. Il existe un inventaire des sites contaminés des terrains fédéraux, mais la nature et la présentation des données sur le site internet du Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada (SCT, 2013) ne permettaient pas d'extraire, d'utiliser et d'analyser les données adéquatement pour en faire la représentation cartographique.

Comme mentionnées ci-dessus, les activités agricoles et les installations septiques des résidences sont exclues de l'évaluation du risque potentiel de contamination relié aux activités anthropiques. Toutefois, dans les secteurs où l'agriculture couvre une grande partie du territoire, ces activités pourraient présenter un risque non négligeable. De la même manière, les secteurs présentant des zones densément peuplées de résidences non desservies par un réseau d'égout ne peuvent être considérés sans risque.

Le risque potentiel de contamination relié aux activités anthropiques, présenté dans cette section, ne tient pas compte des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du milieu. Afin de tenir compte de ces caractéristiques, l'évaluation du risque global de contamination de l'eau souterraine par les activités anthropiques devrait donc combiner le risque potentiel de contamination relié aux activités anthropiques et la vulnérabilité des aquifères présentée dans la section précédente. Ainsi, pour un endroit donné, un risque potentiel élevé de contamination relié aux activités anthropiques ne se traduit pas nécessairement en un risque global élevé pour l'eau souterraine si, par exemple, la vulnérabilité des aquifères à cet endroit est très faible.

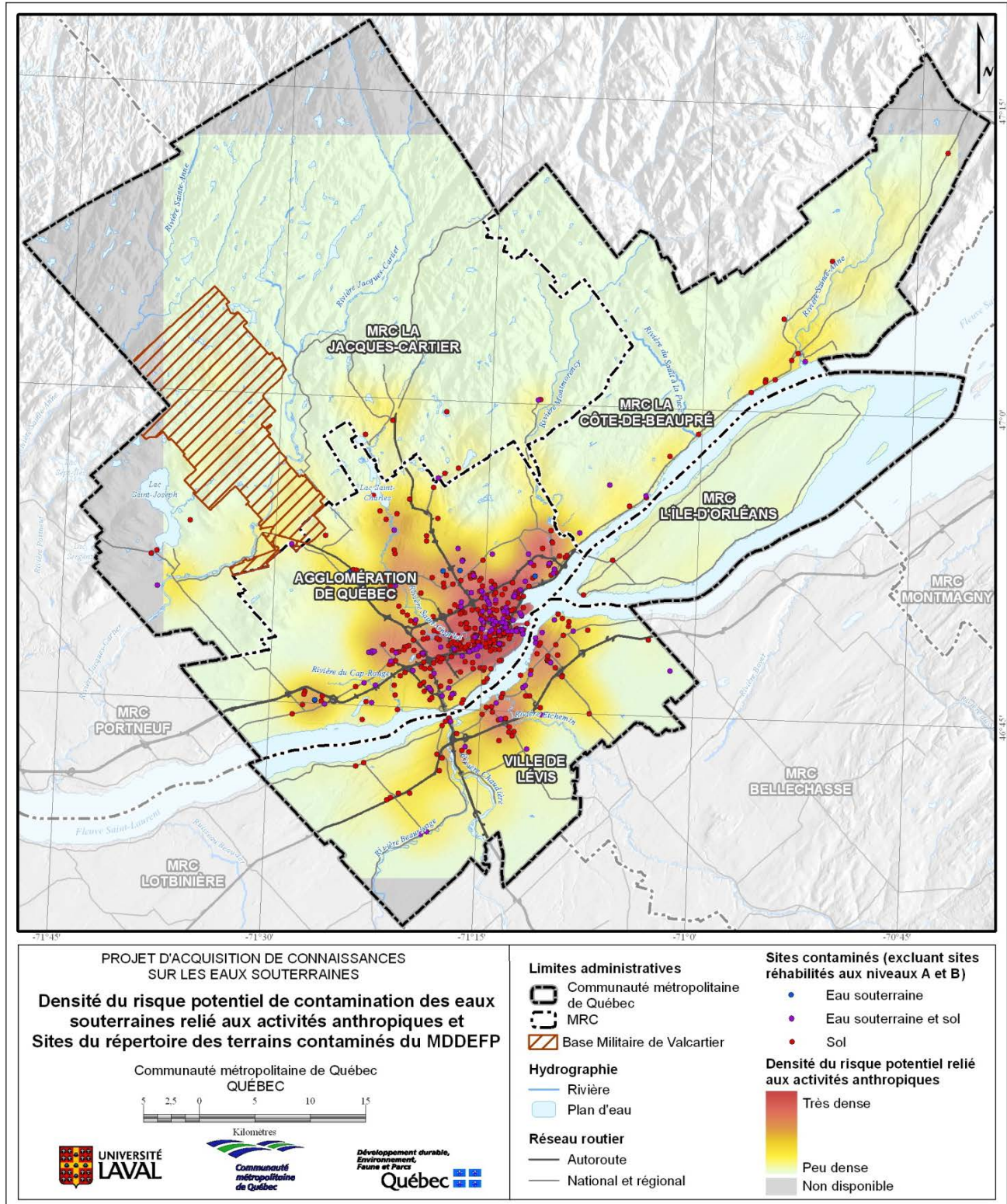


Figure 5.3 : Densité du risque potentiel de contamination des eaux souterraines relié aux activités anthropiques et sites du répertoire des terrains contaminés du MDDEFP

5.3 Utilisation de l'eau souterraine

L'eau souterraine est prélevée pour alimenter les habitants du territoire en eau potable, soit par un réseau d'aqueduc municipal ou par des puits privés individuels des propriétés non desservies par un réseau d'aqueduc. Des puits collectifs existent également pour la consommation en eau par les industries, commerces et institutions (ICI). L'utilisation de l'eau souterraine à des fins agricoles, telles que l'alimentation des troupeaux d'élevage et l'irrigation, serait aussi à considérer pour l'établissement d'un bilan complet. Ces données n'étant pas accessibles, l'utilisation agricole a été exclue du bilan. Afin d'exposer sommairement les réalités de cet enjeu, une carte thématique a été élaborée afin de présenter la pression exercée pour chaque municipalité qui compose le territoire à l'étude (Carte 26 et Figure 5.4).

Afin de combler leurs besoins en eau, les municipalités du territoire de la CMQ s'approvisionnent en eau souterraine (aquifère) et en eau de surface (fleuve, rivières et lacs). L'analyse qui suit s'attarde à la consommation des eaux souterraines par type d'utilisation, en excluant celle à des fins agricoles. Les volumes de prélèvement en eau souterraine ont été établis à l'aide de diverses données compilées depuis 2009 et sont représentatifs du portrait actuel. La consommation en eau de surface n'a pas été quantifiée. La méthodologie est détaillée en Annexe 10. Le calcul global de l'utilisation de l'eau souterraine comprend une évaluation des volumes extraits pour les types d'utilisation suivants :

- Puits collectifs municipaux qui alimentent un réseau d'aqueduc,
- Puits collectifs qui alimentent les ICI, et
- Puits privés individuels des propriétés non desservies par un réseau d'aqueduc.

Les volumes d'eau prélevés annuellement par les puits collectifs municipaux ont été transmis, pour la plupart, directement par les municipalités du territoire. Les données manquantes ont été complétées en consultant les formulaires de Déclaration des prélèvements en eau de 75 m³/jour et plus, mis à notre disposition par le MDDEFP. L'information sur l'ensemble des réseaux isolés, qui alimentent les ICI de plus de 20 personnes ou consommant plus de 75 m³/jour, est aussi disponible dans cet inventaire.

Les puits privés individuels des propriétés non desservies par un réseau d'aqueduc ont été comptabilisés à partir du rôle d'évaluation des municipalités. Ces informations ont été transférées sur une base volontaire par la majorité des municipalités. Afin d'obtenir un volume pour les puits privés individuels d'une municipalité, chaque puits est localisé et son rôle d'évaluation renseigne sur le nombre de logements (ou de ménage) desservi par le puits. Le nombre moyen de personnes par ménage pour chaque aire de diffusion est tiré du dernier recensement de Statistique Canada (2011). Le volume d'eau souterraine consommé pour cette utilisation est calculé en multipliant la consommation moyenne (250 litres par jour par personne) (MDDEP, 2006) par le nombre de personnes par ménage et par le nombre de ménages desservis par un puits individuel.

Dans les municipalités n'ayant pas de réseau d'aqueduc, tous les résidents sont considérés comme alimentés par un puits individuel. Pour les municipalités ayant refusé de transmettre l'information sur leur approvisionnement en eau potable, le volume total d'eau souterraine consommée a été estimé selon une méthode alternative (Annexe 10).

La Carte 26, la Figure 5.4 et le Tableau 5.1 présentent une estimation annuelle des volumes d'eau souterraine prélevés dans chaque municipalité, excluant les utilisations agricoles. L'évaluation de la consommation totale annuelle d'eau souterraine est issue des diverses sources d'informations disponibles et est représentative de la période 2009-2013. La consommation totale annuelle pour le territoire à l'étude est estimée à 15 millions de mètres cubiques (Mm^3), dont $5,2 \text{ Mm}^3$ seraient exploités par les puits individuels, $7,8 \text{ Mm}^3$ par les puits municipaux alimentant les aqueducs et $1,9 \text{ Mm}^3$ par les ICI. En 2008, 21 % de la population, soit environ 148 000 personnes, s'approvisionnaient quotidiennement en eau potable dans les aquifères.

Dans la MRC de La Jacques-Cartier, environ $5,8 \text{ Mm}^3$ sont prélevés annuellement. L'eau souterraine y constitue la principale source d'eau potable, alimentant 86 % de la population en 2006. Dans l'Agglomération de Québec, le prélèvement approximatif en eau souterraine s'élève annuellement à $5,4 \text{ Mm}^3$, dont $4,5 \text{ Mm}^3$ alimentent les réseaux d'aqueduc municipaux. L'approvisionnement en eau provient en forte majorité des eaux de surface et dans une plus faible proportion, de puits de captage de l'eau souterraine. Le restant des besoins en eau de consommation de l'agglomération est comblée par les prélèvements en eau de surface dans la rivière Saint-Charles et Montmorency ainsi que dans le fleuve Saint-Laurent. Pour la MRC de La Côte-de-Beaupré, le prélèvement annuel est estimé à $1,6 \text{ Mm}^3$, dont $1,0 \text{ Mm}^3$ pour l'alimentation de réseaux d'aqueduc. En 2006, 23 % de la population s'approvisionnait en eau souterraine. Sur le territoire de la Ville de Lévis, environ $1,1 \text{ Mm}^3$ sont prélevés annuellement alors que 38 % de sa population s'approvisionnait en eau souterraine en 2006. Dans le cas de la MRC de L'Île-d'Orléans, approximativement $1,0 \text{ Mm}^3$ sont prélevés chaque année. Le territoire de cette MRC étant dépourvu de réseau d'aqueduc, les prélèvements sont exclusifs aux puits collectifs ICI et aux puits privés individuels. L'eau souterraine y est ainsi l'unique source d'eau potable pour la population.

Tableau 5.1 : Prélèvement annuel en eau souterraine (2009-2013)

	Prélèvement annuel en (m ³) pour la période 2009-2013			
	Puits privés individuels	Puits municipaux	Puits ICI	Total (excluant les utilisations agricoles)
Agglomération de Québec	596 590	4 490 856	317 273	5 404 719
L'Ancienne-Lorette				228
Québec				4 957 974
Saint-Augustin-de-Desmaures				446 517
Ville de Lévis	834 359	280 139	25 832	1 140 330
MRC de La Jacques-Cartier	2 551 150	1 940 583	1 315 325	5 802 601
Fossambault-sur-le-Lac				275 691
Lac-Beauport				*659 935
Lac-Delage				79 256
Lac-Saint-Joseph				22 904
Sainte-Brigitte-de-Laval				930 136
Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier				1 043 136
Saint-Gabriel-de-Valcartier				1 363 386
Shannon				*464 848
Stoneham-et-Tewkesbury				963 310
MRC de La Côte-de-Beaupré	442 427	1 128 950	62 075	1 633 452
Beaupré				13 322
Boischatel				29 384
Château-Richer				83 122
L'Ange-Gardien				108 584
Sainte-Anne-de-Beaupré				485 454
Saint-Ferréol-les-Neiges				472 785
Saint-Joachim				205 042
Saint-Louis-de-Gonzague-du-Cap-Tourmente				274
Saint-Tite-des-Caps				235 485
MRC de L'Île-d'Orléans	793 496	0	226 673	1 020 170
Sainte-Famille				121 884
Sainte-Pétronille				143 979
Saint-François-de-l'île-d'Orléans				97 978
Saint-Jean-de-l'île-d'Orléans				151 500
Saint-Laurent-de-l'île-d'Orléans				261 780
Saint-Pierre-de-l'île-d'Orléans				243 049
TOTAL CMQ	5 218 022	7 840 527	1 921 347	15 001 272

*Les volumes des municipalités de Shannon et de Lac-Beauport ont dû être évalués en l'absence de données provenant directement de l'organisme. L'estimation demeure toutefois valable, car des données étaient accessibles par les formulaires de Déclaration des prélèvements en eau de 75 m³/jour et plus du MDDEFP et le Répertoire de tous les réseaux municipaux de distribution d'eau potable (MDDEFP, 2013).

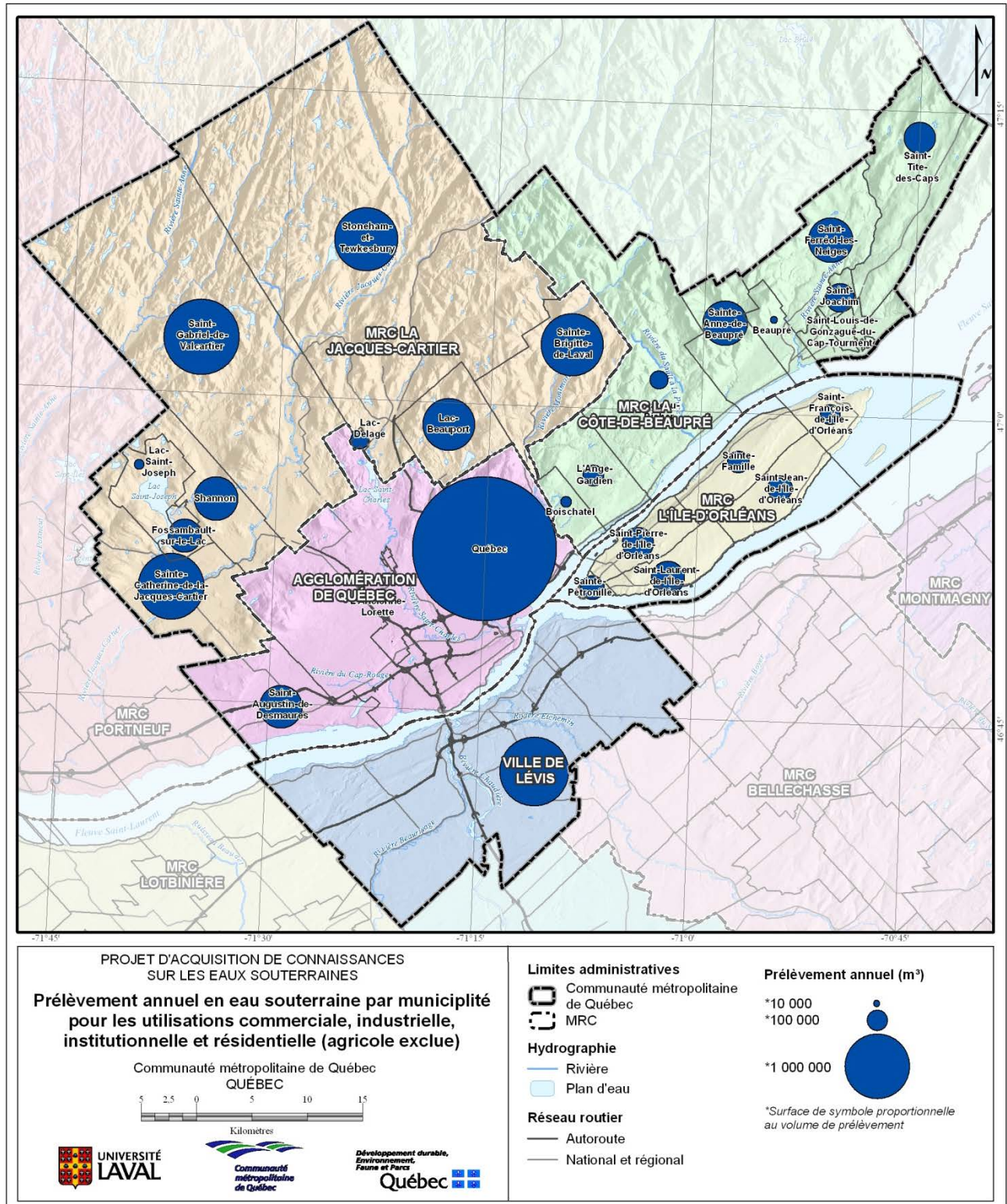


Figure 5.4 : Prélèvement annuel en eau souterraine par municipalité pour la période 2009-2013

5.4 Potentiel d'exploitation

5.4.1 Aux fins de consommation

Afin d'évaluer la disponibilité (ou le potentiel) en eau souterraine à des fins d'alimentation en eau potable, il est nécessaire de connaître le volume d'eau souterraine contenu dans les aquifères de dépôts meubles de la CMQ, la capacité à la prélever aisément (transmissivité), son taux de renouvellement (recharge) ainsi que sa qualité globale. Le potentiel d'exploitation a été déterminé seulement pour les aquifères de dépôts meubles. Bien que les formations de roc contiennent de l'eau souterraine, elles n'ont pas été incluses dans les calculs, car leur faible capacité à soutenir un débit de prélèvement en eau ne permet généralement que l'installation de puits de captage à des fins domiciliaires. La présente sous-section vise à établir les volumes d'eau souterraine contenus dans les aquifères de dépôts meubles. Cependant, le principe de gestion durable de la ressource (section 5.5) doit nécessairement être pris en considération pour planifier l'utilisation de l'eau souterraine.

Le volume d'eau souterraine efficace (V_e) contenu dans l'aquifère de dépôts meubles a été déterminé en multipliant la porosité de drainage (S_y) des hydrofaciès composant l'aquifère, leur épaisseur (b) et leur superficie (A) :

$$V_e = S_y \cdot b \cdot A$$

La porosité de drainage représente la fraction du volume d'eau totale contenue dans un milieu géologique saturé qui peut être drainée par gravité. Les valeurs moyennes employées dans le calcul sont issues de Johnson (1967), Fetter (2001) et ASCE (1995). Une porosité de drainage de 0,25 a été attribuée à l'hydrofaciès HF5 tandis qu'une valeur de 0,23 a été retenue pour les hydrofaciès HF4 et HF6.

La transmissivité totale, T_{tot} , d'un empilement de n couches de dépôts meubles est donnée par l'équation :

$$T_{tot} = \sum_{i=1}^n K_i e_i$$

où K_i est la conductivité hydraulique de l'hydrofaciès de la couche i et e_i est son épaisseur. Les épaisseurs et les conductivités hydrauliques des couches de dépôts meubles proviennent du modèle hydrostratigraphique 3D (section 4.3) et de l'analyse statistique des propriétés hydrauliques propres à chaque hydrofaciès de ce modèle (Tableau 4.3).

Il faut rappeler que dans le cas de l'hydrofaciès HF6, représentant les complexes fluvioglaciaires et deltaïques, une fraction (2/3) a été utilisée dans l'estimation des épaisseurs constituant l'aquifère. L'autre portion des dépôts correspond à la présence d'horizons silteux.

Les volumes efficaces d'eau souterraine dans les aquifères de dépôts meubles sont estimés à 610 millions de mètres cubiques (Mm³) pour l'ensemble du territoire de la CMQ (Tableau 5.2). La MRC de La Jacques-Cartier arrive en tête avec 329 Mm³ d'eau souterraine contenus dans ses aquifères de dépôts meubles, suivi par la MRC de La Côte-de-Beaupré (146 Mm³), l'Agglomération de Québec (106 Mm³) et la Ville de Lévis (29 Mm³). Le volume disponible calculé dans la MRC de L'Île-d'Orléans est nul parce que la méthode de calcul ne considère que les aquifères de dépôts meubles, qui sont inexistantes dans cette MRC.

La cartographie de la transmissivité totale des aquifères de dépôts meubles permet de localiser les secteurs où les aquifères sont plus perméables et/ou plus épais. La Figure 5.5 illustre que les aquifères qui présentent un potentiel supérieur sont dispersés dans les vallées des rivières Jacques-Cartier, Montmorency et Sainte-Anne de même que dans le piémont laurentien où des amas fluvioglaciaires ont été déposés. Sur la rive sud, le cordon fluvioglaciaire situé à l'ouest de la rivière Etchemin est également identifiable. Les secteurs qui présentent des transmissivités importantes sont souvent associés à l'hydrofaciès HF5 (sable et gravier) qui offre un potentiel d'exploitation supérieur en raison de sa conductivité hydraulique élevée.

Les aquifères ciblés à la Figure 5.5 ont une recharge importante, car les dépôts meubles sus-jacents sont généralement perméables. Ainsi, les taux de renouvellement considérables de ces aquifères suggèrent un potentiel élevé. Par contre, l'utilisation de l'eau souterraine doit aussi tenir compte du concept de gestion durable des aquifères (section 5.5). Todd (1959) a défini ce concept comme la quantité d'eau pouvant être prélevée annuellement sans produire d'effets indésirables. Ces effets indésirables n'incluent pas seulement la diminution des réserves en eaux souterraines, mais également l'impact qu'un pompage excessif pourrait avoir sur la diminution des débits des cours d'eau, l'assèchement de marais, la subsidence des sols, les conflits d'utilisation ou l'appel d'une contamination vers le puits de pompage. Quelques auteurs ont suggéré que l'exploitation durable est assurée lorsque l'extraction annuelle d'eau souterraine est inférieure à sa recharge moyenne annuelle. Selon Freeze et Cherry (1979) et Bredehoeft et Young (1970), ce concept n'est pas adéquat et un changement majeur d'exploitation peut avoir des impacts significatifs et imprévisibles sur l'équilibre naturel du bilan hydrologique et du rapport recharge/résurgence des aquifères.

En regard des analyses chimiques des eaux souterraines des aquifères de dépôts meubles (section 4.9), la ressource est de bonne qualité. Bien que les aquifères de dépôts meubles soit d'une bonne envergure, le cas de contamination au trichloréthylène (TCE) de l'aquifère à l'endroit de la municipalité de Shannon doit être pris en compte dans la quantité d'eau exploitable aux fins de consommation. En décembre 2000, la Direction régionale de santé publique (DRSP) de l'Agence de la santé et des services sociaux de la Capitale-Nationale a recommandé de ne pas consommer l'eau de cet aquifère et de ne pas l'utiliser pour la douche ou le bain (DRSP, 2013).

À l'échelle de la CMQ, les aquifères potentiellement exploitables sont répartis sur un grand territoire, qui est parfois moins développé et difficile d'accès. Il est donc nécessaire de réaliser des études de faisabilité afin de cibler les aquifères à proximité et les coûts rattachés à leur exploitation et leur acheminement vers les secteurs habités à desservir.

Tableau 5.2 : Estimation des volumes efficaces d'eau souterraine dans les aquifères de dépôts meubles des différentes municipalités

MRC Villes ou municipalités	Volume efficace d'eau pour les aquifères de dépôts meubles (Mm³)
Agglomération de Québec	106
L'Ancienne-Lorette	1
Québec	105
Saint-Augustin-de-Desmaures	0
Ville de Lévis	29
MRC de La Jacques-Cartier	329
Fossambault-sur-le-Lac	11
Lac-Beauport	7
Lac-Delage	0
Lac-Saint-Joseph	1
Sainte-Brigitte-de-Laval	24
Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier	73
Saint-Gabriel-de-Valcartier	141
Shannon	54
Stoneham-et-Tewkesbury	18
MRC de La Côte-de-Beaupré	146
Beaupré	5
Boischatel	15
Château-Richer	9
L'Ange-Gardien	17
Sainte-Anne-de-Beaupré	1
Saint-Ferréol-les-Neiges	63
Saint-Joachim	11
Saint-Louis-de-Gonzague-du-Cap-Tourmente	0
Saint-Tite-des-Caps	25
MRC de L'Île-d'Orléans	0
Sainte-Famille	0
Sainte-Pétronille	0
Saint-François-de-l'Île-d'Orléans	0
Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans	0
Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans	0
Saint-Pierre-de-l'Île-d'Orléans	0
TOTAL CMQ	610

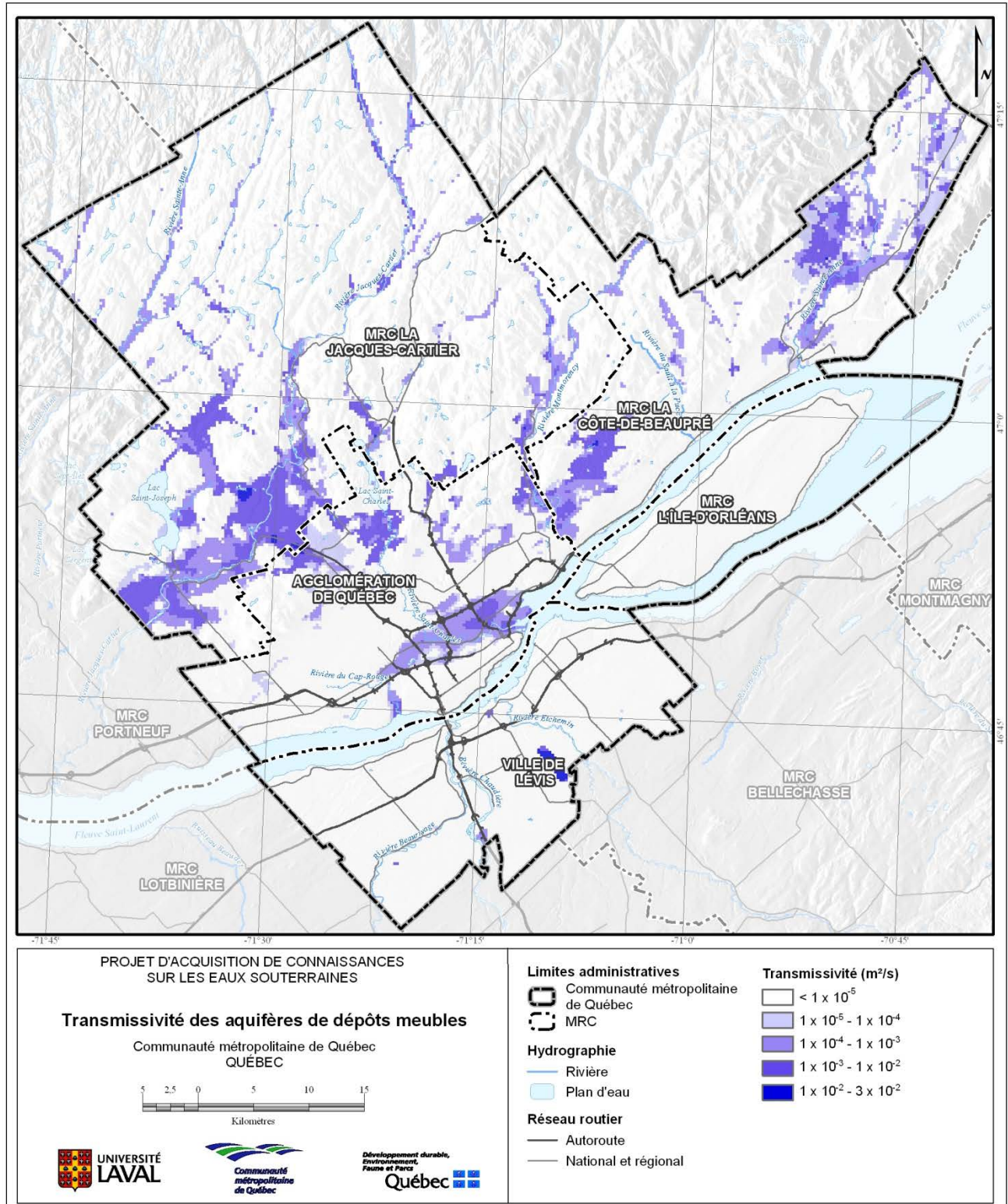


Figure 5.5 : Transmissivité des aquifères de dépôts meubles

5.4.2 Aux fins de chauffage et climatisation (potentiel géothermique)

Le gradient géothermique sur le territoire de la CMQ est de l'ordre de 2°C/100 m de profondeur pour les premiers 6 km. Le gradient est trop faible pour envisager une exploitation géothermique de hautes températures et le potentiel est donc actuellement limité aux technologies de basses et très basses températures (Minea, 2010). L'analyse du potentiel géothermique des aquifères de la CMQ vise donc seulement ce type de technologies, c'est-à-dire les boucles fermées horizontales, les boucles fermées verticales et les boucles ouvertes. Ces systèmes ont été schématisés à la Figure 5.6 par la Coalition canadienne de l'énergie géothermique (CCÉG).

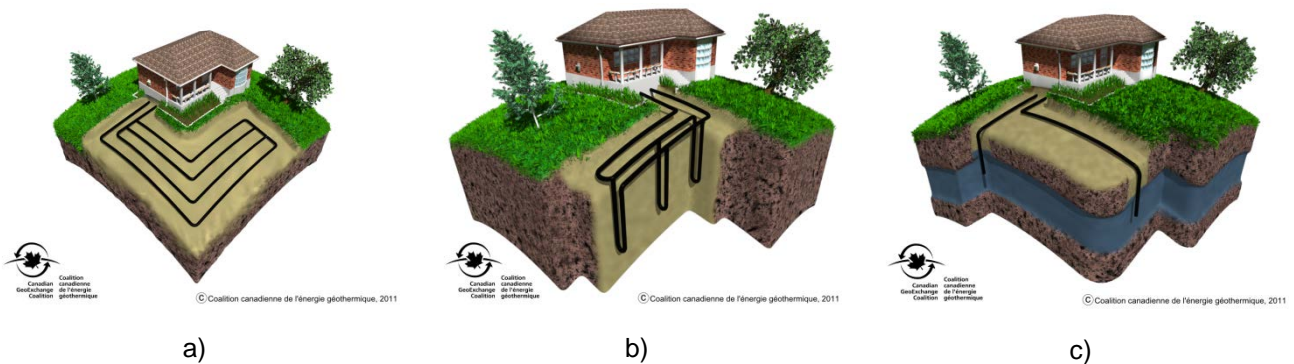


Figure 5.6 : Systèmes géothermiques a) en boucles fermées horizontales, b) en boucles fermées verticales et c) en boucles ouvertes (CCÉG, 2011)

5.4.2.1 Boucles fermées horizontales

Le potentiel géothermique des systèmes à boucles fermées horizontales dépend des conditions retrouvées dans les trois premiers mètres de la surface, profondeurs auxquelles sont installés de tels systèmes. La conductivité thermique des dépôts meubles en surface ainsi que leur saturation en eau sont les deux principaux facteurs influençant la conductivité thermique globale d'un milieu géologique. Un matériel géologique saturé en eau aura une conductivité thermique globale plus élevée qu'un matériel non saturé. La valeur de conductivité thermique globale est donc utilisée ici comme un indicateur du potentiel géothermique.

Afin d'évaluer ce potentiel géothermique, l'hydrofaciès de la première couche du modèle hydrostratigraphique (section 4.3) a été extraite ainsi que la profondeur du niveau piézométrique pour déterminer si les dépôts sont saturés ou non. Les valeurs de la conductivité hydraulique issues de l'analyse statistique de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ (section 4.6) ainsi que les conductivités thermiques théoriques (Tableau 5.3) pour les dépôts, saturés ou non, ont servi à estimer la conductivité thermique globale (λ_h) en W/mC selon l'équation suivante :

$$\lambda_h = \frac{\lambda_s e_s + \lambda_n e_n}{e_s + e_n} \quad \text{pour } e_s + e_n \geq 2 \text{ m}$$

$$\lambda_h = 0 \quad \text{pour } e_s + e_n < 2 \text{ m}$$

où λ_s est la conductivité thermique théorique des dépôts saturés (W/mC), λ_n est la conductivité thermique théorique des dépôts non saturés (W/mC), e_s est l'épaisseur des dépôts saturés de la première couche du modèle hydrostratigraphique (m), et e_n est l'épaisseur des dépôts meubles non saturés de la première couche du modèle hydrostratigraphique (m). Les résultats des essais de réponse thermique, visant à mesurer la conductivité géothermique des unités géologiques, n'ont pas été employés dans l'analyse des potentiels compte tenu du faible nombre d'essais réalisés durant la campagne de terrain.

Tableau 5.3 : Conductivité thermique théorique des dépôts meubles

Hydrofaciès	Granulométrie	Conductivité hydraulique horizontale (m/s)	Conductivité thermique théorique (W/mC)	
			non saturée	saturée
HF1	Silt, argile silteuse	5E-08	^{&} 1,20	^{&} 1,20
HF2	Silt sableux/graveleux, Alternances silt/sable	2E-07	^{&} 0,50	^{&} 1,45
HF3	Sable/gravier silteux	1E-06	[^] 0,50	[^] 1,60
HF4	Sable	9E-05	[#] 0,50	[#] 2,30
HF5	Sable et gravier	5E-04	[#] 0,45	^{#,*} 2,00
HF6	Hétérogène	9E-05	[#] 0,50	^{#,**} 2,00

Note : [&]Johansen (1977) ; [^]Fujii et coll. (2007) ; [#]Colliard (2004);

* Pour déterminer la conductivité thermique de l'hydrofaciès HF5, une proportion de 50% de sable et de 50% de gravier est considérée;

** Pour déterminer la conductivité thermique de l'hydrofaciès HF6, une proportion d'un tiers de silt argileux et de deux tiers de sable est considérée.

La Carte 29a et la Figure 5.7 illustrent le potentiel géothermique des systèmes en boucles fermées horizontales à partir des valeurs calculées de conductivité thermique, qui varient de 0,0 à 2,4 W/mC. La classification du potentiel géothermique en fonction de la conductivité thermique des matériaux géologiques est inspirée de Kavanaugh et Rafferty (1997) et présentée au Tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Classification du potentiel géothermique pour les systèmes en boucles fermées horizontales

Potentiel	Conductivité thermique (W/mC)
Nul	Épaisseur des dépôts meubles inférieurs à 2 m, c.-à-d. trop faible pour l'installation du système
Inférieur	[0,0 – 1,0[
Moyen	[1,0 – 2,0[
Supérieur	[2,0 – ∞ [

Sur le territoire à l'étude, la variabilité des conductivités thermiques est associée à la distribution des différents hydrofaciès de surface. Les secteurs où les dépôts de surface correspondent aux hydrofaciès HF4, HF5 et HF6 présentent des conductivités thermiques plus élevées. Certains de ces secteurs ont une conductivité thermique globale plus élevée car les niveaux piézométriques sont plus près de la surface et où les dépôts sont saturés. La plus grande portion des Laurentides détient un potentiel inférieur dans les hauts topographiques, car les dépôts sont généralement non saturés. Par contre, le fond des vallées contient des dépôts généralement sableux et saturés, ce qui se traduit en un potentiel inférieur à moyen. Certains secteurs du Promontoire de la Ville de Québec, de la Ville de Lévis, de Charlesbourg, de Beauport et de l'île d'Orléans, n'ont pas été pris en compte dans les calculs du potentiel, car la faible épaisseur des dépôts meubles n'est pas propice à l'installation des systèmes en boucles horizontales.

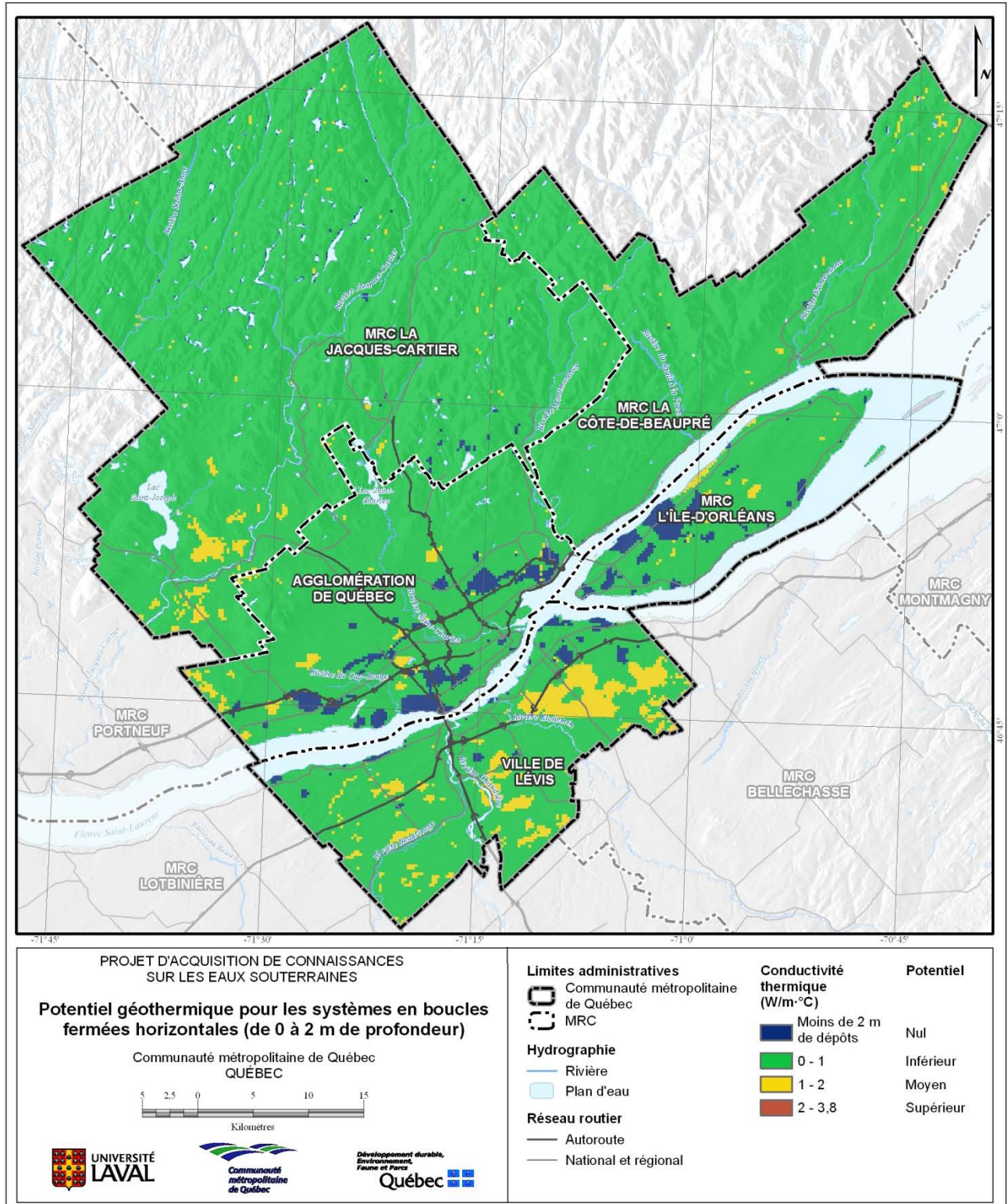


Figure 5.7 : Potentiel géothermique pour les systèmes en boucles fermées horizontales

5.4.2.2 Boucles fermées verticales

L'efficacité des systèmes géothermiques en boucles fermées verticales dépend des propriétés du roc et des dépôts meubles. Ces propriétés sont la conductivité thermique, la saturation en eau et l'épaisseur. Le modèle hydrostratigraphique 3D (section 4.3) a servi à définir les différentes unités géologiques et leurs propriétés nécessaires au calcul du potentiel. Les conductivités thermiques théoriques associées aux dépôts meubles sont les mêmes que celles définies pour les boucles fermées horizontales (Tableau 5.3). La conductivité thermique du roc est évaluée selon la lithologie de la géologie simplifiée du roc (Carte 13). Ainsi, une valeur de conductivité thermique tirée de la littérature est attribuée à chaque type de roche en fonction de la lithologie (Tableau 5.5). Le Grenville est composé de roches dont les conductivités thermiques sont plus importantes que celles de la Plateforme du Saint-Laurent ou des Appalaches.

Parce que ces propriétés varient d'un site à l'autre, la profondeur d'installation des systèmes en boucles fermées verticales est aussi variable. Cependant, comme la profondeur de ces installations est généralement de l'ordre de 100 m, le potentiel géothermique global est évalué uniquement pour les premiers 100 m. Le modèle hydrostratigraphique a été utilisé pour évaluer λ_{tot} , la conductivité thermique globale de 0 à 100 m de profondeur (W/mC), sur des mailles horizontales de 205 m par 250 m. La conductivité globale pour chaque maille est donnée par :

$$\lambda_{tot} = \frac{\lambda_s e_s + \lambda_n e_n + \lambda_r e_r}{e_s + e_n + e_r}$$

où λ_r est la conductivité thermique théorique moyenne du roc (W/mC) et e_r est l'épaisseur du roc (m).

Tableau 5.5 : Conductivité thermique théorique du roc

Code	ENSEMBLE Formation (Composition)	*Conductivité thermique théorique (W/mC)
-	APPALACHES	
Ovq	Nappe du Promontoire de Québec (shale, calcaire, dolomie, grès)	2,50
Oore	Wildflysh de la rivière Etchemin (shale chaotique avec blocs)	2,10
Oll	Écaille de Ste-Pétronille et de la Pointe de Lévis (mudstone dolomitique, shale calcisilite, calcarénite, conglomérat, calcaire)	2,17
COio	Nappe de Bacchus (mélange)	2,25
Csy	Nappe de la Chaudière (shale rouge, grès vert)	2,47
-	PLATE-FORME DU SAINT-LAURENT	-
Olo	Formation de Lotbinière (shale silteux, lamines de grès)	2,25
Oss	Formation de Ste-Sabine et Les Fonds (ardoise, dolomie)	2,52
Out	Shale d'Utica (shale)	1,96
Ot	Groupe de Trenton et Formation de Neuville (calcaire, shale, calcaire argileux)	1,93
-	GRENVILLE	-
53	(anorthosite et gabbronorite)	2,18
55	(granotoïde à orthopyroxène)	3,58
46	(migmatite)	3,37
45	(gneiss charnockitique et granitoïdes à orthopyroxène)	3,58
43	(gneiss gris à quartz, gneiss mafique)	3,74

Source : Côté et Konrad (2005), Robertson (1988)

Note : * Dans la littérature, il n'y a pas de distinction entre le roc saturé ou non.

Comme illustrée sur la Carte 29b et la Figure 5.8, le potentiel géothermique en boucles fermées verticales est fortement dépendant de la lithologie du roc et inversement proportionnel à l'épaisseur des dépôts meubles. La classification du potentiel géothermique pour les systèmes en boucles fermées verticales est défini au Tableau 5.6 selon Kavanaugh et Rafferty (1997).

Tableau 5.6 : Classification du potentiel géothermique pour les systèmes en boucles fermées verticales

Potentiel	Conductivité thermique (W/mC)
Nul	[0,0 – 0,2[
Inférieur	[0,2 – 2,2[
Moyen	[2,2 – 3,0[
Supérieur	[3,0 – ∞ [

L'amélioration de la qualité de la cartographie des lithologies rocheuses en surface autant que la connaissance de la continuité des unités lithologiques en profondeur permettraient grandement d'améliorer la définition du potentiel. Les roches granitiques de la Province de Grenville ont des conductivités thermiques supérieures aux autres types de roche sur le territoire et les conductivités thermiques dans ce secteur varient de 2,2 à 3,8 W/mC, ce qui rend attrayants les systèmes en boucles fermées selon Grasby *et coll.* (2011).

Les valeurs les plus élevées correspondent aux endroits où les dépôts meubles sont plus minces et donc, où le roc est en plus grande proportion sur la profondeur d'évaluation du potentiel (100 m). Le potentiel dans les Laurentides est donc supérieur, à l'exception des secteurs qui contiennent de l'anorthosite et du gabbro norite, qui conduisent moins bien la chaleur. Ces deux types de roches ont des conductivités thermiques plus faibles en raison des minéraux qui les composent et ne sont pas aussi propices à l'installation de systèmes en boucles fermées.

Les roches d'origine sédimentaires faisant partie de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches ont des conductivités thermiques nettement moins élevées que les roches de la Province de Grenville. Les conductivités thermiques varient de 1,4 à 2,8 W/mC selon la lithologie, mais également selon l'épaisseur des dépôts meubles. Dans la région d'étude, les Basses-terres du Saint-Laurent présentent donc un potentiel géothermique moyen pour ce type d'installation.

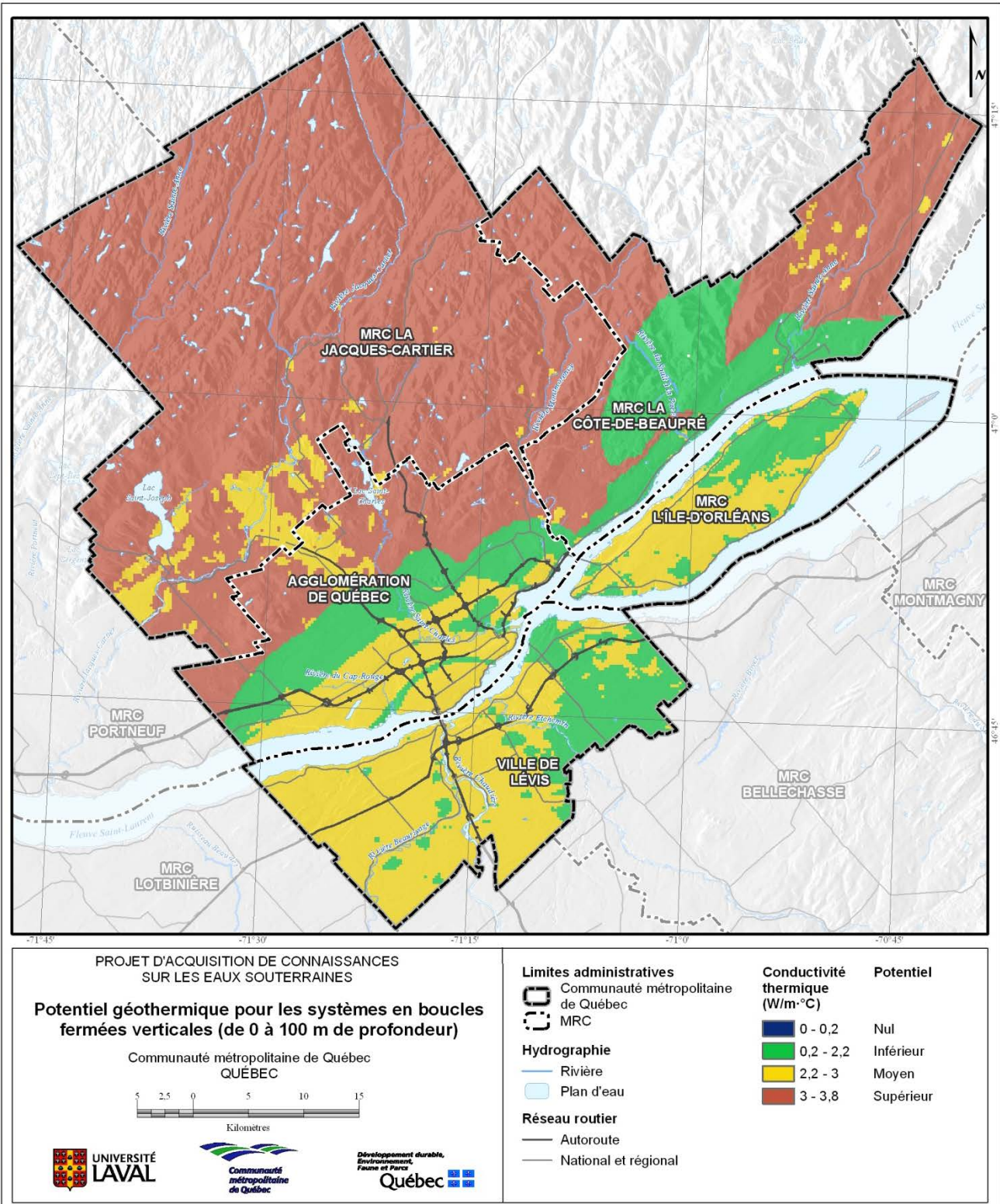


Figure 5.8 : Potentiel géothermique pour les systèmes en boucles fermées verticales

5.4.2.3 Boucles ouvertes

Contrairement aux deux systèmes en boucles fermées, le potentiel géothermique en boucles ouvertes ne dépend pas principalement de la conductivité thermique des unités géologiques, mais plutôt de la capacité de l'aquifère à soutenir un débit de prélèvement en eau, qui est reliée à la transmissivité. Le potentiel du système en boucles ouvertes a donc été déterminé en calculant la transmissivité totale des aquifères de dépôts meubles. Le roc n'a pas été inclus dans le calcul de la transmissivité, car la transmissivité du roc sur le territoire n'est généralement pas suffisante pour l'installation de systèmes en boucles ouvertes.

La transmissivité totale, T_{tot} , d'un empilement de n couches de dépôts meubles est donnée par :

$$T_{tot} = \sum_{i=1}^n K_i e_i$$

où K_i est la conductivité hydraulique de l'hydrofaciès de la couche i et e_i est son épaisseur. Les épaisseurs et les conductivités hydrauliques des couches de dépôts meubles proviennent du modèle hydrostratigraphique 3D (section 4.3) et de l'analyse statistique des propriétés hydrauliques propres à chaque hydrofaciès de ce modèle (section 4.6).

Abesser (2010) propose la classification suivante (Tableau 5.7) du potentiel géothermique basée sur la transmissivité des matériaux géologiques. Cette classification du potentiel géothermique en boucles ouvertes a été adaptée en ajoutant la classe de potentiel nul pour des transmissivités inférieures à 10^{-5} m²/s.

Tableau 5.7 : Classification du potentiel géothermique pour les systèmes en boucles ouvertes

Potentiel	Transmissivité des matériaux géologiques (m ² /s)
Nul	< 10 ⁻⁵
Inférieur	[10 ⁻⁵ - 10 ⁻³ [
Moyen	[10 ⁻³ - 10 ⁻² [
Supérieur	≥ 10 ⁻²

Contrairement aux systèmes en boucles fermées pour lesquels l'eau souterraine n'est pas pompée, les systèmes en boucles ouvertes nécessitent l'extraction de l'eau souterraine à partir d'un puits et sa réinjection dans l'aquifère par un autre puits, après avoir circulé dans une thermopompe. Alors que les puits d'extraction de ces systèmes sont visés par le Règlement sur le captage des eaux souterraines (Gouvernement du Québec, 2013c), les puits de réinjection ne le sont pas. Les puits de captage dont le débit journalier est supérieur à 75 m³/j sont soumis à une autorisation ministérielle alors que les autres nécessitent un permis municipal.

Le captage de l'eau souterraine pour les systèmes en boucles ouvertes n'étant pas pour des fins de consommation, la réglementation provinciale exige donc que l'eau souterraine captée soit retournée directement à l'aquifère afin de minimiser le gaspillage d'eau, mais ne spécifie pas qu'elle doit être de qualité équivalente. Les systèmes en boucles ouvertes nécessitent le captage et l'injection d'eau souterraine dont la composition chimique doit donc être connue afin d'optimiser la conception du système et d'éviter des problèmes de colmatage. Un colmatage des crépines des puits de réinjection de l'eau souterraine peut survenir et, dans un cas extrême, empêcher l'injection et rendre le système géothermique inutilisable. La norme canadienne C448 Series-02 (CAN/CSA, 2009) pour la conception et l'installation de systèmes géothermiques ne mentionne pas de concentration limite pour les paramètres chimiques qui peuvent causer le colmatage des puits des systèmes en boucles ouvertes. Cependant, les principaux paramètres chimiques responsables de ces problèmes ont déjà été identifiés de même que sa probabilité d'occurrence en fonction de la valeur de ces paramètres dans l'eau souterraine (Tableau 5.8).

Le fer et le manganèse dissous dans l'eau souterraine peuvent colmater la crépine d'un puits ou la tuyauterie du système géothermique en s'y accumulant ou en favorisant la croissance de bactéries qui forment une couche visqueuse. Des concentrations en fer ferreux dépassant 0,2 mg/L sont favorables à la formation de bactéries ferrugineuses pouvant obstruer les ouvertures de la crépine. Pour des concentrations en fer ferrugineux dépassant 0,5 mg/L, la déposition d'oxydes de fer devient aussi problématique.

La dureté de l'eau est un autre paramètre géochimique à considérer pour éviter le colmatage en raison de la possibilité de précipitation de minéraux calcaires pour ce type d'eau. Selon Rafferty (2003), les probabilités de précipitations de dépôts calcaires sont faibles lorsque la dureté de l'eau est inférieure à 100 mg/L (éq. CaCO_3). Aucune mesure n'est alors nécessaire pour prévenir le colmatage. Pour une dureté entre 100 et 200 mg/L, la formation de dépôts calcaires dépend du pH et de la température de l'eau souterraine, tandis qu'au-delà de 200 mg/L, le colmatage est fort probable. Finalement, selon le même auteur, un pH supérieur à 8 augmente aussi la probabilité de colmatage et nécessite une investigation plus poussée avant d'installer un système en boucles ouvertes.

L'installation de systèmes géothermiques en boucles ouvertes demeure cependant possible même si les valeurs des paramètres du Tableau 5.8 dans l'eau souterraine sont élevées. Par exemple, l'ajout d'équipements spéciaux comme les échangeurs en cupro-nickel et la modulation du débit de pompage et d'injection peut permettre l'utilisation d'une eau souterraine ayant une dureté de 350 mg/L (ClimateMaster, 2013). Il est cependant recommandé d'analyser la composition de l'eau souterraine avant d'utiliser ce genre de technologie.

Tableau 5.8 : Principales conditions géochimiques de l'eau souterraine nuisibles au fonctionnement des systèmes géothermiques en boucles ouvertes

Paramètres chimiques	Source	Probabilité de colmatage en fonction de la concentration (mg/L) ou du pH		
		Probable	Peu probable	Très peu probable
Fer (Fe²⁺)	ClimateMaster (2013)	Fe ²⁺ > 0,5	0,5 ≤ Fe ²⁺ ≤ 0,2	Fe ²⁺ < 0,2
Manganèse (Mn)	MDDEFP (2012)	Mn > 0,05 ^	S.O.	Mn ≤ 0,05
Sulfure d'hydrogène (H₂S)	Rafferty (2003)	H ₂ S ≥ 0,25	S.O.	H ₂ S < 0,25
Dureté (éq. CaCO₃)	Rafferty (2003)	dureté > 200	100 ≤ dureté ≤ 200	dureté < 100
pH	Rafferty (2000, 2003)	pH > 8,0	8,0 ≤ pH ≤ 7,5	pH < 7,5

Note : S.O. : sans objet

^ : Objectif esthétique établi pour l'eau souterraine aux fins de consommation. Au-delà de cette concentration, des dépôts noirs peuvent se former dans la tuyauterie.

La Carte 29c du potentiel géothermique en boucles ouvertes indique que le potentiel est nul pour une grande portion du territoire de la CMQ. La raison principale est la faible épaisseur des dépôts meubles sur une grande partie du territoire, ce qui produit des valeurs calculées de transmissivité inférieures à 10⁻⁵ m²/s. Le potentiel géothermique est moyen à supérieur dans les secteurs où se trouvent des complexes fluvioglaciers ou deltaïques ayant des conductivités hydrauliques élevées. Plusieurs aquifères ont une transmissivité supérieure à 0,01 m²/s et un potentiel géothermique moyen à élevé. Des exemples d'aquifères avec un potentiel élevé sont ceux situés à Shannon près du lac du Père et du lac Griffin, celui situé entre Shannon et Val-Bélair à l'ouest de la rivière Nelson et l'est de la rivière Jacques-Cartier, celui situé à l'ouest de la rivière Montmorency près de l'exutoire de la rivière aux Pins ou celui situé sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent près de la rivière Pénin. En zone urbaine, où l'application de la géothermie en boucles ouvertes est particulièrement intéressante pour le chauffage et la climatisation des immeubles industriels, des commerces ou des institutions, seuls les aquifères du Proto-Saint-Laurent, situés dans la basse ville de Québec et à Cap-Rouge, présentent un potentiel intéressant.

Des exemples de dépôts meubles montrant un potentiel géothermique moyen sont ceux situés au nord-ouest de Wendake, ceux dans la portion aval de la rivière Sainte-Anne à Beauport et ceux situés au sud du lac Neigette à Lac-Beauport. Un potentiel inférieur à moyen est associé aux dépôts fluvioglaciers des Laurentides se trouvant au fond des vallées.

La Carte 29c affiche aussi les résultats d'analyses PACES-CMQ de l'eau souterraine des dépôts meubles, pour le manganèse, le fer, la dureté et le pH selon la classification présentée au Tableau 5.8. L'échantillonnage des eaux souterraines pour le projet a été conçu pour offrir une couverture régionale de la géochimie de l'eau souterraine, et non pas pour caractériser la géochimie des secteurs à fort potentiel pour la géothermie en boucles ouvertes. La localisation des échantillons pour lesquels la probabilité de colmatage est la plus élevée correspond majoritairement aux secteurs où le potentiel géothermique est le plus faible. Cependant, des valeurs de pH plus élevées que 8 ont été mesurées dans des

secteurs où le potentiel n'est pas nul, par exemple à L'Ange-Gardien ou à Shannon. L'aquifère du Proto-Saint-Laurent, dans le secteur commercial et industrialisé de la basse ville de Québec, contient des concentrations élevées en Fe, Mg, dureté et pH qui pourraient limiter l'efficacité des systèmes géothermiques en boucles ouvertes. Un cas réel de colmatage de puits géothermiques a été identifié dans ce secteur et confirme la possibilité de faire face à une telle problématique. Comme mentionné précédemment, une analyse plus détaillée de la géochimie de l'eau souterraine pour les secteurs à potentiel moyen ou supérieur est recommandée pour la conception d'un système en boucles ouvertes.

5.5 Gestion durable de la ressource

Le captage de l'eau souterraine peut servir à des fins d'approvisionnement domestique et industriel ou encore pour la géothermie. Pour combler ces besoins en eau souterraine, une saine gestion de la ressource devrait viser des objectifs de développement durable. Le Conseil des académies canadiennes a proposé cinq objectifs pour assurer une gestion durable de la ressource en eau souterraine (CAC, 2009). Ces cinq objectifs, illustrés à la Figure 5.9, visent à 1) prévenir une surexploitation des eaux souterraines, 2) prévenir leur contamination, 3) assurer la viabilité des écosystèmes influencés par les eaux souterraines, 4) assurer le bien-être socio-économique de la population et 5) appliquer les principes de bonne gouvernance.

Ces objectifs sont décrits en détails dans le rapport du Conseil des académies canadiennes. Le conseil note que ce sont des objectifs qui doivent être visés pour la gestion à long terme des eaux souterraines, car il n'existe présentement pas au Canada d'exemple de gestion des eaux souterraines qui les respectent. Certains de ces objectifs peuvent être conflictuels, comme par exemple l'utilisation de l'eau souterraine pour assurer un bien-être économique, pour lequel les volumes d'eau captés peuvent être déterminés selon un objectif économique plutôt que pour empêcher l'épuisement de la ressource. Le défi des gestionnaires de la ressource est donc de viser l'atteinte de l'ensemble des objectifs et de résoudre les conflits qui pourraient survenir entre les utilisateurs.

Le conseil propose une méthodologie pour la gestion des eaux souterraines dans l'objectif de sa gestion durable (Figure 5.10). La méthodologie est présentée sous la forme d'une pyramide qui montre la progression à suivre, en débutant à la base pour se diriger vers le sommet. La prise de décision, au sommet de la pyramide, devrait donc reposer sur les données et connaissances acquises dans les étapes précédentes illustrées dans la pyramide.

La méthodologie utilisée dans le cadre du PACES suit celle proposée par le conseil car elle vise premièrement la mise en place d'une base de données hydrogéologiques. Des modèles conceptuels du cadre géologique de la région et de la dynamique de l'écoulement souterrain ont ensuite été développés pour la CMQ. L'étape suivante de modélisation des eaux souterraines proposée par le conseil (CAC, 2009) ne requière par obligatoirement l'utilisation des modèles mathématiques complexes, comme par exemple un modèle de simulation de l'écoulement de l'eau souterraine en trois dimensions. Le type de modèle, ou d'approche quantitative, à utiliser dépendra des objectifs de gestion, mais devra reposer sur l'information et l'interprétation découlant des étapes précédentes de la pyramide.

L'utilisation du modèle HELP[®] dans le cadre de ce projet pour calculer la recharge est un exemple de modélisation reposant sur ces étapes précédentes.

Des travaux de modélisation mathématique plus complexes, débordant du cadre du PACES, sont présentement en cours dans le cadre de deux projets de recherche doctoraux à l'Université Laval. Ces deux projets requièrent l'utilisation d'un modèle mathématique pouvant simuler l'écoulement de l'eau souterraine en trois dimensions. Le premier projet porte sur l'évaluation de l'impact des changements climatiques et du développement urbain sur l'écoulement des eaux souterraines et de surface du bassin versant de la rivière Saint-Charles. Le deuxième projet vise à développer un outil d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères intégrant un modèle d'écoulement des eaux souterraines et de transport de contaminants. L'application de cet outil se fait aussi sur le bassin versant de la rivière Saint-Charles. Un découpage du territoire, respectant les limites physiques, est nécessaire pour l'élaboration de tels modèles. Selon le conseil (CAC, 2009), le développement de tels modèles mathématiques 3D peut ne pas être nécessaire pour la prise de décision visant à assurer la saine gestion des eaux souterraines et des modèles plus simples, comme par exemple HELP[®] pour calculer la recharge, peuvent être aussi appropriés. La définition des objectifs de gestion et des problématiques particulières auxquelles font face les gestionnaires guideront le choix de modèle à utiliser.

Selon l'approche proposée par le Conseil des académies canadiennes, l'exploitation des eaux souterraines ne peut pas être basée uniquement sur la quantité d'eau disponible, ou sur la recharge de la nappe. La quantité d'eau disponible donne une indication du potentiel d'un aquifère mais les taux de pompage et la localisation des puits de captages doivent être choisis pour éviter la surexploitation.

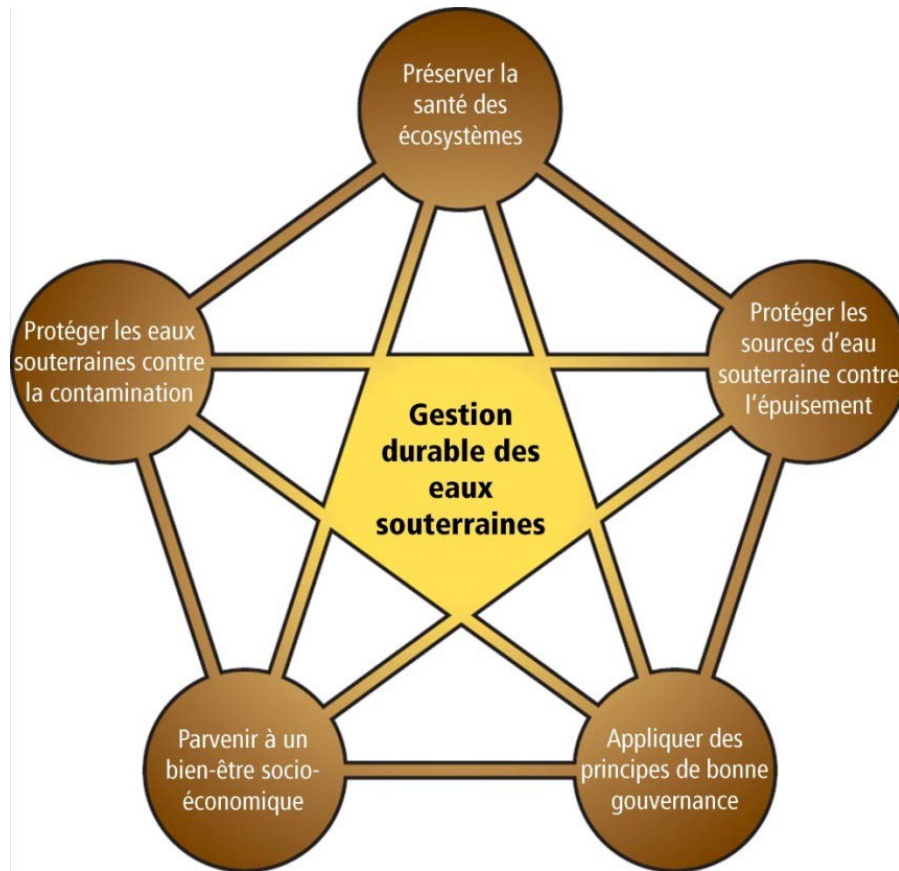


Figure 5.9 : Pentagone de la gestion durable des eaux souterraines

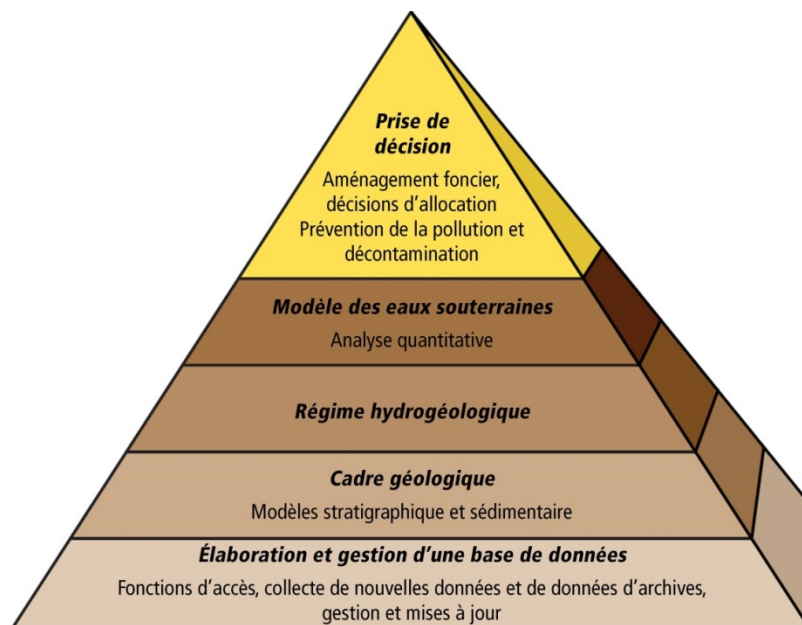


Figure 5.10 : Connaissances scientifiques nécessaires pour une gestion durable des eaux souterraines

6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusions

Le Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (PACES-CMQ) a pour objectif de dresser le portrait régional de la ressource en eau souterraine sur le territoire municipalisé de la CMQ et ainsi combler les besoins en informations sur cette ressource. Par le transfert et l'intégration de ces connaissances, le projet vise ultimement une utilisation durable des ressources en eau souterraine à des fins de consommation et pour l'exploitation de l'énergie géothermique. Les résultats du projet rendront possible l'établissement d'une approche de gestion et de protection de la ressource avec des priorités en relation avec les conditions des aquifères, tout en développant une structure de gestion qui s'appuiera sur les organismes locaux et les conditions spécifiques de la région.

6.1.1 Contextes hydrogéologiques

6.1.1.1 Contextes hydrostratigraphiques

La nature des dépôts géologiques et leur distribution spatiale exercent un contrôle déterminant sur l'écoulement de l'eau souterraine et sa composition géochimique. Sur le territoire de la CMQ, l'histoire géologique de la région a mené à la mise en place de trois provinces géologiques: le Grenville, la Plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches. Les roches appartenant à ces trois provinces sont surmontées d'une architecture tridimensionnelle complexe de dépôts meubles d'origine glaciaire, marine et fluviatile. Les dépôts meubles ont été définis sur la base de leurs propriétés hydrauliques par des hydrofaciès régionaux. Ces hydrofaciès, des coupes et un modèle hydrostratigraphique ont permis d'établir les différents contextes hydrostratigraphiques de la région.

Sur la rive sud, la succession des dépôts comprend généralement des unités de silt argileux ou sableux d'origine marine reposant sur le roc. L'aquifère de roc fracturé est en grande partie confiné par ces dépôts. Les aquifères de dépôts meubles, composés de sable et gravier d'origine fluvioglaciaire, sont rares.

Les dépôts meubles silteux sur l'île d'Orléans sont minces, l'aquifère de roc fracturé est donc non confiné sur la majorité de l'île. Aucun aquifère de dépôts meubles n'a été décelé.

Sur la rive nord dans les Basses-terres du Saint-Laurent, les dépôts de surface sont généralement des sables silteux et, lorsque l'épaisseur des dépôts est importante, une couche de silt d'origine marine se retrouve en profondeur et confine l'aquifère de roc fracturé sous-jacent. Le delta du Proto-Saint-Laurent, dans la basse ville de Québec, contient une succession plus complexe de dépôts avec des silts recouvrant un aquifère de sable séparé du roc par une importante épaisseur de silt. L'aquifère de roc est confiné, mais celui dans les dépôts varie de non confiné à semi confiné.

Sur le piémont laurentien, d'importants complexes fluvioglaciaires ou deltaïques sont présents et constituent des aquifères de dépôts meubles non confinés de grande taille. Ces complexes sont principalement composés de sable et gravier et contiennent généralement des horizons de silt discontinus difficiles à localiser précisément tant à l'échelle locale que régionale. L'aquifère de roc y présente généralement un confinement discontinu. Les plus importants complexes se situent dans les vallées de la rivière Jacques-Cartier, de la rivière Montmorency et, plus haut en altitude, dans le secteur de Saint-Ferréol-les-Neiges et Saint-Tite-des-Caps. Dans les Laurentides, les dépôts de till sableux sont généralement peu épais et ne confinent pas l'aquifère de roc sous-jacent. Des sables et graviers d'origine alluvionnaire ou fluvioglaciaire se retrouvent dans les vallées et peuvent former localement des aquifères de dépôts meubles non confinés.

6.1.1.2 Conditions hydrogéologiques

Les conditions hydrogéologiques comprennent l'ensemble des connaissances sur les aquifères. L'établissement des contextes hydrostratigraphiques a permis de définir l'architecture des dépôts meubles en fonction des hydrofaciès. La piézométrie et les directions d'écoulement de l'eau souterraine, les propriétés hydrauliques des matériaux, la recharge des aquifères ainsi que la géochimie de l'eau souterraine permettent de compléter les connaissances et de définir les conditions hydrogéologiques régionales.

Sur le territoire de la CMQ, la carte piézométrique illustre que le niveau piézométrique est généralement peu profond (2 à 10 m) et que l'écoulement régional se fait vers le fleuve ; plus localement, des hauts topographiques vers le fond des vallées. Les aquifères de dépôts meubles du Proto Saint-Laurent sont les seuls aquifères de dépôts meubles d'intérêt régional qui ne sont pas en lien hydraulique avec l'aquifère de roc sous-jacent. Leurs niveaux piézométriques sont toutefois similaires à ceux de l'aquifère de roc fracturé sous-jacent.

Les propriétés hydrauliques issues de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ ont été analysées en fonction de chaque hydrofaciès. Les valeurs obtenues sont cohérentes avec celles tirées de la littérature et permettent de calculer la recharge et de parfaire la compréhension de l'écoulement régional. Une valeur unique de conductivité hydraulique a été attribuée à l'aquifère de roc fracturé car les données disponibles ne permettaient pas d'en distinguer les propriétés par province géologique ou par lithologie.

L'établissement d'un bilan hydrologique, dont les principales composantes sont la précipitation, l'évapotranspiration, le ruissellement et la recharge des aquifères, permet de définir la quantité d'eau qui contribue aux différents processus d'échange dans le cycle complet de l'eau. En hydrogéologie, la recharge permet de quantifier les taux de renouvellement des aquifères et son évaluation est nécessaire pour assurer une gestion durable de cette ressource. Dans le cadre du projet, les composantes du bilan en eau ont été estimées avec le modèle numérique HELP[®] intégrant de nombreuses données sur le territoire : des données climatiques, des données de surface sur la végétation et l'occupation du sol, des données pédologiques et géologiques. Dans les Laurentides qui représentent les 2/3 du territoire à l'étude, les taux de recharge sont les plus importants avec des valeurs entre 400 et 500 mm/an. Dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, la recharge est plus faible avec des valeurs de 50 à 400 mm/an en raison de la forte

urbanisation et des dépôts meubles parfois peu perméables qui favorise le ruissellement de l'eau en surface.

La détermination des types d'eau, ou faciès géochimiques, permet de comprendre l'évolution des eaux souterraines et les différents contextes hydrogéologiques. Dans les Laurentides, l'eau souterraine est très peu évoluée, peu chargée en ions majeurs ce qui confirme qu'il s'agit d'une eau de recharge assez jeune. Au droit des grands complexes fluvioglaciaires et deltaïques, la signature géochimique est caractéristique soit d'une eau jeune, soit d'une eau évoluée. Cela témoigne de la complexité de l'écoulement entraînée par la structure des dépôts comprenant fréquemment des horizons de silt. La couronne nord des Basses-terres du Saint-Laurent est considérée comme intermédiaire, offrant une transition entre les eaux de recharge des Laurentides et les eaux souterraines généralement plus évoluées des Basses-terres du Saint-Laurent. Sur le pourtour de l'île d'Orléans, le niveau d'évolution géochimique de l'eau souterraine est aussi intermédiaire, signifiant que l'écoulement souterrain est lent, car la distance entre la recharge du centre de l'île et son pourtour est faible. Sur la rive sud, où l'aquifère est confiné localement, le niveau d'évolution géochimique est intermédiaire.

À partir de l'analyse des résultats issus des campagnes d'échantillonnage des eaux souterraines, les dépassements des normes de potabilité ou des objectifs esthétiques semblent être d'origine naturelle. La nature du roc et des dépôts meubles ainsi que l'incursion de la Mer de Champlain peuvent expliquer les dépassements en Ba, F, Na, Cl, Mn, Fe, Al, sulfures, dureté et MDT (matières dissoutes totales). Le pourcentage d'échantillons montrant des dépassements des critères de potabilité est faible, la qualité naturelle des eaux souterraines de la CMQ peut être considérée comme bonne.

6.1.2 Ressource en eau souterraine

La protection et l'exploitation durable de la ressource en eau souterraine nécessitent une connaissance de sa vulnérabilité à la contamination, des activités anthropiques qui menacent sa qualité, de l'utilisation qui en est faite et de son potentiel d'exploitation à des fins de consommation et d'exploitation de l'énergie géothermique.

Une carte de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC a été produite et permet d'identifier les zones les plus vulnérables à la contamination et de fournir un outil d'aide à la prise de décision pour aménager le territoire tout en protégeant la ressource en eau souterraine. Sur le territoire de la CMQ, les secteurs où la vulnérabilité est la plus élevée se trouvent dans les vallées des Laurentides et sur le piémont laurentien. En effet, les grands complexes deltaïques et fluvioglaciaires qui forment d'importants aquifères de dépôts meubles sont très vulnérables à la contamination. L'aquifère de roc fracturé au nord-est de la Ville de Lévis est aussi très vulnérable. Les zones les moins vulnérables se retrouvent au centre de la Ville de Lévis, dans la partie est de la MRC de La Côte-de-Beaupré et dans l'Agglomération de Québec où d'importantes épaisseurs de dépôts de silt protègent l'aquifère de roc fracturé. La vulnérabilité est moyenne à élevée à l'île d'Orléans et sur le reste du territoire où le roc est subaffleurant. Les paramètres ayant le plus de poids dans l'évaluation de la vulnérabilité sont la profondeur de l'aquifère, l'impact de la zone vadose et la recharge. Ces trois paramètres dépendent largement de la nature des dépôts de surface

et des contextes hydrostratigraphiques. Toutefois, d'importantes variations de la vulnérabilité sont observables dans la région. La grande diversité physiographique et géologique de la CMQ explique cette variabilité et fait ressortir l'importance de faire des études locales détaillées pour mieux définir un secteur.

Les activités anthropiques représentent souvent une source potentielle de contamination des eaux souterraines. Une cartographie de la densité des activités anthropiques pondérée par l'ampleur du risque qu'elles présentent a été faite. Cette carte régionale fait ressortir les zones les plus fortement urbanisées du centre ville de Québec et de Lévis. Cette analyse ne considère pas le risque relié aux activités agricoles et aux installations septiques résidentielles qui pourrait représenter un risque non négligeable. De plus, elle ne montre pas les sources réelles ponctuelles de contamination potentielle. L'évaluation du risque global de contamination de l'eau souterraine par les activités anthropiques devrait inclure le risque potentiel de contamination relié aux activités anthropiques et la vulnérabilité des aquifères.

Les volumes d'eau souterraine prélevés par chaque municipalité ou ville de la CMQ pour l'utilisation résidentielle, industrielle, commerciale et institutionnelle ont été estimés. La MRC prélevant le plus d'eau souterraine est la MRC de La Jacques-Cartier avec environ 5,4 Mm³/an, dont le territoire est vaste et la recharge importante. L'Agglomération de Québec prélève des quantités du même ordre (5,4 Mm³/an bien que seulement 12 % de sa population s'alimente en eau souterraine. La Ville de Lévis et les MRC de La Côte-de-Beaupré et de L'Île-d'Orléans prélèvent chacun environ 1 Mm³/an d'eau souterraine. À l'île d'Orléans, cette ressource est particulièrement importante, car l'eau souterraine est la seule source d'eau potable. La consommation totale annuelle, excluant l'utilisation agricole, est estimée à 15 Mm³/an d'eau souterraine pour l'ensemble de la CMQ. En 2008, l'eau souterraine approvisionnait 21 % de la population.

Bien que le potentiel d'exploitation d'un aquifère de dépôts meubles ne puisse être défini uniquement par le volume efficace d'eau souterraine qu'il contient (Sophocleos, 2000), l'évaluation de ce volume permet une première quantification de son importance. Pour l'ensemble du territoire de la CMQ, les volumes efficaces totaux d'eau souterraine contenu dans les aquifères de dépôts meubles sont estimés à 610 Mm³. La MRC La-Jacques-Cartier arrive en tête avec 329 Mm³ d'eau souterraine contenu dans ses aquifères de dépôts meubles, suivi par la MRC La Côte-de-Beaupré (146 Mm³), l'Agglomération de Québec (106 Mm³) et la Ville de Lévis (29 Mm³). Le volume disponible dans la MRC de L'Île-d'Orléans est nul compte tenu de l'absence d'aquifères de dépôts meubles. La cartographie de la transmissivité totale des aquifères de dépôts meubles permet de localiser les secteurs où les aquifères sont plus perméables et/ou plus épais. Les aquifères qui présentent un potentiel supérieur sont dispersés dans les vallées des rivières Jacques-Cartier, Montmorency et Sainte-Anne de même que dans le piémont laurentien où des amas fluvioglaciers ont été déposés. Sur la rive sud, le cordon fluvioglacière situé à l'ouest de la rivière Etchemin présente également un potentiel attrayant même si peu de forage ont permis de le délimiter précisément.

En regard des analyses chimique de l'eau souterraine des aquifères de dépôts meubles, la qualité de la ressource est bonne à l'échelle régionale. Toutefois, ces aquifères de dépôts meubles avec un fort potentiel d'exploitation ont généralement une vulnérabilité à la

contamination très élevée et des cas de contamination ont déjà été rapportés à l'échelle locale. Bien que cette analyse des volumes efficaces permette de cibler des secteurs de fort potentiel, une étude plus poussée doit être réalisée pour prévoir une exploitation durable de la ressource. En effet, un changement majeur d'exploitation peut avoir des impacts significatifs et imprévisibles sur l'équilibre naturel du bilan hydrologique et du rapport recharge/résurgence des aquifères (Devlin et Sophocleo (2005); Sophocleos (2000); Freeze et Cherry (1979); Bredehoeft et Young (1970)).

L'analyse du potentiel géothermique des aquifères de la CMQ concerne les technologies de basses et très basses températures, soient les boucles fermées horizontales, les boucles fermées verticales et les boucles ouvertes. Sur le territoire de la CMQ, le meilleur potentiel géothermique pour des systèmes en boucles fermées horizontales se retrouve dans les secteurs où les dépôts sont sableux, saturés et d'épaisseur de 2 m et plus. Le potentiel géothermique en boucles fermées verticales évalué sur les 100 premiers mètres de profondeur est fortement dépendant de la lithologie du roc et est généralement faible lorsque les dépôts sont épais. Ainsi les secteurs avec un fort potentiel pour ce type d'installations se retrouvent dans les roches granitiques de la Province de Grenville dans les Laurentides. Contrairement aux deux systèmes en boucles fermées, le potentiel géothermique en boucles ouvertes ne dépend pas principalement de la conductivité thermique des unités géologiques, mais plutôt de la capacité de l'aquifère à soutenir un débit de prélèvement en eau, qui est reliée à la transmissivité. Pour ce type de système, les secteurs de potentiel géothermique moyen à supérieur sont donc les mêmes que ceux de fort potentiel d'exploitation pour la consommation, soient les grands complexes deltaïques et fluvioglaciaires du piémont laurentien et des vallées des rivières Jacques-Cartier, Montmorency et Sainte-Anne. Les aquifères du Proto-Saint-Laurent, sur lesquels repose un secteur industrialisé, présentent un potentiel géothermique intéressant. Toutefois, pour la conception de ce type d'installation, certains paramètres physico-chimiques (les concentrations en fer, en manganèse, en sulfures d'hydrogène, la dureté et le pH) doivent être connus. Les aquifères du Proto-Saint-Laurent semblent moins propices aux installations en boucles ouvertes en regard des paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine. Des études locales de faisabilité seraient nécessaires pour confirmer les conditions hydrogéochimiques locales. Les eaux moins minéralisées dans les aquifères de dépôts meubles du piémont laurentien seraient plus faciles d'exploitation.

La notion de gestion durable de la ressources est capitale et passe par l'atteinte de cinq objectifs : 1) prévenir une surexploitation des eaux souterraines, 2) prévenir leur contamination, 3) assurer la viabilité des écosystèmes influencés par les eaux souterraines, 4) assurer le bien-être socio-économique de la population et 5) appliquer les principes de bonne gouvernance. Le projet PACES-CMQ a mené à l'élaboration d'une base de données hydrogéologiques, la compréhension du cadre géologique et l'établissement du régime hydrogéologique. Ces trois étapes sont les jalons de la gestion durable de la ressource et constitue une avancée notable des connaissances pour la province du Québec et la Communauté métropolitaine de Québec, maintenant plus outillés face aux enjeux sur les eaux souterraines.

6.1.3 Limitations de l'étude

Le projet PACES-CMQ a pour objectif l'amélioration des connaissances sur les eaux souterraines d'un territoire de 3 663 km². En regard du mandat de l'Université Laval d'établir le portrait régional des ressources en eau souterraine et compte tenu de la disponibilité variable des informations de forages dans certains secteurs, il importe de rappeler la portée régionale des analyses. Dans le cas d'études locales, le gestionnaire, le propriétaire d'un lot ou le mandataire de l'étude peut consulter les analyses et les cartes produites par le projet PACES-CMQ.

De manière générale, la profondeur prise en compte dans le cadre du PACES-CMQ se limite à une centaine de mètres, profondeur maximale à laquelle les puits de captage sont généralement installés sur le territoire de la CMQ. L'architecture et les propriétés des dépôts meubles sont bien définies à l'exception des complexes deltaïques et fluvioglaciaires des rivières Jacques-Cartier, Montmorency et Sainte-Anne. Pour ces aquifères, il n'a pas été possible d'apporter plus de précision sur la localisation des unités de silt semi confinant ou confinant qui peuvent avoir des implications sur les processus d'écoulement de l'eau souterraine et sur la plupart des autres aspects touchant l'hydrogéologie. La connaissance de la nature, de la fracturation et des propriétés hydrauliques du roc fracturé reste un défi de taille car ce milieu est plus complexe.

Les activités potentiellement polluantes telles que l'agriculture, les activités militaires et les fosses septiques n'ont pas été intégrées en raison d'un manque d'information sur la nature ou la localisation précise de l'activité.

Les volumes d'eau souterraine prélevés par le secteur agricole n'ont pas été évalués en raison d'un manque d'information. Le portrait du prélèvement en eau souterraine a été établi à l'aide de données réparties sur plusieurs années. Un effort supplémentaire est nécessaire pour accéder aux données de prélèvement en eau, de manière à évaluer les prélèvements sur la même base annuelle et de suivre l'évolution des habitudes d'utilisation de la ressource (quantité en fonction des différentes utilisations).

6.2 Recommandations

La gestion durable des eaux souterraines sera atteinte en poursuivant les cinq objectifs énoncés par le Conseil des académies canadiennes (CAC, 2009) soit de protéger les eaux souterraines contre l'épuisement et la contamination, de préserver les écosystèmes, de parvenir à un bien-être socio-économique et d'appliquer des principes de bonne gouvernance.

Le PACES-CMQ s'inscrit dans la méthodologie proposée pour la gestion des eaux souterraines. Premièrement, l'élaboration et la gestion d'une base de données hydrogéologiques se situent à la base de cette démarche. L'utilité de cette base de données dépendra de sa qualité, ainsi nous recommandons :

- L'accès à l'ensemble des informations et des données hydrogéologiques acquises par des fonds publics afin qu'elles soient être intégrées dans cette base de données,
- La mise à jour continue de la base de données, et
- La diffusion de l'information, sa facilité d'accès et son uniformisation entre les régions du Québec.

Le PACES-CMQ a aussi permis l'établissement d'un cadre géologique et du contexte hydrogéologique régional, qui devront être mis à jour au fur et à mesure que de nouvelles données seront disponibles.

L'utilisation de modèles simples, comme par exemple HELP[®] pour estimer la recharge, peut déjà aider les gestionnaires de la ressource. Si les objectifs futurs de gestion nécessitent de faire appel à des modèles plus complexes, comme par exemple des modèles de simulation de l'écoulement de l'eau souterraine, nous recommandons alors de délimiter le territoire par bassin versant plutôt que par limite administrative. Ce découpage du territoire, en plus de faciliter grandement la modélisation numérique de l'écoulement, permettrait d'arrimer davantage les objectifs du PACES à ceux des OBV. Les connaissances sur les eaux souterraines et les eaux de surface pourraient ainsi être mieux harmonisées et leur gestion mieux intégrée, en concertation avec tous les intervenants du milieu.

Des efforts devront être déployés pour permettre l'intégration des analyses hydrogéologiques par les gestionnaires du territoire. Des outils adéquats devront aussi être mis en place pour sensibiliser la population, les élus et les gestionnaires à la protection et à la conservation de l'eau souterraine.

7 RÉFÉRENCES

- Abesser, 2010 – ABESSER, C. *Open-loop ground source heat pumps and the groundwater systems: A literature review of current applications, regulations and problems*. British Geological Survey.
- AgriCan, 2012 – AGRICULTURE CANADA. Base de données nationale sur les sols. Adresse URL : <http://sis.agr.gc.ca/siscan/nsdb/index.html>, consulté le 23 octobre 2012.
- Agrométéo Québec, 2012 – AGROMÉTÉO QUÉBEC. *Atlas agroclimatique du Québec*. Adresse URL : <http://dev.agrometeo.org/atlas/category/saiscrois/therm/true#tendances>, consulté le 6 décembre 2012.
- Allen, 1996 – ALLEN, D.M. *Steady-state and transient hydrologic, thermal and chemical modelling of a faulted carbonate aquifer used for aquifer thermal energy storage*. Department of Geoscience Centre, and Department of Earth Sciences, Carleton University, Ottawa, On, Ca.
- Aller *et coll.*, 1987 – ALLER, L., BENNETT, T., LEHR, J.H., PETTY, R., HACKETT, G. *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*. National Water Well Association, Dublin, OH.
- ASCE, 1995 – AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Hydrology Handbook*. Prepared by the Task committee on hydrology handbook of management group D of the American society of civil engineers. 2de ed.
- Beaudin *et coll.*, 2011 – BEAUDIN, I., MICHAUD, A.R., ST-LAURENT, I. DROUIN, A. ET DESJARDINS., J. *Rapport d'étape du Projet interrégional de connaissances sur les eaux souterraines du Québec - Projet de connaissances en Montérégie Est*. Projet réalisé pour l'Institut national de recherche scientifique pour et financé par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Pêches. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Québec, Canada.
- Benoit *et coll.*, 2011 – BENOIT, N., BLANCHETTE, D., NASTEV, V., CLOUTIER, V., MARCOTTE, D., BRUN KONE, M. ET MOLSON, J.W. « Groundwater geochemistry of the lower Chaudière river watershed. » Québec. Natural Resources Canada – Geological Survey of Canada, *Proceedings of Geohydro 2011*.
- Blais, 2006 – BLAIS, V. *Caractérisation et modélisation de l'Écoulement et du transport de TCE en relation avec la rivière Jacques-Cartier à Shannon, Québec, Canada*. Mémoire de maîtrise, Institut nationale de la recherche scientifique.
- Blanchette *et coll.*, 2010 – BLANCHETTE, D., CLOUTIER, V., ROY, M., AUDET-GAGNON, F., CASTELLI, S., BEAUDRY, C. *Protocole officiel de prélèvement d'échantillon d'eau souterraine – Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines au Québec (PACES)*. Université du Québec, juin 2010.
- Bourque *et coll.*, 1998 – BOURQUE, E., MICHAUD, Y., LEFEVBRE, R., BOISVERT, E. *Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf : hydrogéochimie des eaux souterraines*. Commission géologique du Canada, Dossier public #3664-c.
- Bourque, 2010 – BOURQUE, P.A. *Planète Terre*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Adresse URL : http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html, consulté en février 2013.

- Bouwer et Rice, 1976 – BOUWER, H., RICE, R.C. « A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells ». *Water Resources Research* 12 (3), pp. 423-428.
- Bradbury et Rothschild, 1985 – BRADBURY, K.R., ROTHSCHILD, E.R. « A computerized technique for estimating the hydraulic conductivity of aquifers from specific capacity data. » *Ground Water* 23 (2), pp. 240-246, March-April 1985.
- Bréda, 1999 – BRÉDA, N. « L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. » *Revue forestière française* 51 (2), pp.135-150.
- Bredehoeft et Young, 1970 – BREDEHOEFT, J.D., YOUNG, R.A. « The temporal allocation of groundwater: a simulation approach. » *Water Resources Research* 6 (1), pp. 3-21.
- CAC, 2009 – CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES. *La gestion durable des eaux souterraines au Canada*. Comité d'expert sur les eaux souterraines, Ottawa, Canada, 292 p.
- CAN/BNQ, 1987 – CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION ET BUREAU DE NORMALISATION DU QUÉBEC. *Sols - Analyse granulométrique des sols inorganiques*. Canadian standards association (Ottawa, Ont.) et Bureau de normalisation du Québec (Québec, Que.). CAN/BNQ 2501-025.
- CAN/CSA, 2009 – CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. C448 Series-02. *Design and installation of earth energy systems, a national standard of Canada*. approved March 2003, Update no. 2 – October 2009.
- Canadell et coll., 1996 – CANADELL, J., JACKSON, R.B., EHLERINGER, J.R., MOONEY, H.A., SALA, O.E., SCHULZE, E.-D. « Maximum rooting depth of vegetation types at the globe scale. » *Oecologia* 108 (4), pp. 583-595.
- Carrier et coll., 2013 – CARRIER, M.-A., LEFEBVRE, R., RIVARD, C., PARENT, M., BALLARD, J.-M., BENOIT, N., VIGNEAULT, H., BEAUDRY, C., MALET, X., LAURENCELLE, M., GOSSELIN, J.-S., LADEVÈZE, P., THÉRIAULT, R., BEAUDIN, I., MICHAUD, A., PUGIN, A., MORIN, R., CROW, H., GLOAGUEN, E., BLESER, J., MARTIN, A., LAVOIE, D. *Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada*. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines Rapport final INRS R-1412, soumis en mars 2013.
- Castonguay et Nadeau, 2012 – CASTONGUAY, S., NADEAU, L. *Géologie simplifiée de la région de Québec, Québec*. Commission géologique du Canada, Dossier public 7086. Doi :10.4095/290089. Adresse URL : http://geogratis.cgdi.gc.ca/nationalatlas/download/part6/ess_pubs/290/290089/of_7086.pdf, consulté le 13 mars 2013.
- Cayer, 2010 – CAYER, D. *Manuel d'analyse granulométrique : Méthode combinant les techniques de la granulométrie laser et les tamis*. Première édition, Laboratoire de sédimentologie et de géomorphologie, Université Laval.
- CEP, 2012 – COMITÉ FÉDÉRAL-PROVINCIAL-TERRITORIAL SUR L'EAU POTABLE. *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Tableau sommaire*. Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable, septembre 2012. Adresse URL : http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/2012-sum_guide-res_recom/index-fra.php

- ClimateMaster, 2013 – CLIMATEMASTER. *Geothermal heat pump systems*. 40 p. (fiche technique), URL address: http://www.climatemaster.com/share/Res_All_Products_CLM/Section_2_Geothermal%20Applications.pdf
- COBARIC ET UPA, 2008 – COMITÉ DE BASSIN DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE ET UNION DES PRODUCTEURS AGRICOLES. *Atlas des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Chaudière : secteurs de la Basse-Chaudière et de la Moyenne-Chaudière*.
- Colliard, 2004 – COLLIARD, B. *Outil de décision et de quantification du potentiel géothermique pour l'implantation de sondes géothermiques verticales*. Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel.
- Comeau et coll., 2012 – COMEAU, F.-A., BÉDARD, K., MALO, M. *Les régions de Nicolet et de Villeroy: état des connaissances pour la séquestration géologique du CO₂*. Institut national de la recherche scientifique, Québec, Québec. R-1332 (INRSCO2-2012-V1.3), Adresse URL : http://chaireco2.ete.inrs.ca/en/publications_en, consulté le 14 mars 2013.
- Coté et Konrad, 2005 – CÔTÉ J., KONRAD J.M. « A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. » *Canadian Geotechnical Journal* 42 (2), pp. 443-458.
- CPVQ, 1993 – CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC. *Besoins en eau pour l'irrigation des cultures du sud-ouest du Québec*. Conseil des productions végétales du Québec, Bulletin technique 19.
- Croteau, 2006 – CROTEAU, A. *Détermination de la distribution spatiale et temporelle de la recharge de l'aquifère régional transfrontalier du bassin versant de la rivière Chateauguay, Québec et États-Unis*. Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, Québec, Université du Québec.
- Devlin et Sophocleos, 2005 – DEVLIN, J.F., SOPHOCLEOS, M. The persistence of the water budget myth and its relationship to sustainability. *Hydrogeology Journal* 13, pp.549-554.
- Dion-Dupont et coll., 2013 – DION-DUPONT, V., MAHEUX, A.F., BISSON, M.-A., BOUCHARD, S., RODRIGUE, L., RODRIGUEZ, M.J. *La santé microbiologique des puits privés d'eau potable de la grande région de Québec. Le cas particulier de l'île d'Orléans*. Affiche présentée dans le cadre du 81^e Congrès de l'ACFAS, Québec, 7 mai 2013.
- DRSP, 2013 – DIRECTION RÉGIONALE DE SANTÉ PUBLIQUE, AGENCE DE LA SANTÉ ET DES SERVICES SOCIAUX DE LA CAPITALE-NATIONALE. *Le trichloroéthylène (TCE)*. Adresse URL : <http://www.dspq.qc.ca/TCE2.html>, consulté le 15 mai 2013.
- Environnement Canada, 2012 – ENVIRONNEMENT CANADA. *Climat-Québec – Normales climatiques*. Adresse URL : www.climat-quebec.qc.ca, consulté le 6 décembre 2012.
- Fetter, 2001 – FETTER, C.W. *Applied Hydrogeology, 4th Edition*. Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, ISBN 0-13-088239-9.
- Finch, 1998 – FINCH, J.W. « Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model - Sensitivity to land surface parameters. » *Journal of Hydrology* 211 (1-4), pp. 112-125.
- Freeze et Cherry, 1979 – FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.
- Fujii et coll., 2007 – FUJII H., INATOMI T., ITOI R., UCHIDA Y. « Development of suitability maps for ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport models ». *Geothermics* 36 (5), pp. 459-472.

- Gadd, 1971 – GADD, N.R. *Surficial geology of central St. Lawrence Lowland, Quebec; Map 1197A*. Geological Survey of Canada, 1 carte à l'échelle 1/125 000.
- Gerardin et McKenney, 2001 – GERARDIN, V., MCKENNEY, D. *Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles : vers une définition des bioclimats du Québec*. Direction du patrimoine écologique et du développement durable, ministère de l'Environnement, Québec. Adresse URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/classification/model-clima.pdf>
- Gogolev, 2002 – Gogolev, M.I. « Assessing groundwater recharge with two unsaturated zone modeling technologies. » *Environmental Geology* 42 (2-3), pp. 428-458.
- Gouvernement du Québec, 2013a – GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Loi sur la qualité de l'environnement (Q-2)*. mise à jour 1er mai 2013, Adresse URL : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/Q_2/Q2.htm
- Gouvernement du Québec, 2013b – GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Règlement sur la qualité de l'eau potable (Q-2, r.40) de la Loi sur la qualité de l'environnement*. mise à jour 1er mai 2013, Adresse URL : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=%2F%2FQ_2%2FQ2R40.htm
- Gouvernement du Québec, 2013c – GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Règlement sur le captage des eaux souterraines (Q-2, r.6) de la Loi sur la qualité de l'environnement*. mise à jour 1er mai 2013, Adresse URL : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=%2F%2FQ_2%2FQ2R40.htm
- Gouvernement du Québec, 2004 – GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Caractérisation de l'eau souterraine dans les sept bassins versants*. Dans le cadre de l'Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé, réalisé conjointement par le ministère de l'Environnement, le ministère de la Santé et des Services sociaux, le ministère de l'Agriculture, de Pêcheries et de l'Alimentation et l'Institut national de santé publique du Québec. Adresse URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/sept-bassins/caracterisation.pdf>
- Grasby et coll., 2011 – GRASBY, S.E., ALLEN, D.M., BELL, S., CHEN, Z., FERGUSSON, G., JESSOP, A., KELMAN, M., MAJOROWICZ, J., MOORE, M., RAYMOND, J., THERRIEN, R. *Geothermal energy resource potential of Canada*. Geological Survey of Canada, Open File 6914.
- Gregory et coll., 2003 – GREGORY, P.A., JONATHAN, SCURLOCK, M.O., JEFFREY, A.H. « Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. » *Global Ecology & Biogeography*. 15 p. 12, 191–205. Department of Global Ecology, Carnegie Institution of Washington, Stanford, CA 94305, U.S.A
- GRIES, 2012 – GROUPE DE RECHERCHE INTERRUNIVERSITAIRE SUR LES EAUX SOUTERRAINES. *Protocole de production des livrables des projets PACES, Livrables 3.24 Qualité de l'eau (critères d'eau potables) et 3.25 Qualité de l'eau (objectifs esthétiques)*. Version préliminaire, mars 2012. 11 p.
- Hantush et Jacob, 1955 – HANTUSH, M.S., JACOB, C.E. « Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. » *Transactions, American Geophysical Union* 36 (1), pp. 95-100. DOI: 10.1029/TR036i001p00095.

- Healy et Cook, 2002 – HEALY, R.W., COOK, P.G. « Using groundwater levels to estimate recharge. » *Hydrogeology Journal* 10 (1), pp. 91-109.
- ISQ, 2009 – INSTITUT DE LA STATISTIQUE DU QUÉBEC, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Perspectives démographiques des MRC du Québec 2006-2031*.
- Johansen, 1977 – JOHANSEN, O. *Thermal conductivity of soils*. Ph.D. diss. Norwegian Univ. of Science and Technol., Trondheim, CRREL draft transl. 637, July 1977. URL address: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA044002>.
- Johnson, 1967 – JOHNSON A.I. Specific yield - Compilation of specific yields for various materials. U.S. *Geological Survey Water-Supply*, Paper 1662-D.
- Jyrkama et coll., 2002 – JYRKAMA, M.I., SYKES, J.F., NORMANI, S.D. « Recharge estimation for transient groundwater modeling. » *Ground Water* 40 (6), pp. 638-648.
- Kavanaugh et Rafferty, 1997 – KAVANAUGH S.P., RAFFERTY K. *Ground-Source Heat Pumps: Design Of Geothermal Systems For Commercial And Institutional Buildings*, ASHRAE, Atlanta. 167p. ISBN: 1883413524.
- Kirby et Beaulieu, 2006 – KIRBY, J., BEAULIEU, J. *Rapport méthodologique de la cartographie des milieux humides du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec*. Canards illimités - Québec, Rapport technique No Q2006-2f.
- Lamarche et coll., 2012 – LAMARCHE, L., VÉZINA, L.-P., CÔTÉ, J. *Cartographie des dépôts superficiels de la région de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ)*. Université Laval. Rapport présenté au ministère des Ressources naturelles et de la Faune.
- Lamarche, 2011 – LAMARCHE, L. *Évolution paléo environnementale de la dynamique quaternaire dans la région de Québec: Application en modélisation tridimensionnelle et hydrogéologique*. Thèse de doctorat, Institut nationale de la recherche scientifique.
- Lambert et coll., 2010 – LAMBERT, M., WALTER, J., ROULEAU, A., DAIGNEAULT, R., CHESNAUX, R. *Protocole de fiabilité et validation des données de forage (version 02)*, Projet interrégional sur les eaux souterraines, janvier 2010
- Lamothe, 1987 – LAMOTHE, M. *Pleistocene stratigraphy in the St-Lawrence lowland and the Appalachians of southern Québec: A field guide. Volume 4*. Collection Environnement et Géologie, Université de Montréal.
- Laplante, 1962 – LAPLANTE, L. *Étude pédologique du comté de Lévis*. Division des sols, ministère de l'Agriculture et de la colonisation, Adresse URL : http://www.irda.qc.ca/_ftbFiles/Etude_pedo/Etude_pedo_33.pdf, consulté le 12 avril 2013.
- Lasalle et coll., 1972 – LASALLE, P., HARDY, L., POULIN, P. *Une position du front glaciaire au nord et au nord-est de la ville de Québec*. ministère des Richesses naturelles, gouvernement du Québec.
- Lefebvre et coll., 2003 – LEFEBVRE, R., BOUTIN, A., MARTEL, R., THERRIEN, R., PARENT, M., BLAIS, V. *Caractérisation et modélisation numérique de l'écoulement et de la migration de la contamination en TCE dans l'eau souterraine du secteur Valcartier, Québec, Canada*. Rapport final corrigé de l'INRS-ETE au Ministère de la Défense nationale.
- MAMROT, 2011 – MINISTÈRE DES AFFAIRES MUNICIPALES DES RÉGIONS ET DE L'OCCUPATION DU TERRITOIRE. *Localisation des immeubles*. Direction du bureau municipal, de la géomatique et de la statistique.

- MAMROT, 2012 – MINISTÈRE DES AFFAIRES MUNICIPALES DES RÉGIONS ET DE L'OCCUPATION DU TERRITOIRE. *Grandes affectations du territoire*. Adresse URL : <http://www.mamrot.gouv.qc.ca/amenagement-du-territoire/guide-la-prise-de-decision-en-urbanisme/planification/grandes-affectations-du-territoire/>
- MAMROT, 2013 – MINISTÈRE DES AFFAIRES MUNICIPALES DES RÉGIONS ET DE L'OCCUPATION DU TERRITOIRE. Stratégie québécoise d'économie d'eau potable. Adresse URL : <http://www.mamrot.gouv.qc.ca/grands-dossiers/strategie-quebecoise-deconomie-deau-potable>, consulté le 4 mars 2013.
- MAPAQ, 2007 – MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION DU QUÉBEC. *Fiche d'enregistrement des producteurs agricoles*. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- MDDEFP, 2000 – MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA FAUNE ET DES PARCS, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Portrait de l'eau : Capitale nationale (région administrative 03)*. Adresse URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/regions/region03/03-capitale.htm#2>, consulté le 20 mars 2013.
- MDDEFP, 2002 – MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA FAUNE ET DES PARCS, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, gouvernement du Québec, Adresse URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/piezo/index.htm>.
- MDDEFP, 2006 – MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA FAUNE ET DES PARCS, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Guide de conception des installations de production d'eau potable (Guide de conception), section 5.2.1*, Adresse URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/documents/volume1.pdf>
- MDDEFP, 2008 – MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA FAUNE ET DES PARCS, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 1 – Généralités*. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 58 p., 3 annexes, Adresse URL : http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/guides_ech.htm
- MDDEFP, 2012 – MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA FAUNE ET DES PARCS, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Guide de gestion des eaux pluviales du Québec*. Adresse URL : <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide.htm>, mise à jour le 17 octobre 2012.
- MDDEFP, 2013a – MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA FAUNE ET DES PARCS, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Les aires protégées au Québec*. Adresse URL : http://www.mddefp.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protegees/aires_quebec.htm, consulté le 6 janvier 2013.
- MDDEFP, 2013b – MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA FAUNE ET DES PARCS, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Répertoire de tous les réseaux municipaux de distribution d'eau potable*. Adresse URL : <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/potable/distribution/index.asp>, consulté le 18 janvier 2013.

- MDDEFP, 2013c – MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA FAUNE ET DES PARCS, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Répertoire des terrains contaminés*, Adresse URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/terrains-contamines/recherche.asp>, consulté le 20 janvier 2013.
- MDDEFP, 2013d – MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA FAUNE ET DES PARCS, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Suivi des pesticides dans les eaux souterraines*. http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/suivi_mil-aqua/pesti_eaux-souter.htm.
- MENV, 2004 – MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT. GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Influence de la vulnérabilité des aquifères sur la qualité de l'eau des puits individuels dans la MRC de Montcalm – Étude de la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé*. Ministère de l'Environnement du Québec, ISBN 2-550-43509, MENV-2004-003, Adresse URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/sept-bassins/aquifere.pdf>
- Monfet, 1979 – MONFET, J. *Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée*. Ministère des Richesses naturelles, Service de l'hydrométrie, H.P.-51, Québec, 35 p., Adresse URL : http://www.grr.ulaval.ca/gae_3005/Logiciels/MAPAQ/Monfet_HP-51.pdf, consulté le 16 janvier 2013.
- Moreno *et coll.*, 2011 – MORENO, A., COMEAU, G., CANTIN, A.-M., THERRIEN, R., LANGLOIS, C., LAMARCHE, L., LAVOIE, C., LABONTÉ, C., THERRIEN, P., MONTCOUDIOL, N., COCHAND, F., NADEAU, M.M., COSSETTE, M. *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport d'étape I*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Communauté métropolitaine de Québec.
- MTQ, 2004 – MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Guide de conception des ponceaux*. Adresse URL : http://www3.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage_routier/guides/guide21.fr.html, consulté le 16 janvier 2013.
- Nadeau, 2013 – NADEAU, M.M. *Hydrogéochimie des aquifères de la Communauté métropolitaine de Québec*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec.
- Nastev *et coll.*, 2004 – NASTEV, M., SAVARD, M.M., LAPCEVIC, P., LEFEBVRE, R., MARTEL, R. « Hydraulic properties and scale effects investigation in regional rock aquifers, south-western Quebec, Canada. » *Hydrogeology Journal* 12 (3), pp. 257-269.
- Neitsch *et coll.*, 2011 – NEITSCH S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J.R. *Soil and Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2009*. Grassland Soil and Water Research laboratory - Agricultural Research Service, Blackland Research Center - Texas AgriLife Research, Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, September 2011.
- Ouellet *et coll.*, 1995 – OUELLET, L., ROMPRÉ, M., CARRIER, D., LAFLAMME, G. *Étude pédologique du comté de Beauce*. Direction de la recherche et du développement, ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation, Adresse URL : http://www.irda.qc.ca/_ftbFiles/Etude_pedo/Etude_pedo_06.pdf

- Pagé, 1999 – PAGÉ, P. *Les Grandes Glaciations, L'histoire et la Stratigraphie des Glaciations Continentales dans l'Hémisphère Nord. 2e édition.* Université du Québec à Montréal. Guérin éditeur Ltée.
- Poirier et coll., 2012 – POIRIER, C., FORTIER-FILION, T.-C., TURCOTTE, R., LACOMBE, P. *Apports verticaux journaliers estimés de 1900 à 2010 – version 2012.* Contribution au Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Direction de l'expertise hydrique.
- Poirier, 2012 – POIRIER, C. *Estimation préliminaire des débits de base à des sites de stations hydrométriques du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ).* Contribution au Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Présentation PowerPoint faite aux équipes PACES, 2012-10-30.
- Rafferty, 2000 – RAFFERTY, K. *Scaling in geothermal heat pump systems.* Geo-Heat Centre, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, Oregon, July 1999.
- Rafferty, 2003 – RAFFERTY, K. « Ground water Issues in geothermal heat pumps systems. » *Groundwater* 41 (4), pp. 408-410, July 2003.
- Raymond et coll., 1976 – RAYMOND, R., LAFLAMME, G., GODBOUT, G. *Pédologie du comté de Portneuf.* Agriculture Québec, Direction générale de la recherche et de l'enseignement. Bulletin technique, no 18. Adresse URL : http://www.irda.qc.ca/_ftbFiles/Etude_pedo/Etude_pedo_44.pdf
- Raymond et coll., 2010 – RAYMOND J., ROBERT G., THERRIEN R., GOSSELIN L. « A novel thermal response test using heating cables. » *Proceedings of the World Geothermal Congress, Bali.*
- Richardson et Wright, 1984 – RICHARDSON, C.W., WRIGHT, D.A. *WGEN: A model for generating daily weather variables.* AR-S, Agricultural Research Service, USDA.
- Rivard et coll., 2012 – RIVARD, C., CARRIER, M.A., LEFEBVRE, R. *Protocole pour la préparation du Livrable 22 - Vulnérabilité de l'aquifère de roc régional.* Institut national de la recherche scientifique, Centre - Eau Terre Environnement (INRS-ETE) en collaboration avec la Commission géologique du Canada (CGC), version préliminaire 11 avril 2012.
- Robertson, 1988 – ROBERTSON C.E. *Thermal properties of rocks,* U.S. Department of the Interior Geological Survey, Open-file Report 88-441, Reston, Virginia, 110 p.
- Rompré et Gagnon, 2000 – ROMPRÉ, M., GAGNON, M. *Étude pédologique des terres cultivées de la MRC de la Côte-de-Beaupré.* Institut de recherche et développement en agriculture (IRDA), Québec, Adresse URL : http://www.irda.qc.ca/_ftbFiles/Etude_pedo/Etude_pedo_40.pdf
- Rompré et Gagnon, 2001 – ROMPRÉ, M., GAGNON, M. *Étude pédologique de la région de Québec (secteurs Sainte-Foy et Valcartier).* IRDA, Québec. Adresse URL : http://www.irda.qc.ca/_ftbFiles/Etude_pedo/Etude_pedo_45.pdf
- Saxton et Rawls, 2006 – SAXTON, K.E., RAWLS, W.J. « Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. » *Soil science society of America* 70 (5), pp. 1569-1578, September-October 2006.
- Scanlon et coll., 2002 – SCANLON, B.R., HEALY, R.W., COOK, P.G. « Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. » *Hydrogeology Journal* 10 (1), pp. 18-39, February 2002.

- Schroeder *et coll.*, 1994 – SCHROEDER, P. R., AZIZ, N. M., LLOYD, C. M., ZAPPI, P. A. *The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: User's guide for version 3.* » EPA/600/R-94/168a, September 1994, US. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.
- Scibek *et coll.*, 2007 – SCIBEK, J., ALLEN, D.M., CANNON, A.J., WITHFIELD, P.H. « Groundwater-surface water interaction under scenarios of climate change using high-resolution transient groundwater model. » *Journal of Hydrology* 333 (2-4), pp. 165-181, February 2007.
- SCT, 2013 – SECRÉTARIAT DU CONSEIL DU TRÉSOR DU CANADA. *Inventaire des sites contaminés fédéraux.* Adresse URL : <http://www.tbs-sct.gc.ca/fcsi-rscf/home-accueil-fra.aspx>, consulté le 7 février 2013
- Soilmoisture Equipment (2008) – SOILMOISTURE EQUIPMENT. *Operating instructions – Model 28000K1 Guelph permeameter.* Soil Moisture Equipment Corporation, M1.09.07.E, December 2008.
- Sophocleos, 2000 – SOPHOCLEO, M. From safe yield to sustainable development of water resources: The Kansas experience. *Journal of Hydrology* 235, pp. 27-43.
- Statistique Canada, 2011 – STATISTIQUE CANADA. *Recensement de la population de 2011.* Produit no 98-311-XCB2011026 au catalogue de Statistique Canada. Adresse URL : <http://www12.statcan.ca/census-recensement/2011/dp-pd/index-fra.cfm>
- Tabi *et coll.*, 1990 – TABI, M., TARDIF, L., CARRIER, D., LAFLAMME, G., ROMPRÉ, M. *Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec, Région 03, Québec.* Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Talbot Poulin *et coll.*, 2012 – TALBOT POULIN, M.C., MORENO, A., COMEAU, G., THERRIEN, R., FORTIER, R., LAMARCHE, L., NADEAU, M.M., MONTCOUDIOL, N., FABIEN-OUELLET, G., BÉRUBÉ, S., DONATI-DAOUST, F., STERCKX, A., BERGERON, L.É., VÉZINA, L.P., GRAF, T. *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Outaouais, Rapport d'étape II.* Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, mars 2012.
- Tecsult, 2008 – TECSULT. *Cartographie hydrogéologique du bassin de la rivière Chaudière – Secteur Basse-Chaudière.* Rapport final 05-15919, mars 2008.
- Theis, 1935 – THEIS, C.V. « The Relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. » *Transactions, American Geophysical Union* 16 (2), pp. 519-524, August 1935.
- UQAC, 2011 – UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI. *Protocole pour la réalisation des livrables 14, 17 et 18.* Ébauche initiale du protocole, 16 mai 2011.
- UQAT et INRS, 2013 – UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINQUE EN COLLABORATION AVEC L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE. *Protocole pour la préparation du Livrable 23 - Indice de densité d'activités anthropiques.* Version finale, 31 janvier 2013.
- USDA, 1985 – UNITED STATES DEPARTEMENT OF AGRICULTURE. *National Engineering Handbook.* Soil Conservation Service, US Government Printing Office, Washington, D.C.
- USDA, 1986 – UNITED STATES DEPARTEMENT OF AGRICULTURE. *Urban hydrology for small watershed.* United states department of agriculture, URL address: <https://engineering.purdue.edu/mapserve/sedspec/doc/tr55.pdf>, Technical release 55, 210-VI-TR-55, Second Edition, June 1986, consulté le 16 janvier 2013.

USDA, 2011 – UNITED STATES DEPARTEMENT OF AGRICULTURE. *Soil survey manual*. URL address: <http://soils.usda.gov/technical/manual/contents/chapter3.html>

ANNEXES

Annexe 1 : Classification de l'occupation du sol

La classification de l'occupation du sol est une combinaison de plusieurs couches d'information géographique. Une classification hiérarchique (Tableau A1) a été générée en fonction de la précision des couches d'informations utilisées pour l'assemblage de l'occupation du sol.

Tableau A1 : Priorisation des classes d'occupation du sol

Niveau dans la hiérarchie	Classe
1	Parc et boisé urbains
2	Milieu urbanisé
3	Milieu humide
4	Hydrographie
5	Terre agricole
6	Friche et régénération
7	Couvert forestier

L'occupation du sol se décompose en 13 classes thématiques adaptées par la CMQ pour une meilleure représentation cartographique du territoire. Tel qu'indiqué dans le Tableau A2, l'occupation du sol est un amalgame d'informations provenant de plusieurs sources de données à différentes échelles et années.

Tableau A2 : Description des classes d'occupation du sol

Classe	Description	Niveau	Source des données
Agricole	Terre agricole	5	Financière Agricole du Québec. 2012. Base de Données des Cultures Généralisées (BDCG), 1 : 20 000. SIEF, MRN, 4 ^e décennal, 1 :20 000
Friche et sol dénudé	Friche, ligne hydroélectrique, coupe forestière non régénérée, dénudé sec	6	SIEF, MRN, 4 ^e décennal, 1 :20 000 Hydro-Québec, 2005, CMQ, 2011
Hydrographie	Lac, rivière	4	BDTQ, 2001, 1 :20 000 SIEF, MRN, 4 ^e décennal, 1 :20 000
Milieu humide	Aulnaie, Dénudé et semi-dénudé humide	3	Canards illimités.2007, SIEF, MRN, 4 ^e décennal, 1 :20 000
Feuilleu	Forêt de feuillus	7	SIEF, MRN, 4 ^e décennal, 1 :20 000
Mélangé	Forêt mixte	7	SIEF, MRN, 4 ^e décennal, 1 :20 000
Résineux	Forêt de résineux	7	SIEF, MRN, 4 ^e décennal, 1 :20 000
Parc et boisé urbains	Parc et boisé urbains	1	CMQ, 2012
Milieu urbanisé très dense	Milieu très fortement perturbé par l'activité humaine (non-boisé), Réseau routier et emprise, Très forte densité de population. ex. : Centre-ville de Québec	2	CMQ, 2008, Statistiques Canada, 2006, 1 :50 000 Adresse-Québec, 2011, 1 :20 000 Ville de Québec, 2011,
Milieu urbanisé dense	Milieu fortement perturbé par l'activité humaine, forte densité de population. ex. : Limoilou, Sainte-Foy	2	CMQ, 2008, Statistiques Canada, 2006, 1 :50 000
Milieu urbanisé moyennement dense	Milieu perturbé par l'activité humaine, Zones industrielles, Densité moyenne de population. ex. : Pintendre	2	CMQ, 2008, Statistiques Canada, 2006, 1 :50 000
Milieu urbanisé peu dense	Milieu faiblement perturbé par l'activité humaine, faible densité de population, Golf. ex. : l'île d'Orléans	2	CMQ, 2008, Statistiques Canada, 2006, 1 :50 000
Autre	superficie < 1 ha, grand espace gazonné, espace non classé	7	MRNF. 2005. Système d'information écoforestière (SIEF), 1 : 20 000.

Annexe 2 : Méthodologie pour la réalisation des travaux géophysiques

Méthodologie

Trois méthodes géophysiques ont été utilisées dans le cadre du projet PACES-CMQ : la tomographie de polarisation provoquée accompagnée soit d'un profil de géoradar (radar géologique), soit d'une tomographie de sismique réfraction selon le type de dépôt investigué. Le rapport PACES-CMQ Phase II (Talbot Poulin *et coll.*, 2012) présente une section plus détaillée sur la méthodologie adoptée pour les investigations géophysiques.

Les tomographies de polarisation provoquée ont été réalisées à l'aide d'un émetteur *TX-II* et d'un récepteur *GRx8-32 d'Instrumentation GDD* avec une configuration des électrodes dite du dipôle-dipôle. La distance inter-électrode était de 5 ou 10 m selon la profondeur d'investigation souhaitée.

Les levés de géoradar ont été effectués à l'aide d'un géoradar *pulseEKKO Pro* de *Sensors and Software* à des fréquences nominales de 50, 100 et 200 MHz. Le long de chaque ligne de levés hydrogéophysiques, deux types de levés de géoradar ont été réalisés: 1) un profil en mode réflexion pour identifier les réflecteurs associés aux contacts stratigraphiques dans les dépôts investigués et 2) un profil du point milieu commun (common mid point ou *CMP*) pour déterminer la vitesse de propagation du signal radar dans le sous-sol. La connaissance de cette vitesse est essentielle afin de calculer la profondeur des réflecteurs identifiés sur les profils en mode réflexion à partir des temps de propagation des ondes électromagnétiques.

Enfin, les données de sismique réfraction ont été acquises à l'aide d'un séismographe de terrain *Stratavisor NZ24* de 24 canaux de la compagnie *Geometrics* et de 24 géophones. Les ondes sismiques ont été générées par la détonation d'une cartouche à blanc de calibre 12 dans un fusil Betsy enfoncé à quelques décimètres sous la surface du sol. L'intervalle de distance entre les géophones était de 5 ou 10 m selon la profondeur au socle rocheux: un intervalle de 5 m pour une profondeur jusqu'à 25 m et un intervalle de 10 m pour une plus grande profondeur. Plusieurs points de tir sismique et plusieurs tirs sismiques par point de tir sismique pour amplifier le signal enregistré par les géophones ont été réalisés le long de chaque ligne de sismique réfraction. La méthode de sismique réfraction permet d'identifier les principaux contacts stratigraphiques et de déduire la nature des dépôts à partir de la vitesse de propagation des ondes sismiques de compression.

Interprétation

Les données de tomographie de polarisation provoquée ont été inversées à l'aide du logiciel *Res2Dinv* ver. 3.5 de *Geotomo Software* pour produire des modèles en coupe de la résistivité électrique et de la chargeabilité électrique. Ces propriétés électriques sont caractéristiques des différents types de sol qui peuvent donc être déduites en interprétant ces modèles obtenus de l'inversion.

Les profils de géoradar ont été traités à l'aide du logiciel *EKKO_View* de *Sensor & Software GPR*. Différents filtrages ont été appliqués pour mettre en valeur les réflecteurs associés aux contacts stratigraphiques.

Dans les milieux sableux, la tomographie de polarisation provoquée et les profils de géoradar sont deux méthodes géophysiques complémentaires. En effet, la première

méthode permet de caractériser la nature des dépôts, mais les contacts stratigraphiques sont mal définis alors que la deuxième méthode permet d'identifier avec précision les contacts stratigraphiques et de déterminer leur profondeur et attitude sans toutefois différencier explicitement la nature des dépôts en contact. Les modèles de résistivité et de chargeabilité électrique et le profil en mode réflexion de géoradar, combinés aux informations disponibles (la carte de la géologie des formations superficielles, les connaissances sur la stratigraphie régionale, les profondeurs à la nappe et au roc mesurées dans des forages), permettent de produire une coupe hydrogéologique interprétative du site d'études.

Les données des levés en sismique réfraction ont été inversées à l'aide du logiciel *Rayfract 3.21* de *Intelligent Resources Inc.* Le résultat de chaque inversion est sous la forme d'un modèle en coupe de la vitesse de propagation des ondes sismiques de compression dans le sous-sol. Cette propriété physique est caractéristique des différents types du sol. La nature du dépôt investigué peut donc être inférée d'un levé de sismique réfraction. Bien que le modèle de vitesse soit plus précis que ceux obtenus de la polarisation provoquée, ce modèle peut contenir des incertitudes importantes dans le cas d'une inversion de vitesse de propagation des ondes de compression en profondeur. Dans le cas d'une couche profonde dont la vitesse de propagation des ondes de compression est inférieure à la couche supérieure, cette couche profonde peu compétente ne sera pas détectée par un levé de sismique réfraction. C'est pour cette raison que les méthodes de polarisation provoquée et de sismique réfraction sont combinées pour investiguer les milieux argileux. Tout comme dans le cas précédent, en réalisant la synthèse des modèles géophysiques et des informations disponibles, une coupe hydrogéologique interprétative plus fiable peut être générée.

Les résultats des investigations hydrogéophysiques sont présentés sous forme de planches contenant l'ensemble des informations utiles à l'élaboration des modèles géologiques (Annexe E1). Le Tableau A3 fait la synthèse des travaux effectués. La qualité des modèles géologiques a été regroupée en 4 catégories: très bonne, bonne, moyenne et faible. La catégorie « très bonne » indique que les modèles générés sont vraisemblablement justes et concordent bien avec les informations de forages alors que l'information tirée des levés géophysiques de la catégorie « bonne » représente une bonne approximation de la réalité avec un certain nombre d'incertitudes. Les modèles de la catégorie « moyenne » présentent des informations partielles ou ambiguës, mais tout de même utilisables alors que l'interprétation des levés de la catégorie « faible » est pratiquement non utilisable. Deux sites ont été abandonnés en raison de la piètre qualité des résultats causée par le bruit de nature anthropique tel que la présence de lignes à haute tension et de canalisations enfouies.

Tableau A3 : Lignes de levés géophysiques réalisés durant l'été 2011

MRC ou Ville	Nom du levé, lieu et site (Date de la prise de données)	Identifiant	Longueur de la ligne (m)	Géoradar	Électrique	Sismique	Qualité du modèle géologique
MRC de La Côte-de-Beaupré	L'Ange-Gardien , plage Fortier (23 - 24/05/2011)	1	840	X	X		Bonne
	Beaupré (abandonné) (29/09/2011)	2	275	X			----
	Saint-Ferréol-les-Neiges (21-29/09/2011)	3	680	X	X		Bonne
MRC de La Jacques-Cartier	Lac Saint-Jacques (abandonné) (06/07/2011)	4	500	X			----
	Lac Delage (05/07-01/09/2011)	5	300	X	X		Moyenne
	Sainte-Brigitte , rue Saint-Louis (09/11/2011)	6	325	X	X		Faible
MRC de L'Île-d'Orléans	Île d'Orléans , rive nord (14-15/06 - 28/09/2011)	7	570		X	X	Très bonne
Ville de Lévis	Lévis 1 , Pintendre site 1 (17-18-19/05/2011)	8	360	X	X	X	Bonne
	Lévis 2 , Pintendre site 2 (17/11/2011)	9	260		X		Moyenne
	Lévis, Saint-Romuald (17/11/2011)	10	190		X		Moyenne
Agglomération de Québec	Sainte-Foy, Base de plein air (27/06 - 09/09/2011)	11	200		X	X	Moyenne
	Cap-Rouge , église Saint-Félix-de-Valois (07-08/09/2011)	12	200		X	X	Moyenne
	Lac Saint-Augustin , pointe nord (08/09/2011)	13	180		X		Faible
	Lac Saint-Charles 1 , Marais du Nord (30/05-08/06/2011)	14	100		X	X	Bonne
	Lac Saint-Charles 2 , site sud-ouest (31/05- 09/06/2011)	15	130		X	X	Très bonne
	Lac Saint-Charles 3 , site est (01-08/06/2011)	16	130		X	X	Bonne
	Lac St-Charles 4 , site sud est (02-07/06/2011)	17	220		X	X	Bonne
	Vanier, Pierre-Bertrand (16/09/2011)	18	180		X		Faible
	Saint-Augustin 2 , 3e rang (07-08/07/2011)	19	360			X	Bonne
	Saint-Augustin 1 , rang Saint-Denis (10/11/2011)	20	180		X	X	Moyenne
	Val-Bélair , aréna (11/11/2011)	21	180		X		Moyenne

Note : **en gras** : Nom du levé

Annexe 3 : Cotes de fiabilité et critères de validation contenus dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ

Tableau A4 : Synthèse des valeurs des cotes de fiabilité associées aux objets de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ

	Cote de fiabilité	Description	Valeurs possibles		Objet	
					n	%
LOCALISATION	FL1	Source des coordonnées géographiques	1	Nouvelles coordonnées prises sur le terrain dans le cadre du projet PACES	239	0,9
			2	Les coordonnées proviennent du document source	25 484	98,9
			3	Erreur évidente corrigée dans les coordonnées sources	38	0,2
	FL2	Degré d'incertitude sur les coordonnées géographiques	1	Précision entre 0 m et 1 m (ex. : GPS haute précision, arpentage)	121	0,5
			2	Précision entre 1 m et 10 m (ex.. : GPS simple)	406	1,6
			3	Précision entre 10 m et 100 m (ex. : extraites par géoréférencement, extraites d'une carte topographique, localisation visuelle)	4973	19,3
			4	Inconnu	20 261	78,6
	FL3-A	Degré d'incertitude sur le géoréférencement par géocodage ou à partir d'une carte	1	Les coordonnées géographiques fournies	22 011	85,4
			2	Géoréférencement excellent	570	2,2
			3	Géoréférencement bon	1 284	5,0
			4	Géoréférencement acceptable	147	0,6
			5	Aucun géoréférencement, localisation visuelle	1 749	6,8
	FL3-B	Degré d'incertitude sur la localisation visuelle	1	Les coordonnées géographiques fournies ou géoréférencement	24 012	93,2
			2	Plan à grande échelle (1:20 000 et plus grand)	1 472	5,7
			3	Plan à moyenne échelle (1:50 000)	171	0,7
			4	Plan à petite échelle (1:100 000 et plus petit)	0	0,0
			5	Repères visuels peu fiables ou inexistantes	106	0,4
	FL4	Degré d'incertitude de l'élévation	1	Précision entre 0 m et 1 m (ex. : GPS haute précision, arpentage)	273	1,1
			2	Précision entre 1 m et 20 m (ex. : GPS simple)	129	0,5
			3	Précision entre 20 m et 100 m (ex. : extraites par géoréférencement d'une carte, extraites d'une carte topographique, localisation visuelle)	20 412	79,2
4			Inconnu	4 947	19,2	
SOURCE	FS1	Provenance de l'information	1	Forages réalisés dans le cadre du PACES	239	0,9
			2	Données extraites de rapports techniques obtenus dans le cadre du PACES	3 798	14,8
			3	Données extraites d'une compilation de données de même source	4 226	16,4
			4	Données extraites d'une compilation de sources multiples	2 136	8,3
			5	SIH	15 362	59,6
			6	Source de données douteuses	0	0,0
	FS2	Accessibilité des données sources	1	Les valeurs ont été vérifiées à l'aide des données sources	4 209	16,3
			2	Les valeurs ne peuvent être vérifiées à l'aide des données sources (source non disponible)	21 552	83,7

Note : n = Nombre

Tableau A5 : Synthèse des valeurs des critères de validation associés aux objets de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ

	Critère de validation	Description	Valeurs possibles	Objet		
				n	%	
LOCALISATION	VL1	Cohérence de la localisation avec le réseau hydrographique de la Carte 5 : Hydrographie	1	Aucun conflit spatial identifié	24 800	96,3
			2	Conflit spatial avec le réseau hydrographique, mais localisation adéquate	372	1,4
			3	Forages situés à l'extérieur des polygones du réseau hydrographique et dont la première unité stratigraphique ou le type de captage indique que le forage est dans l'eau, mais localisation adéquate	25	0,1
			4	Conflit spatial avec le réseau hydrographique, mais forage localisé à moins de 10 m de la rive	195	0,8
			5	Forages situés à l'extérieur des polygones du réseau hydrographique et dont la première unité stratigraphique indique que le forage est dans l'eau, mais localisation inadéquate	25	0,1
			6	Conflit spatial avec le réseau hydrographique et forage localisé à plus de 10 m de la rive	344	1,3
	VL2	Cohérence de la profondeur au roc identifiée en forage avec les zones d'affleurement et de till mince de la Carte 12 (préliminaire) : Géologie du Quaternaire	1	Forage situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince et montrant une épaisseur de dépôts <= 5 m	1 827	7,1
			2	Forage situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince et montrant une épaisseur de dépôts > 5 m et <= 10 m	401	1,5
			3	Forage situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince et montrant une épaisseur de dépôts > 10 m	372	1,4
			4	Forage n'est pas situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince	10 967	42,6
			5	Forage situé à l'extérieur de la zone cartographiée	0	0,0
			6	Forage ne contient pas de description stratigraphique	5 091	19,8
			7	Non validé	7 103	27,6
	VL3	Cohérence des altitudes rapportées de la source des données avec le modèle numérique de terrain	1	Différence <= 1 m	1 342	5,21
			2	Différence > 1 m et <= 20 m	2 183	8,5
			3	Altitude disponible, mais localisation à l'extérieur du cadre du MNT	13	0,1
			4	Altitude non disponible, mais localisation à l'intérieur du cadre du MNT	20 416	79,2
			5	Altitude non disponible et localisation à l'extérieur du cadre du MNT	1 703	6,6
6			Différence > 20 m	104	0,4	
TECHNIQUE	VT1	Cohérence de la profondeur des forages avec l'épaisseur totale des séquences stratigraphiques	1	Différence <= 1 m	16 565	64,3
			2	Profondeur non disponible, mais épaisseur des séquences stratigraphiques disponible	4 116	16,0
			3	Profondeur disponible, mais épaisseur des séquences stratigraphiques non disponible	1 544	6,0
			4	Profondeur et épaisseur des séquences stratigraphiques non disponibles	3 536	13,7
			5	Différence > 1 m	0	0,0
	VT2	Cohérence de la stratigraphie (dépôts meubles au-dessus du roc)	1	Les dépôts meubles sont toujours au-dessus du roc ou le roc n'a pas été rencontré en forage	20 667	80,2
			2	Une séquence de roc au-dessus des dépôts meubles est identifiée	11	0,1
			3	Le forage ne contient pas de descriptions stratigraphiques	5 083	19,7
	VT3	Identification des doublons	1	Aucun doublon stratigraphique "Certain" n'a été identifié. Lorsque l'identification du doublon est "Probable", les deux objets ont été conservés.	19 562	75,9
			2	Un (ou plusieurs) doublon stratigraphique "certain" en lien avec cet objet a été identifié. Uniquement la description stratigraphique de cet objet a été conservée.	498	1,9
			3	Un (ou plusieurs) doublon stratigraphique "certain" en lien avec cet objet a été identifié. La description stratigraphique de cet objet a été rejetée.	618	2,5
			4	Le forage ne contient pas de description stratigraphique	5 083	19,7

Tableau A6 : Synthèse des valeurs des critères de validation associés aux observations de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ

	Critère de validation	Description	Valeurs possibles		Observation	
					n	%
TECHNIQUE	VT4	Cohérence de la profondeur des niveaux d'eau : comparaison de la profondeur du niveau d'eau statique avec la profondeur totale du puits et la profondeur du niveau dynamique	1	Niveau statique < Profondeur du puits et Niveau statique < Niveau dynamique	84	0,1
			2	Niveau statique < Profondeur du puits, mais Niveau dynamique non disponible	83 272	97,9
			3	Niveau statique < Niveau dynamique, mais profondeur du puits non disponible	13	0,0
			4	Profondeur du puits et Niveau dynamique non disponible	1 544	1,8
			5	Pas un niveau statique (niveau dynamique)	153	0,2
			6	Niveau statique > Profondeur du puits	8	0,0
			7	Niveau statique > Niveau dynamique	5	0,0
			TOTAL		85 079	100,0
	VT5	Cohérence des paramètres hydrogéologiques et des informations servant à estimer la transmissivité	1	Au moins 1 paramètre hydrogéologique rapporté de la source (S, Cs, T ou K)	880	5,9
			2	Aucun paramètre hydrogéologique rapporté de la source, mais suffisamment d'information pour estimer la transmissivité (Q, t, Δs)	9 605	64,2
			3	Au moins 1 paramètre hydrogéologique rapporté de la source jugé aberrant	0	0,0
			4	Au moins 1 information pour estimer la transmissivité jugée aberrante	0	0,0
			5	Aucun paramètre hydrogéologique rapporté de la source, et insuffisamment d'information pour estimer la transmissivité	4 472	29,9
TOTAL			14 957	100,0		
SCIENTIFIQUE	VS1	Balance ionique des analyses géochimiques	1	Balance ionique <= 5%	1 088	3,2
			2	Balance ionique > 5% et <= 10%	236	0,7
			3	Balance ionique > 10%	246	0,7
			4	Données insuffisantes pour le calcul de la balance ionique	32 101	95,4
			TOTAL		33 671	100,0

Note : n = Nombre

Annexe 4 : Méthodologie pour la réalisation des cartes d'épaisseur des dépôts meubles et de topographie du roc

Le Protocole du GRIES (Annexe E5) pour la préparation de la Carte 15 Estimation de l'épaisseur des dépôts meubles et de la Carte 16 Topographie du roc (ci-après nommé Protocole) a été respecté en majeure partie pour la production de ces deux cartes. La présente annexe est plus détaillée que dans le corps du rapport et explique la méthodologie employée par l'Université Laval dans le cadre du PACES-CMQ.

Source des données

Les mêmes sources de données que le Protocole ont été employées. Les informations de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ ont été utilisées : les descriptions stratigraphiques des forages répertoriés sur le territoire de l'étude, la Carte 12 (version préliminaire) Géologie du Quaternaire, la Carte 13 Géologie simplifiée du roc, ainsi que les informations obtenues lors des travaux de terrain, dont notamment les forages et les levés géophysiques réalisés dans le cadre du projet.

Sélection et validation des données

Un processus de sélection et de validation des données stratigraphiques, similaire à celui du Protocole, a été suivi. Les forages qui ne respectaient pas les critères de validation établis lors de la validation de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ ont été écartés en premier lieu. Ces critères de validation sont les suivants :

- les forages dont la localisation est incohérente avec le réseau hydrographique,
- les forages dont la localisation est incohérente avec le modèle numérique de terrain,
- les forages qui n'ont pas de description stratigraphique,
- les forages qui n'ont pas atteint le roc,
- les forages dont la profondeur est incohérente avec l'épaisseur totale de leur séquence stratigraphique, et
- les doublons basés sur la localisation et la description stratigraphique (un seul des deux forages identiques a été conservé pour ne pas donner un poids statistique supplémentaire à ce forage).

Sur les 20 678 forages de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ qui ont une description stratigraphique, 14 467 ont été conservés suite à ce processus de validation.

Le territoire a ensuite été divisé en cinq zones en fonction de leur contexte physiographique et géologique similaire, et pour lesquelles les moments statistiques des épaisseurs sont différents. Les zones identifiées sur le territoire de la CMQ sont :

- la rive sud,
- l'île d'Orléans,
- le Promontoire de Québec,
- les Basses-terres du Saint-Laurent, et
- les Laurentides.

D'autres critères basés sur le jugement professionnel ont été appliqués afin de bonifier la validation des données stratigraphiques. Ces critères ont été élaborés selon la connaissance et la compréhension du territoire. Une exploration spatiale préliminaire des

données a été effectuée afin de détecter des aberrations flagrantes (ex. : épaisseur de dépôt importante au sommet d'une montagne). Des histogrammes et des analyses statistiques pour chaque zone ont aussi été produits afin d'éliminer les valeurs extrêmes. Les forages localisés à l'extérieur de la Carte 12 (version préliminaire) Géologie du Quatenaire ont également été éliminés.

Une moyenne mobile a été calculée à chaque forage lorsqu'un minimum de 3 valeurs d'épaisseur était disponible dans un rayon de 250 m. Ensuite, les épaisseurs qui s'éloignaient trop de la moyenne locale ont été vérifiées et rejetées selon les critères suivants :

- lorsque la différence entre l'épaisseur et la moyenne locale de l'épaisseur est supérieure à 5 m (pour l'île d'Orléans et le Promontoire de Québec où les épaisseurs sont généralement faibles),
- lorsque la différence entre l'épaisseur et la moyenne locale de l'épaisseur est supérieure à 10 m pour les autres zones,
- le rejet d'un forage est confirmé par visualisation spatiale et comparaison avec leurs voisins immédiats, tout en tenant compte du contexte hydrogéologique, et
- le même exercice a été réalisé, mais cette fois-ci en calculant un écart-type mobile lorsque 5 valeurs d'épaisseur étaient disponibles dans un rayon de 250 m : les épaisseurs supérieures dont l'écart avec la moyenne locale est supérieure deux écarts-types locale a aussi permis d'identifier les valeurs potentiellement aberrantes et de les éliminer en fonction des valeurs voisines immédiates et du contexte hydrogéologique.

Cette méthode de filtration avec fenêtre mobile a servi à mettre en évidence certaines données aberrantes, mais pas toutes. Les forages qui n'ont pas atteint le roc ont aussi été considérés dans le processus de validation. En effet, l'épaisseur des dépôts mesurée dans ces forages fournit une valeur minimum pour cette épaisseur qui peut être comparée à celle des forages qui ont atteint le roc.

Suite à ce processus de validation basé sur le jugement professionnel, 10 708 forages ont ultimement été conservés pour produire les cartes d'interpolation de l'épaisseur des dépôts meubles et de la topographie du roc.

La fiabilité des sources de données a aussi été prise en considération à chacune des étapes de sélection et de validation.

Traitement des données

Comme suggéré par le Protocole, l'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles a été effectuée par une méthode d'interpolation. La méthode d'interpolation par krigeage ordinaire, jugée appropriée pour notre jeu de données, a été utilisée.

Lors de l'analyse géostatistique, des semi-variogrammes préliminaires directionnels ont été calculés pour chaque zone. Un modèle sphérique a ensuite été ajusté manuellement sur chaque semi-variogramme expérimental (intervalle de direction de 30 degrés et tolérance sur cet intervalle de 30 degrés). À l'aide du module « *Autofit* » du logiciel Surfer8 de Golden

Software[®], ce modèle a ensuite été ajusté automatiquement tout en fixant les limites des paramètres pour se rapprocher du modèle ajusté manuellement. Les paramètres du modèle sphérique ajusté à chaque semi-variogramme pour chaque zone sont donnés au Tableau A7.

Tableau A7 : Paramètres des semi-variogrammes directionnels des données des épaisseurs de dépôts meubles pour chaque zone de la CMQ

Zones	Effet pépite (m ²)	Seuil (m ²)	Portée maximale (m)	Rapport d'anisotropie géométrique	Direction de la portée maximale (degrés)
Laurentides	17,03	48	1 377	1,412	68,47
Rive sud	11,33	38,01	1 529	1,606	17,23
Basses-terres	18,6	112	2 500	1,446	33,49
Île d'Orléans	5,52	8,45	2 000	1,349	38,31
Promontoire de Québec	1	1,496	1 995	1	90

L'interpolation par krigeage ordinaire de l'épaisseur des dépôts meubles a été effectuée séparément pour chacune des 5 zones sur une grille régulière qui couvre chaque zone dont la taille des mailles est de 250 m par 250 m. Les paramètres de recherche employés l'interpolation sont indiqués au Tableau A8. L'intégration des données externes à chaque zone a permis d'obtenir une estimation continue de l'épaisseur des dépôts lors de l'assemblage des cinq cartes d'interpolation. Une validation croisée et une étude spatiale des résidus ont aussi été réalisées afin d'évaluer la fiabilité de l'interpolation.

Tableau A8 : Paramètres de recherche pour l'interpolation par krigeage ordinaire des épaisseurs de dépôts meubles pour chaque zone de la CMQ

Zones	Rayon du cercle de recherche (m)	Nombre minimal de forages	Nombre maximal de forages	Nombre de secteurs de recherche	Nombre maximal de forages par secteur de recherche	Nombre maximal de secteurs de recherche sans forage
Laurentides	3 000	8	64	1	s.o.	s.o.
Rive sud	3 500	8	64	1	s.o.	s.o.
Basses-terres	5 000	8	64	1	s.o.	s.o.
Île d'Orléans	4 000	8	64	1	s.o.	s.o.
Promontoire de Québec	4 000	8	64	1	s.o.	s.o.

Note : s.o. = sans objet

Les résultats de l'interpolation ont été comparés avec la topographie, la carte préliminaire de la géologie du Quaternaire et l'épaisseur des dépôts dans les forages qui n'ont pas atteint le roc. Dans les secteurs où une faible densité de mesures menait à des résultats improbables, des points de contrôles ont été ajoutés. Le jeu de données qui a été utilisé pour l'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles a donc été bonifié par :

- 38 forages qui n'ont pas atteint le roc (épaisseurs variables),
- 61 points de contrôle le long des levés géophysiques (épaisseurs variables),

- 220 points de contrôle (2,5 m d'épaisseur) dans les polygones d'affleurement de la Carte 12 (version préliminaire) Géologie du Quaternaire, et
- 66 points de contrôle sur les sommets topographiques (2,5 m d'épaisseur).

Les deux derniers types de points de contrôle ont servi à mieux représenter les affleurements rocheux dans les résultats des interpolations. Selon les statistiques des forages de tout le territoire de la CMQ situés à l'endroit des polygones d'affleurement (Carte 12 version préliminaire Géologie du Quaternaire), l'épaisseur médiane des dépôts meubles est de 2,5 m. Tel qu'indiqué ci-dessus, cette valeur médiane a donc été attribuée aux points de contrôle situés sur les sommets topographiques et sur les polygones d'affleurements.

Toutes les étapes décrites ci-dessus ont été reprises autant de fois qu'il a été nécessaire pour obtenir un résultat de qualité. Cependant, la faible densité de mesures dans le secteur nord de la CMQ a conduit à des résultats médiocres d'interpolation. Afin de ne pas prendre en compte ces effets de bordure, une bande de 2 km des résultats de l'interpolation a été tronquée dans la partie nord. Cet effet de bordure n'a pas été constaté aux limites est, sud et ouest de la région interpolée, car la densité d'information y est suffisante pour des résultats valables.

Une autre méthode d'estimation a été utilisée dans la zone au nord où la densité de forages est insuffisante pour réaliser une interpolation. En premier lieu, les polygones de la Carte 12 (version préliminaire) Géologie du Quaternaire ont été simplifiés pour la zone des Laurentides. En second lieu, une analyse statistique a été réalisée pour toutes les données validées d'épaisseur de dépôts qui se situent sur chacun de ces polygones simplifiés (Tableau A9). Finalement, la valeur médiane de l'épaisseur des dépôts a été attribuée à toute la surface du polygone correspondant.

Tableau A9 : Épaisseur médiane de dépôts meubles à l'endroit des polygones simplifiés de la Carte 12 préliminaire de la géologie du Quaternaire (zone des Laurentides)

Polygone simplifié	n forages	Épaisseur médiane des dépôts
Roc	298	3
Till mince	489	3
Till épais	467	5,4
Marin	668	12,2
Alluvions récentes	353	15,2
Fluvioglacière	420	8,9
Organiques	41	16,8
TOTAL	2736	7,3

Note : n = nombre

Un faible nombre de données (41) est disponible pour l'épaisseur des dépôts à l'endroit des dépôts organiques et sème un doute quant à la fiabilité de la valeur médiane de 16,8 m. Dans ce cas, la médiane de tous les forages validés des Laurentides (7,3 m), indépendamment des types de dépôt, a été utilisée.

La carte de la topographie du roc a été produite en soustrayant le modèle numérique d'élévation du terrain à l'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles.

Annexe 5 : Méthodologie pour la création du modèle hydrostratigraphique tridimensionnel (3D)

La définition du modèle hydrostratigraphique 3D comprend une première étape d'interprétation qui se divise comme suit :

1. Division du territoire de la CMQ en zones au contexte de déposition similaire :
 - a. le Proto-Saint-Laurent,
 - b. la rive nord (sous la limite d'incursion marine),
 - c. les Laurentides (au-dessus de la limite d'incursion marine),
 - d. l'île d'Orléans, et
 - e. la rive sud.
2. Définition d'un modèle conceptuel des successions verticales possibles de dépôts meubles pour chaque unité quaternaire définie en surface sur la Carte 12 (version préliminaire) de la géologie du Quaternaire. Cette analyse se faisait une zone à la fois.
3. Vérification et modification du modèle conceptuel à partir des données stratigraphiques des forages fiables, des coupes hydrostratigraphiques, de la carte d'épaisseur des dépôts et d'autres sources d'information.
4. Création d'un fichier cartographique d'unité de surface contenant les polygones de la Carte 12 (version préliminaire) Géologie du Quaternaires modifiés par endroit.
5. Pour chaque polygone d'unité de surface, création de trois champs définissant :
 - a. le code quaternaire de la couche,
 - b. l'hydrofaciès de la couche, et
 - c. l'épaisseur maximale de la couche, pour les 4 couches de dépôts meubles.
6. Pour chaque zone, définition d'un modèle de variation de l'épaisseur des couches.
 - a. La première méthode consiste à définir une épaisseur maximale constante pour certaines couches (généralement les couches de surface) et à poser que l'épaisseur de la couche sous-jacente correspond à l'épaisseur résiduelle de l'épaisseur totale des dépôts meubles (rive nord, Laurentides, île d'Orléans et rive sud), et
 - b. La deuxième méthode consiste à poser l'hypothèse que l'épaisseur de chaque couche correspond à une proportion constante de l'épaisseur totale des dépôts meubles (Proto-Saint-Laurent). Cette méthode a été appliquée à la zone du Proto-Saint-Laurent seulement.

Par la suite, des manipulations techniques permettent de convertir l'information contenue dans les fichiers d'unité de surface en format grille.

1. Création de grilles avec mailles de 250 m par 250 m:
 - a. d'épaisseur maximale,
 - b. d'hydrofaciès
 - c. de code quaternaire (pour chacune des 4 couches de dépôts)
2. Création des grilles d'épaisseur réelle par calcul à partir des grilles d'épaisseur maximale des couches et de la grille d'épaisseur des dépôts.
3. Extraction des données au centre de chaque maille et traitement des données dans un tableur Excel[®].
4. Création des grilles d'hydrofaciès finales définies par les hydrofaciès des dépôts là où l'épaisseur réelle de la couche est non nulle et par l'hydrofaciès du roc (HF7) lorsqu'il n'y a pas de dépôts.

Sur la majorité du territoire de la CMQ, une ou deux couches de dépôts seulement étaient définies lorsqu'elles étaient suffisantes pour bien décrire la succession des dépôts. Des cartes des hydrofaciès des couches de dépôts 1 à 4 sont présentées aux Figure A1 à Figure A7.

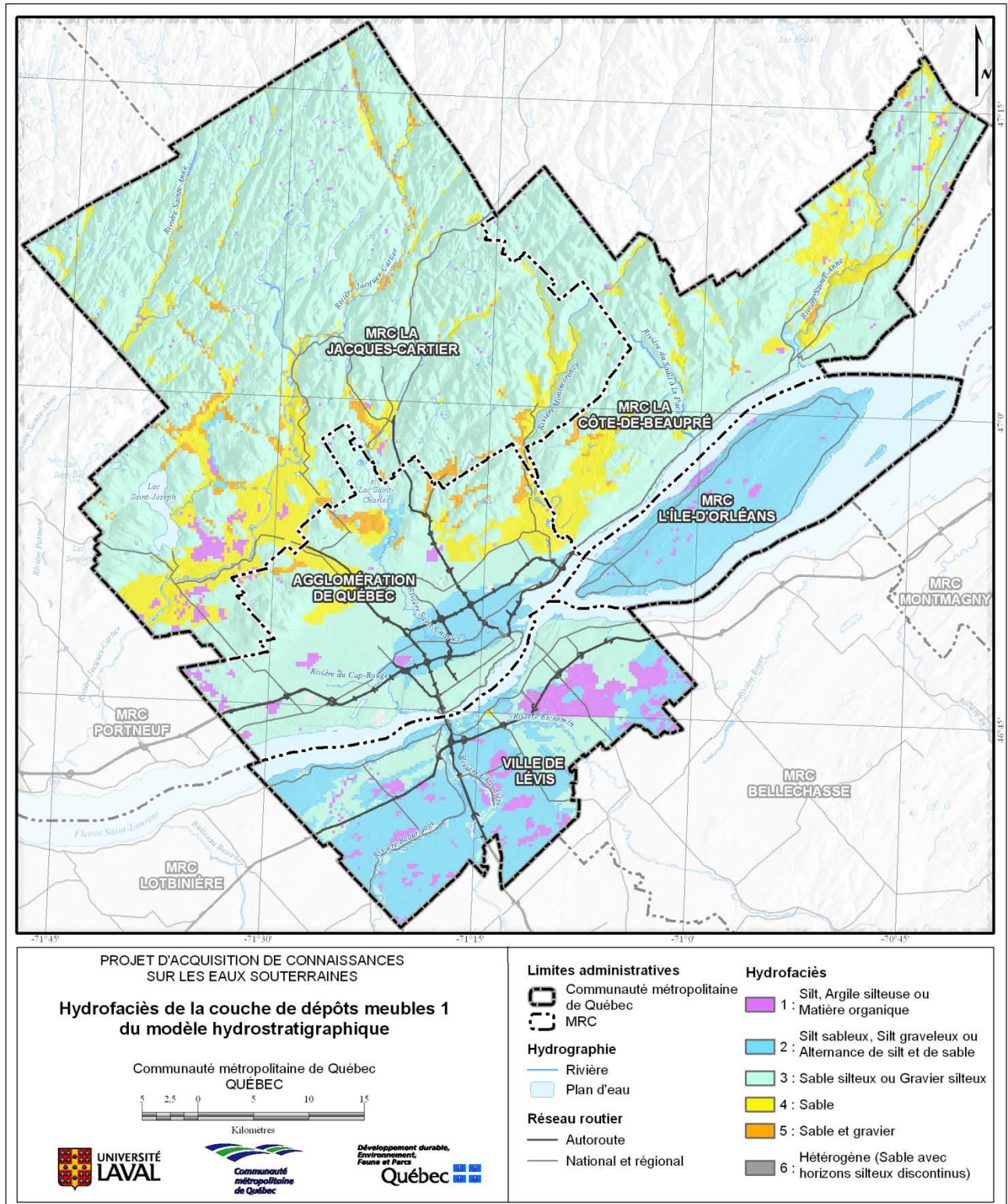


Figure A1 : Distribution spatiale des hydrofaciès de la première couche du modèle hydrostratigraphique

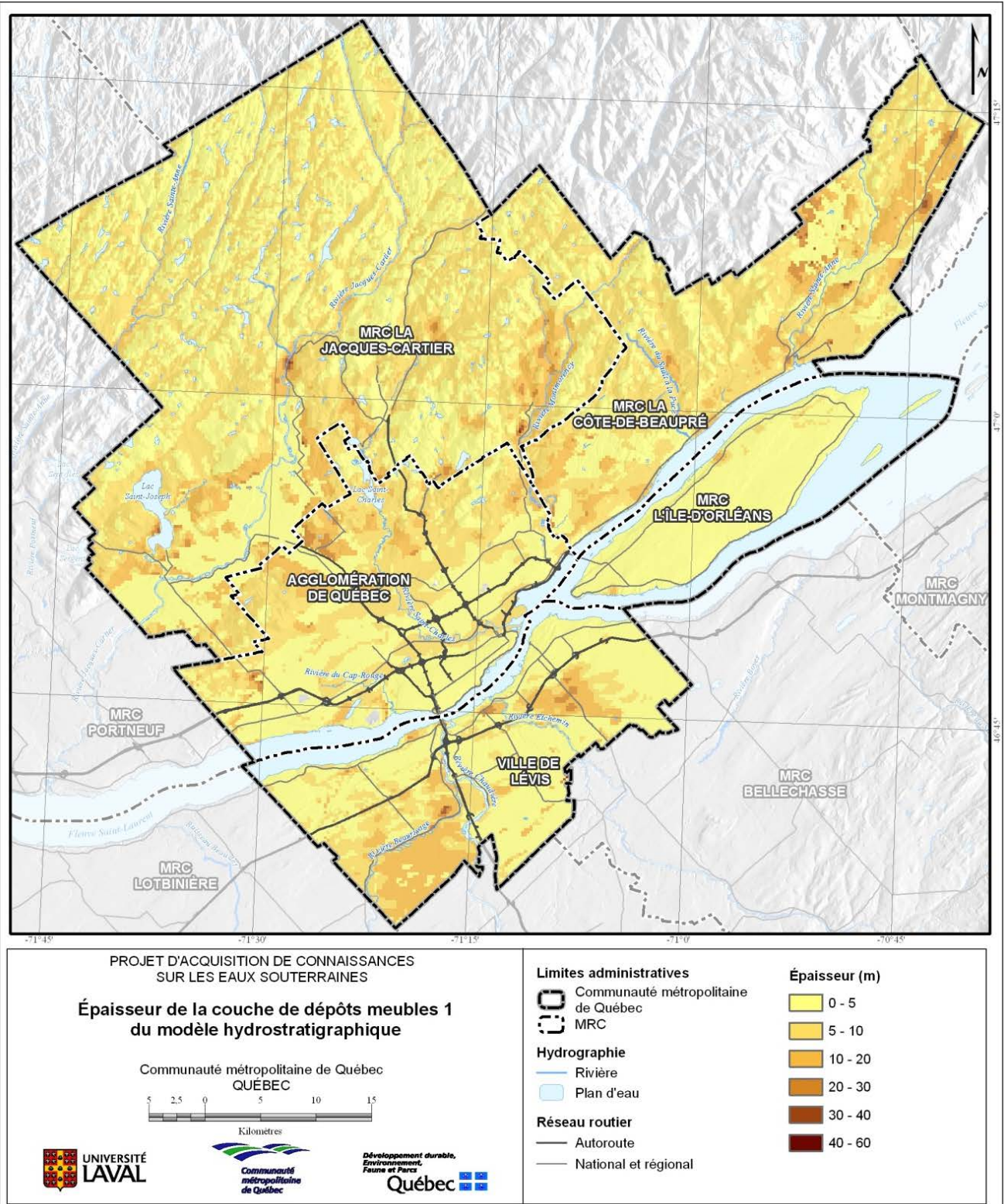


Figure A2 : Épaisseur de la première couche d'hydrofaciès du modèle hydrostratigraphique

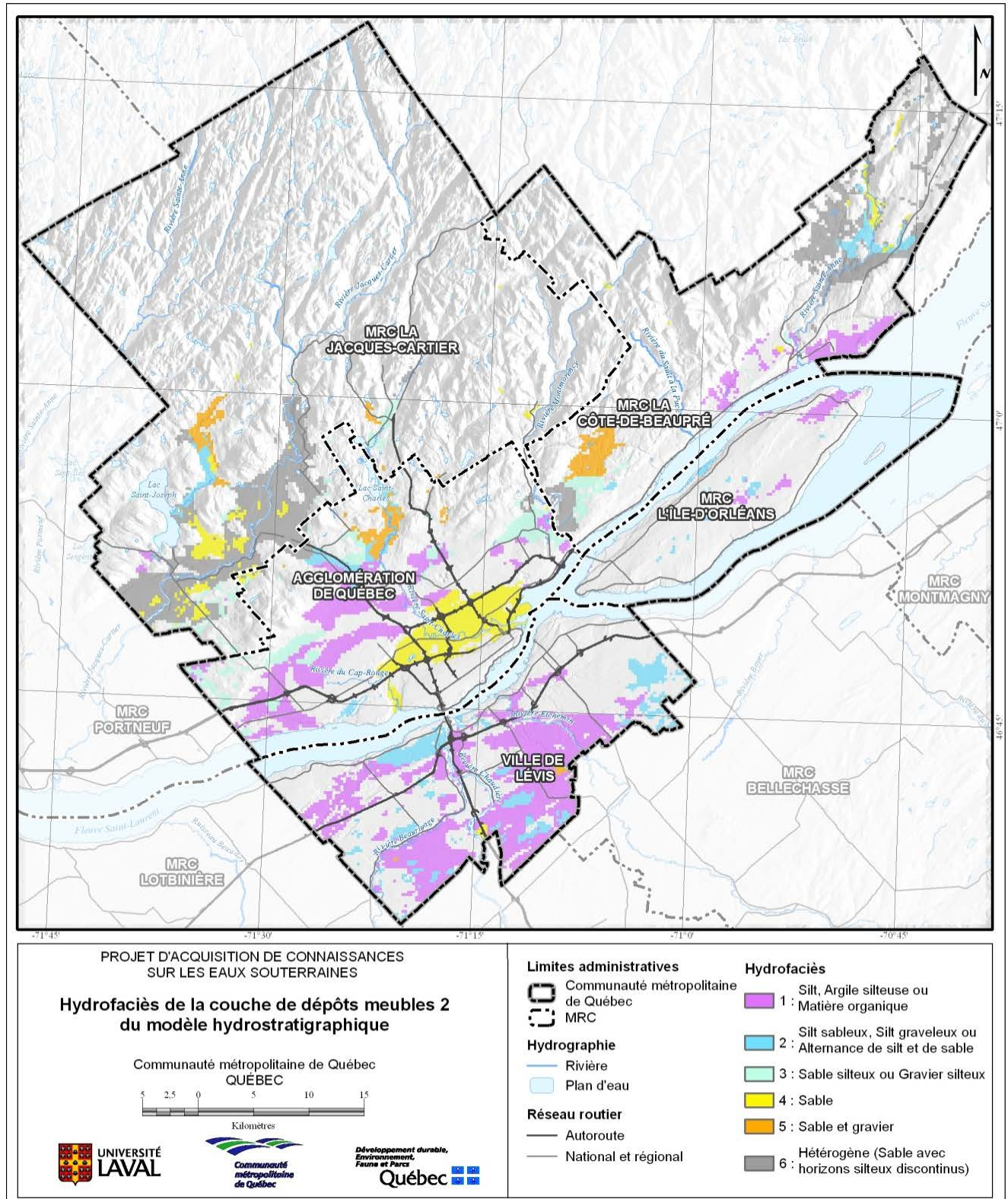


Figure A3 : Distribution spatiale des hydrofaciès de la deuxième couche du modèle hydrostratigraphique

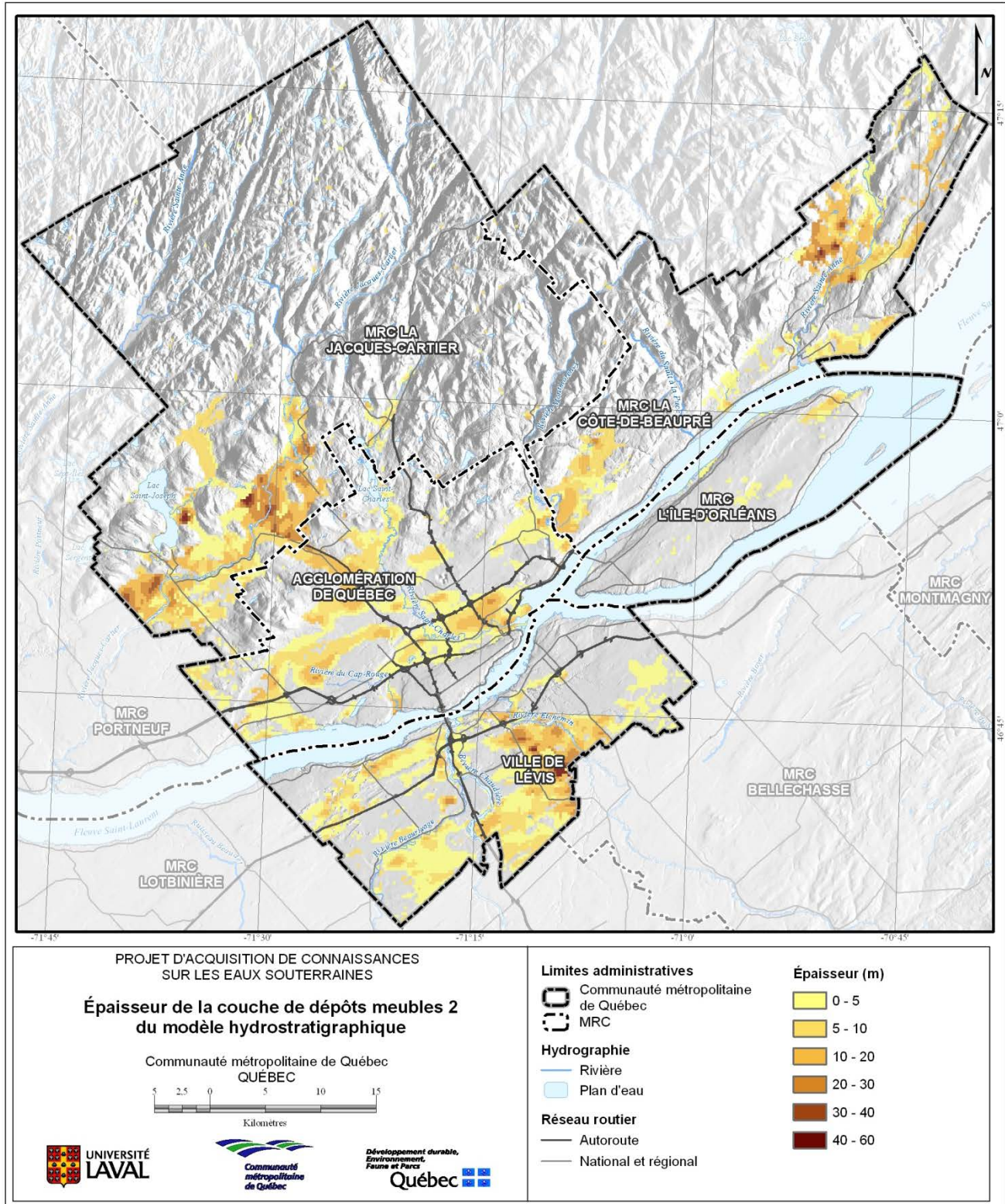


Figure A4 : Épaisseur de la deuxième couche d'hydrofaciès du modèle hydrostratigraphique

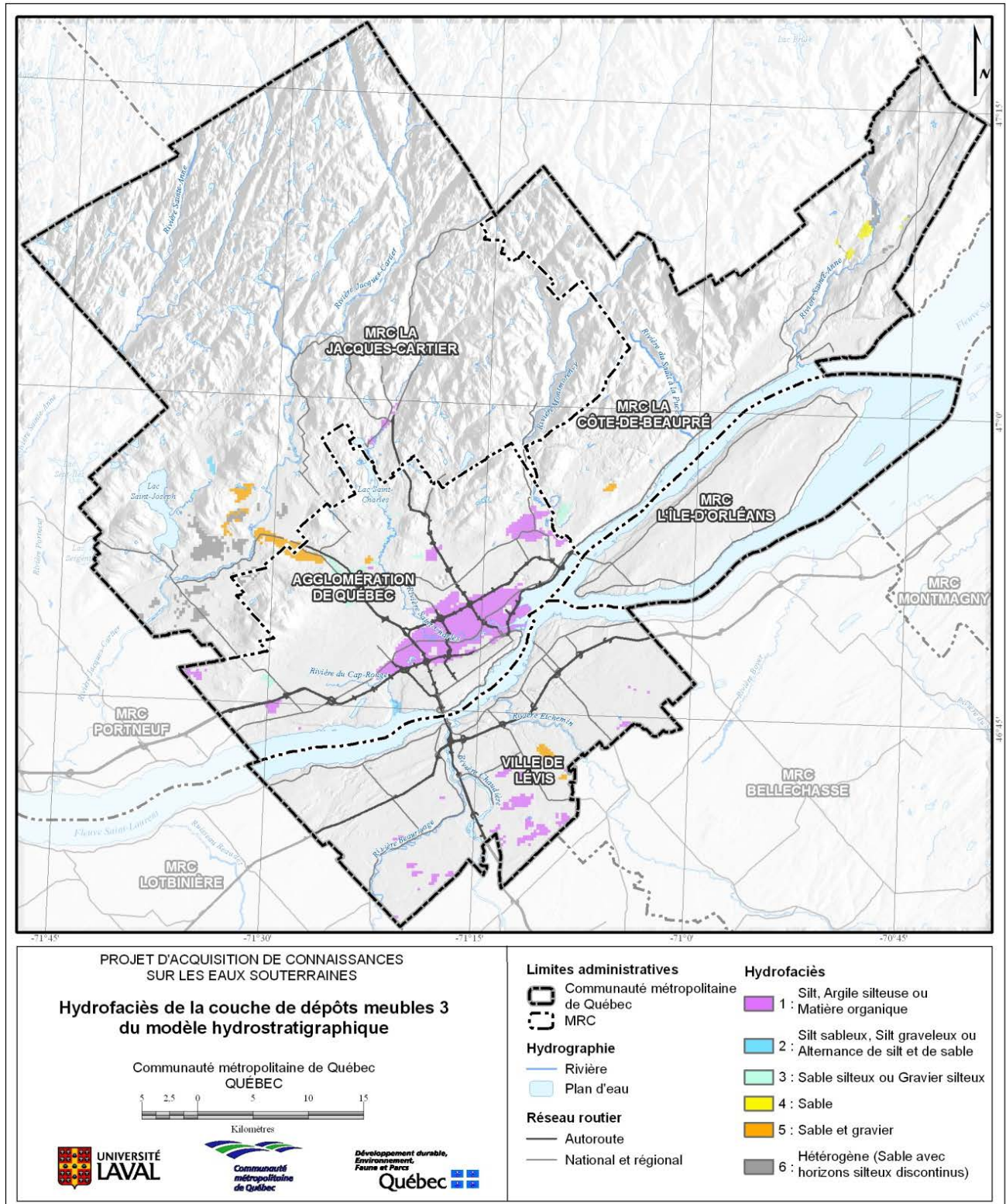


Figure A5 : Distribution spatiale des hydrofaciès de la troisième couche du modèle hydrostratigraphique

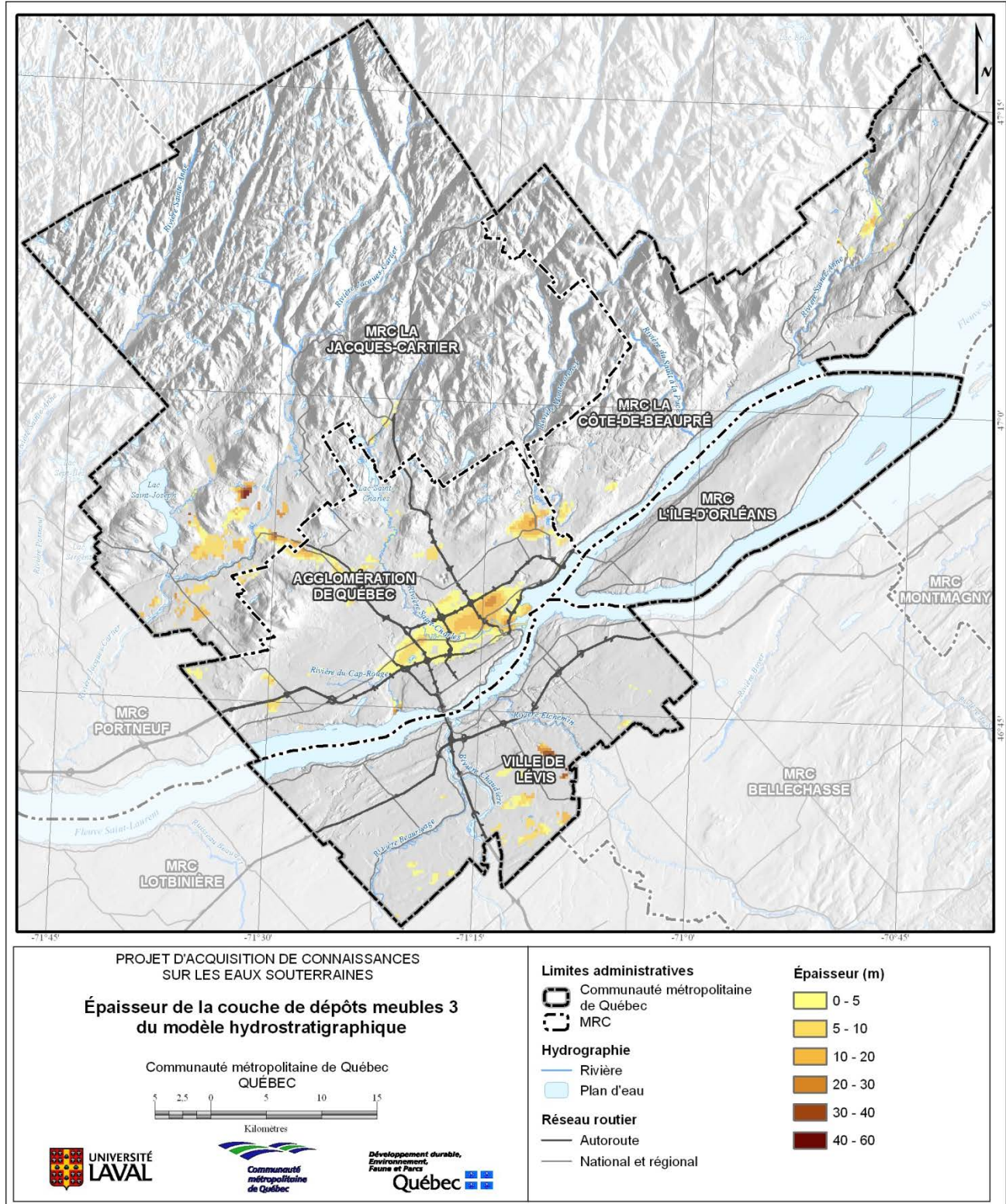


Figure A6 : Épaisseur de la troisième couche d'hydrofaciès du modèle hydrostratigraphique

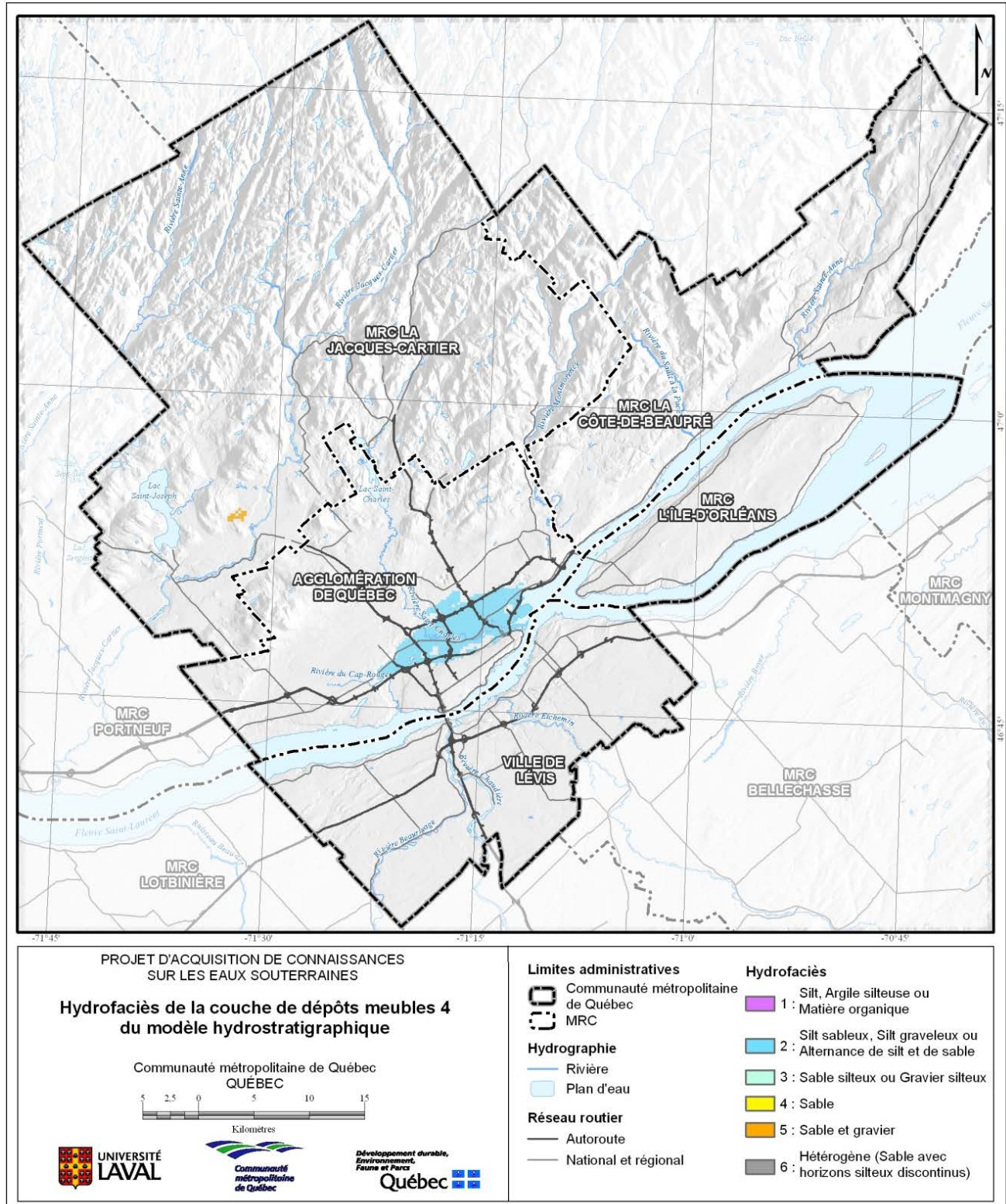


Figure A7 : Distribution spatiale des hydrofaciès de la quatrième couche du modèle hydrostratigraphique

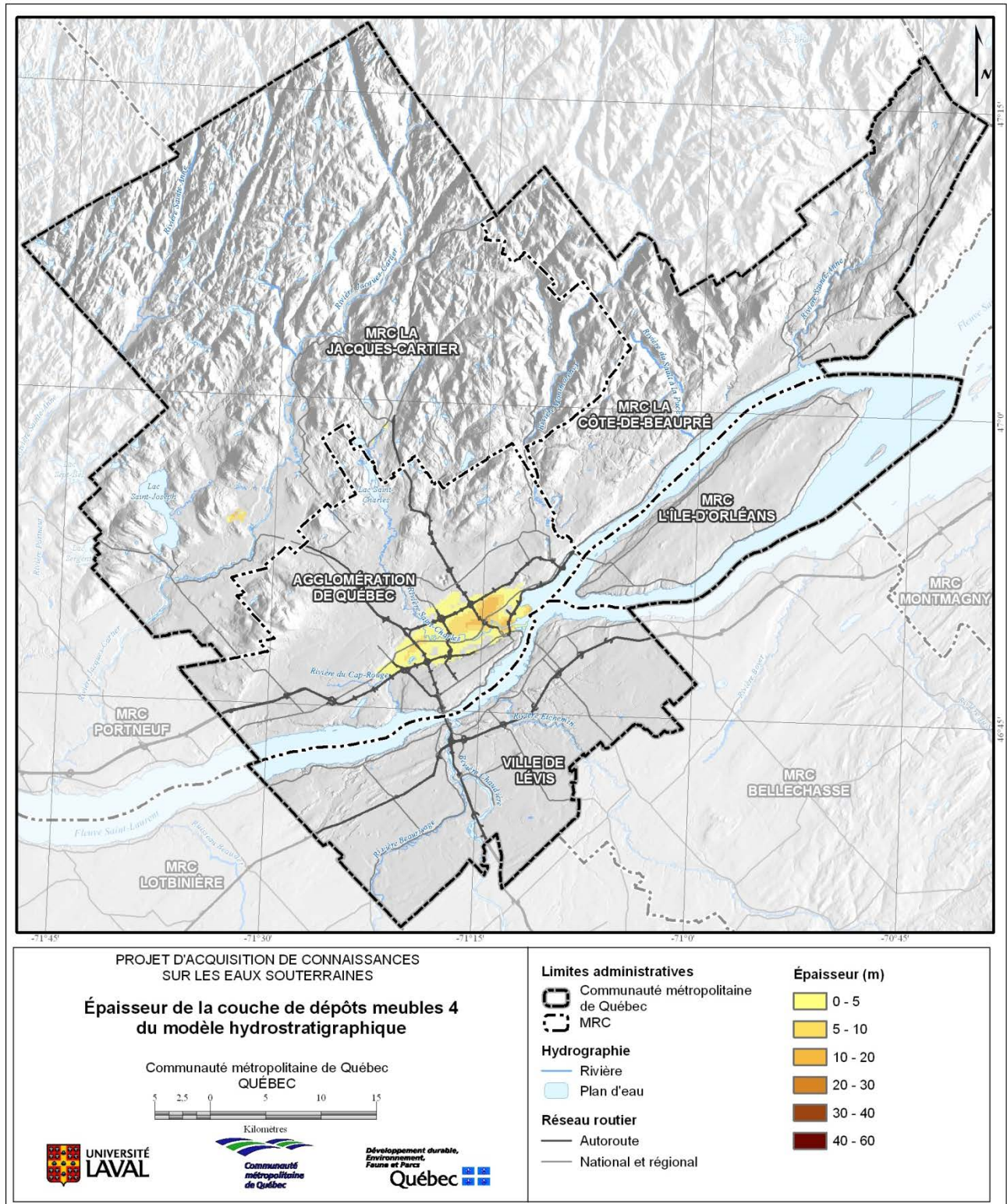


Figure A8 : Épaisseur de la quatrième couche d'hydrofaciès du modèle hydrostratigraphique

Annexe 6 : Méthodologie pour la réalisation des cartes piézométriques

Le Protocole du GRIES (Annexe E6) pour la préparation de la Carte 19 – Piézométrie dans les formations superficielles et la Carte 20 – Piézométrie dans le roc fracturé (ci-après nommé Protocole) a été respecté en majeure partie pour la production de ces deux cartes. L'Annexe 6 vise une présentation plus détaillée de la méthodologie employée dans le cadre du PACES-CMQ.

Source des données

La même source de données que le Protocole a été employée, soit la profondeur des niveaux d'eau souterraine contenus dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ. La Carte 5 Hydrographie, la Carte 12 (version préliminaire) Géologie du Quaternaire, la Carte 15 Épaisseur des dépôts meubles et la Carte 17 Confinement et épaisseur des aquifères ont également servi à établir la nature des liens hydrauliques entre les cours d'eau et les aquifères et à améliorer l'estimation de la piézométrie.

Sélection et validation des données

Un processus de sélection et validation des données de niveau d'eau, similaire à celui du Protocole, a été suivi. Les niveaux d'eau qui ne respectaient pas les critères de validation établis lors de la validation de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ ont tout d'abord été écartés. Ces critères de validation permettent de rejeter :

- les niveaux d'eau des puits dont la localisation est incohérente avec le réseau hydrographique,
- les niveaux d'eau statiques des puits qui sont plus profonds que leurs niveaux d'eau dynamiques,
- les niveaux d'eau non mesurés en raison d'un puits « à sec », et
- les niveaux d'eau qui diffèrent de plus de 5 m (critère arbitraire) de la moyenne des niveaux d'eau mesurés dans le même puits.

Lorsque plusieurs niveaux d'eau sont mesurés dans le même puits, un seul niveau répondant aux exigences suivantes est conservé :

- la provenance de l'information présente la meilleure fiabilité,
- les paramètres sur l'état, la représentativité et le pompage sont connus, et
- la date de mesure est la plus récente.

Les niveaux d'eau sélectionnés ont tous été rapportés au niveau de référence du sol. Pour les puits jaillissants dont le débordement n'était pas mesuré, le niveau d'eau a été fixé à 0 m, soit à égalité avec la surface du sol.

Sur les 85 079 niveaux d'eau de la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ, 13 047 ont été conservés selon les critères énumérés ci-dessus. En grande partie, les données éliminées sont celles des puits de suivi de la piézométrie avec des milliers de données journalières.

Le type d'aquifère (fracturé ou de dépôts meubles) a été identifié pour chaque niveau d'eau relevé dans la base de données hydrogéologiques PACES-CMQ. Pour ce faire, la

description stratigraphique de chaque puits, lorsque disponible, a été jumelée à la profondeur de la crépine. Parmi les niveaux d'eau validés, 2 676 proviennent d'un aquifère de dépôts meubles et 10 195 d'un aquifère de roc fracturé. La provenance de 176 niveaux d'eau demeure indéterminée.

Contrairement à l'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles (Annexe 4), le territoire n'a pas été divisé en différentes zones d'interpolation puisque la piézométrie dépend principalement de la topographie et moins de la géologie du roc et du Quaternaire.

D'autres critères basés sur le jugement professionnel ont été appliqués afin de bonifier la validation des niveaux d'eau. Ces critères ont été élaborés selon la connaissance et la compréhension hydrogéologique de la région. Une exploration préliminaire spatiale des données a été effectuée afin de détecter des aberrations flagrantes (ex. : les profondeurs d'eau de plus de 100 m). Des histogrammes et des analyses statistiques ont aussi été produits afin d'éliminer les données douteuses. Étant donné que 99 % des niveaux d'eau ont moins de 20 m de profondeur, ceux ayant plus de 20 m ont été identifiés comme douteux. Leur validité a ensuite été confirmée ou non en comparant les niveaux avec leurs voisins géographiques immédiats et en tenant compte du contexte hydrogéologique. Les niveaux profonds en bordure des plans d'eau importants tels que le fleuve Saint-Laurent ont été rejetés, car ces plans d'eau sont généralement en lien hydraulique avec les aquifères.

Pour chaque milieu aquifère (de dépôts meubles et de roc fracturé), un calcul de la moyenne mobile centrée sur chaque puits a été réalisé lorsque plus de 3 données de niveau d'eau étaient localisées dans un rayon de 250 m. Les niveaux d'eau s'éloignant trop de la moyenne locale, ont été rejetés si :

- la différence entre la valeur du niveau et la moyenne locale est supérieure à 5 m (correspond environ à l'incertitude estimée sur les mesures),
- le rejet est confirmé, par visualisation spatiale et comparaison avec leurs voisins immédiats, tout en tenant compte du contexte hydrogéologique, et
- d'autres mesures douteuses ont été identifiées avec un écart-type mobile à chaque donnée, et calculé lorsque 5 niveaux d'eau se trouvaient dans un rayon de 250 m. Les niveaux d'eau dont l'écart avec la moyenne locale est supérieure à deux écarts-types locale a aussi permis d'identifier les valeurs potentiellement aberrantes et de les éliminer en fonction des valeurs voisines immédiates et du contexte hydrogéologique.

Cette méthode de filtration avec fenêtre mobile a servi à mettre en évidence certaines données douteuses, mais pas toutes. Les niveaux d'eau des aquifères de dépôts meubles ont aussi été comparés avec ceux dans les aquifères de roc fracturé des secteurs où ces deux aquifères sont en lien hydraulique.

Suite à ce processus de validation basé sur le jugement professionnel, 9 270 niveaux d'eau ont été conservés pour les aquifères de roc fracturé et 2 611 niveaux d'eau pour les aquifères de dépôts meubles.

La fiabilité des sources de données a été prise en considération à chacune des étapes de sélection et de validation des niveaux d'eau.

Traitement des données

Comme suggéré par le Protocole, l'estimation de la piézométrie des aquifères de dépôts meubles et des aquifères de roc fracturé a été effectuée par une méthode d'interpolation. La méthode d'interpolation par krigeage ordinaire, jugée appropriée à notre jeu de données, a été utilisée. L'analyse statistique et l'interpolation ont été réalisées sur les valeurs de profondeur des niveaux d'eau souterraine.

Roc fracturé

Pour la piézométrie dans les aquifères de roc fracturé, un semi-variogramme a été ajusté manuellement en utilisant d'abord un modèle sphérique omnidirectionnel, puis directionnel avec orientation à chaque 30 degrés (balayage) et tolérance de 30 degrés. Aucune anisotropie géométrique n'a été détectée. Ce modèle a été jugé satisfaisant et n'a pas nécessité l'utilisation du module « Autofit » du logiciel Surfer®. Les paramètres de ce semi-variogramme sont présentés au Tableau A10.

Tableau A10 : Paramètres du semi-variogramme des données de profondeurs de niveau d'eau de l'aquifère de roc fracturé

Effet pépite (m ²)	Seuil (m ²)	Portée maximale (m)	Rapport d'anisotropie géométrique (m/m)	Direction de la portée maximale (degrés)
5,5	9	800	1	s.o.

Note : s.o. = sans objet

Le krigeage ordinaire, avec validation croisée et étude spatiale des résidus, a été effectué sur une grille de 250 m par 250 m pour toute la zone d'étude, en incluant les puits situés à l'extérieur de la limite du territoire de la CMQ, avant d'être découpé par cette dernière. Les paramètres de recherche employés pour l'interpolation sont indiqués au Tableau A11. Les niveaux d'eau interpolés sur les rivières et plans d'eau jugés en lien hydraulique avec l'aquifère du roc fracturé ont été remplacés par 0 m.

Tableau A11 : Paramètres de recherche pour l'interpolation par krigeage ordinaire des profondeurs de niveau d'eau de l'aquifère de roc fracturé

Rayon du cercle de recherche (m)	Nombre minimal de forages	Nombre maximal de forages	Nombre de secteurs de recherche	Nombre maximal de forages par secteur de recherche	Nombre maximal de secteurs de recherche sans forage
3 500	4	16	4	4	4

Note : s.o. = sans objet

Le long de la bordure nord de l'interpolation, la faible densité de mesures a conduit à des résultats médiocres d'interpolation. Afin de ne pas prendre en compte ces effets de

bordure, une bande de 2 km des résultats de l'interpolation a été tronquée dans la partie nord. Cet effet de bordure n'a pas été constaté aux limites est, sud et ouest de la région interpolée, car la densité d'information y est suffisante pour des résultats valables.

Dans le secteur de l'ancien delta de la rivière Jacques-Cartier, due à la faible densité de niveaux d'eau provenant du milieu aquifère de roc fracturé, l'interpolation présente un piètre résultat. Puisque les aquifères de dépôts meubles et de roc sont en lien hydraulique, il a été possible d'améliorer le résultat de l'interpolation en ajoutant à la méthode les nombreux niveaux d'eau mesurés dans les dépôts meubles.

Un nouveau semi-variogramme, n'incluant que les puits situés à l'intérieur de la limite de l'aquifère, a été ajusté manuellement en utilisant un modèle sphérique omnidirectionnel, puis directionnel avec orientation à chaque 30 degrés (balayage) et tolérance de 30 degrés. Aucune anisotropie géométrique n'a été détectée. Ce modèle fait à la main a été jugé satisfaisant et n'a pas nécessité l'utilisation du module « *Autofit* » du logiciel Surfer®. Les paramètres du semi-variogramme sont présentés au Tableau A12.

Tableau A12 : Paramètres du semi-variogramme de la profondeur des niveaux d'eau mesurés dans les aquifères de dépôts meubles et de roc fracturé à l'endroit du delta de la rivière Jacques-Cartier

Effet pépite (m ²)	Seuil (m ²)	Portée maximale (m)	Rapport d'anisotropie géométrique (m/m)	Direction de la portée maximale (degrés)
0,5	18,5	2500	1	s.o.

Note : s.o. = sans objet

Le krigeage ordinaire, avec validation croisée et étude spatiale des résidus, ont ensuite été effectués sur une grille de 250 m par 250 m. Les paramètres de recherche employés pour l'interpolation sont indiqués au Tableau A13. Les niveaux d'eau interpolés sur les rivières et plans d'eau en lien hydraulique avec les aquifères du delta de la rivière Jacques-Cartier et les aquifères de roc fracturé ont été remplacés par 0 m.

Tableau A13 : Paramètres de recherche pour l'interpolation par krigeage ordinaire des profondeurs de niveau d'eau des aquifères de dépôts meubles et de roc fracturé à l'endroit du delta de la Jacques-Cartier

Rayon du cercle de recherche (m)	Nombre minimal de forages	Nombre maximal de forages	Nombre de secteurs de recherche	Nombre maximal de forages par secteur de recherche	Nombre maximal de secteurs de recherche sans forage
3 500	4	64	1	s.o.	s.o.

Note : s.o. = sans objet

Dans la zone au nord où la densité de forage est insuffisante pour faire une interpolation, une autre méthode d'estimation a été utilisée. Des unités physiographiques simplifiées contrôlant la piézométrie ont été définies sur la zone des Laurentides à partir de la Carte 12 (version préliminaire) de la Géologie du Quaternaire (version préliminaire) et des dépôts

quaternaires simplifiés identifiés lors de l'estimation des épaisseurs des dépôts meubles (Annexe 4). Les statistiques des niveaux d'eau validés, localisés dans la zone des Laurentides, ont été calculées pour chaque unité physiographique (Tableau A14). Sur la carte finale de la piézométrie du roc fracturé, la valeur de la médiane des niveaux d'eau a été attribuée à chaque type d'unité.

Tableau A14 : Niveau d'eau pour chaque type d'unité topographique simplifiée pour la zone des Laurentides

Unité physiographique simplifiée	Type de dépôt simplifié	n forages	Médiane des profondeurs d'eau (m)
Sommet de colline	Roc, till mince	654	6,1
Versant de colline	Till épais, certains dépôts organiques	726	5,5
Fond de vallée	Marin, fluvioglacière, alluvion et certains dépôts organiques	1255	4,9

Pour produire une cartographie unifiée des niveaux d'eau de l'aquifère de roc fracturé, une mosaïque a été construite entre les résultats de tout le territoire de la CMQ, du delta de la Jacques-Cartier et de la zone non interpolée au nord. Pour atténuer le contraste des niveaux d'eau à la limite de l'aquifère du delta de la Jacques-Cartier, une zone tampon de 1 km de chaque côté de cette limite a été tracée. Dans cette zone, une moyenne a été effectuée entre les résultats de l'interpolation dans le delta de la Jacques-Cartier (niveaux d'eau mesurés dans le roc et dans les dépôts) et du reste du territoire de la CMQ (niveau d'eau dans le roc).

Dépôts meubles

Pour le milieu aquifère de dépôts meubles, étant donné la faible densité de données de niveau d'eau provenant de ces milieux, l'interpolation n'a été réalisée que pour certains secteurs limités. Parmi les aquifères régionaux n'étant pas en lien hydraulique avec l'aquifère de roc, seuls ceux du Proto-Saint-Laurent contenaient une densité suffisante de profondeurs de niveau d'eau pour réaliser une interpolation.

Un semi-variogramme, n'incluant que les puits situés à l'intérieur de la limite de cet aquifère, a été ajusté manuellement en utilisant d'abord un modèle gaussien omnidirectionnel, puis directionnel avec orientation à chaque 30 degrés (balayage) et tolérance de 30 degrés. Le module « Autofit » du logiciel Surfer[®] a ensuite été employé en fixant les limites des paramètres pour se rapprocher du modèle fait à la main. Les paramètres du semi-variogramme sont présentés au Tableau A15.

Tableau A15 : Paramètres du semi-variogramme des données de niveau d'eau des aquifères de dépôts meubles du Proto-Saint-Laurent

Effet pépite (m ²)	Seuil (m ²)	Portée maximale (m)	Rapport d'anisotropie géométrique (m/m)	Direction de la portée maximale (degrés)
1	6	1600	2,5	148,5

Le krigeage ordinaire, avec validation croisée et étude spatiale des résidus, a ensuite été effectué sur une grille de 250 m par 250 m. Les paramètres de recherche employée pour l'interpolation sont au Tableau A16. Les niveaux d'eau interpolés sur les rivières et plans d'eau jugés en lien hydraulique avec les aquifères du delta du Proto-Saint-Laurent ont été remplacés par 0 m.

Tableau A16 : Paramètres de recherche pour l'interpolation par krigeage ordinaire des profondeurs de niveau d'eau des aquifères de dépôts meubles du Proto-Saint-Laurent

Rayon du cercle de recherche (m)	Nombre minimal de forages	Nombre maximal de forages	Nombre de secteurs de recherche	Nombre maximal de forages par secteur de recherche	Nombre maximal de secteurs de recherche sans forage
1 500	4	64	4	16	3

Comme mentionné précédemment, l'interpolation a été réalisée à partir des données de profondeurs de niveau d'eau. Pour obtenir la piézométrie en termes d'élévation par rapport au niveau moyen de la mer, une soustraction des profondeurs d'eau à l'altitude du modèle numérique de terrain a été réalisée. L'encadré Carte 19, apparaissant sur la Carte 20, a été produit pour les aquifères de dépôts meubles du Proto-Saint-Laurent.

Annexe 7 : Propriétés hydrauliques

Tableau A17 : Propriétés hydrauliques selon les différentes formations rocheuses cartographiées

Géologie du roc		Emmagasinement S			Capacité spécifique C _{sp}			Transmissivité T			Conductivité hydraulique K		
Code	ENSEMBLE Formation (Composition)	n	μ _g	σ _{log}	n	μ _g	σ _{log}	n	μ _g	σ _{log}	n	μ _g	σ _{log}
		(-)	(m ³ /m ³)	(log m ³ /m ³)	(-)	(m ² /s)	(log m ² /s)	(-)	(m ² /s)	(log m ² /s)	(-)	(m/s)	(log m/s)
-	APPALACHES	10	2x10⁻⁴	0,7	296	7x10⁻⁵	0,7	20	3x10⁻⁴	0,5	22	3x10⁻⁷	1,1
Ovq	Nappe du Promontoire de Québec (shale, calcaire, dolomie, grès)	-	-	-	14	1x10 ⁻⁵	0,7	-	-	-	-	-	-
Oore	Wildflysh de la rivière Etchemin (shale chaotique avec blocs)	-	-	-	4	5x10 ⁻⁵	0,9	-	-	-	-	-	-
Oll	Écaille de Ste Pétronille et de la Pointe de Lévis (mudstone dolomitique, shale calcisilite, calcarénite, conglomérat, calcaire)	-	-	-	4	6x10 ⁻⁵	0,8	-	-	-	18	2x10 ⁻⁷	1,0
COio	Nappe de Bacchus (mélange)	-	-	-	178	8x10 ⁻⁵	0,6	1	1x10 ⁻⁵	-	-	-	-
Csy	Nappe de la Chaudière (shale rouge, grès vert)	10	2x10 ⁻⁴	0,7	96	9x10 ⁻⁵	0,7	19	4x10 ⁻⁴	0,5	4	1x10 ⁻⁶	0,9
-	PLATE-FORME DU SAINT-LAURENT	-	-	-	34	7x10⁻⁵	0,6	-	-	-	5	2x10⁻⁶	1,8
Olo	Formation de Lotbinière (shale silteux, lamines de grès)	-	-	-	10	1x10 ⁻⁴	0,6	-	-	-	3	1x10 ⁻⁷	0,6
Oss	Formation de Sainte-Sabine et Les Fonds (ardoise, dolomie)	-	-	-	8	3x10 ⁻⁵	0,8	-	-	-	-	-	-
Out	Shale d'Utica (shale)	-	-	-	2	2x10 ⁻⁵	0,8	-	-	-	-	-	-
Ot	Groupe de Trenton et Formation de Neuville (calcaire, shale, calcaire argileux)	-	-	-	14	9x10 ⁻⁵	0,3	-	-	-	2	1x10 ⁻⁴	1,3
-	PROVINCE DE GRENVILLE	1	3x10⁻⁴	-	304	4x10⁻⁵	0,7	14	4x10⁻⁵	1,1	2	5x10⁻⁵	0,9
53	(anorthosite et gabbronorite)	-	-	-	4	1x10 ⁻⁵	0,4	1	1x10 ⁻⁵	-	-	-	-
55	(granitoïde et syénite)	-	-	-	32	4x10 ⁻⁵	0,7	-	-	-	-	-	-
46	(migmatite)	1	3x10 ⁻⁴	-	109	5x10 ⁻⁵	0,7	5	6x10 ⁻⁵	1,0	1	2x10 ⁻⁴	-
45	(gneiss charnockitique et granitoïdes à orthopyroxène)	-	-	-	157	5x10 ⁻⁵	0,8	8	3x10 ⁻⁵	1,2	1	1x10 ⁻⁵	-
43	(gneiss)	-	-	-	2	2x10 ⁻⁴	0,8	-	-	-	-	-	-
	TOTAL ROC	11	2x10⁻⁴	0,7	634	6x10⁻⁵	0,7	34	1x10⁻⁴	0,9	29	5x10⁻⁷	1,3

où n : nombre d'échantillons; μ_g : moyenne géométrique de l'échantillon ; σ_{log} : écart-type du logarithme de l'échantillon.

Tableau A18 : Propriétés hydrauliques selon la lithologie dominante décrite en forage

Géologie du roc	Emmagasinement S			Capacité spécifique C _{sp}			Transmissivité T			Conductivité hydraulique K		
	n (-)	μ _g (m ³ /m ³)	σ _{log} (log m ³ /m ³)	n (-)	μ _g (m ² /s)	σ _{log} (log m ² /s)	n (-)	μ _g (m ² /s)	σ _{log} (log m ² /s)	n (-)	μ _g (m/s)	σ _{log} (log m/s)
Type Lithologie dominante en forage												
Roches sédimentaires	8	3x10⁻⁴	0,8	49	1x10⁻⁴	1,0	16	4x10⁻⁴	0,6	27	4x10⁻⁷	1,2
Dominance de Grès	4	3x10 ⁻⁴	0,9	18	5x10 ⁻⁵	1,3	6	5x10 ⁻⁴	0,8	1	3x10 ⁻⁵	-
Dominance de Shale	4	3x10 ⁻⁴	0,8	13	5x10 ⁻⁴	0,6	10	3x10 ⁻⁴	0,4	23	2x10 ⁻⁷	0,9
Dominance de Calcaire	-	-	-	18	9x10 ⁻⁵	0,6	-	-	-	3	2x10 ⁻⁵	1,5
Roches ignées et métamorphiques	2	7x10⁻⁵	0,4	323	6x10⁻⁵	0,7	7	9x10⁻⁵	1,0	1	1x10⁻⁵	-
Dominance de Schiste	2	7x10 ⁻⁵	0,4	242	7x10 ⁻⁵	0,5	2	7x10 ⁻⁴	0,0	-	-	-
Dominance de Roches intrusives	-	-	-	5	4x10 ⁻⁴	1,9	-	-	-	-	-	-
Dominance de Gneiss	-	-	-	76	4x10 ⁻⁵	0,9	5	4x10 ⁻⁵	1,0	1	1x10 ⁻⁵	-
TOTAL ROC	10	2x10⁻⁴	0,7	372	7x10⁻⁵	0,7	23	2x10⁻⁴	0,7	28	4x10⁻⁷	1,2

où *n* : nombre d'échantillons; *μ_g* : moyenne géométrique de l'échantillon ; *σ_{log}* : écart-type du logarithme de l'échantillon.

Annexe 8 : Données d'entrée et résultats de la modélisation avec HELP[®] de la recharge et des autres composantes du bilan hydrologique

Dans le cadre de l'étude PACES-CMQ, le logiciel HELP[®] (Hydrologic Evaluation of Landfill Potential), version 3.07, par Schroeder *et coll.* (1994), a servi à estimer la contribution des composantes du bilan hydrologique pour l'ensemble du territoire de la CMQ. L'établissement du bilan hydrologique par HELP[®] nécessite l'intégration de plusieurs données concernant les sols, la géologie (dépôts quaternaires et roc), la végétation, l'occupation du sol ainsi que la météorologie (Figure A9). Cette annexe présente les différentes données intégrées au modèle de calcul HELP[®].

Hypothèses et considérations du modèle :

- 1) La recharge est considérée comme étant la percolation verticale de l'eau qui atteint le toit de l'aquifère, c'est-à-dire la surface piézométrique pour les aquifères non confinés ou la base de la dernière couche confinante pour les aquifères confinés et semi confinés.
- 2) Les précipitations (pluie et neige) sont les seuls apports d'eau dans le modèle.
- 3) Les eaux de surface (lacs, rivières), lorsqu'elles couvrent la majorité de la surface d'une maille (250 m par 250 m) du modèle, sont exclues de la modélisation. En climat continental humide, comme au Québec, les eaux de surface sont souvent considérées comme des zones de résurgences, où la recharge est nulle.
- 4) L'occupation du sol et la végétation demeurent identiques durant toute la période de simulation (1979 – 2009). Ces informations sont représentatives de l'année 2012 pour les zones forestières (SIEF du MRN), de 2012 pour les zones agricoles (BDCG de la Financière Agricole du Québec), de 2007 pour les milieux humides (Canards illimités Canada) et 2012 pour les zones urbaines (zones de recensements).
- 5) Il n'y a pas d'écoulement latéral entre les cellules voisines : chaque cellule représente une colonne stratigraphique fermée et pour laquelle un bilan hydrologique est calculé.
- 6) Le territoire d'étude a été séparé en deux zones climatiques, bien qu'il existe des variations locales de température, précipitation et radiation solaire.
- 7) En raison de l'absence de données de radiation solaire disponibles sur le territoire, un jeu de données synthétiques a été généré en intégrant les mesures de précipitation et de température au module WGEN (Richardson et Wright, 1984) contenu dans le modèle HELP[®].
- 8) Le roc fracturé est considéré comme un milieu poreux équivalent, au même titre que les dépôts meubles.

Données météorologiques

La région d'étude a été séparée en deux zones climatiques (Figure A10) de manière à bien représenter les conditions météorologiques des régions physiographiques des hautes terres et des basses terres. Le modèle HELP[®] nécessite à la fois des données journalières (température, précipitation, radiation solaire), des données trimestrielles (humidités relatives) et annuelles (vitesse du vent et période de croissance des végétaux) qui proviennent de diverses sources (Figure A10).

Les données journalières de précipitation totale et de température minimale et maximale ont été produites par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) à partir des données du Programme de surveillance du climat du MDDEFP. Ces données sont

disponibles à partir de 1900 à l'échelle du Québec sur un maillage régulier de 0,1 degré en longitude et latitude. Pour plus de détails sur la production de ces données, il est possible de consulter le document (Poirier *et coll.*, 2012). Le jeu de données n'offrant que les températures minimales et maximales journalières, la valeur moyenne calculée entre ces dernières a été retenue pour les besoins du modèle HELP[®]. La simulation ne s'est faite qu'avec les données de 1980 à 2009, correspondant à une période de 30 ans.

Aucune station de mesures de la radiation solaire n'est disponible dans la région. La radiation solaire a donc été générée par le module « WGEN » (Richardson et Wright, 1984), imbriqué dans le modèle HELP[®], et à partir des températures et des précipitations quotidiennes fournies pour le projet.

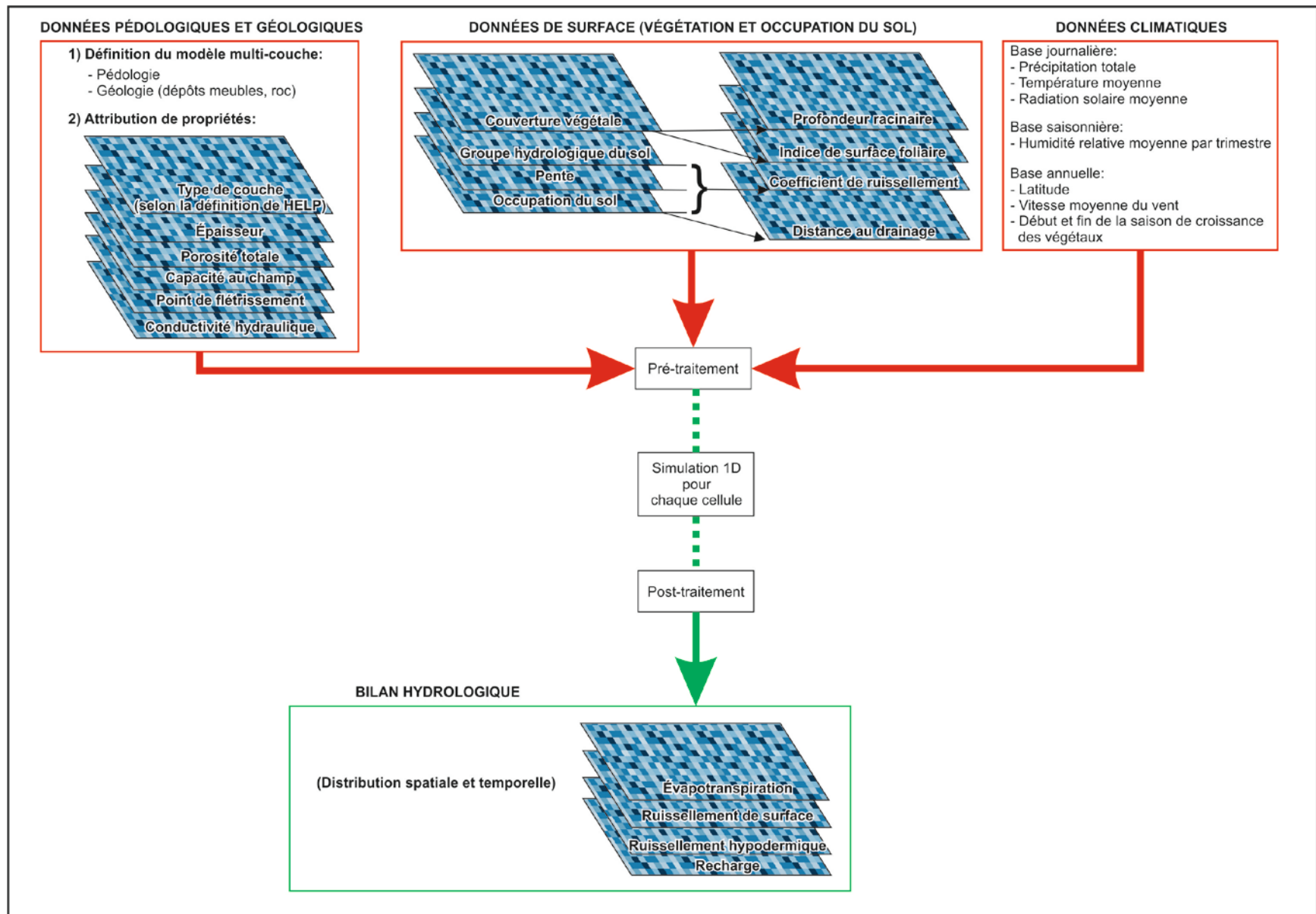


Figure A9 : Architecture du modèle HELP®

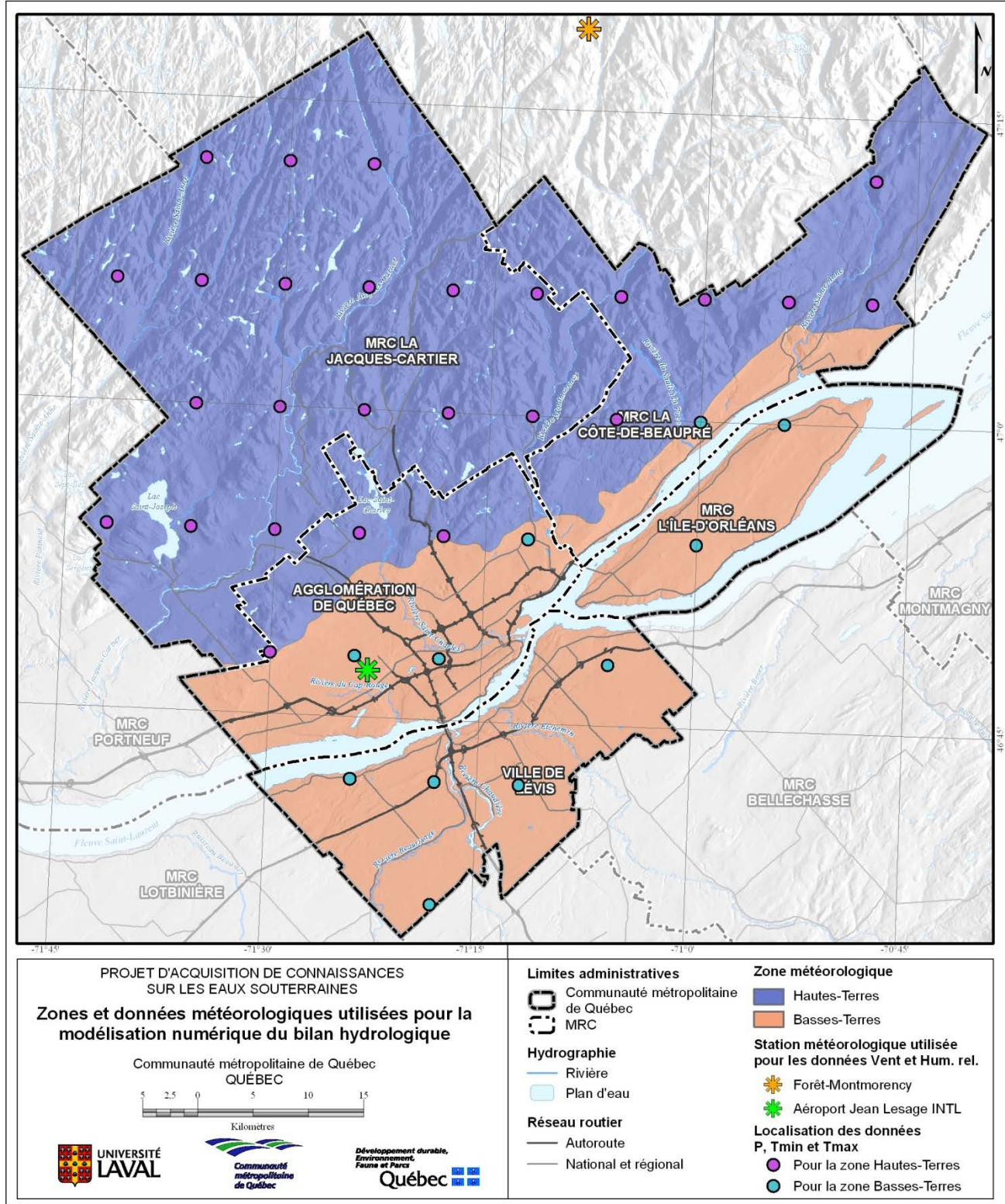


Figure A10 : Définition des zones et localisation des données météorologiques utilisées pour la modélisation numérique du bilan hydrologique

Les valeurs annuelles moyennes de vitesse du vent ont été déterminées à partir des normales climatiques d'Environnement Canada (2012) disponibles aux stations de l'Aéroport Jean-Lesage et de la Forêt Montmorency (Tableau A19). Les stations de la Forêt Montmorency et de l'Aéroport sont localisées à l'extérieur de la zone des hautes terres, la première au nord et l'autre au sud. Pour la zone météorologique des hautes terres, la moyenne des valeurs aux deux stations (11,2 km/h) a été conservée tandis que la valeur de l'Aéroport Jean-Lesage (14,8 km/h) a été attribuée à la zone des basses terres.

Des données d'humidité relative sont aussi disponibles à la station de l'Aéroport Jean-Lesage pour les quatre trimestres (Environnement Canada, 2012). En raison du manque d'information sur ce paramètre dans la zone des hautes terres, ces mêmes valeurs ont été attribuées aux deux zones météorologiques définies sur le territoire de la CMQ.

Les dates de début et de la fin de la saison de croissance des végétaux ont été établies avec les deux cartes montrant la date moyenne de début et de fin pour la période 1979 – 2008 (température moyenne $\geq 5,5^{\circ}\text{C}$) disponibles sur le site d'Agrométéo Québec (2012). La sélection s'est faite à partir des dates moyennes pour la période 1979-2008. Les dates de début et de fin de la saison de croissance sont, respectivement, le 27 avril et le 4 novembre pour la zone météorologique des basses terres et le 3 mai et le 26 octobre pour la zone des hautes terres.

Tableau A19 : Données météorologiques fixées pour la modélisation du bilan hydrologique avec HELP®

Paramètres	Unités de mesure	Hautes terres	Basses terres	Source des données	
Vitesse annuelle moyenne du vent	Km/h	11,2	14,8	[1]	
Humidité relative moyenne	1 ^{er} trimestre (janv-mars)	68,6		[1]	
	2 ^e trimestre (avr-juin)	65,0		[1]	
	3 ^e trimestre (juil-sept)	72,0		[1]	
	4 ^e trimestre (oct-dec)	73,9		[1]	
Saison de croissance des végétaux	Début	Jour julien	123	117	[2]
	Fin	Jour julien	299	308	[2]

[1] Environnement Canada (2012) ; [2] Agrométéo Québec (2012)

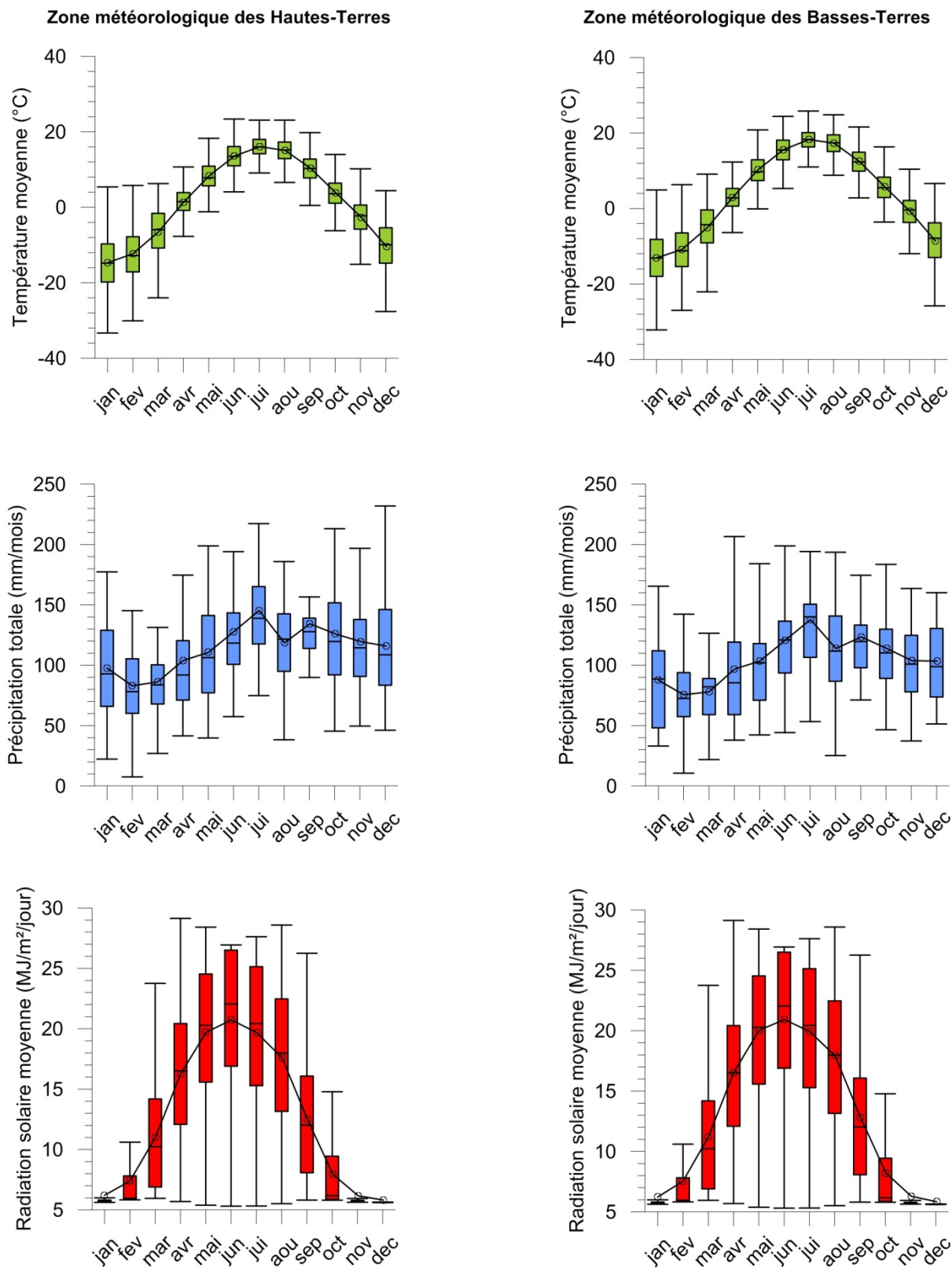


Figure A11 : Variations mensuelles des températures, précipitations et radiations solaires utilisées pour la modélisation numérique du bilan hydrologique (années 1980-2009)

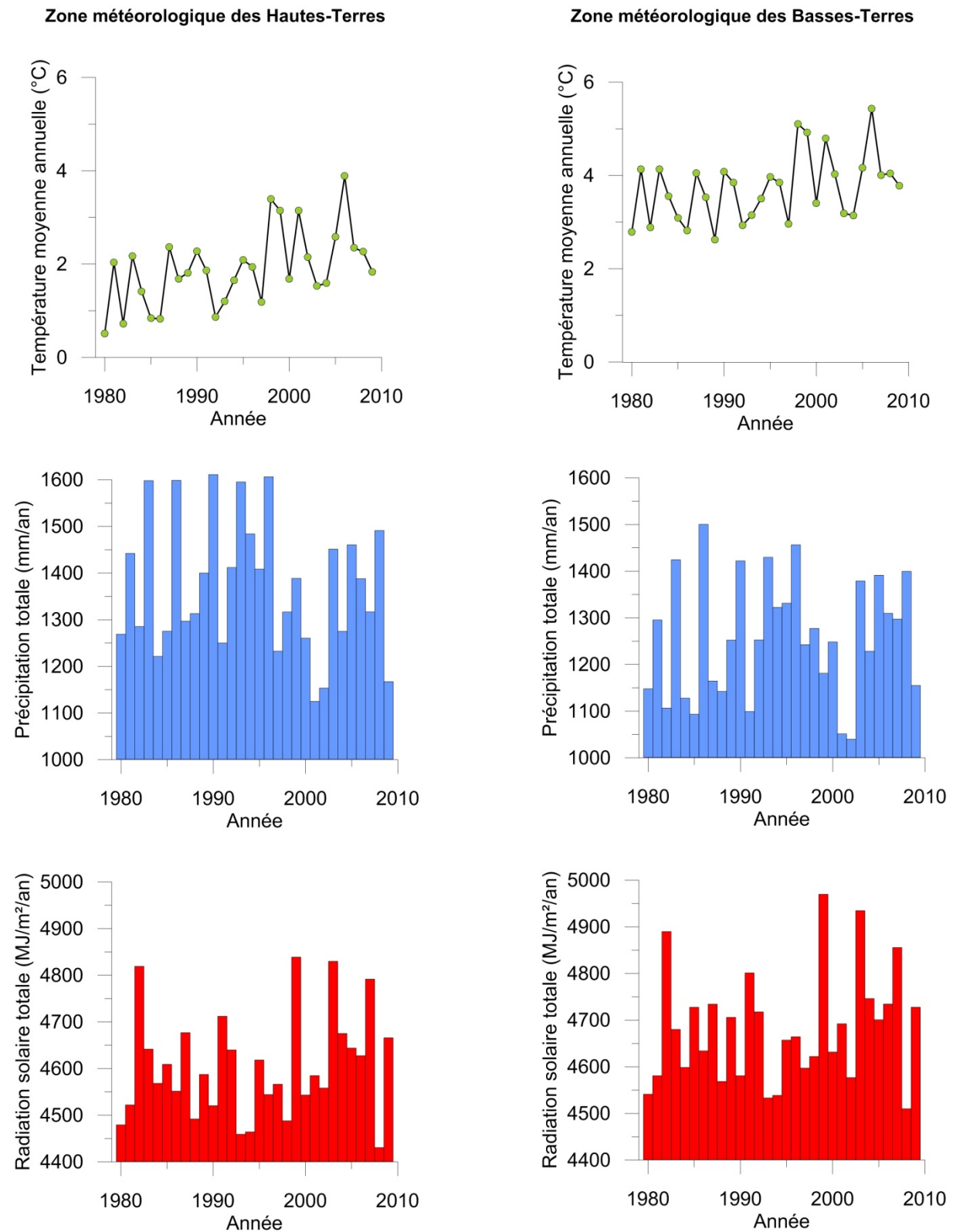


Figure A12 : Variations annuelles des températures, précipitations et radiations solaires utilisées pour la modélisation numérique du bilan hydrologique (années 1980-2009)

Pente du sol

Les pentes du sol ont été générées dans le cadre du projet à partir du modèle numérique de terrain fourni par le MDDEFP (2012) (Figure A13). Lors de modélisation avec le logiciel HELP[®], les pentes sont combinées avec l'occupation du sol et les groupes hydrologiques du sol pour participer indirectement au calcul du ruissellement de surface. De plus, les pentes sont directement intégrées dans le fichier d'intrants et servent à simuler le ruissellement hypodermique.

Groupe hydrologique du sol

Les groupes hydrologiques des sols ont été établis à partir des données cartographiques de la pédologie et d'une classification préliminaire des séries de sols faite par l'IRDA (Tableau A20). La classification des groupes varie de A à D, respectivement pour les sols avec une capacité d'infiltration élevée à très faible. Dans la portion nord du territoire, où la Carte 11 de la Pédologie de l'IRDA a été complétée avec les données du SIEF, l'attribution des groupes hydrologiques s'est faite en se basant sur le Manuel de conception des ponceaux (MTQ, 2004) (Tableau A21). Dans le cas des dépôts organiques et du roc affleurant, les valeurs du groupe hydrologique ont été définies par l'Université Laval en s'inspirant de Croteau (2006). La distribution des groupes hydrologiques du sol est disponible à la Figure A14.

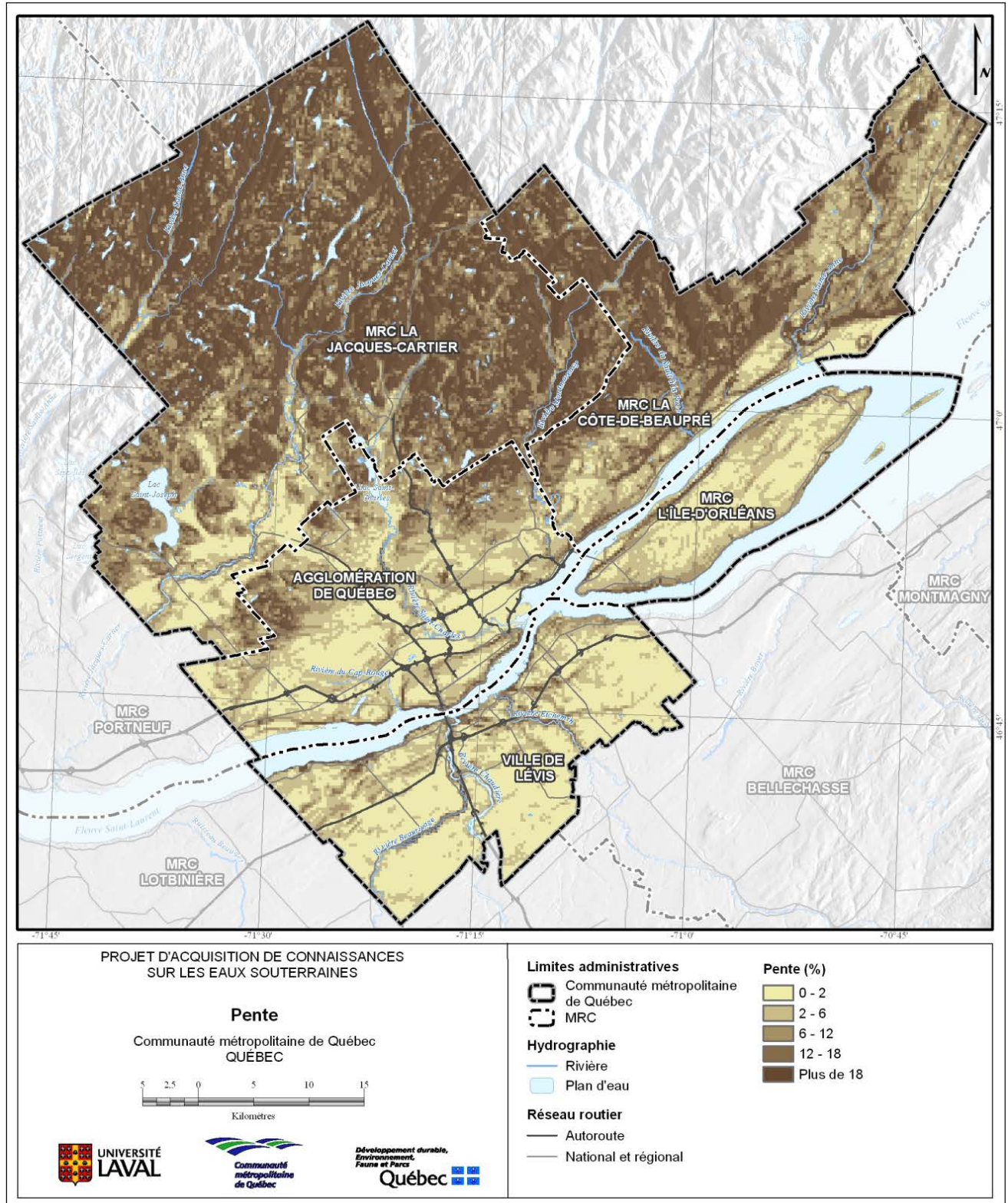


Figure A13 : Distribution spatiale des pentes

Tableau A20 : Groupe hydrologique du sol attribué aux sols de l'IRDA et de la BNDS

Code CanSIS	Nom de la série	Groupe hydrol. du sol	Portion dans la CMQ (%)	Code CanSIS	Nom de la série	Groupe hydrol. du sol	Portion dans la CMQ (%)
Eau	Eau	s.o.	9,13	SAA	SAVANE	B	0,05
ORS	ORLEANS	C	2,54	BPU	BAIE-SAINT-PAUL	C	0,04
SJU	SAINT-JUDE	B	2,23	MIC	MICHE	C	0,04
SDR	SAINT-ANDRE	C	2,08	IRN	IRENEE	C	0,04
MWO	MAWCOOK	B	1,80	SBE	SAINT-BERNARD	A	0,04
SCS	SAINT-NICOLAS	B	1,25	SNU	SAINT-LOUIS	C	0,04
KRK	KAMOURASKA	B	1,13	UPD	UPLANDS	B	0,04
JOY	JOLY	C	1,10	BES	BESSERER	C	0,04
BVG	BEURIVAGE	B	1,04	DTO	DES TOURS	A	0,03
MEM	MARECAGES ET MARAIS,OM	^ A	1,02	GAR	GARDIEN	B	0,03
TNH	TERRES NOIRES,HUMIQUE	^ D	0,85	MDL	MACDONALD	C	0,03
MOI	MORIN	B	0,78	BDF	BEDFORD	C	0,03
TLY	TILLY	C	0,70	GRC	GRANDE COTE	C	0,03
DTU	DES BATTURES	C	0,66	MAS	MARSOLET	B	0,03
TOF	TOURBE	A	0,64	RIC	RICHER	C	0,03
SNG	SAINTE-AGATHE*	B	0,63	DCA	DES CAPS	C	0,03
MTA	MONT-ROLLAND	A	0,60	IGN	IGNACE	B	0,03
ARR	AFFLEUREMENTS ROCHEUX	^ D	0,56	TOU	TOURMENTE	B	0,03
LFL	LAFLEUR	C	0,50	JOA	JOACHIM	B	0,03
DPI	DAUPHINE	C	0,48	BVI	BEVIN	C	0,02
NUV	NEUVILLE	C	0,42	BLI	BLOUIN	B	0,02
BEL	BELLEFINE	B	0,36	ROG	ROUGE	D	0,02
DIY	DELIGNY	C	0,32	SOL	SOREL	A	0,02
SSM	SAINT-SAMUEL	B	0,22	CPR	COMPORTE	C	0,02
CVX	CHARLEVOIX	B	0,21	PLU	PLEUREUSE	C	0,02
PLO	PLATON	D	0,19	SFU	SAINT-FAUSTIN	A	0,02
COP	CHALOUPE	C	0,16	SGD	SAGARD	A	0,02
VUD	VAUDREUIL	C	0,14	LEB	LES EBOULEMENTS	C	0,02
PGV	PONTGRAVE	A	0,13	PGY	PERIGNY	A	0,02
SIT	SAINT-AIME	C	0,13	AHG	ACHIGAN*	C	0,01
LMA	LA MARE	C	0,12	PEL	PELTIER	C	0,01
LPC	LA POCATIERE	B	0,12	PUC	PUCES	C	0,01
LAT	L'ATREE	A	0,11	ZAC	ZACHARIE	C	0,01
CAZ	CAZEAU	B	0,11	ALL	ALLUVIONS RECENTES	^ C	0,01
BUX	BOTREAUX	B	0,10	BBF	BREBEUF	B	0,01
ETI	ETERNITE	A	0,10	BLD	BLONDELLE	B	0,01
AUT	AUTEUIL	C	0,10	CIN	CHAMPLAIN	C	0,01
DQT	DOSQUET	B	0,09	LHU	LACHUTE	B	0,01
SNO	SAINT-ANTOINE	A	0,09	PSI	PERSIL	C	0,01
MHU	MAHEUX	C	0,08	ACH	ACHILLE	C	0,01
HIL	HILARION	C	0,08	MIS	MISERE	C	0,01
SIE	SAINT-LAURENT	C	0,07	RHE	RHEAUME	C	0,01
SNS	SAINT-THOMAS	A	0,07	BEP	BEUPRE	D	0,01
PTG	PONT-ROUGE	B	0,07	SSL	SAINTE-ROSALIE	C	0,01
DUM	DUMAS	B	0,06	BTC	BATISCAN	B	0,01
CAR	CASGRAIN	C	0,06	GGG	GRAVIÈRES	A	0,00
PCI	PLACIDE	C	0,06	CAP	CAP-SANTE	B	0,00
LOM	LOMBRETTE	C	0,05	DCT	DES CRETES	D	0,00
MMB	MATAMBIN	A	0,05	IVR	IVRY	B	0,00
CHU	CHUTE	C	0,05	TRB	TERREBONNE	C	0,00
MON	MONTMORENCY	C	0,05	TOTAL		-	34,72

Note : s.o. = sans objet

^ : Valeur définie par Université Laval

Tableau A21 : Groupe hydrologique du sol attribué aux dépôts contenus dans le SIEF

Code SIEF	Description des dépôts	Groupe hydrologique du sol	Portion dans la CMQ (%)
1A	Dépôt glaciaire : till indifférencié	B	28,08
1AY	Dépôt glaciaire : till indifférencié; épaisseur modale de 50 cm à 1 m. Les affleurements rocheux sont très rares ou rares.	B	14,43
5S	Dépôt marin : marin (faciès d'eau peu profonde)	C	5,11
1AM	Dépôt glaciaire : till indifférencié; épaisseur modale de 25 cm à 50 cm. Les affleurements rocheux sont rares ou peu abondants.	B	4,21
2BE	Dépôt fluvioglaciaire : proglaciaire, épandage	B	3,80
R1A	Dépôt glaciaire : till indifférencié; mince à très mince : épaisseur modale inférieure à 50 cm. Les affleurements rocheux sont abondants.	D	2,51
5A	Dépôt marin : marin (faciès d'eau profonde)	C	2,47
3AN	Dépôt fluviatile ancien	B	1,54
7T	Organique mince	* D	0,86
2A	Dépôt fluvioglaciaire : juxtaglaciaire	A	0,61
7E	Organique épais	* D	0,51
2BD	Dépôt fluvioglaciaire : proglaciaire, delta fluvioglaciaire	B	0,34
2AT	Dépôt fluvioglaciaire : juxtaglaciaire, terrasse de kame	A	0,11
3AE	Dépôt fluviatile récent	B	0,11
1BF	Dépôt glaciaire : moraine frontale	B	0,10
8E	Dépôt de pente et d'altération : éboulis rocheux (talus)	A	0,09
R	Roc	* D	0,09
1BP	Dépôt glaciaire : moraine de décrépitude	A	0,08
6S	Dépôt littoral marin : plage soulevée	B	0,04
2AE	Dépôt fluvioglaciaire : juxtaglaciaire, esker	A	0,04
2AK	Dépôt fluvioglaciaire : juxtaglaciaire, kame	A	0,04
6SY	Dépôt littoral marin : plage soulevée, épaisseur moyenne de 250 à 1000 mm	B	0,04
4GS	Dépôt lacustre : glaciolacustre (faciès d'eau peu profonde)	B	0,03
5AY	Dépôt marin : marin (faciès d'eau profonde), épaisseur moyenne de 250 à 1000 mm	C	0,02
5SY	Dépôt marin : marin (faciès d'eau peu profonde), épaisseur moyenne de 250 à 1000 mm	C	0,01
R5S	Dépôt marin : marin (faciès d'eau peu profonde), mince à très mince : épaisseur modale inférieure à 50 cm. Les affleurements rocheux sont abondants.	C	0,01
1B	Dépôts glaciaires caractérisés par leur morphologie	A	0,01
9S	Dune stabilisée	B	0,00
TOTAL		-	65,28

[*] Valeur définie par l'Université Laval.

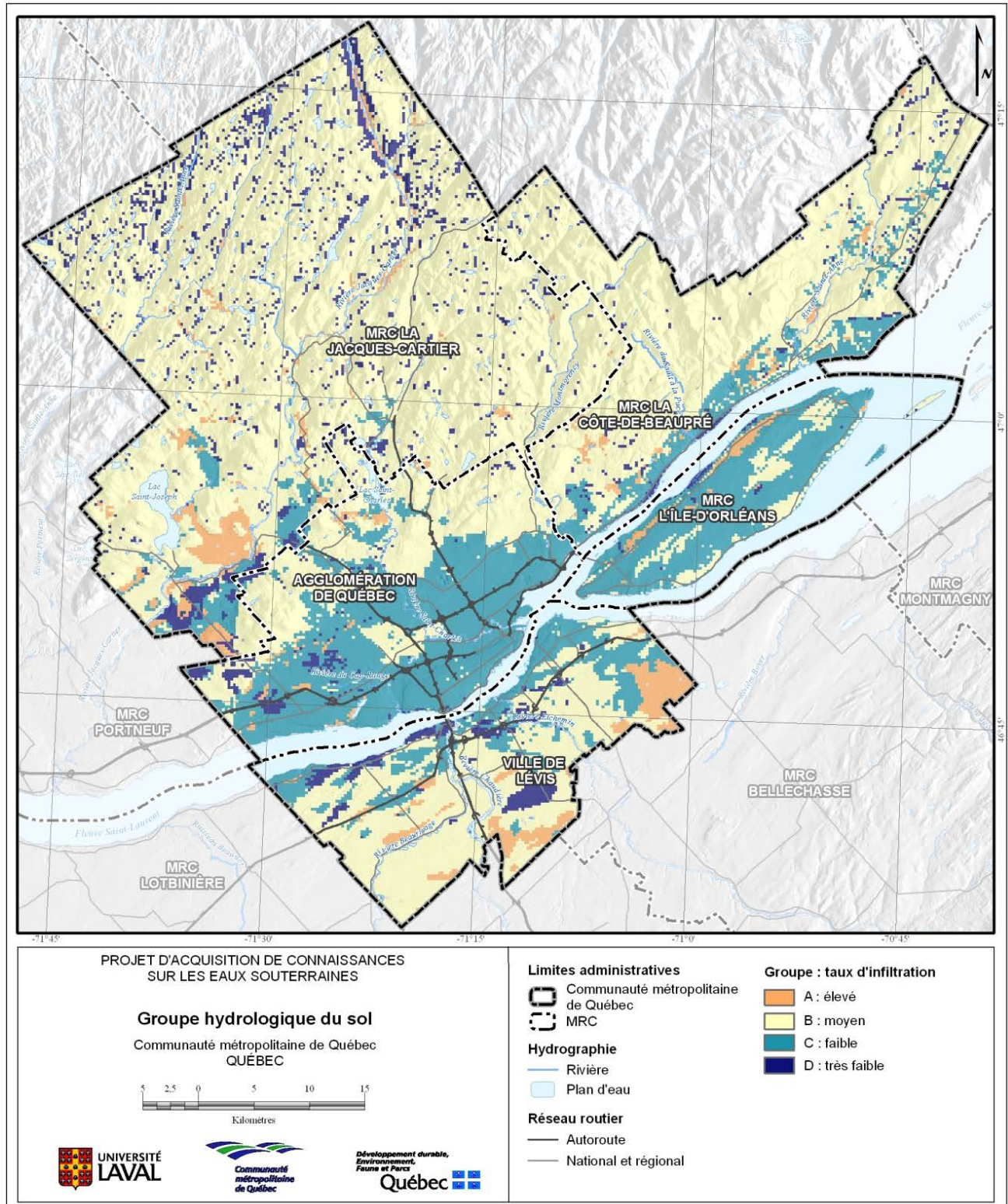


Figure A14 : Distribution spatiale des groupes hydrologiques du sol

Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement sert à évaluer la portion d'eau ruisselée en surface lors des événements pluvieux. Il est déterminé à partir de la méthode développée par le Service de Conservation des Sols (SCS) du département de l'Agriculture des États-Unis (USDA, 1985). Cette approche a été modifiée par Monfet (1979) pour les conditions climatiques et physiques du Québec. Le taux de ruissellement est estimé à partir des caractéristiques physiques des sols, leur occupation ainsi que les conditions d'humidité précédant chaque événement pluvieux (Croteau, 2006). Le Tableau A22 illustre les coefficients de ruissellement correspondant aux conditions rencontrées en mentionnant la source utilisée pour les établir. Ces sources ne considèrent pas les pentes dans l'établissement des coefficients de ruissellement en zones urbaines. Ces coefficients ont donc été attribués par l'Université Laval. La distribution spatiale des coefficients de ruissellement est illustrée à la Figure A15.

Tableau A22 : Coefficients de ruissellement établis en fonction de l'occupation du sol, la pente et le groupe hydrologique du sol

Occupation du sol	Pente (%)	Coefficient de ruissellement				[Source des données] (catégorie correspondante dans le tableau de la source)
		A	B	C	D	
Milieu urbanisé très dense (surface imperméable = 85%)	[0 – 3[	89	92	94	95	[1], [4] (secteurs commerciaux)
	[3 – 8]	92	94	95	96	[*]
	[8 - ∞ [	94	95	96	98	[*]
Milieu urbanisé dense (surface imperméable = 65%)	[0 – 3[	77	85	90	92	[1], [4] (secteurs industriels)
	[3 – 8]	85	90	92	93	[*]
	[8 - ∞ [	90	92	93	95	[*]
Milieu urbanisé moyennement dense (surface imperméable = 52%)	[0 – 3[	69	70	87	90	[1], [4] (résidentiel moy. de D<0.05 et D=0.1 ha)
	[3 – 8]	70	87	90	91	[*]
	[8 - ∞ [	87	90	91	93	[*]
Milieu urbanisé faiblement dense (surface imperméable = 20%)	[0 – 3[	51	68	79	84	[1], [4] (résidentiel : D=0.4 ha)
	[3 – 8]	68	79	84	85	[*]
	[8 - ∞ [	79	84	85	88	[*]
Parc et boisé urbains (surface imperméable = 10%)	[0 – 3[	39	61	74	80	[1], [4] (Espaces ouverts)
	[3 – 8]	61	74	80	82	[*]
	[8 - ∞ [	74	80	82	84	[*]
Milieu agricole	[0 – 3[	62	72	79	82	[2], [5]
	[3 – 8]	64	76	84	88	[2], [5]
	[8 - ∞ [	70	80	87	90	[2], [5]
Couvert forestier	[0 – 3[	24	54	68	76	[2], [5]
	[3 – 8]	33	59	73	79	[2], [5]
	[8 - ∞ [	44	66	78	83	[2], [5]
Friche, régénération, ligne d'énergie et autre	[0 – 3[	32	51	72	79	[2], [5]
	[3 – 8]	44	65	77	82	[2], [5]
	[8 - ∞ [	59	74	83	87	[2], [5]
Hydrographie et Milieux humides	[0 – 3[	5	5	5	5	[3]

[1] MDDEFP (2012) ; [2] Monfet (1979) ; [3] MTQ (2004) ; [4] USDA (1986) ; [5] Croteau (2006) ; [*] Valeur définie par l'Université Laval. ∞ = infinie

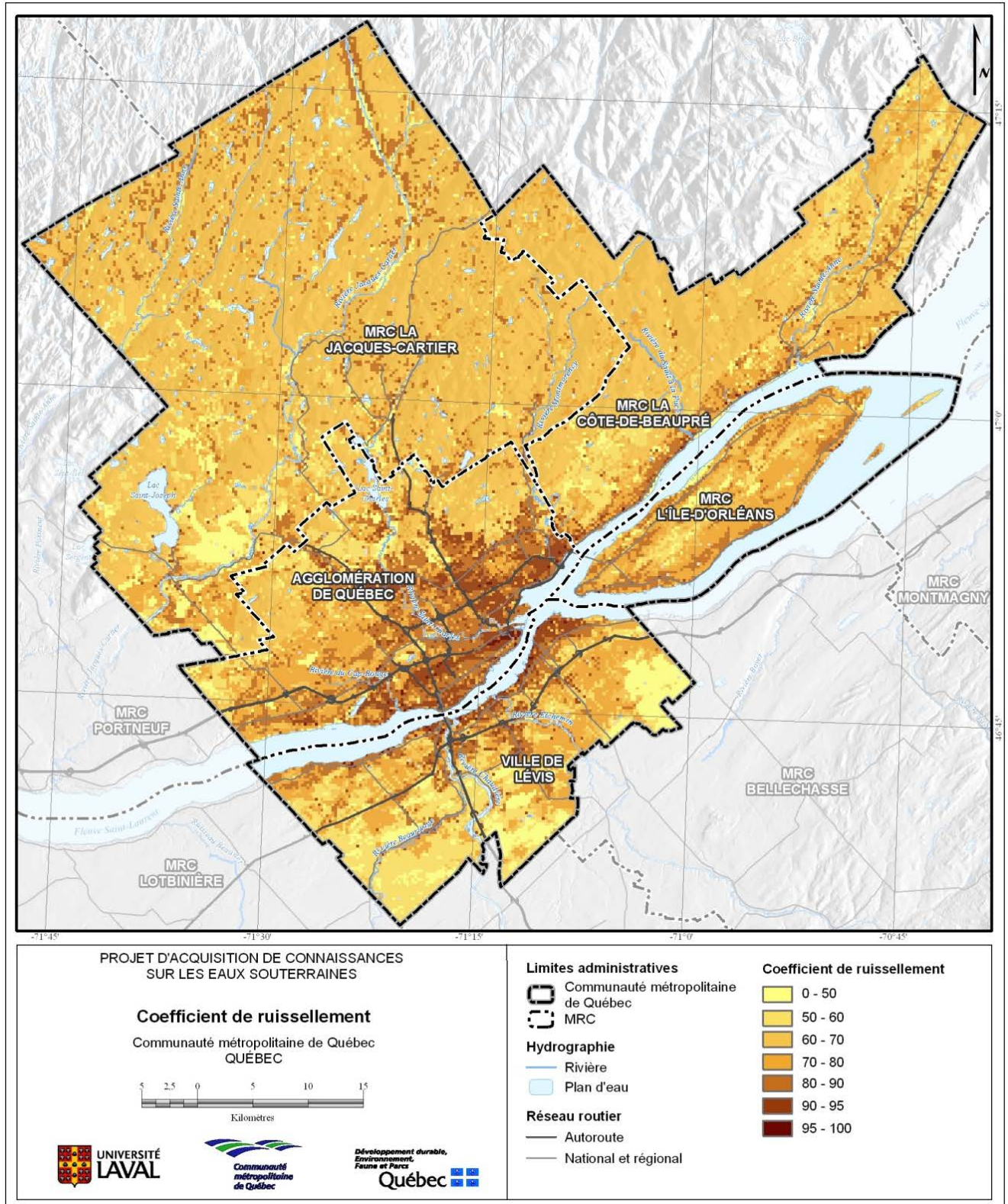


Figure A15 : Distribution spatiale des coefficients de ruissellement

Distance au drainage

La distance au drainage est déterminée à partir de classes simplifiées de l'occupation du sol (Tableau A23). Elle correspond à la distance latérale typique avant que l'eau soit interceptée par un réseau de drainage (fossé, égout pluvial). Elle est prise en compte dans le calcul du ruissellement hypodermique. Les valeurs contenues dans le document de Croteau (2006) et celles déterminées par l'Université Laval, sont illustrées à la Figure A16.

Tableau A23 : Distance latérale au réseau de drainage le plus près établie en fonction de l'occupation du sol

Occupation du sol	Distance latérale au drainage (m)	Source des données
Couvert forestier	20	[1]
Friche, régénération et ligne d'énergie	15	[*]
Autre	15	[*]
Agricole	10	[1]
Parc et boisé urbains	10	[*]
Milieu urbanisé	5	[1]
Hydrographie et Milieux humides	0	[*]

[1] Croteau (2006); [*] valeur définie par l'Université Laval.

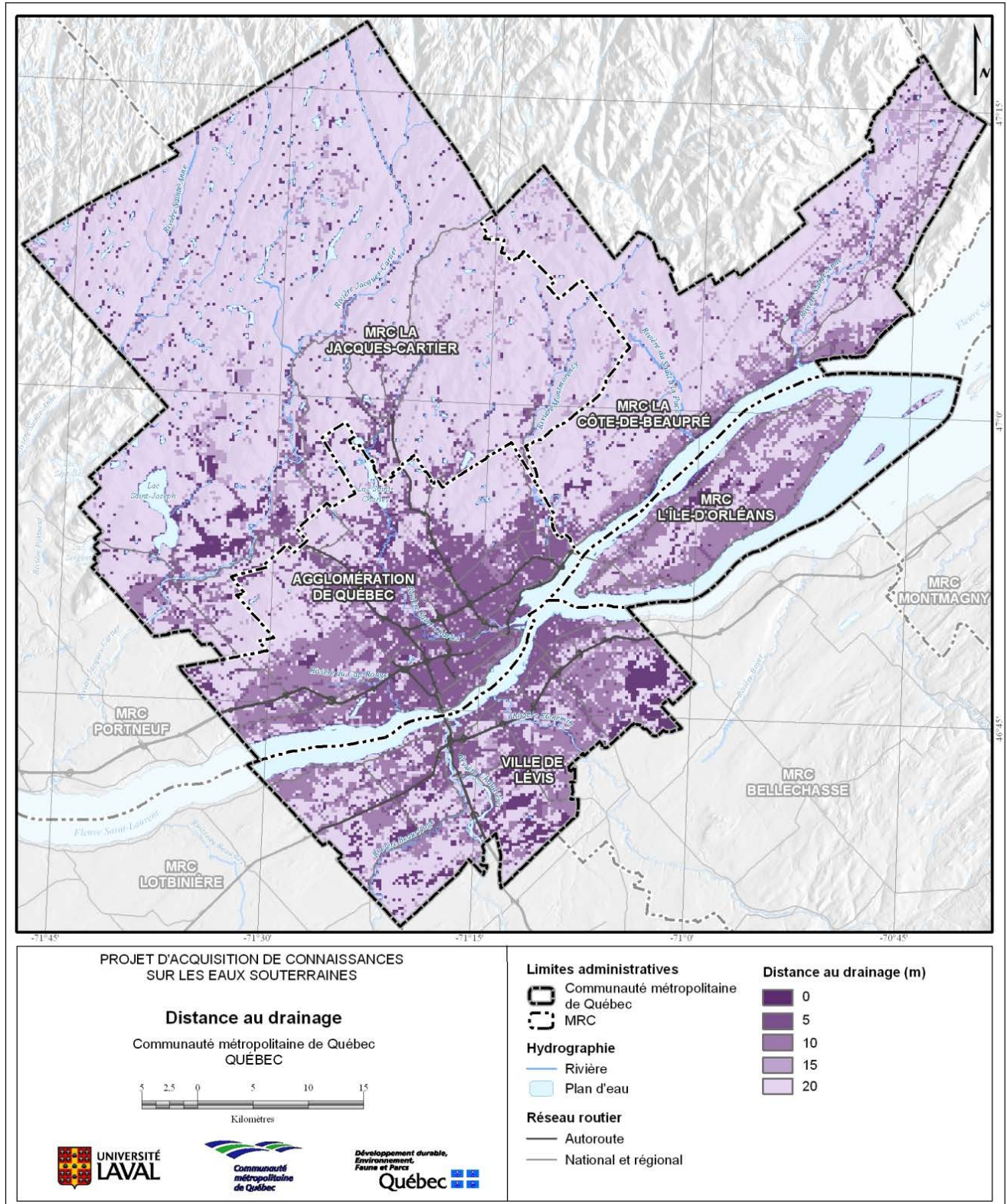


Figure A16 : Distribution spatiale des distances au drainage

Profondeur racinaire maximale et indice de surface foliaire

Une revue de la littérature a servi à établir les profondeurs racinaires maximales et l'indice de surface foliaire selon les différentes catégories de couverture végétale (Carte 8). Les valeurs de profondeur racinaire maximale et de l'indice de surface foliaire sont respectivement indiquées aux Tableau A24 et Tableau A25, leur distribution est illustrée à la Figure A17 et à la Figure A18.

Tableau A24 : Profondeur racinaire maximale pour les différents types de couverture végétale

Type de couverture végétale	Profondeur racinaire maximale (m)	Source des données
Résineux, mature	3,5	[2], [3], [5], [7]
Mélangés, mature	3,4	[2], [3], [5], [7]
Feuillus, mature	3,3	[2], [3], [5], [7]
Résineux, jeune	3,2	[2], [3], [5], [7]
Mélangés, jeune	3,1	[2], [3], [5], [7]
Parc et boisé urbains	3,1	[*]
Feuillus, jeune	3,0	[2], [3], [5], [7]
Milieu humide	2,1	[7]
Arbuste	2,0	[2]
Autres cultures	2,0	[1]
Grandes cultures agricoles	2,0	[1], [2], [6], [7]
Agriculture maraîchère	0,6	[1]
Pas de couvert végétal (incluant le milieu urbain)	0,2	[2]
Friche et sol dénudé	0,2	[2]
Hydrographie	0,08 ^	[*]

[1] Beaudin et coll. (2011) ; [2] Croteau (2006) ; [3] Canadell et coll. (1996) ; [4] CPVQ (1993) ; [5] Finch (1998) ; [6] MAPAQ (2007) ; [7] Neitsch et coll. (2011) ; [*] valeur définie par l'Université Laval.

^: Une valeur minimale est requise pour assurer la stabilité numérique du modèle HELP®.

Tableau A25 : Indice de surface foliaire pour les différents types de couverture végétale

Type de couverture végétale	Indice de surface foliaire	Source des données
Couvert forestier, densité moyenne à forte	5	[1], [3], [4], [5].
Milieu humide	5	[1], [3], [6].
Autres cultures	4	[1], [3]
Culture maraîchère	4	[1], [3]
Grandes cultures agricoles	4	[1], [2]
Couvert forestier, mature, densité faible à moyenne	4	[1], [3], [4], [5].
Couvert forestier, jeune, densité faible à moyenne	3	[1], [3], [4], [5].
Parc et boisé urbains	3	[*]
Arbuste	2	[2], [3], [4].
Friche et sol dénudé	1	[1], [3], [4].
Pas de couvert végétal (incluant le milieu urbain)	1	[3], [4].
Hydrographie	0	[3], [4].

[1] Beaudin et coll. (2011) ; [2] Finch (1998) ; [3] Croteau (2006) ; [4] Schroeder et coll. (1994) ; [5] Bréda (1999) ; [6] Gregory et coll. (2003) ; [*] valeur définie par l'Université Laval.

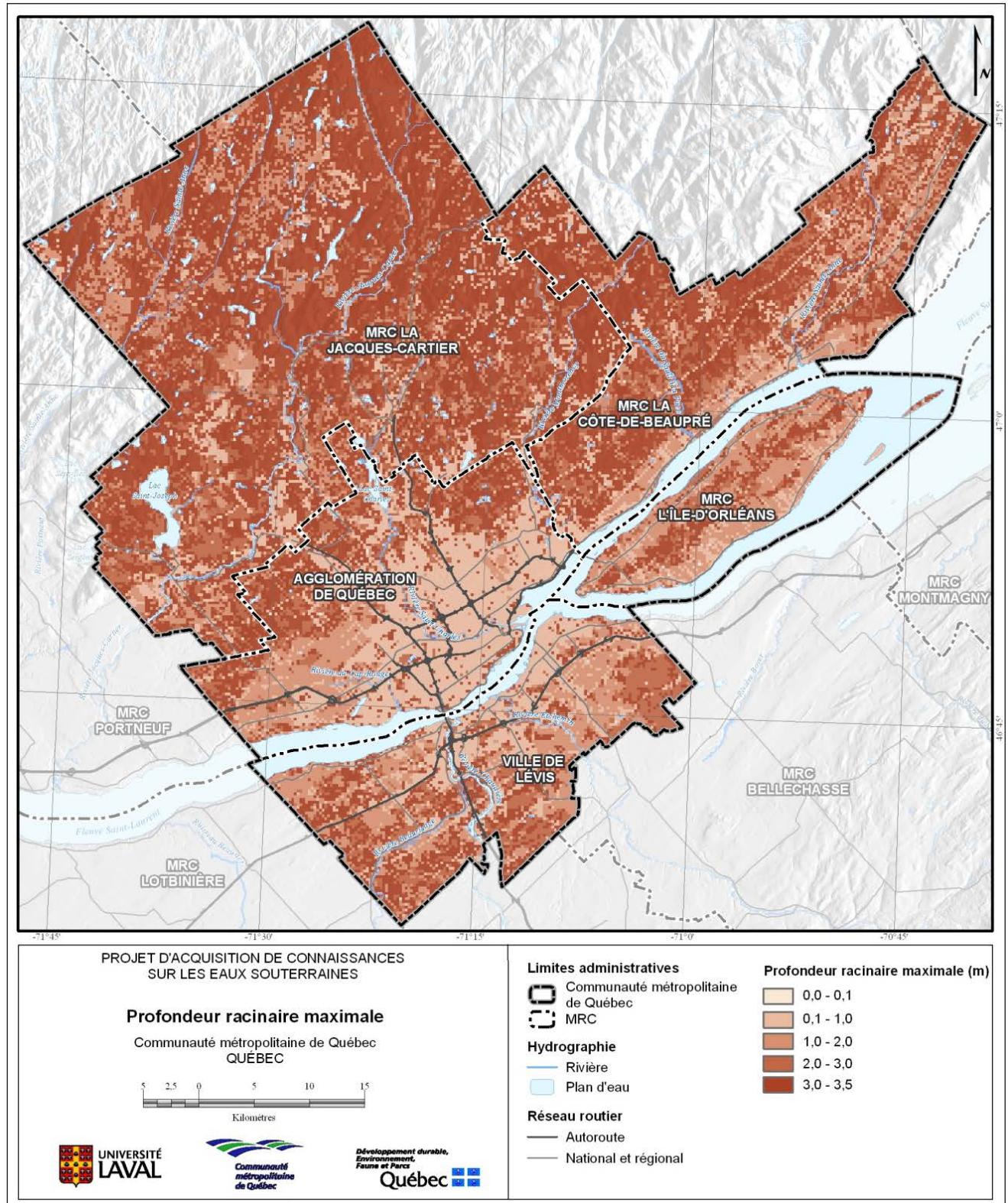


Figure A17 : Distribution spatiale de la profondeur racinaire maximale

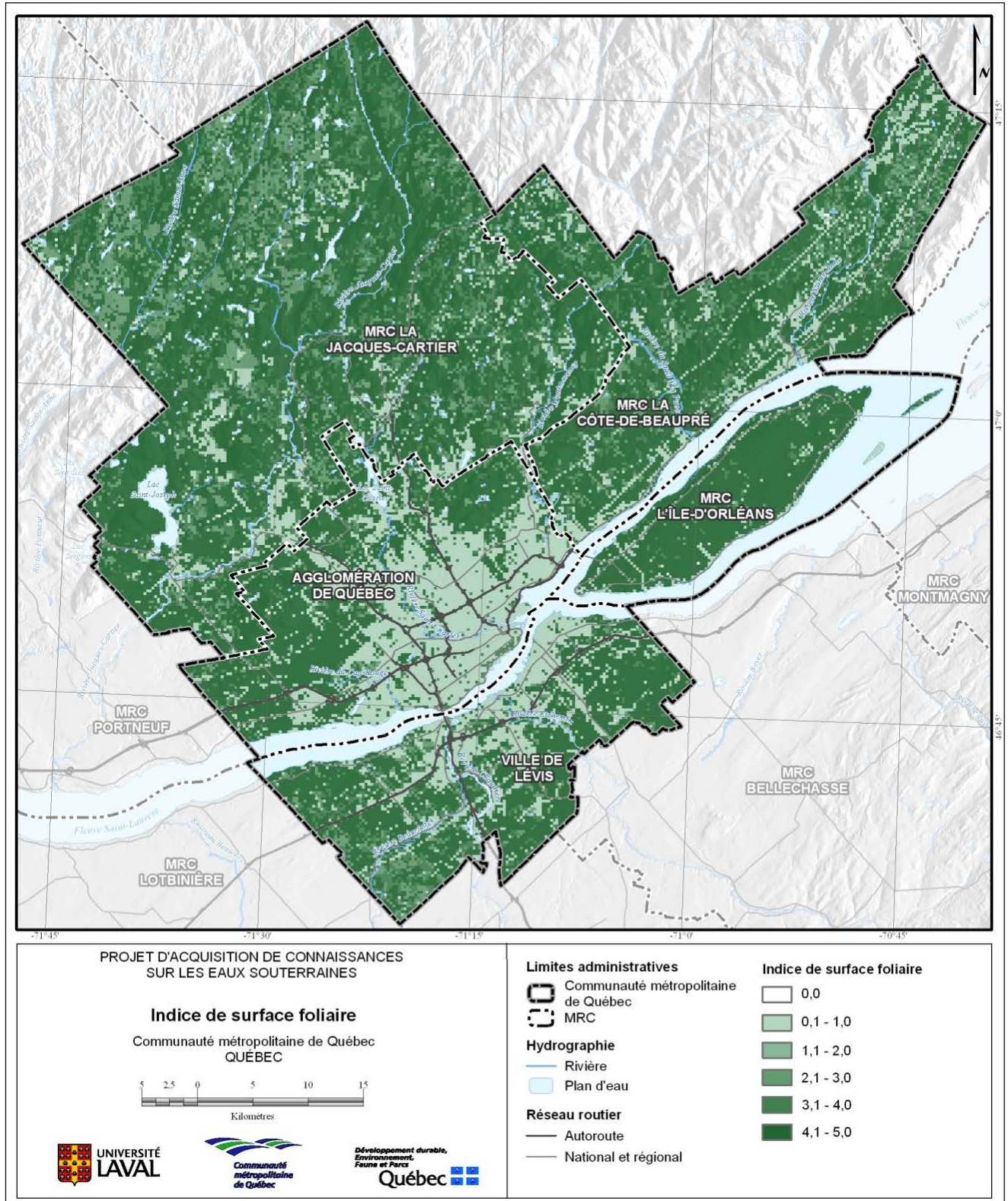


Figure A18 : Distribution spatiale des indices de surface foliaire

Préparation des données sur les sols et la géologie (dépôts meubles et roc)

Le modèle hydrostratigraphique élaboré à la section 4.3 du rapport a servi à la modélisation de la recharge avec HELP[®]. Étant donné que le modèle HELP[®] simule l'infiltration d'eau dans la zone vadose, seules les couches non saturées ont été retenues pour la modélisation. Dans le cas d'un aquifère libre, cette limite correspond à la profondeur du niveau piézométrique. Cependant, dans le cas des aquifères semi confinés et confinés, les couches de la colonne stratigraphique qui sont retenues pour la modélisation sont celles qui se trouvent au-dessus du toit de l'aquifère et non seulement celles au-dessus de la surface piézométrique.

Assignment du type de couche selon la définition du modèle HELP[®]

L'utilisateur d'HELP[®] doit spécifier le type de couche pour chacune d'elle. Les classes possibles sont définies selon les processus d'écoulement possible dans chacune des couches :

- 1 Couche de percolation verticale (drainage vertical par gravité, évaporation, prélèvement d'eau par les végétaux),
- 2 Couche de drainage latéral (écoulement latéral, drainage vertical par gravité), et
- 3 Couche barrière (drainage vertical par gravité).

Les sols de surface ont tous été considérés comme des couches de type 1, à l'exception de la dernière couche à laquelle a été attribué un type 2 lorsqu'elle était perméable.

Les couches de type 2 (drainage latéral) permettent l'évacuation de l'eau par un système de collecte de surface ou sous-surface (par exemple : drain, égouts, fossés). Pour que le drainage latéral ait lieu, elle doit nécessairement être sus-jacente à une couche de type 3 (barrière) et qu'une lame d'eau se développe au-dessus de cette interface. La percolation verticale dans les couches de type 2 est aussi possible et est régie par la même équation que pour les couches de type 1 (Loi de Darcy). Pour qu'un drainage latéral significatif ait lieu, il faut que la couche de type 2 ait une conductivité hydraulique saturée supérieure à 10^{-3} cm/sec.

Les couches de type 3 (barrière) sont destinées à restreindre l'écoulement vertical. Elles doivent avoir une conductivité hydraulique saturée inférieure à 10^{-6} cm/sec. HELP[®] assume que la couche de type 3 est constamment saturée et que la percolation verticale à travers cette couche n'est possible que lorsque le contenu en eau de la couche supérieure devient supérieur à sa capacité au champ.

Tableau A26 : Colonnes stratigraphiques non saturées servant à la modélisation

*Combinaisons des hydrofaciès (HF) non saturés	Type de couches (nomenclature HELP®)^	Superficie dans la CMQ (%)
10 principales combinaisons d'HF (superficie ≥ 1%)	-	93,1
3-7	1-3	46,5
3	3	17,1
2-7	3-3	5,9
2	3	5,5
4	1	5,3
3-1	1-3	4,4
4-6	1-1	3,0
2-1	3-3	2,6
5	1	1,6
1	3	1,1
49 autres combinaisons (superficie ≤ 1%)	-	6,9
2-4-1-2	3-2-3-3	0,9
3-2	1-3	0,5
4-7	2-3	0,5
1-2-7	3-3-3	0,4
4-5	1-1	0,3
4-1	2-3	0,3
1-4-6	3-1-1	0,3
1-2-1	3-3-3	0,3
1-3	3-1	0,3
4-2	2-3	0,3
3-3	1-1	0,3
4-3-1	1-1-3	0,3
1-2	3-3	0,3
5-7	2-3	0,2
1-4	3-2	0,2
1-7	3-3	0,2
3-1-7	1-3-3	0,2
2-1-7	3-3-3	0,1
2-4	3-1	0,1
1-3-1	3-1-3	0,1
1-6	3-1	0,1
4-3	1-1	0,1
4-6-7	2-2-3	0,1
7	3	0,1
4-4	1-1	0,1
3-2-7	1-3-3	0,0
2-1-5	3-3-1	0,0
4-3-7	2-1-3	0,0
1-3-7	3-1-3	0,0
3-3-7	1-1-3	0,0
4-6-5	1-1-1	0,0
2-5	3-1	0,0
1-4-6-7	3-2-2-3	0,0
4-5-7	2-2-3	0,0
1-2-1-7	3-3-3-3	0,0
1-5	3-1	0,0
2-2	3-3	0,0
1-4-1-2	3-2-3-3	0,0
3-6	1-1	0,0
3-4	1-1	0,0
1-4-7	3-2-3	0,0
4-2-5	2-3-1	0,0
3-4-6	1-1-1	0,0
4-4-6	1-1-1	0,0
4-4-7	2-2-3	0,0
4-3-1-7	1-1-3-3	0,0
2-4-1-2-7	3-2-3-3-3	0,0

Note : ^ : 1 = couche de percolation; 2 = couche de drainage latéral; 3 = couche imperméable
* : Excluant les couches pédologiques

Assignation de propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques dont nécessite HELP[®] sont la porosité totale, la capacité au champ, le point de flétrissement et la conductivité hydraulique saturée du matériel. Les valeurs des trois premières propriétés sont inspirées de la revue de la littérature réalisée par Croteau (2006). Toutefois, tel qu'expliqué à la section 4.8.3, un calage des valeurs est souvent nécessaire. Les propriétés hydrauliques calées et utilisées pour la modélisation de la recharge sont présentées au Tableau A27.

Tableau A27 : Paramètres hydrauliques calibrés pour la modélisation du bilan hydrologique

Hydrofaciès		Porosité totale	Capacité au champ	Point de flétrissement	Conductivité hydraulique saturée verticale
Code	Définition	n (m ³ /m ³)	Cc (m ³ /m ³)	Pf (m ³ /m ³)	K _v (m/s)
HF1	Silt, argile silteuse, dépôt organique	0,45	0,40	0,30	2x10 ⁻⁹
HF2	Silt sableux/graveleux	0,399	0,318	0,27	2x10 ⁻⁷
HF3	Sable/gravier silteux	0,47	0,25	0,10	1x10 ⁻⁶
HF4	Sable	0,42	0,17	0,05	9x10 ⁻⁵
HF5	Sable et gravier	0,44	0,19	0,12	5x10 ⁻⁴
HF6	Hétérogène	0,42	0,17	0,05	9x10 ⁻⁵
HF7	Roc fracturé	0,05	0,04	0,035	5x10 ⁻⁷

RÉSULTATS

HELP[®] a servi à modéliser les différentes composantes du bilan hydrologique. Différentes cartes montrent la distribution spatiale de ces composantes, soit l'évapotranspiration (Figure A19), le ruissellement de surface (Figure A20), le ruissellement hypodermique (Figure A21) et finalement la recharge (Figure A22).

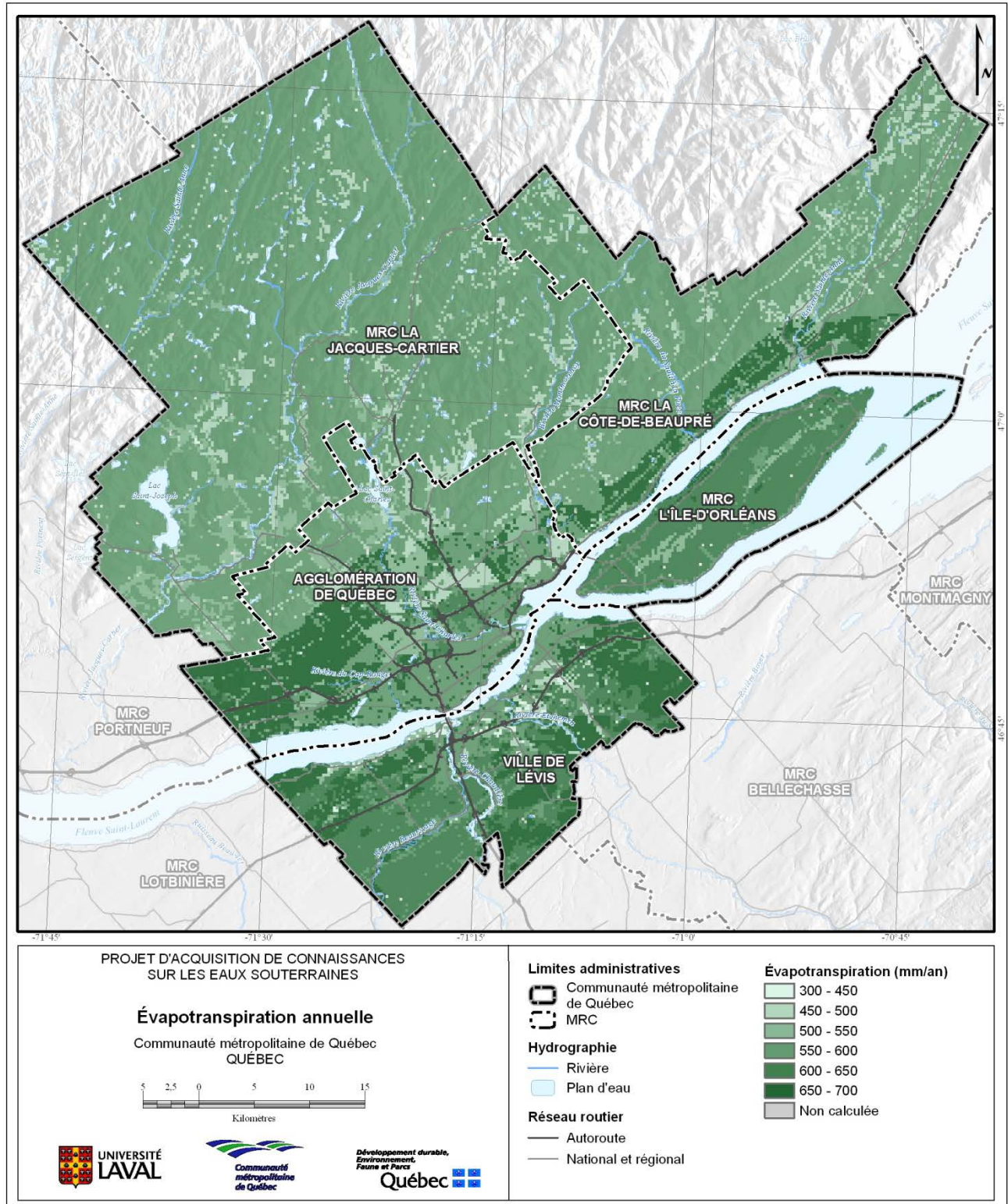


Figure A19 : Distribution spatiale de l'évapotranspiration

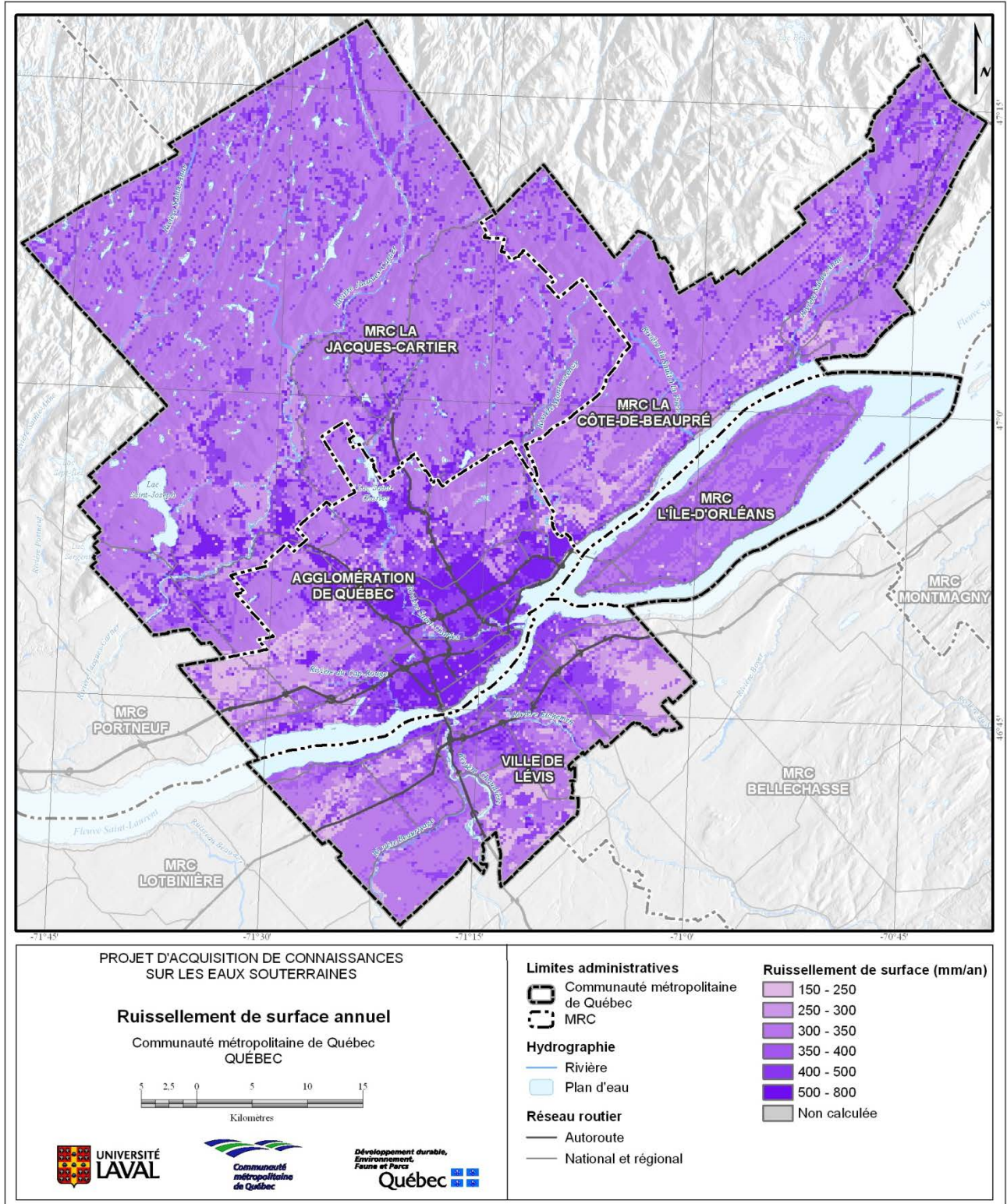


Figure A20 : Distribution spatiale du ruissellement de surface

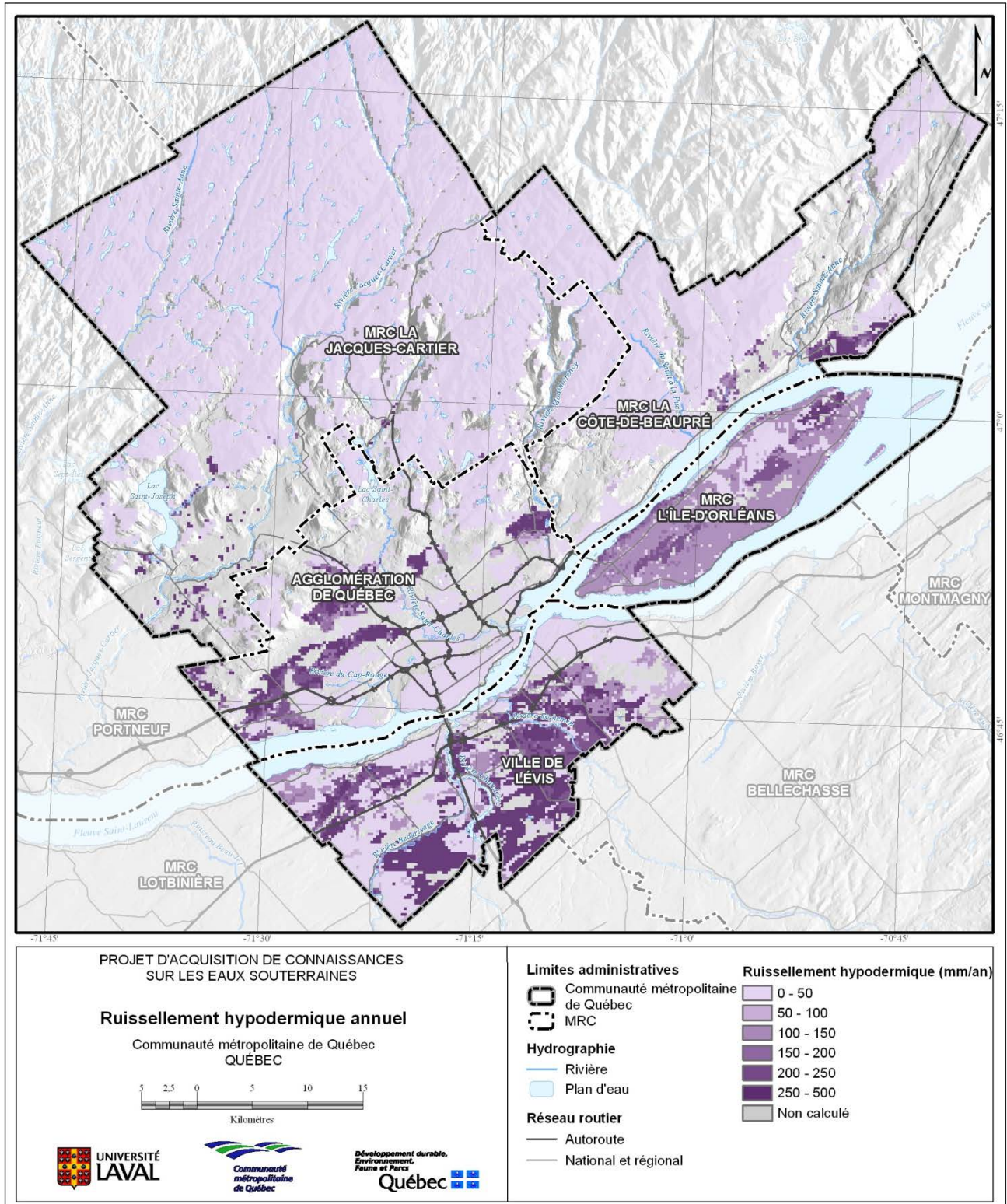


Figure A21 : Distribution spatiale du ruissellement hypodermique

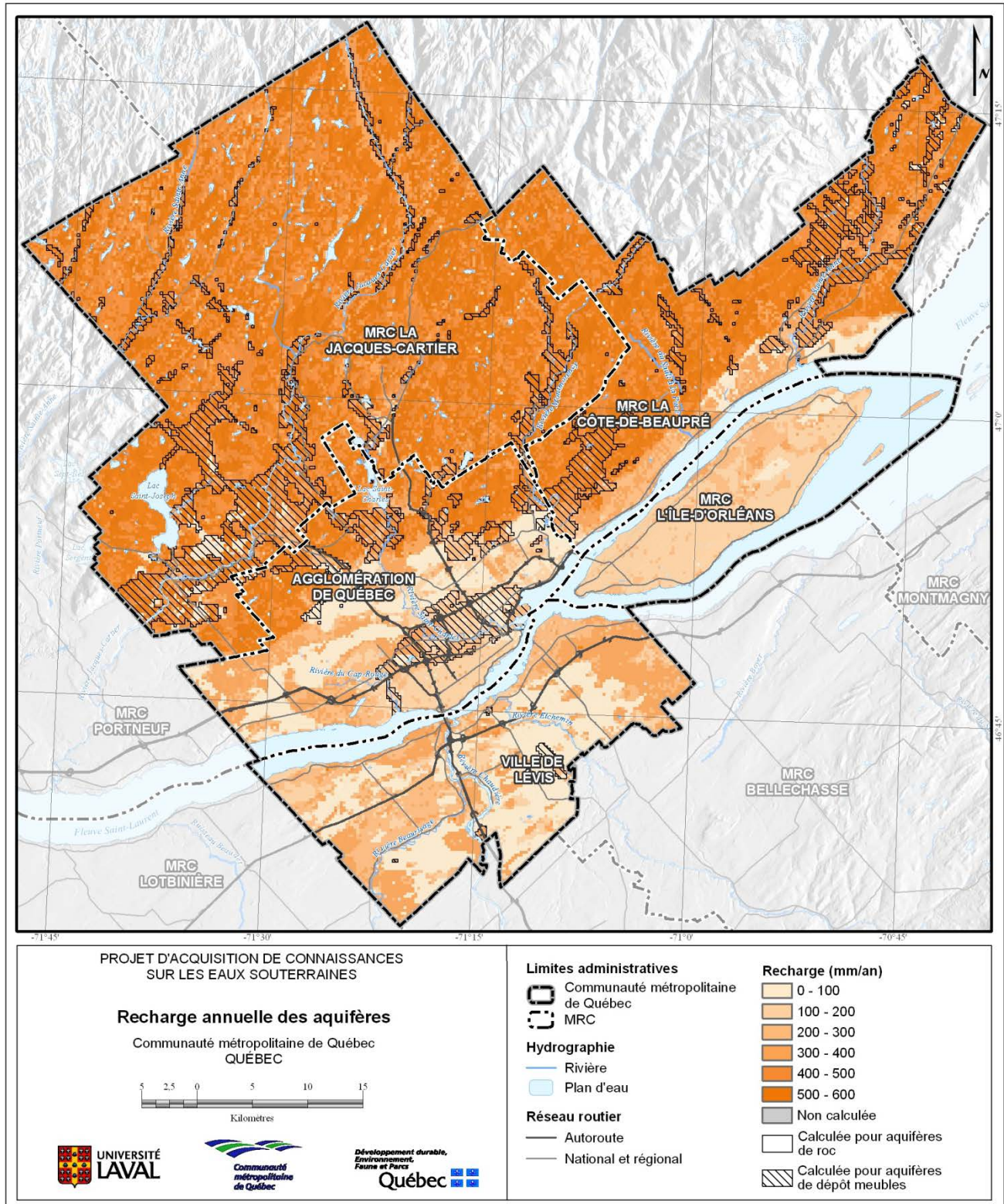


Figure A22 : Distribution spatiale de la recharge de l'aquifère superficiel

Annexe 9 : Cotes et distribution spatiale des paramètres DRASTIC

Tableau A28 : Cotes attribuées à chacun des paramètres DRASTIC

Cote	Profondeur de l'aquifère (m)	Recharge (mm/a)	Milieu aquifère	Type de sol	Pente (%)	Impact de la zone vadose	Conductivité hydraulique de l'aquifère (m/s)
	D	R	A	S	T	I	C
1	>30,5	0-50		Argile intacte	>18	Aquifère confiné (Carte 18a et 18b)	Roc fracturé (5×10^{-7})
2	22,8-30,5		Shale d'Utica (shale massif)	Matériau organique		Hydrofaciès 1	Hydrofaciès 4 ou 6 (9×10^{-5})
3	15,2-22,8	50-102		Loam argileux	12-18	Hydrofaciès 2 Shale d'Utica	Proportion égale Hydrofaciès 5 avec 4 ou 6 (9×10^{-5} à 1×10^{-4})
4			Roches fracturées de la Province de Grenville (ignées et métamorphiques)	Loam silteux		Hydrofaciès 3 Roches fracturées de la Province de Grenville (ignées et métamorphiques)	Hydrofaciès 5 (1×10^{-4})
5	9,1-15,2			Loam	6-12		
6		102-178	Roches de la Province des Appalaches (séquence de grès, calcaire et shale) Roches de la Plate-forme du Saint-Laurent (séquence de shale, grès, ardoise, dolomie) *sauf Shale d'Utica	Loam sableux		Roches de la Province des Appalaches et de la Plate-forme du Saint-Laurent (séquence de grès, calcaire et shale) *sauf Shale d'Utica	
7	4,6-9,1		Hydrofaciès 4 (sable) Hydrofaciès 6 (hétérogène : sable et silt) Proportion égale Hydrofaciès 4 et 6	Argile fissurée ou agglomérée		Hydrofaciès 4 (sable) Hydrofaciès 6 (hétérogène : sable et silt)	
8		178-254	Proportion égale Hydrofaciès 5 avec 4 ou 6	Matériau organique (tourbe)		Hydrofaciès 5 (sable et gravier)	
9	1,5-4,6		Hydrofaciès 5 (sable et gravier)	Sable	2-6		
10	0-1,5	>254		Gravier, couche mince ou absente	0-2		
Poids	5	4	3	2	1	5	3

Source : modifié de Rivard et coll. (2012) disponible à l'Annexe E8.

Profondeur de l'aquifère ($D = \text{groundwater depth}$)

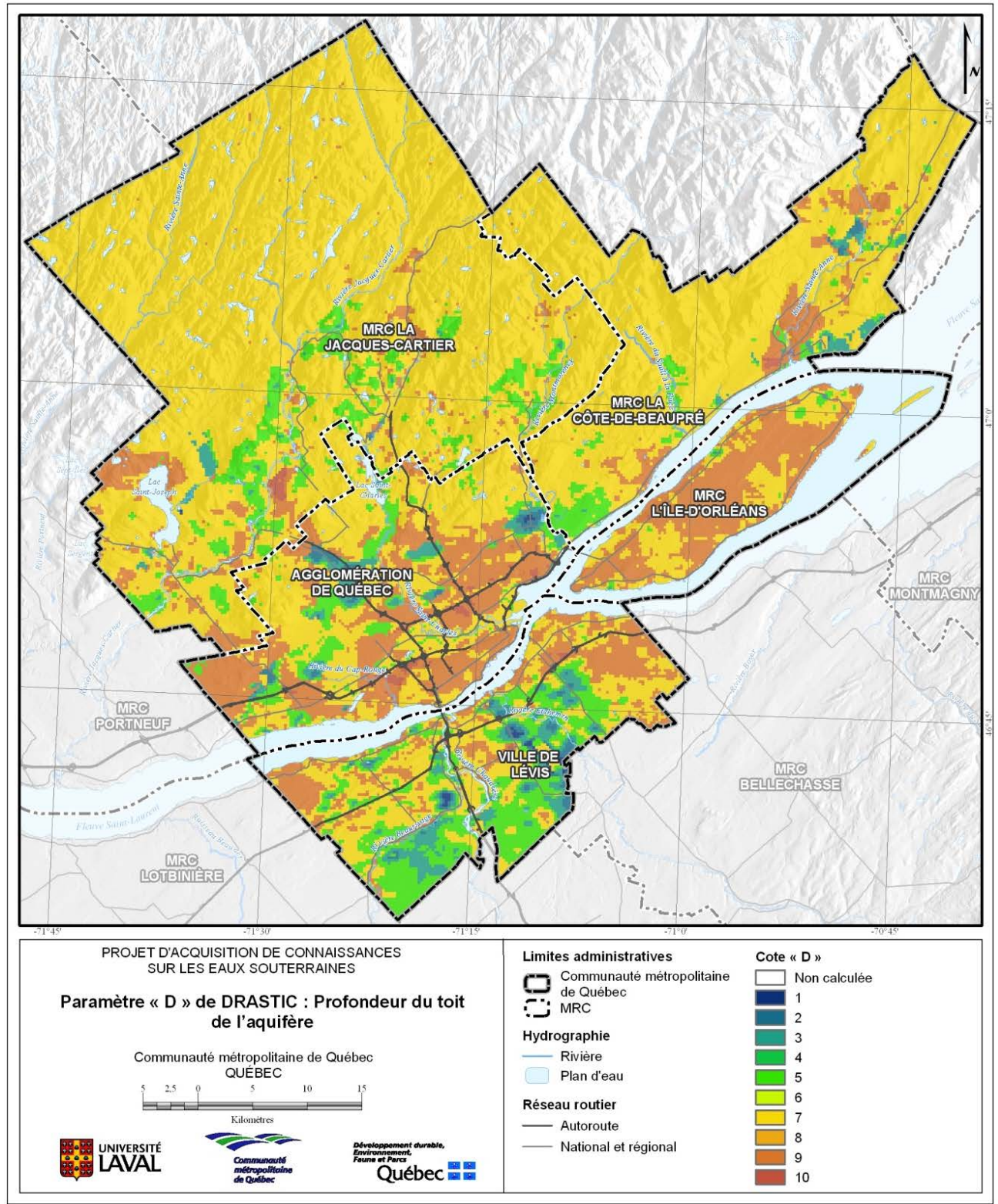


Figure A23 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « D » associé à la profondeur de l'aquifère

Recharge de l'aquifère ($R = \text{net recharge}$)

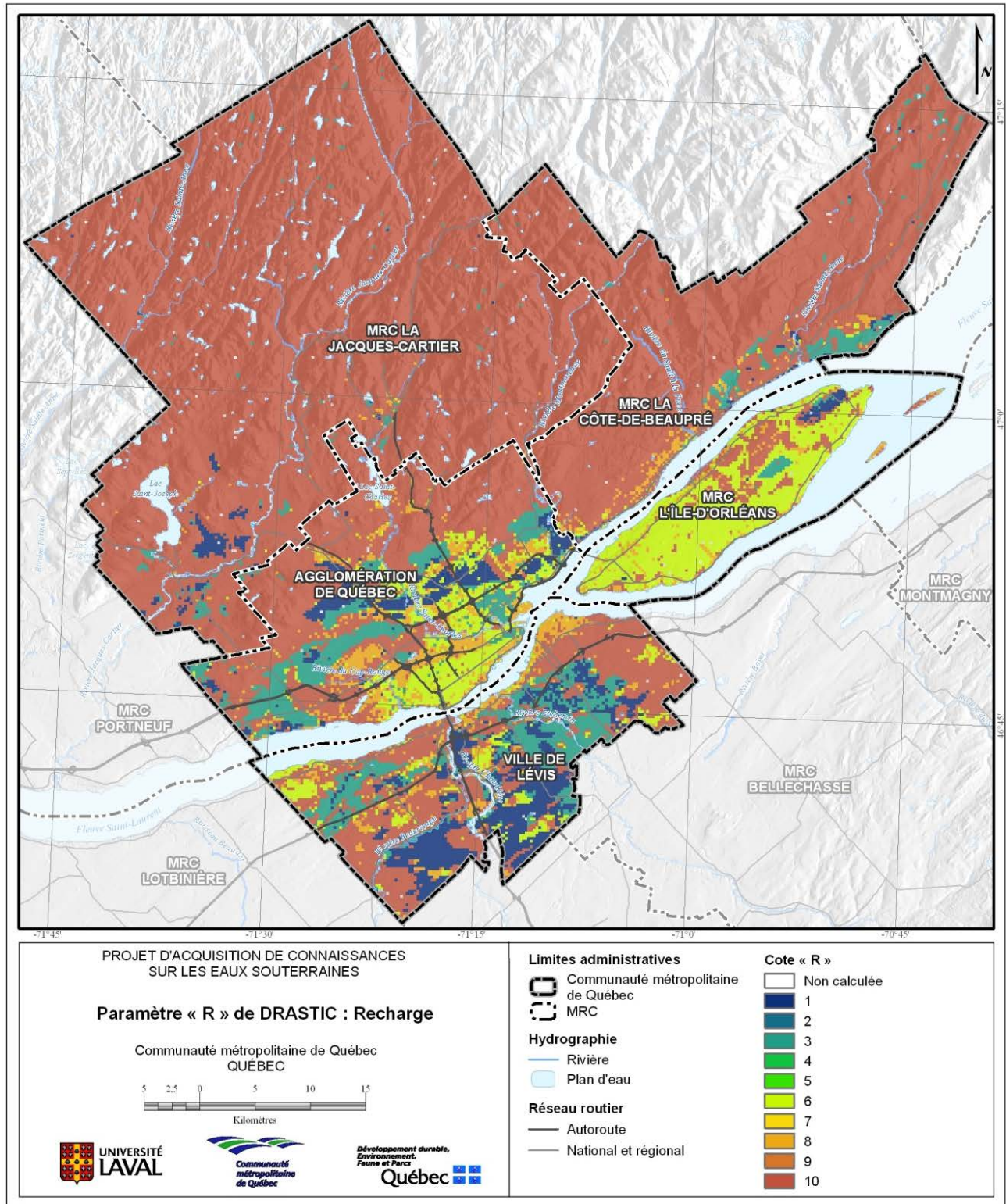


Figure A24 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « R » associé à la recharge de l'aquifère

Milieu aquifère (*A = aquifer media*)

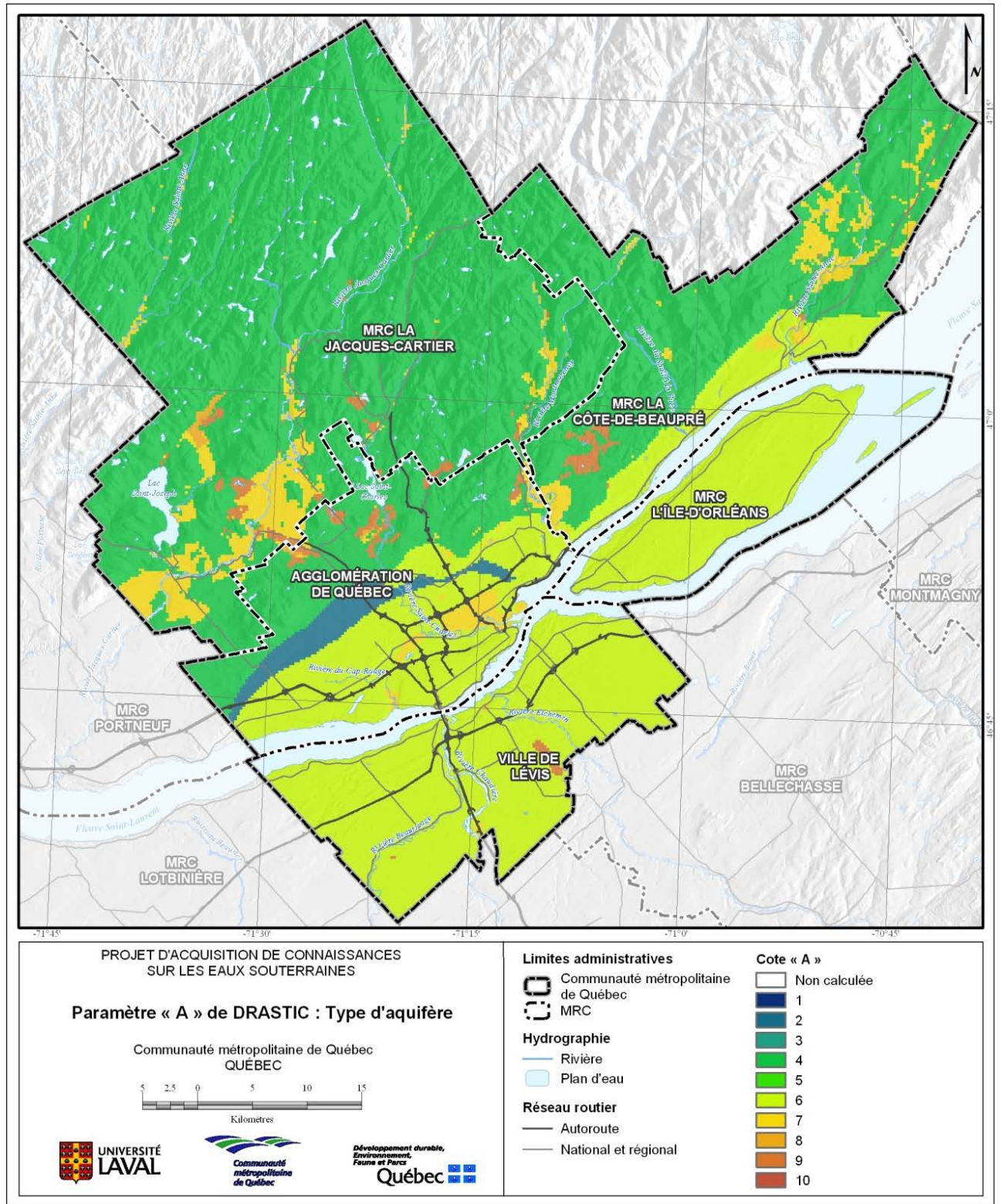


Figure A25 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « A » associé au milieu aquifère

Type de sol (S = soil media)

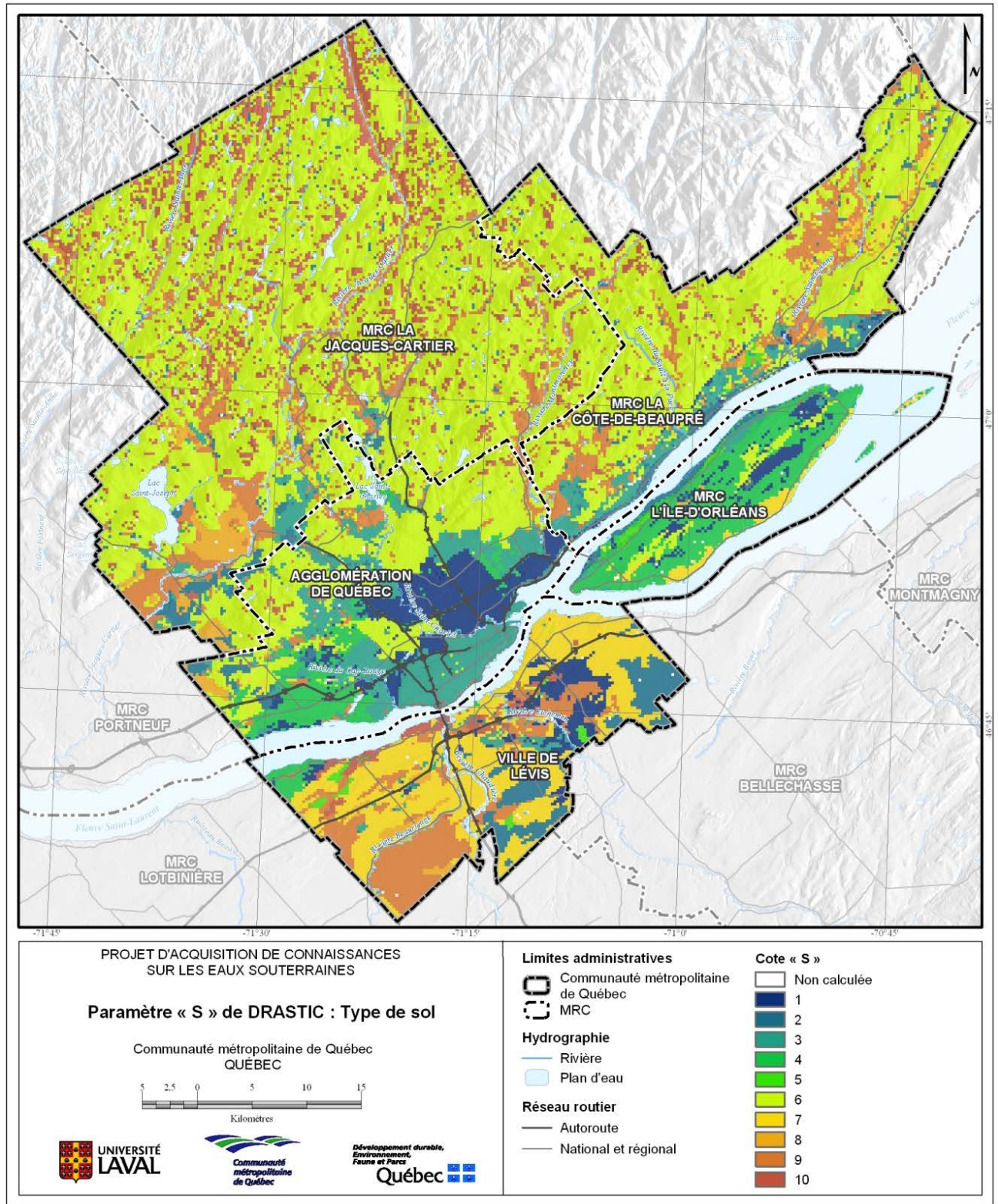


Figure A26 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « S » associé au type de sol

Pente ($T = \text{topography}$)

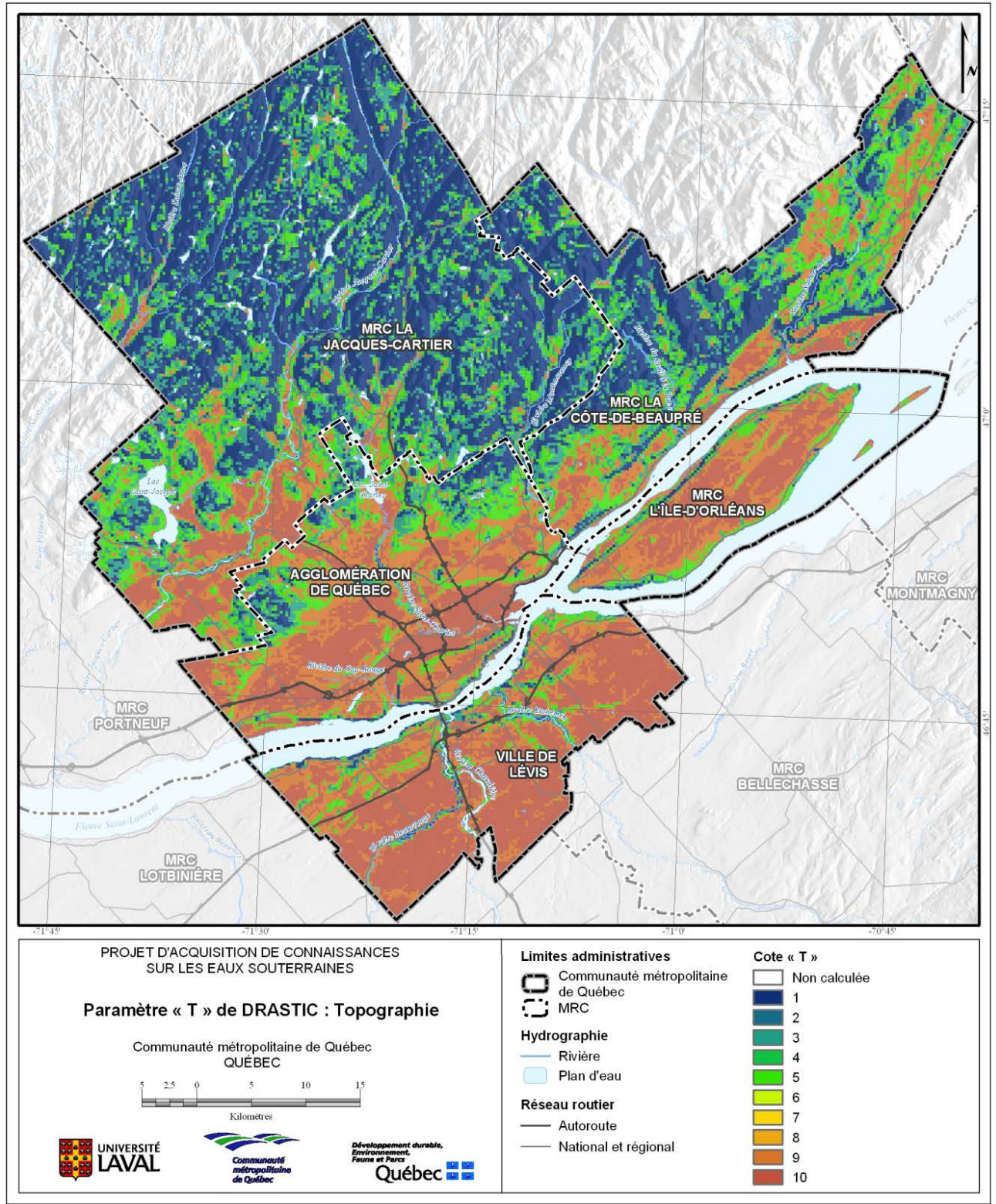


Figure A27 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « T » associé à la pente

Impact de la zone vadose (*I* = *Impact of vadose zone*)

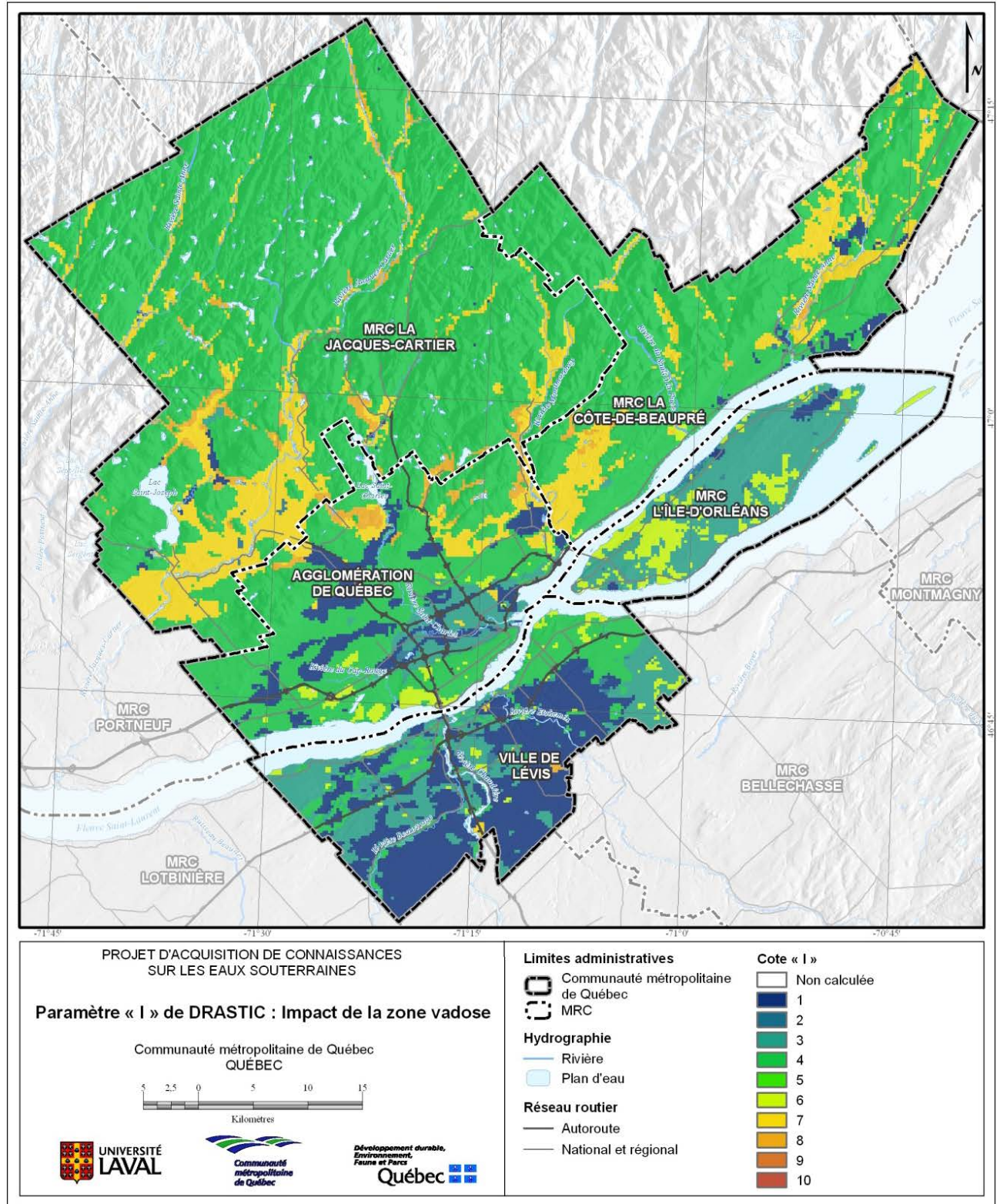


Figure A28 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « I » associé à l'impact de la zone vadose

Conductivité hydraulique de l'aquifère ($C = \text{aquifer hydraulic conductivity}$)

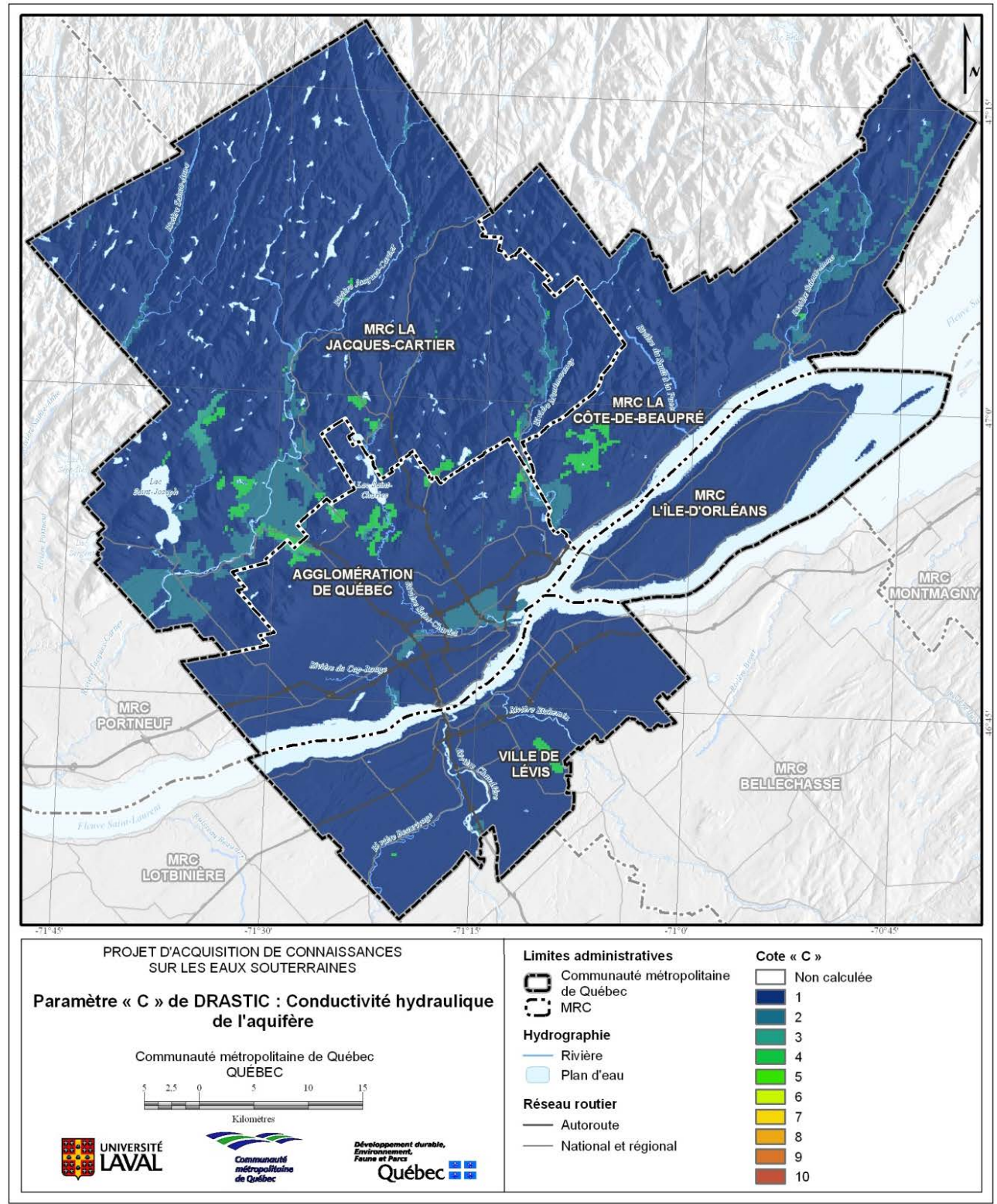


Figure A29 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « C » associé à la conductivité hydraulique de l'aquifère

Annexe 10 : Méthodologie pour le calcul des volumes d'eau souterraine prélevés à des fins d'approvisionnement résidentiel, industriel, commercial et institutionnel

Objectif

Le présent protocole propose une méthodologie appliquée au territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) pour l'évaluation de l'utilisation de l'eau souterraine à des fins d'approvisionnement résidentiel, industriel, commercial et institutionnel. La méthodologie proposée ne comprend pas la consommation d'eau issue des activités agricoles. Elle a été approfondie par la CMQ pour l'Université Laval dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec (PACES). Ce livrable a pour objectif d'indiquer, à titre informatif, la consommation estimée d'eau souterraine par municipalité pour l'ensemble du territoire de la CMQ.

Mise en contexte et problématique

Afin de combler leurs besoins en eau à des fins de potabilité, les municipalités du territoire de la CMQ s'approvisionnent en eau souterraine (aquifère) et en eau de surface (fleuve, rivières et lacs). Afin de déterminer les volumes d'eau consommés, il est important de différencier les prélèvements en eaux de surface de ceux en eaux souterraines. Une fois cette distinction établie, il est possible de réaliser des bilans sur la consommation de l'eau en fonction des utilisations. Considérant le sujet de l'étude et la possibilité de distinguer les sources d'approvisionnement, aucun calcul ne sera effectué afin d'évaluer la consommation des eaux de surface. Le présent protocole s'attarde donc à la consommation des eaux souterraines par type d'utilisation.

Sources et traitement de données

Cette section présente le détail des sources de données utilisées de même que le traitement réalisé pour déterminer les volumes d'eau prélevés pour les utilisations suivantes : résidentielle et industrielle, commerciale, institutionnelle (ICI). L'information a été compilée en format abrégé par municipalité.

Méthode de calcul des volumes d'eau prélevés pour les utilisations résidentielles et industrielles, commerciales, institutionnelles

a) Les puits collectifs municipaux alimentant un réseau d'aqueduc

Un inventaire des données fourni directement par le MDDEFP pour les analyses PACES permet de localiser les puits collectifs municipaux qui alimentent des réseaux d'aqueduc. Les volumes d'eau souterraine prélevés annuellement ont été transmis pour la plupart directement par les municipalités du territoire. Les données manquantes ont été complétées en consultant les formulaires de Déclaration des prélèvements en eau de 75 m³/jour et plus du MDDEFP. Les volumes pour les ICI n'ont pas été indiqués pour chacune des municipalités. Les données des formulaires de Déclaration des prélèvements en eau du MDDEFP sont confidentielles et leur divulgation à l'échelle d'une municipalité peut être nominative si un seul ICI s'y trouve. Cet inventaire de Déclaration de prélèvement n'est pas exhaustif.

b) Les puits collectifs communautaires alimentant des ICI

L'inventaire des données nous est fourni par les formulaires de Déclaration des prélèvements en eau de 75 m³/jour et plus du MDDEFP. Cette base de données permet de déterminer les petits réseaux isolés qui alimentent plus de 20 personnes ou consomment plus de 75 m³/jour. Elle indique le nombre de personnes susceptibles d'être alimentées. Ainsi les volumes d'eau souterraine peuvent être calculés sur une base annuelle à partir des consommations journalières moyennes par personne établies selon leurs utilisations. Ces valeurs sont déterminées selon les critères de conception du MDDEFP (2006) relatifs aux types d'établissement. Ces données confidentielles sont additionnées aux autres utilisations et représentées par municipalité.

c) Les puits privés individuels des propriétés non desservies par un réseau d'aqueduc

La CMQ a sollicité pour chaque municipalité de son territoire la liste des matricules résidentiels. Ces informations ont été recueillies sur une base volontaire et renseignent sur les propriétés étant desservies par un puits privé individuel. Une fois ces matricules localisés sur le territoire, ils ont été jumelés aux différents rôles d'évaluation pour obtenir le nombre de logements ou de ménages alimentés par puits. Pour calculer un volume, le nombre de personnes alimentées par les puits de ces propriétés doit être estimé. Pour ce faire, la sommation des logements pour chaque aire de diffusion de recensement est réalisée. Le nombre moyen de personnes par ménage de chaque aire de diffusion de recensement étant connu (Statistique Canada, 2011), cette valeur est multipliée au nombre de logements par aire de diffusion, ce qui donne une estimation du nombre de personnes alimentées par des puits. Ce nombre se verra impartir un volume moyen journalier par personne de 250 L/ jour/personne (MDDEP, 2006).

Les résidents des municipalités ne disposant pas de réseaux d'aqueduc sont généralement alimentés par des puits privés individuels. Une consommation d'eau souterraine de 250 L/j est imputée à chaque habitant.

Pour les municipalités qui n'ont pas souhaité transmettre de données, mais qui disposent d'un réseau d'aqueduc, une estimation des volumes d'eau souterraine prélevés a aussi été faite en multipliant le nombre d'habitants par la consommation moyenne par personne (250 L/jour). Lorsqu'un volume d'eau souterraine prélevé pour l'aqueduc municipal est disponible dans les Déclarations de prélèvement, il est utilisé pour le bilan et les volumes prélevés par les puits individuels sont calculés en imputant une consommation de 250 L/jour/habitant pour les habitants non desservis par le réseau. Le nombre de personnes desservies par les réseaux municipaux est aussi disponible sur le site internet du MDDEFP (2013).

Format de la carte

Cette carte thématique inclut les résultats de volume d'eau souterraine prélevé par municipalité ou ville.

Cette carte présente les éléments suivants :

- Les limites municipales,
- Le réseau hydrographique, et
- Les volumes d'eau souterraine prélevés par municipalité sous forme de cercle dont la surface est proportionnelle au volume.

Sources de données

Puits privés individuels :

Ville de Québec (2012)
Ville de Lévis (2012)
Ville de Beaupré (2012)
Ville de Sainte-Anne-de-Beaupré (2012)
Ville de Fossambault-sur-le-Lac (2012)
Ville de Sainte-Brigitte-de-Laval (2012)
Ville de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (2012)
Cantons unis de Stoneham-et-Tewkesbury (2012)
MRC La Côte-de-Beaupré (2012)
MRC La Jacques-Cartier (puits de Lac-Delage) (2011)
MRC L'Île-d'Orléans (2011)

Puits municipaux :

Ville de Québec (2009)
Ville de Sainte-Anne-de-Beaupré (2012)
Ville de Sainte-Brigitte-de-Laval (2013)
Ville de Lac-Delage (2012)
Ville de Lévis (2012)
Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2010)
MDDEFP (2013b). Répertoire de tous les réseaux municipaux de distribution d'eau potable.
<http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/potable/distribution/index.asp>

Puits collectifs ICI

Déclaration des prélèvements en eau, ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2010 à 2012)

Nombre de logements

Ville de Fossambault-sur-le-Lac (2012)
Ville de Sainte-Brigitte-de-Laval (2012)
Ville de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (2012)
Cantons unis de Stoneham-et-Tewkesbury (2012)
Rôle d'évaluation de la MRC de La Jacques-Cartier

Rôle d'évaluation de la Ville de Québec (2012)

Rôle d'évaluation de la MRC de L'Île-d'Orléans (2011)

Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (2011)

Consommation journalière d'eau souterraine par personne

MDDEP (2006), Guide de conception des installations de production d'eau potable (Guide de conception), section 5.2.1

<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/documents/volume1.pdf>

Aire de diffusion et nombre moyen de personnes par ménage

Statistique Canada, recensement 2011.

Annexe E1 : Coupes interprétatives des investigations hydrogéophysiques

Annexe E2 : Rapports de forage et de sondage

Annexe E3 : Protocole de numérisation et d'archivage

Annexe E4 : Protocole de fiabilité et de validation des données de forage

Annexe E5 : Protocole pour la préparation du Livrable 15 – Estimation de l'épaisseur des formations superficielles et Livrable 16 – Topographie du roc

Annexe E6 : Protocole pour la préparation du Livrable 19 et 20 – Piézométrie dans les formations superficielles et dans le roc

Annexe E7 : Protocole pour la préparation du Livrable 24 – Qualité de l'eau (critères eau potable) et Livrable 25 – Qualité de l'eau (objectifs esthétiques)

Annexe E8 : Protocole pour la préparation du Livrable 22 – Vulnérabilité de l'aquifère de roc régional

Annexe E9 : Protocole pour la préparation du Livrable 23 – Indice de densité d'activités anthropiques