

Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Outaouais (PACES-OUT)

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 juillet 2013

Mise en garde

Les résultats du projet PACES-OUT ont été produits à une échelle cartographique régionale afin d'établir le portrait hydrogéologique global de la région de l'Outaouais. En tout temps, dans le cas de problématiques locales, par exemple à l'échelle d'une propriété ou d'une aire d'alimentation d'un puits, des études plus détaillées seront nécessaires. L'Université Laval ne se porte pas garante des divergences entre les résultats de cette étude régionale et ceux provenant d'investigations détaillées à des échelles locales.

Figures de couverture

Les photographies d'échantillonnage d'eau souterraine (à gauche) et de la foreuse (au centre) représentent 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 de droite indique la vulnérabilité des aquifères de l'Outaouais selon l'indice DRASTIC. Cette cartographie 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. Cette évaluation constitue en quelque sorte une synthèse des nombreuses analyses hydrogéologiques réalisées dans le cadre du projet, car elle nécessite l'intégration de plusieurs paramètres étudiés.

La photographie du bas prise dans la MRC Papineau illustre les deux occupations du sol les plus fréquentes en Outaouais, soit l'agriculture en avant plan (10 % du territoire) et le milieu forestier en arrière-plan (72 % du territoire).

Note au lecteur

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

ÉQUIPE DE RÉDACTION ET DE CARTOGRAPHIE

Université Laval

Guillaume Comeau, ing., M.Sc., professionnel de recherche
Marie-Catherine Talbot Poulin, ing. jr, M.Sc., professionnelle de recherche
Yohann Tremblay, M.Sc., professionnel de recherche
John Molson, ing., Ph.D., professeur, coordonnateur
Jean-Michel Lemieux, ing., Ph.D., professeur, coordonnateur
René Therrien, ing., Ph.D., professeur
Richard Fortier, ing., Ph.D., professeur
Pierre Therrien, M.Sc., responsable de travaux pratiques et de recherche
Nelly Montcoudiol, étudiante au doctorat
Gabriel Fabien-Ouellet, étudiant à la maîtrise

L'Agence de traitement de l'information numérique en Outaouais (L'ATINO)

Stéphanie Ayotte, M.Sc., coordonnatrice
Jonathan Martin, B.Sc., chargé de projets en géomatique
Élodie Roy, M.Sc., biologiste
Said Akif, MBA, chargé de projets en géomatique

Pour citer ce rapport :

Comeau, G., Talbot Poulin, M.C., Tremblay, Y., Ayotte, S., Molson, J., Lemieux, J.M., Montcoudiol, N., Therrien, R., Fortier, R., Therrien, P., Fabien-Ouellet, G. (2013). *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Outaouais, Rapport final*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, juillet 2013, 148 pages, 24 annexes, 25 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/>



L'agence de traitement de
l'information numérique
de l'Outaouais

**L'Agence de traitement de l'information
numérique en Outaouais (L'ATINO)**

394, boulevard Maloney Ouest, bureau 101
Gatineau (Québec) J8P 7Z5 CANADA
T : 819-770-8222
www.latino.qc.ca

PARTENAIRES

Municipalités régionales de comtés (MRC) et ville :

MRC des Collines-de-l'Outaouais

MRC de La Vallée-de-la-Gatineau

MRC Pontiac

MRC Papineau

Ville de Gatineau



Organismes de bassin(s) versant(s) (OBV) :

Agence de bassins versants des 7 (ABV des 7)

Comité du bassin versant de la rivière du Lièvre (COBALI)

Organisme de bassins versants des rivières Rouge, Petite Nation et Saumon (OBV-RPNS)



Ministères :

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP)

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ)

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



Autres organismes :

Conseil régional de l'environnement et du développement durable de l'Outaouais (CREDDO)

Conférence régionale des élus de l'Outaouais (CRÉ-O)



RÉSUMÉ

Le Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Outaouais (PACES-OUT) dresse le portrait régional de la ressource en eau souterraine sur le territoire municipalisé de la région administrative de l'Outaouais et permet ainsi de pallier le manque d'information sur cette ressource. Jusqu'au dépôt de ce rapport, l'information existante sur la ressource en eau souterraine en Outaouais était incomplète et non uniforme selon les secteurs et il n'existait pas de synthèse régionale des connaissances sur les eaux souterraines. Le présent rapport scientifique 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, un inventaire des données acquises dans le cadre du projet, une présentation des contextes géologiques et hydrogéologiques ainsi qu'un portrait de la ressource en eau.

Le territoire municipalisé de l'Outaouais repose sur deux provinces géologiques, le Grenville et la Plate-forme du Saint-Laurent, 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.

Les collines des hautes terres couvrent la majorité du territoire de l'Outaouais et se trouvent dans la région physiographique du Bouclier canadien. Des dépôts de tills, composés de sable et gravier silteux y sont généralement minces et ont des perméabilités moyennement élevées. Les petites vallées situées entre les collines sont comblées, par endroit, de dépôts de sables et gravier d'origine fluvioglaciaire ou alluvionnaire qui peuvent former des aquifères de dépôts meubles non confinés de petite envergure. L'aquifère de roc fracturé de la Province de Grenville est non confiné et caractérisé par des perméabilités généralement faibles mais très variables qui dépendent de l'ouverture, de l'espacement et de la connectivité des fractures. L'écoulement de l'eau souterraine est gravitaire et sous l'influence des variations topographiques. L'écoulement se fait, à l'échelle locale, des sommets vers le fond des vallées et, régionalement, du nord au sud vers la rivière des Outaouais. Les taux de recharge de l'aquifère de roc sont élevés. La géochimie de l'eau souterraine de ce secteur est généralement très peu évoluée et donc, peu chargée en ions majeurs. Dans les collines des hautes terres, la vulnérabilité est intermédiaire dans les secteurs recouverts de till et très élevée dans les vallées comblées de sédiments fluvioglaciaires. Les collines des hautes terres sont des secteurs avec une faible densité de population où l'on retrouve généralement peu d'activités industrielles potentiellement polluantes pour les eaux souterraines. La population s'approvisionne principalement en eau souterraine dans des puits individuels dans l'aquifère de roc fracturé.

Les grandes vallées des hautes terres qui se trouvent également dans la région physiographique du Bouclier canadien se situent plus bas en altitude, sous la limite d'incursion marine de la Mer de Champlain. L'épaisseur des dépôts meubles dans les vallées des rivières Gatineau, Petite Nation et du Lièvre peut atteindre plus de 70 mètres et comprend principalement des dépôts fluvioglaciaires de sable et gravier et des dépôts marins argileux ou sableux. Les dépôts fluvioglaciaires forment localement des aquifères de perméabilité élevée en lien hydraulique avec l'aquifère régional de roc grenvillien fracturé dont la perméabilité est plus faible. Dans ces grandes vallées, ces aquifères sont confinés ou semi confinés par endroit. Toutefois, les couches d'argile ou de silt d'origine marine sont discontinues et difficiles à définir en profondeur lorsque des sables d'origine marine deltaïque, alluvionnaire ou éolienne sont présents en surface. Ces sables de surface constituent, par endroit, des aquifères non confinés de dépôts meubles de petite envergure. L'eau souterraine s'écoule régionalement vers la rivière des Outaouais et localement des collines vers le fond des vallées bien que la complexité de la stratigraphie puisse entraîner, localement, des directions d'écoulement moins prévisibles. La recharge et la vulnérabilité des aquifères dans ces grandes vallées sont variables allant de faibles, en présence de dépôts marins argileux à très élevées lorsque des dépôts fluvioglaciaires affleurants favorisent l'infiltration des précipitations dans le sol jusqu'à l'aquifère. Les eaux souterraines échantillonnées dans ce secteur sont généralement faiblement minéralisées et récemment infiltrées bien que des types d'eau intermédiaire soient présents par endroit. Tout comme dans les collines des hautes terres, la population des grandes vallées s'approvisionne majoritairement en eau souterraine dans des puits individuels dans l'aquifère de roc fracturé. La population et les activités potentiellement polluantes y sont plus concentrées que dans les collines des hautes terres bien que ce secteur soit rural.

La vallée de l'Outaouais correspond à l'ensemble physiographique des Basses-terres du Saint-Laurent. L'épaisseur totale des dépôts peut atteindre plus de 100 mètres et comporte généralement une importante couche d'argile d'origine marine, très peu perméable et relativement continue. Des complexes de dépôts de sable et gravier fluvioglaciaires très perméables sont présents par endroit, particulièrement à la limite des deux ensembles physiographiques. Le confinement de ces aquifères de dépôts meubles varie selon les secteurs. Ils sont en lien hydraulique avec les aquifères de roc fracturé de la Plate-forme du Saint-Laurent ou de la Province de Grenville qui sont confinés sur la majorité du territoire de la vallée de l'Outaouais. Bien que le confinement des aquifères soit plus continu dans ce secteur que dans les grandes vallées des hautes terres, la continuité demeure incertaine lorsque des dépôts sableux marins deltaïques, des alluvions ou des dépôts éoliens sont présents en surface. L'eau souterraine s'écoule vers la rivière des Outaouais où elle fait résurgence. La recharge et la vulnérabilité des aquifères sont limitées par la nature argileuse des dépôts. Elles sont toutefois plus élevées lorsque l'aquifère de roc fracturé ou de dépôts fluvioglaciaires est subaffleurant. La signature géochimique de l'eau souterraine a une forte minéralisation qui témoigne du confinement des aquifères. La population de la vallée de l'Outaouais se concentre dans la Ville de Gatineau et s'approvisionne majoritairement en eau de surface par des réseaux d'aqueduc. Les activités potentiellement polluantes et la population y sont plus denses que dans les autres secteurs.

Des dépassements des critères de potabilité pour l'uranium (5% des échantillons) et le fluorure (7 %) ainsi que des objectifs esthétiques pour le fer (13 %) et le manganèse (20 %) ont été mesurés dans l'eau souterraine de certains puits de la région répartis sur tout le territoire. La présence de ces éléments serait liée à la composition minéralogique naturelle de la roche. Des dépassements des objectifs esthétiques en chlorure, sodium, matière dissoute totale et pH sont également fréquents dans la vallée de l'Outaouais, principalement dans les aquifères de roc confiné.

L'établissement du portrait régional des eaux souterraines sur le territoire municipalisé de l'Outaouais mène 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 que la définition des contextes géologiques et hydrogéologiques sont des étapes nécessaires à la mise en place de pratique d'exploitation durable de la ressource en eau souterraine sur le territoire municipalisé de l'Outaouais.

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 (MRC), la Conférence régionale des élus de l'Outaouais (CRÉ-O) et le Conseil régional de l'environnement et du développement durable de l'Outaouais (CREDDO) qui ont reconnu la nécessité d'améliorer les connaissances sur les eaux souterraines de leur territoire. Ils ont appuyé le projet d'un point de vue financier et logistique, notamment par leur travail auprès des municipalités, ce qui a facilité la collecte des rapports existants et la réalisation des travaux de terrain. Nous remercions également les employés municipaux qui ont coopéré au projet.

La contribution de L'ATINO au projet a été considérable, autant pour la recherche que pour la représentation cartographique des thèmes portant sur le territoire. L'ATINO a été spécialement impliquée dans les analyses sur la pédologie, l'occupation du sol, les activités potentiellement polluantes et l'utilisation de l'eau. Nous voulons également mentionner la participation et les échanges avec la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ), partenaire du projet de l'Université Laval pour la région du même nom, qui ont servi à l'amélioration des résultats et analyses cartographiques. Les professionnels de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) ont généreusement mis leur expertise à contribution permettant de bonifier les analyses pédologiques.

Nous voulons souligner la participation des citoyens de la région de l'Outaouais, qui nous ont accordé l'accès à leur puits lors des travaux d'échantillonnage de l'eau souterraine. Plusieurs organismes publics et privés ont également mis à la disposition du projet des études pertinentes, améliorant 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), une plate-forme d'échange d'information et de méthodes de traitements, ajoutant à la qualité des produits livrés au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP). L'Institut national de la recherche scientifique (INRS) a apporté un précieux support pour les analyses de la qualité de l'eau et la modélisation de la recharge.

Nous tenons à remercier l'Université du Québec à Montréal (UQAM), mandatée par le Ministère des Ressources Naturelles, qui a fourni une contribution indispensable à la réalisation du projet par ses travaux sur la géologie du Quaternaire. Nous aimerions remercier la compagnie WESA Envir-Eau inc. qui a recueilli les rapports et données hydrogéologiques existantes durant les deux premières années du projet. Le Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT, 2013) a également fourni quelques données nécessaires à l'estimation des volumes de prélèvement en eau. À ce sujet, nous désirons remercier la direction régionale du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) pour sa collaboration dans l'estimation de la consommation en eau pour l'usage agricole.

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 MDDEFP. Plusieurs professionnels 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 face aux enjeux actuels et futurs de 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	IX
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES TABLEAUX	XIV
LISTE DES CARTES ET LIVRABLES	XV
LISTE DES ACRONYMES	XVI
1 INTRODUCTION	1
1.1 STRUCTURE DU RAPPORT	1
1.2 CONTEXTE ET OBJECTIFS	1
1.3 PARTENAIRES ET ÉQUIPE DE RÉALISATION	3
1.4 PRÉSENTATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE	5
1.4.1 Localisation	5
1.4.2 Relief	7
1.4.3 Hydrographie et bassins versants	11
1.4.4 Couverture végétale	14
1.4.5 Milieux humides	16
1.4.6 Pédologie	19
1.4.7 Démographie	21
1.4.8 Affectations du territoire et aires protégées	21
1.4.9 Occupation du sol	25
2 ACQUISITION DE DONNÉES	29
2.1 COMPILATION DE L'INFORMATION EXISTANTE	29
2.2 TRAVAUX DE TERRAIN	32
2.2.1 Investigations hydrogéophysiques	34
2.2.2 Sondages et forages	35
2.2.2.1 Installation de capteurs de pression dans les puits	36
2.2.2.2 Analyses granulométriques	36
2.2.3 Essais hydrauliques	37
2.2.3.1 Essais de pompage de courte durée	37
2.2.3.2 Essais de perméabilité	38
2.2.3.3 Essais d'infiltration	38
2.2.4 Échantillonnage d'eau souterraine	38
2.3 SAISIE, ARCHIVAGE ET VALIDATION DES DONNÉES	41
2.3.1 Inventaire de la base de données hydrogéologiques	41
2.3.2 Archivage des rapports techniques dans la base de données bibliographiques	43
2.3.3 Protocole de fiabilité et de validation des données	44
2.3.3.1 Cotes de fiabilité	44
2.3.3.2 Critères de validation	44
3 CONTEXTE GÉOLOGIQUE	47
3.1 GÉOLOGIE DU ROC	47
3.1.1 Structure et fracturation	52
3.2 GÉOLOGIE DES DÉPÔTS MEUBLES	53
3.2.1 Histoire du Quaternaire	53

3.2.2	<i>Stratigraphie des dépôts meubles</i>	54
3.2.3	<i>Description des dépôts meubles</i>	55
3.2.4	<i>Épaisseur des dépôts meubles</i>	58
4	CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	63
4.1	DÉFINITION DES HYDROFACIÈS.....	63
4.2	COUPES HYDROSTRATIGRAPHIQUES.....	64
4.2.1	<i>Coupes hydrostratigraphiques A-A' et B-B' : Lochaber-Ouest-Plaisance</i>	67
4.2.2	<i>Coupes hydrostratigraphiques C-C' et D-D' : Gatineau-Aylmer-Chelsea</i>	69
4.2.3	<i>Coupe hydrostratigraphique E-E' : Clarendon-Shawville</i>	71
4.2.4	<i>Coupe hydrostratigraphique F-F' : L'Isle-aux-Allumettes</i>	71
4.2.5	<i>Coupe hydrostratigraphique G-G' : Kazabazoua</i>	73
4.2.6	<i>Coupe hydrostratigraphique H-H' : Saint-André-Avellin</i>	73
4.3	MODÈLE HYDROSTRATIGRAPHIQUE.....	75
4.3.1	<i>Incertitude sur le modèle hydrostratigraphique</i>	75
4.4	CONFINEMENT DES AQUIFÈRES DE ROC FRACTURÉ.....	77
4.5	ÉPAISSEUR DES AQUIFÈRES DE DÉPÔTS MEUBLES.....	80
4.6	PIÉZOMÉTRIE ET ÉCOULEMENT.....	82
4.7	PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES.....	85
4.8	MÉTÉOROLOGIE, HYDROMÉTRIE ET SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE.....	89
4.9	BILAN HYDROLOGIQUE ET RECHARGE DES AQUIFÈRES.....	91
4.9.1	<i>Architecture du modèle HELP®</i>	91
4.9.2	<i>Préparation des données intégrées au modèle HELP®</i>	91
4.9.2.1	Données météorologiques.....	92
4.9.2.2	Données sur la végétation et l'occupation du sol.....	92
4.9.2.3	Données sur les sols et la géologie.....	93
4.9.3	<i>Calage des composantes du bilan hydrologique</i>	93
4.9.3.1	Estimation des débits de base des rivières.....	93
4.9.4	<i>Recharge des aquifères</i>	96
4.10	GÉOCHIMIE DE L'EAU SOUTERRAINE.....	98
4.10.1	<i>Portrait géochimique des eaux souterraines</i>	98
4.10.1.1	Détermination des types d'eau (ions majeurs).....	98
4.10.1.2	Analyse statistique multivariée.....	102
4.10.2	<i>Qualité naturelle de la ressource</i>	104
4.10.2.1	Dépassements des critères de potabilité.....	104
4.10.2.2	Dépassement des objectifs esthétiques.....	107
4.11	SYNTHÈSE DES CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES.....	113
4.11.1	<i>Les collines des hautes terres</i>	113
4.11.2	<i>Les grandes vallées des hautes terres</i>	114
4.11.3	<i>La vallée de l'Outaouais</i>	115
5	RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE	117
5.1	VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES.....	117
5.2	RISQUE POTENTIEL DE CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES.....	121
5.3	UTILISATION DE L'EAU SOUTERRAINE.....	124
5.4	POTENTIEL D'EXPLOITATION AUX FINS DE CONSOMMATION.....	127
5.5	GESTION DURABLE DE LA RESSOURCE.....	129
6	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	131
6.1	CONCLUSIONS.....	131
6.1.1	<i>Contextes hydrogéologiques</i>	131
6.1.2	<i>Ressource en eau souterraine</i>	133
6.1.3	<i>Limitations de l'étude</i>	135
6.2	RECOMMANDATIONS.....	136
7	RÉFÉRENCES	137

ANNEXES	A1
ANNEXE 1 : MÉTHODOLOGIE DE CLASSIFICATION DE L'OCCUPATION DU SOL ET DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE	A3
ANNEXE 2 : MÉTHODOLOGIE DE CLASSIFICATION DES MILIEUX HUMIDES	A11
ANNEXE 3 : MÉTHODOLOGIE DE CLASSIFICATION DES UNITÉS PÉDOLOGIQUES	A17
ANNEXE 4 : MÉTHODOLOGIE POUR LA RÉALISATION DES TRAVAUX GÉOPHYSIQUES	A23
ANNEXE 5 : COTES DE FIABILITÉ ET CRITÈRES DE VALIDATION CONTENUS DANS LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES PACES-OUT	A29
ANNEXE 6 : MÉTHODOLOGIE POUR LA RÉALISATION DES CARTES D'ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES ET DE TOPOGRAPHIE DU ROC	A37
ANNEXE 7 : MÉTHODOLOGIE POUR LA CRÉATION DU MODÈLE HYDROSTRATIGRAPHIQUE TRIDIMENSIONNEL (3D) ..	A45
ANNEXE 8 : MÉTHODOLOGIE POUR LA RÉALISATION DES CARTES PIÉZOMÉTRIQUES	A55
ANNEXE 9 : PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES MATÉRIAUX GÉOLOGIQUES	A63
ANNEXE 10 : DONNÉES D'ENTRÉE ET RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION AVEC HELP® DE LA RECHARGE ET DES AUTRES COMPOSANTES DU BILAN HYDROLOGIQUE	A69
ANNEXE 11 : MÉTHODE DE CALCUL DE LA BALANCE ÉLECTRONIQUE	A97
ANNEXE 12 : COTES ET DISTRIBUTION SPATIALE DES PARAMÈTRES DRASTIC	A103
ANNEXE 13 : MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE L'UTILISATION DE L'EAU	A113
ANNEXE E1 : COUPES INTERPRÉTATIVES DES INVESTIGATIONS HYDROGÉOPHYSIQUES	A123
ANNEXE E2 : RAPPORTS DE FORAGE ET DE SONDAGE	A125
ANNEXE E3 : PROTOCOLE DE NUMÉRISATION ET D'ARCHIVAGE	A127
ANNEXE E4 : PROTOCOLE DE FIABILITÉ ET DE VALIDATION DES DONNÉES DE FORAGE	A129
ANNEXE E5 : PROTOCOLE POUR LA PRÉPARATION DU LIVRABLE 15 – ESTIMATION DE L'ÉPAISSEUR DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET LIVRABLE 16 – TOPOGRAPHIE DU ROC	A131
ANNEXE E6 : PROTOCOLE POUR LA PRÉPARATION DU LIVRABLE 19 ET 20 – PIÉZOMÉTRIE DANS LES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET DANS LE ROC	A133
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)	A135
ANNEXE E8 : PROTOCOLE POUR LA PRÉPARATION DU LIVRABLE 22 – VULNÉRABILITÉ DE L'AQUIFÈRE DE ROC RÉGIONAL	A137
ANNEXE E9 : PROTOCOLE POUR LA PRÉPARATION DU LIVRABLE 23 – INDICE DE DENSITÉ D'ACTIVITÉS ANTHROPIQUES	A139
ANNEXE E10 : PROTOCOLE POUR LA PRÉPARATION DU LIVRABLE 26 – UTILISATION DE L'EAU	A141
ANNEXE E11 : CERTIFICATS D'ANALYSES DE LA CHIMIE DE L'EAU	A143

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 : REPRÉSENTATION DES ROUTES ET LIMITES ADMINISTRATIVES (CARTE 2).....	6
FIGURE 1.2 : REPRÉSENTATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉLÉVATION (MNE) (CARTE 3).....	8
FIGURE 1.3 : REPRÉSENTATION DES PENTES DU SOL (CARTE 4).....	10
FIGURE 1.4 : REPRÉSENTATION DE L'HYDROGRAPHIE ET DES BASSINS VERSANTS (CARTES 5 ET 6).....	12
FIGURE 1.5 : COUVERTURE VÉGÉTALE SUR LE TERRITOIRE À L'ÉTUDE, PAR MRC ET VILLE.....	14
FIGURE 1.6 : REPRÉSENTATION DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE (CARTE 8).....	15
FIGURE 1.7 : TYPE DE MILIEUX HUMIDES SUR LE TERRITOIRE À L'ÉTUDE.....	16
FIGURE 1.8 : REPRÉSENTATION DES MILIEUX HUMIDES (CARTE 9).....	18
FIGURE 1.9 : TEXTURE ET DRAINAGES DES SOLS SUR LE TERRITOIRE À L'ÉTUDE.....	19
FIGURE 1.10 : REPRÉSENTATION DE LA PÉDOLOGIE (CARTE 11).....	20
FIGURE 1.11 : REPRÉSENTATION DES AFFECTATIONS DU TERRITOIRE (CARTE 10A).....	22
FIGURE 1.12 : REPRÉSENTATION DES AIRES PROTÉGÉES ET TERRITOIRES À STATUTS PARTICULIERS (CARTE 10B)...	24
FIGURE 1.13 : REPRÉSENTATION DE L'OCCUPATION DU SOL (CARTE 7).....	26
FIGURE 2.1 : LOCALISATION DES TRAVAUX DE TERRAIN EFFECTUÉS PAR L'UNIVERSITÉ LAVAL.....	33
FIGURE 2.2 : LOCALISATION DES ÉCHANTILLONS SELON LE TYPE D'AQUIFÈRE.....	40
FIGURE 3.1 : GÉOLOGIE SIMPLIFIÉE DU ROC (CARTE 13).....	48
FIGURE 3.2 : HISTOIRE GÉOLOGIQUE.....	50
FIGURE 3.3 : COLONNE STRATIGRAPHIQUE DE LA PLATE-FORME DU SAINT-LAURENT.....	51
FIGURE 3.4 : STRATIGRAPHIE DE LA RÉGION DE L'OUTAOUAIS.....	55
FIGURE 3.5 : GÉOLOGIE SIMPLIFIÉE DES DÉPÔTS MEUBLES (CARTE 12).....	57
FIGURE 3.6 : ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES (CARTE 15).....	60
FIGURE 3.7 : TOPOGRAPHIE DU ROC (CARTE 16).....	61
FIGURE 4.1 : LOCALISATION DES COUPES HYDROSTRATIGRAPHIQUES.....	66
FIGURE 4.2 : COUPES HYDROSTRATIGRAPHIQUES A-A' ET B-B' : LOCHABER-OUEST-PLAISANCE.....	68
FIGURE 4.3 : COUPES HYDROSTRATIGRAPHIQUES C-C' ET D-D' : VILLE DE GATINEAU ET AYLMER- CHelsea.....	70
FIGURE 4.4 : COUPES HYDROSTRATIGRAPHIQUES E-E' : CLARENDON-SHAWVILLE ET F-F' : L'ISLE-AUX-ALLUMETTES	72
FIGURE 4.5 : COUPE HYDROSTRATIGRAPHIQUE G-G' : KAZABAZOUA ET H-H' : SAINT-ANDRÉ-AVELLIN.....	74
FIGURE 4.6 : FACTEURS DÉTERMINANT L'INCERTITUDE DU MODÈLE HYDROSTRATIGRAPHIQUE.....	76
FIGURE 4.7 : CONFINEMENT DES AQUIFÈRES DE ROC FRACTURÉ (CARTE 17).....	79
FIGURE 4.8 : ÉPAISSEUR DES AQUIFÈRES DE DÉPÔTS MEUBLES (CARTE 18).....	81
FIGURE 4.9 : ÉLÉVATION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE COMBINÉ DES AQUIFÈRES DE ROC FRACTURÉ ET DE DÉPÔTS MEUBLES (CARTES 19 ET 20).....	84
FIGURE 4.10 : EMPLACEMENT DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES, HYDROMÉTRIQUES ET DE SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE (CARTE 27).....	90
FIGURE 4.11 : COURBE TYPIQUE DES DÉBITS OBSERVÉS ET DÉBITS DE BASE DE LA RIVIÈRE PICANOC (EN OUTAOUAIS) POUR L'ANNÉE 2004.....	94
FIGURE 4.12 : DISTRIBUTION SPATIALE DE LA RECHARGE DES AQUIFÈRES (CARTE 28).....	97
FIGURE 4.13 : DIAGRAMMES DE PIPER POUR LES DONNÉES PACES SELON LE TYPE D'AQUIFÈRE (À GAUCHE) ET LE NIVEAU DE CONFINEMENT (À DROITE).....	100
FIGURE 4.14 : RÉPARTITION SPATIALE DES TYPES D'EAU EN FONCTION DU TYPE D'AQUIFÈRE.....	101
FIGURE 4.15 : RÉPARTITION SPATIALE DES ÉCHANTILLONS SELON LES GROUPES D'EAU DÉFINIS PAR L'ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE.....	104
FIGURE 4.16 : DISTRIBUTION SPATIALE DES DÉPASSEMENTS EN FLUORURES ET URANIUM.....	107
FIGURE 4.17 : DISTRIBUTION SPATIALE DES DÉPASSEMENTS POUR LES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES EN FER, MANGANÈSE, CHLORURES, SODIUM ET MATIÈRE DISSOUE TOTALE.....	111
FIGURE 4.18 : DISTRIBUTION SPATIALE DES DÉPASSEMENTS POUR LE PH.....	112
FIGURE 4.19 : SYNTHÈSE DES CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES.....	113
FIGURE 5.1 : SCHEMATISATION DE LA METHODE DRASTIC ET POIDS DE CHAQUE PARAMETRE.....	118
FIGURE 5.2 : INDICE DE VULNÉRABILITÉ DRASTIC DES AQUIFÈRES (CARTE 22).....	120
FIGURE 5.3 : REPRÉSENTATION DU RISQUE POTENTIEL DE CONTAMINATION LIÉ AUX ACTIVITÉS ANTHROPIQUES (CARTE 23).....	122

FIGURE 5.4 : REPRÉSENTATION DES TERRAINS CONTAMINÉS (CARTE 23).....	123
FIGURE 5.5 : ESTIMATION DE L'USAGE DE L'EAU SOUTERRAINE, PAR VILLE ET MRC	124
FIGURE 5.6 : REPRÉSENTATION DE L'UTILISATION DE L'EAU SOUTERRAINE ET DE SURFACE (CARTE 26)	126
FIGURE 5.7 : PENTAGONE DE LA GESTION DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES (D'APRÈS CAC, 2009).....	130
FIGURE 5.8 : CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES NÉCESSAIRES POUR UNE GESTION DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES (D'APRÈS CAC, 2009)	130

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.1 : ÉQUIPE DE RÉALISATION (EN ORDRE ALPHABÉTIQUE DE NOM)	4
TABLEAU 1.2 : SUPERFICIE DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE, PAR MRC OU VILLE	7
TABLEAU 1.3 : SUPERFICIE DES BASSINS VERSANTS SUR LE TERRITOIRE À L'ÉTUDE	13
TABLEAU 1.4 : RÉPARTITION DES TYPES DE MILIEUX HUMIDES, PAR VILLE ET MRC.....	17
TABLEAU 1.5 : POPULATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE	21
TABLEAU 1.6 : AFFECTATION DU TERRITOIRE, PAR VILLE ET MRC	23
TABLEAU 1.7 : AIRE PROTÉGÉE ET TERRITOIRE À STATUT PARTICULIER SUR LE TERRITOIRE À L'ÉTUDE, PAR VILLE ET MRC	25
TABLEAU 1.8 : SUPERFICIE DE L'OCCUPATION DU SOL, PAR VILLE ET MRC	27
TABLEAU 2.1 : SYNTHÈSE DES DONNÉES (OBJETS) RECUEILLIES PAR SOURCE	30
TABLEAU 2.2 : SYNTHÈSE DES RAPPORTS OBTENUS PAR SOURCE.....	31
TABLEAU 2.3 : PARAMÈTRES CHIMIQUES ANALYSÉS DANS LE CADRE DES TRAVAUX D'ÉCHANTILLONNAGE.....	39
TABLEAU 2.4 : NOMBRE D'OBJETS DE LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES PACES-OUT ASSOCIÉS À CHAQUE TYPE D'OBJET	41
TABLEAU 2.5 : NOMBRE D'OBSERVATIONS DE LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES PACES-OUT ASSOCIÉ À CHAQUE TYPE D'OBSERVATION	42
TABLEAU 4.1 : DÉFINITION DES HYDROFACIÈS.....	64
TABLEAU 4.2 : DÉFINITION DU DEGRÉ DE CONFINEMENT	77
TABLEAU 4.3 : SOMMAIRE DES PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DISPONIBLES DANS LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES PACES-OUT ET CLASSÉES PAR HYDROFACIÈS.....	88
TABLEAU 4.4 : COMPARAISON DES RÉSULTATS DES PARAMÈTRES DU BILAN HYDROLOGIQUE MODÉLISÉ PAR HELP [®] (1980-2009) AVEC CEUX OBTENUS DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES DU CEHQ.....	95
TABLEAU 4.5 : PARAMÈTRES HYDRAULIQUES CALBRÉS POUR LA MODÉLISATION DU BILAN HYDROLOGIQUE	95
TABLEAU 4.6 : DESCRIPTION DES DONNÉES GÉOCHIMIQUES DISPONIBLES ET UTILISÉES	98
TABLEAU 4.7 : RÉPARTITION DES FACIÈS SELON LE TYPE D'AQUIFÈRE ET SON NIVEAU DE CONFINEMENT POUR LES DONNÉES PACES	99
TABLEAU 4.8 : CARACTÉRISTIQUES DES GROUPES D'ÉCHANTILLONS TELS QUE DÉFINIS LORS DE L'ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE.....	102
TABLEAU 4.9 : SOMMAIRE DES DÉPASSEMENTS DE POTABILITÉ (LES DÉPASSEMENTS SIGNIFICATIFS SONT SOULIGNÉS EN CHIFFRES FONCÉS).	106
TABLEAU 4.10 : SOMMAIRE DES DÉPASSEMENTS DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES (LES DÉPASSEMENTS SIGNIFICATIFS SONT SOULIGNÉS EN CHIFFRES FONCÉS).....	109
TABLEAU 5.1 : SYNTHÈSE DE L'UTILISATION DE L'EAU (EN M ³ /AN), PAR VILLE ET MRC	125

LISTE DES CARTES ET LIVRABLES

*Disponibles individuellement en fichiers électroniques distincts du rapport.

CARTE 1 :	TOPOGRAPHIE
CARTE 2 :	ROUTES ET LIMITES ADMINISTRATIVES
CARTE 3 :	MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉLÉVATION
CARTE 4 :	PENTE
CARTES 5 ET 6 :	HYDROGRAPHIE ET BASSINS VERSANTS
CARTE 7 :	OCCUPATION DU SOL
CARTE 8 :	COUVERTURE VÉGÉTALE
CARTE 9 :	MILIEUX HUMIDES
CARTE 10A :	AFFECTATIONS DU TERRITOIRE
CARTE 10B :	AIRES PROTÉGÉES ET TERRITOIRES À STATUTS PARTICULIERS
CARTE 11 :	PÉDOLOGIE
CARTE 12 :	GÉOLOGIE DU QUATÉNAIRE
CARTE 13 :	GÉOLOGIE DU ROC
LIVRABLE 14 :	COUPES HYDROSTRATIGRAPHIQUES, DISPONIBLES À LA SECTION 4.2 (Figure 4.2 À Figure 4.5)
CARTE 15 :	ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES
CARTE 16 :	TOPOGRAPHIE DU ROC
CARTE 17 :	CONFINEMENT DE L'AQUIFÈRE DE ROC ET INCERTITUDE DU MODÈLE HYDROSTRATIGRAPHIQUE
CARTE 18 :	ÉPAISSEUR DES AQUIFÈRES DE DÉPÔTS MEUBLES
CARTES 19 ET 20 :	PIÉZOMÉTRIE COMBINÉE DES AQUIFÈRES DE ROC FRACTURÉ ET DE DÉPÔTS MEUBLES
LIVRABLE 21 :	PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES, DISPONIBLES À LA SECTION 4.7 (Tableau 4.3) ET Annexe 9 : Propriétés hydrauliques des matériaux géologiques)
CARTE 22 :	VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES SELON L'INDICE DRASTIC
CARTE 23 :	ACTIVITÉS POTENTIELLEMENT POLLUANTES ET SITES CONTAMINÉS
LIVRABLE 24 :	QUALITÉ DE L'EAU EN FONCTION DES CRITÈRES DE POTABILITÉ, DISPONIBLE À LA SECTION 4.10.2
LIVRABLE 25 :	QUALITÉ DE L'EAU EN FONCTION DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES, DISPONIBLE À LA SECTION 4.10.2
CARTE 26 :	UTILISATION DE L'EAU
CARTE 27 :	EMPLACEMENT DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES, HYDROMÉTRIQUES ET DE SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE
CARTE 28 :	RECHARGE MOYENNE ANNUELLE DES AQUIFÈRES

LISTE DES ACRONYMES

Terme général

3D	Tridimensionnel
ABV	Agence de bassins versants
BAPE	Bureau d'audiences publiques sur l'environnement
BDAT	Base de données en aménagement du territoire
BDCG	Base de données de cultures généralisées
BDGA	Base de données géographiques et administratives
BDMA	Base de données en milieu aquatique
BDTA	Base de données topographiques et administratives
BDTQ	Banque de données topographiques du Québec
BNDS	Base nationale de données sur les sols
CCÉG	Coalition canadienne de l'énergie géothermique
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CEP	Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable
CERFO	Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc.
CIC	Canards Illimités Canada
CGC	Commission géologique du Canada
CMA	Concentration maximale acceptée
CMQ	Communauté métropolitaine de Québec
COBALI	Comité de bassin versant de la rivière du Lièvre
CPT	<i>Cone penetration test</i> (essai de pénétration au cône)
CREDDO	Conseil régional de l'environnement et du développement durable de l'Outaouais
CRE-O	Conférence régionale des élus de l'Outaouais
C _{sp}	Capacité spécifique
CUBF	Codes d'utilisation des biens-fonds
DRSP	Direction régionale de santé publique
EFE	Écosystème forestier exceptionnel
GPS	<i>Global positioning system</i> (Système de localisation mondial)
GRIES	Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines
HFF	Habitat faunique et floristique
ICI	Industries, commerces et institutions
INRS	Institut national de la recherche scientifique
ISQ	Institut de la statistique du Québec
IRDA	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement
K	Conductivité hydraulique
L'ATINO	L'Agence de traitement de l'information numérique en Outaouais

M	Masse molaire
MAMROT	Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
MDDEFP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec
MNE	Modèle numérique d'élévation
MRC	Municipalité régionale de comté
MRN	Ministère des Ressources naturelles du Québec
MTQ	Ministère des Transports du Québec
OBV	Organisme de bassin versant
OBV-RPNS	Organisme de bassins versants des rivières Rouge, Petite Nation et Saumon
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
PACES-OUT	Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Outaouais
PDE	Plan directeur de l'eau
PSR	Planification stratégique régionale
RPSS	<i>Rotopercussion sounding system</i> (Système d'investigation par rotopercussion)
S	Coefficient d'emmagasinement
S.O.	Sans objet
SDA	Système sur les découpages administratifs
SIEF	Système d'information écoforestière
SIGAT	Système d'information et de gestion en aménagement du territoire
SIGEOM	Système d'informations géominières
SIH	Système d'information hydrogéologique
SNRC	Système national de référence cartographique
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i> (Système d'évaluation du sol et de l'eau)
T	Transmissivité
TNO	Territoire non organisé
ZEC	Zone d'exploitation contrôlée

Unité de mesure

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

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 Structure du rapport

Ce rapport se divise en 6 chapitres principaux. Il débute par un chapitre d'introduction portant sur le contexte et les objectifs du projet, les partenaires et l'équipe de réalisation ainsi que la présentation du territoire. L'acquisition des données par la collecte de l'information existante et par la réalisation de travaux de terrain est abordée au chapitre 2. Le processus de saisie, d'archivage et de validation des données y est aussi décrit. Le chapitre 3 présente le contexte géologique de la région d'étude et comprend une description de la géologie du roc et des dépôts meubles. Le chapitre 4 traite des contextes hydrogéologiques tels que définis par l'hydrostratigraphie des dépôts meubles, le confinement et l'épaisseur des aquifères, la piézométrie et l'écoulement des eaux souterraines, les propriétés hydrauliques des matériaux géologiques, le bilan hydrologique, la recharge des aquifères et la géochimie des eaux souterraines. Le chapitre 5 porte sur la ressource en eau souterraine : la vulnérabilité des aquifères, le risque potentiel de contamination des eaux souterraines, son utilisation, son potentiel d'exploitation aux fins de consommation et sa gestion durable. Le chapitre 6 conclut l'étude et présente une synthèse sur les contextes hydrogéologiques, la ressource en eau souterraine et les limitations de l'étude ainsi que des recommandations.

Plusieurs cartes ont été réalisées dans le cadre de cette étude. Elles sont disponibles en haute résolution en grand format (42 po par 42 po) en annexe cartographique électronique du rapport. De petites cartes simplifiées portant sur les mêmes thématiques sont présentées directement dans le rapport pour en faciliter la lecture. De l'information détaillée sur les méthodologies employées ainsi que certains résultats se trouvent en annexe du rapport alors que des protocoles et résultats détaillés sont présentés en annexe électronique.

1.2 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 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).

Ces initiatives nationales étaient motivées, entre autres, par les événements de 2000 à Walkerton, Ontario, lors desquels la contamination des eaux souterraines du puits d'approvisionnement municipal a fait 7 morts et plusieurs milliers de malades (O'Connor, 2002).

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.

Dans le cadre de la mise en œuvre 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 (PDE). Ce plan a pour but la gestion intégrée des ressources en eau. Or, dans la production de leur PDE, les OBV de l'Outaouais ont identifié un réel manque de connaissances sur les eaux souterraines de la région.

Le *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Outaouais* (PACES-OUT) vise donc à dresser le portrait régional des ressources en eau souterraine sur le territoire municipalisé de cette région et ainsi combler le manque d'informations identifié par de nombreux acteurs.

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 2^e et 3^e cycles et des stages d'étudiants du 1^e cycle.

Le projet s'est déroulé sur un peu plus de trois ans, soit d'avril 2010 à juillet 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 rapport final de la Phase III constitue une synthèse de tous les travaux effectués durant les trois phases du projet. La consultation des rapports Phase I (Comeau *et coll.*, 2011) et Phase II (Comeau *et coll.*, 2012a) n'est pas nécessaire pour assurer la compréhension du présent rapport, mais pourra offrir quelques précisions lorsque ces rapports sont cités dans le texte. Les thèmes abordés et la structure du rapport ont été orientés par les exigences du MDDEFP et sont communs à tous les projets du PACES.

1.3 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 L'ATINO, 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 :

- Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP),
- L'Agence de traitement de l'information numérique en Outaouais (L'ATINO),
- Ville de Gatineau,
- MRC Pontiac,
- MRC de La Vallée-de-la-Gatineau,
- MRC des Collines-de-l'Outaouais,
- MRC Papineau,
- Agence de bassins versants des 7 (ABV des 7),
- Comité du bassin versant de la rivière du Lièvre (COBALI),
- Organisme de bassins versants des rivières Rouge, Petite Nation et Saumon (OBV-RPNS),
- Conférence régionale des élus de l'Outaouais (CRÉ-O),
- Conseil régional de l'environnement et du développement durable de l'Outaouais (CREDDO),
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ),
- Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT).

Bien avant le démarrage du projet PACES-Outaouais, la CRÉ-O avait démontré leur leadership dans la protection et la mise en valeur de la ressource en eau souterraine en la définissant comme un enjeu prioritaire de la Planification stratégique régionale (PSR) 2007-2012, (CRE-O, 2006).

Tel qu'exigé par le Programme PACES, les partenaires ont contribué au projet avec plus de 10 % de la valeur totale du projet fourni en ressources humaines, et plus de 10 % en espèces. Ils ont notamment été impliqués au niveau des 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 L'ATINO ayant contribué à la réalisation du projet est présenté au Tableau 1.1. L'implication de L'ATINO a été particulièrement importante pour le succès du projet. Sa principale contribution se situe au niveau de la production des cartes et analyses en lien avec les livrables 1 à 11, 23 et 26.

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

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	Simon Bérubé	Christine Berthiaux
Jean-Michel Lemieux	Lise Lamarche	Tobias Graf	Francis Donati-Daoust	Manuel Cossette
John Molson	Alicia Moreno	Nelly Montcoudiol	Gabriel Fabien-Ouellet	Joanie Côté
René Therrien	Marie-Catherine Talbot Poulin		Penny Fiset	Alexandra Demers-Roberge
	Pierre Therrien		Marie-Michèle Nadeau	Mélissa Gauthier
	Yohann Tremblay		Arnaud Sterckx	Mélissa Girard
				Olivier Lefebvre
				Gary-Charlie-Willy Lépinay
				Alain Marcoux
				Marie-Eve Masi
				Hubert Michaud
				Philippe Paradis-Lacombe
				Amélie Plante
				Antoine Rhéaume-Ouellet
				Noémie Simard-Rousseau
				Laurie-Pier Vézina
				Yan Vincent
L'Agence de traitement de l'information numérique en Outaouais (L'ATINO)				
Coordonnatrice	Chargé(e) de projets			
Stéphanie Ayotte	Said Akif			
	Jonathan Martin			
	Élodie Roy			

La contribution de l'Université du Québec à Montréal et du Ministère des Ressources Naturelles, par la réalisation de la cartographie de la géologie du Quaternaire, était indispensable au 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), réunissaient :

- 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

1.4 Présentation du territoire à l'étude

1.4.1 Localisation

Le territoire à l'étude se situe au sud-ouest de la province de Québec dans la région administrative de l'Outaouais. Le PACES-OUT s'intéresse au territoire municipalisé de l'Outaouais et couvre une superficie totale de 13 762 km², ce qui correspond à 40,5 % des 34 014 km² de la région administrative. La Figure 1.1 et la Carte 2 (en annexe cartographique distincte du rapport) illustrent le territoire couvert par le PACES-OUT de même que ses principaux accès routiers et limites administratives.

Les informations cartographiques proviennent de différentes bases de données du ministère des Ressources naturelles (MRN), principalement de la Base de données géographiques et administratives (BDGA, 1 / 1 000 000), de la Base de données topographiques et administratives (BDTA, 1 / 250 000), de la Base de données pour l'aménagement du territoire (BDAT, 1 / 100 000) et du Système de découpages administratifs (SDA, 1 / 20 000). La section portant sur les références cartographiques de la Carte 2 apporte plus de précision sur les sources cartographiques utilisées. Les informations illustrées sur cette carte constituent les informations de base de toutes les autres cartes subséquentes produites dans le cadre du projet.

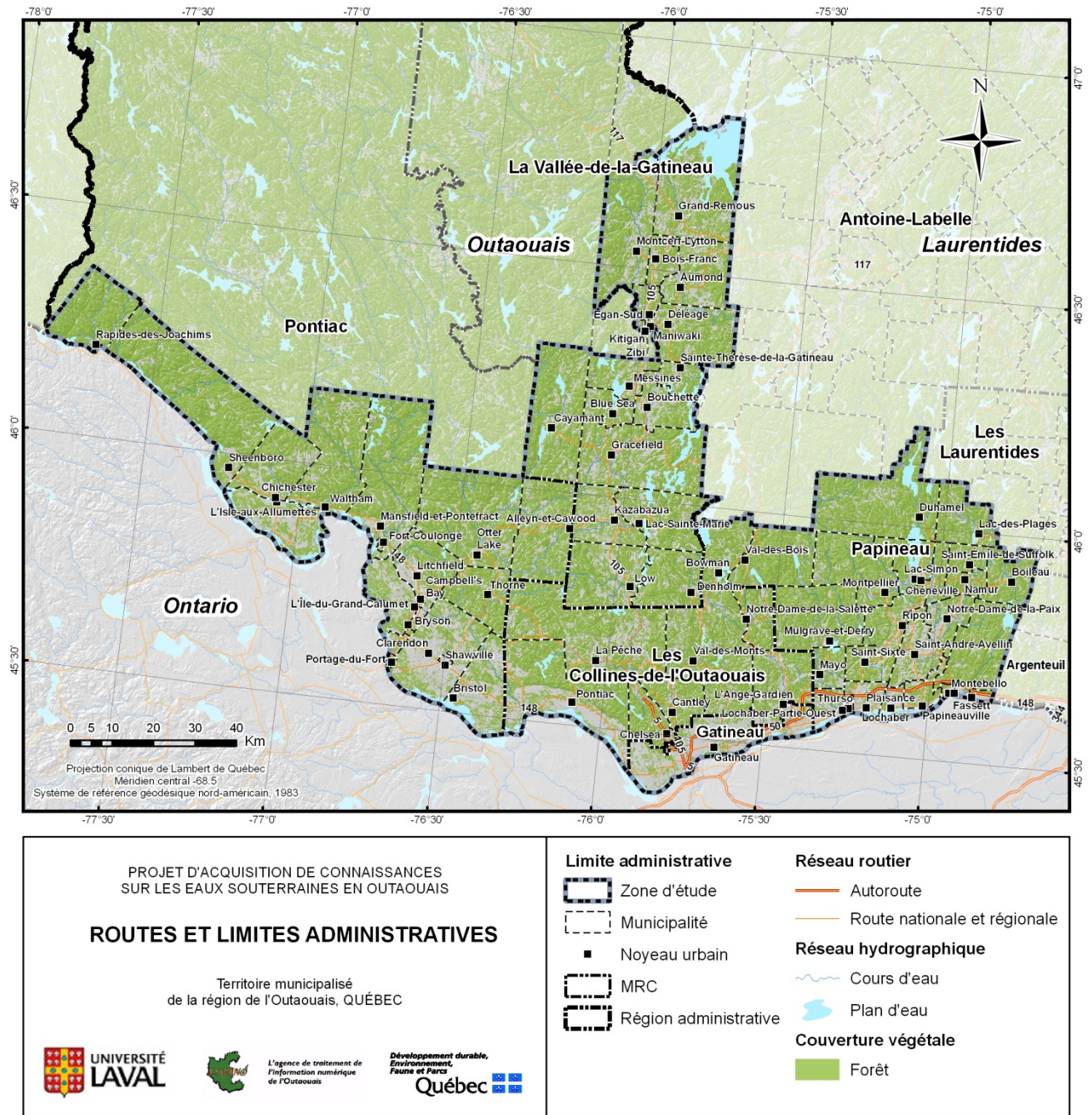


Figure 1.1 : Représentation des routes et limites administratives (Carte 2)

La zone municipalisée de l'Outaouais se divise en 4 MRC et une ville réunissant 67 municipalités. Le Tableau 1.2 détaille les superficies et les proportions de chaque MRC dans le territoire à l'étude.

Tableau 1.2 : Superficie du territoire à l'étude, par MRC ou ville

MRC ou ville	Région administrative				Territoire à l'étude, total	
	Territoire municipalisé	TNO	Total			
	(%)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Papineau	9,4	0,0	3 209	9,4	3 207	23,3
Ville de Gatineau	1,1	-	381	1,1	381	2,8
Les Collines-de-l'Outaouais	6,5	-	2 199	6,5	2 199	16,0
La Vallée-de-la-Gatineau	10,9	30,6	14 117	41,5	3 721	27,0
Pontiac	12,5	29,0	14 108	41,5	4 254	30,9
Total	40,5	59,5	34 014	100,0	13 762	100,0

Note : TNO = Territoire non organisé

Source : SDA (MRN, 2010) adapté par L'ATINO, 2013.

Du côté est, le territoire à l'étude est bordé par la région administrative des Laurentides incluant les MRC Argenteuil, Les Laurentides et Antoine-Labelle. Au nord, le territoire du PACES-OUT est délimité par les territoires non-organisés (TNO) de la région de l'Outaouais, principalement les TNO Lac-Pythonga et Lac-Nilgaut, respectivement dans les MRC de La Vallée-de-la-Gatineau et Pontiac, mais aussi le territoire autochtone algonquin de Kitigan Zibi Anishinabeg. Du côté ouest, le TNO Les Lacs-du-Témiscamingue dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue borde le territoire d'étude alors qu'au sud, il est délimité par la rivière des Outaouais, frontière naturelle entre les provinces de l'Ontario et du Québec.

1.4.2 Relief

Le territoire à l'étude se caractérise principalement par deux ensembles physiographiques présentant des paysages bien distincts : les Basses-terres du Saint-Laurent ou plaine de l'Outaouais (mince bande de relief plat longeant la rivière des Outaouais) et le Bouclier canadien ou hautes terres (relief moutonné dominant à 84 % le territoire du PACES-OUT). Le relief est illustré sur les Carte 1 : Topographie et Carte 3 : Modèle numérique d'élévation (MNE), en annexes cartographiques distinctes du rapport. Les informations hypsométriques proviennent de la Base de données en aménagement du territoire (BDAT, 1 / 100 000) du MRN. L'altimétrie y est illustrée à des intervalles de 20 m pour les courbes de niveau intermédiaires et à des intervalles de 100 m pour les courbes de niveau maîtresses. La Figure 1.2 permet d'avoir une vue d'ensemble du MNE. Le MNE provient des analyses du MDDEFP sur la topographie corrigée de la Base de données topographiques du Québec (BDTQ, 1 / 20 000) à une résolution de 10 m. La section portant sur les références cartographiques des Cartes 1 et 3 apporte plus de précision sur les sources cartographiques utilisées.

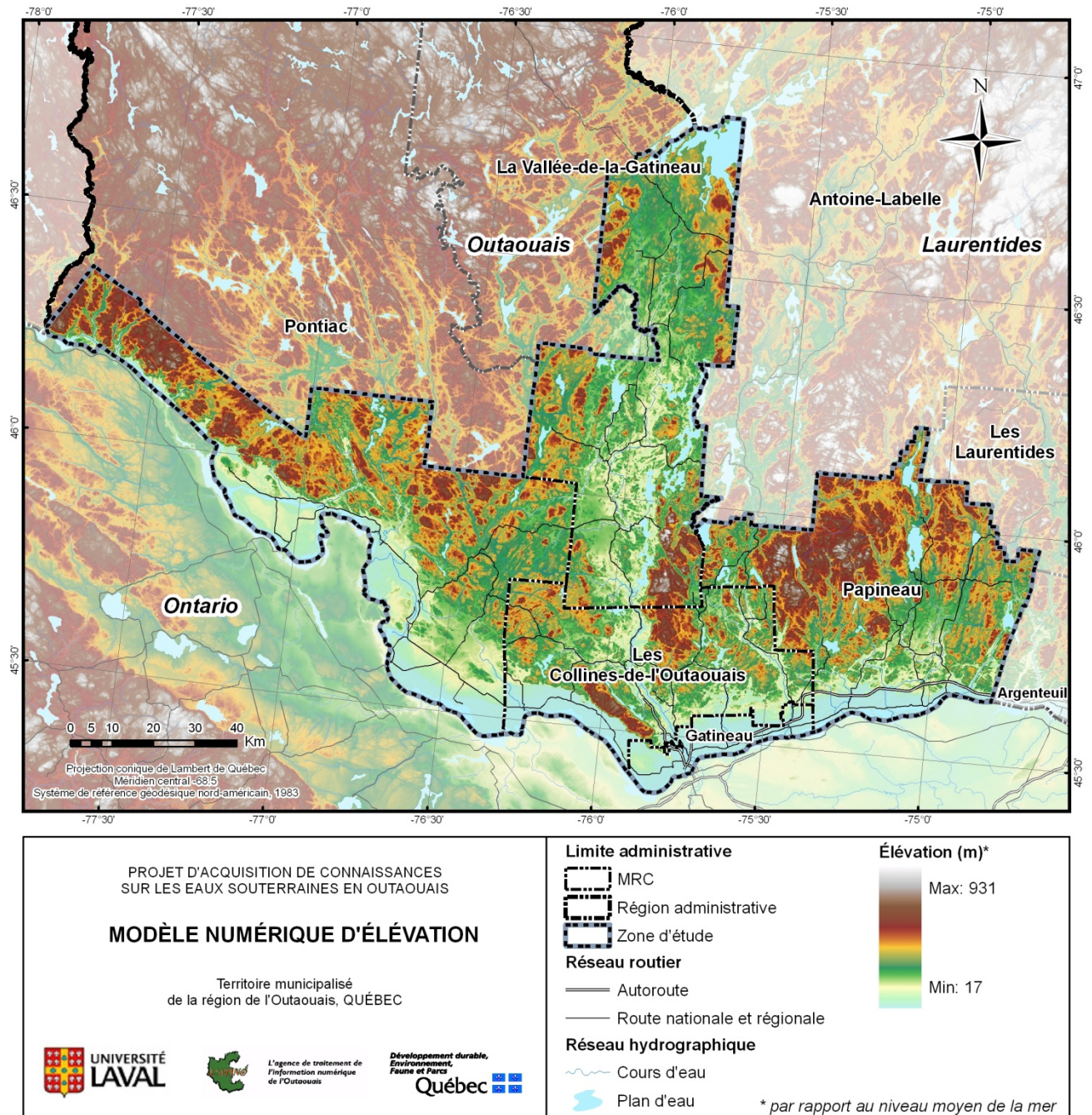


Figure 1.2 : Représentation du modèle numérique d'élévation (MNE) (Carte 3).

Les hautes terres se caractérisent par une physiographie typique des Laurentides méridionales faisant partie du Bouclier canadien. Les glaciations successives et leur action d'érosion sur les roches intrusives et métamorphiques ont laissé un relief moutonné de buttes, de basses collines et de quelques massifs plus élevés (jusqu'à 555 m pour le Mont Sainte-Marie dans la municipalité de Lac-Sainte-Marie). Les basses collines sont entrecoupées de plusieurs larges vallées orientées nord-sud, dont celle de la rivière Gatineau, qui occupe tout le centre du territoire à l'étude, et celles des rivières de la Petite Nation et du Lièvre, plus à l'est.

L'escarpement d'Eardley marque clairement la limite entre l'ensemble physiographique du Bouclier canadien, au nord, et celui des Basses-terres du Saint-Laurent, au sud. La dénivellation de l'escarpement d'Eardley est d'environ 300 m et ce sur plus de 30 km. Au sud de l'escarpement s'ouvre la plaine de l'Outaouais, plate-forme de faible altitude comblée de dépôts de la mer de Champlain et de dépôts glaciaires. Le relief s'y caractérise par des terrasses étagées et les embouchures des grands affluents de la rivière des Outaouais (rivières Gatineau, du Lièvre et de la Petite Nation). L'altitude oscille entre 20 m, au niveau de la rivière des Outaouais, et environ 250 m.

La Carte 4 (en annexe cartographique distincte du rapport) ainsi que la Figure 1.3 présentent la pente sur le territoire à l'étude. La pente du sol résulte de calculs réalisés à partir du MNE (résolution de 10 m). La section portant sur les références cartographiques de la Carte 4 apporte plus de précision sur les sources cartographiques utilisées. Les pentes inférieures à 7° caractérisent les Basses-terres du Saint-Laurent, alors que celles du Bouclier canadien sont généralement supérieures à 10°.

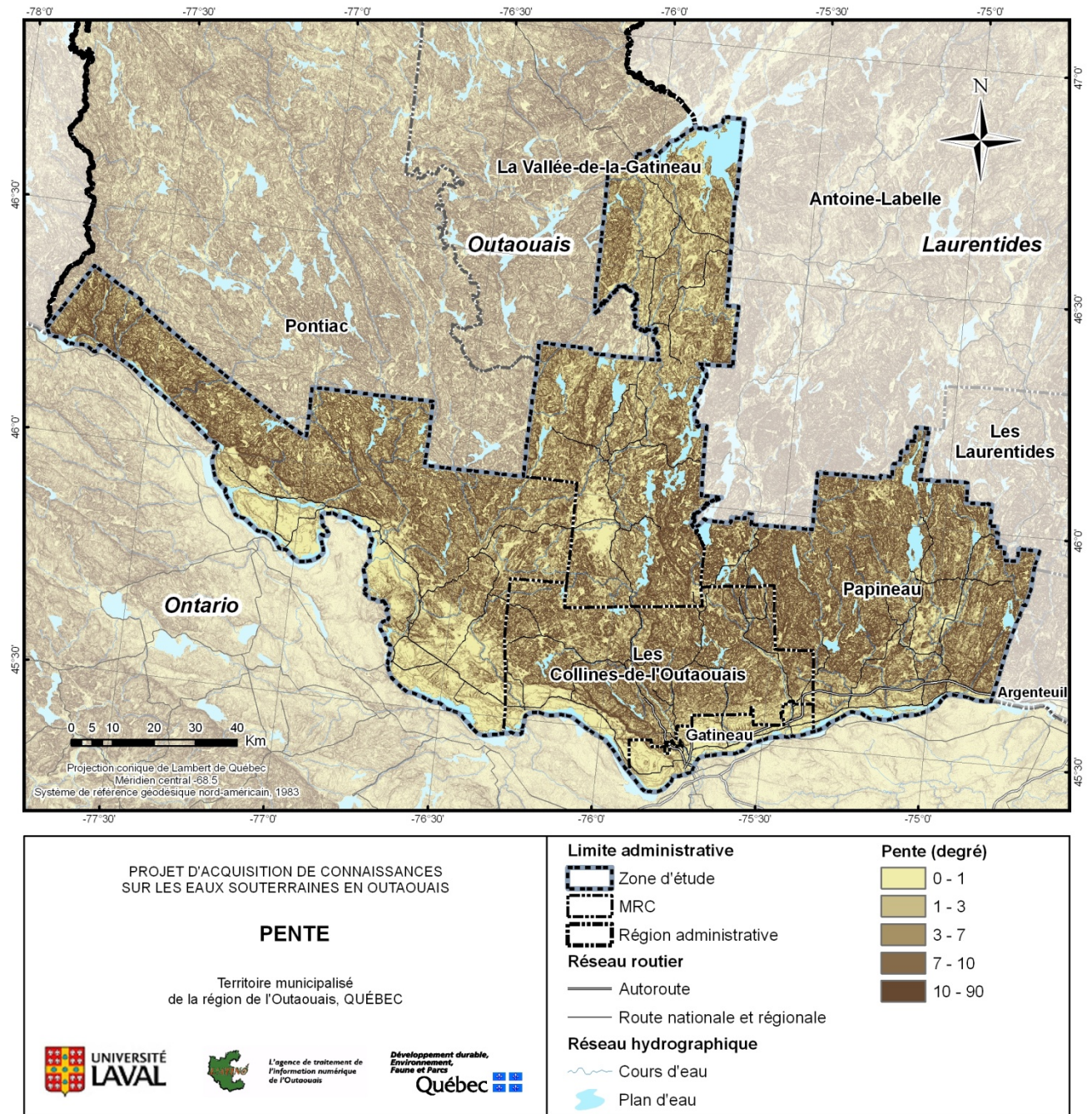


Figure 1.3 : Représentation des pentes du sol (Carte 4)

1.4.3 Hydrographie et bassins versants

Le réseau hydrographique et les bassins versants du territoire à l'étude sont illustrés sur les Cartes 5 et 6 : Hydrographie et bassins versants (en annexes cartographiques distinctes du rapport) et à la Figure 1.4. Le réseau hydrographique provient de la BDTA (1 / 250 000), tandis que les limites des bassins versants résultent de la modélisation effectuée par le Centre d'expertise hydrique (CEHQ) du MDDEFP à partir de la topographie corrigée de la BDTQ (1 / 20 000). Les références cartographiques inscrites sur les Cartes 5 et 6 apportent plus de précisions sur les sources cartographiques utilisées.

Dans les Laurentides méridionales, plusieurs grands lacs et réservoirs donnent naissance à un réseau hydrographique foisonnant, dont les axes majeurs sur le territoire à l'étude sont ceux des rivières des Outaouais, Gatineau, de la Petite Nation et du Lièvre. Tous les cours d'eau prennent leur source au nord dans le Bouclier canadien et y coulent de manière généralement rectiligne en y exploitant les failles du socle rocheux. Ils terminent leur course au sud dans la plaine des Basses-terres du Saint-Laurent, où ils s'écoulent, dans un réseau méandrique, dans des dépôts meubles généralement argileux. Le redressement de cours d'eau (à des fins de développements agricoles ou urbains) dans la plaine de l'Outaouais modifie considérablement le patron d'écoulement de plusieurs rivières ou ruisseaux. En effet, plusieurs d'entre eux présentent un écoulement rectiligne à angle droit révélant clairement leur anthropisation.

Le territoire à l'étude compte 16 222 lacs couvrant 1 300 km², 9 395 km de cours d'eau permanents et 8 460 km de cours d'eau intermittent. Ce riche réseau hydrographique, jumelé aux nombreuses zones forestières sur le territoire, favorise la pratique d'activités récréatives et la villégiature. La majorité des barrages (62) présents sur le territoire à l'étude sont des ouvrages construits pour soutenir ce type d'utilisation. Par ailleurs, plusieurs plans et cours d'eau sont mis à profit pour la production d'hydroélectricité : les réservoirs Baskatong et l'Escalier, les lacs du Poisson Blanc et Leamay, ainsi que les rivières des Outaouais, Gatineau, du Lièvre, Coulonge et Blanche. Au total, 52 barrages hydroélectriques sont présents sur le territoire.

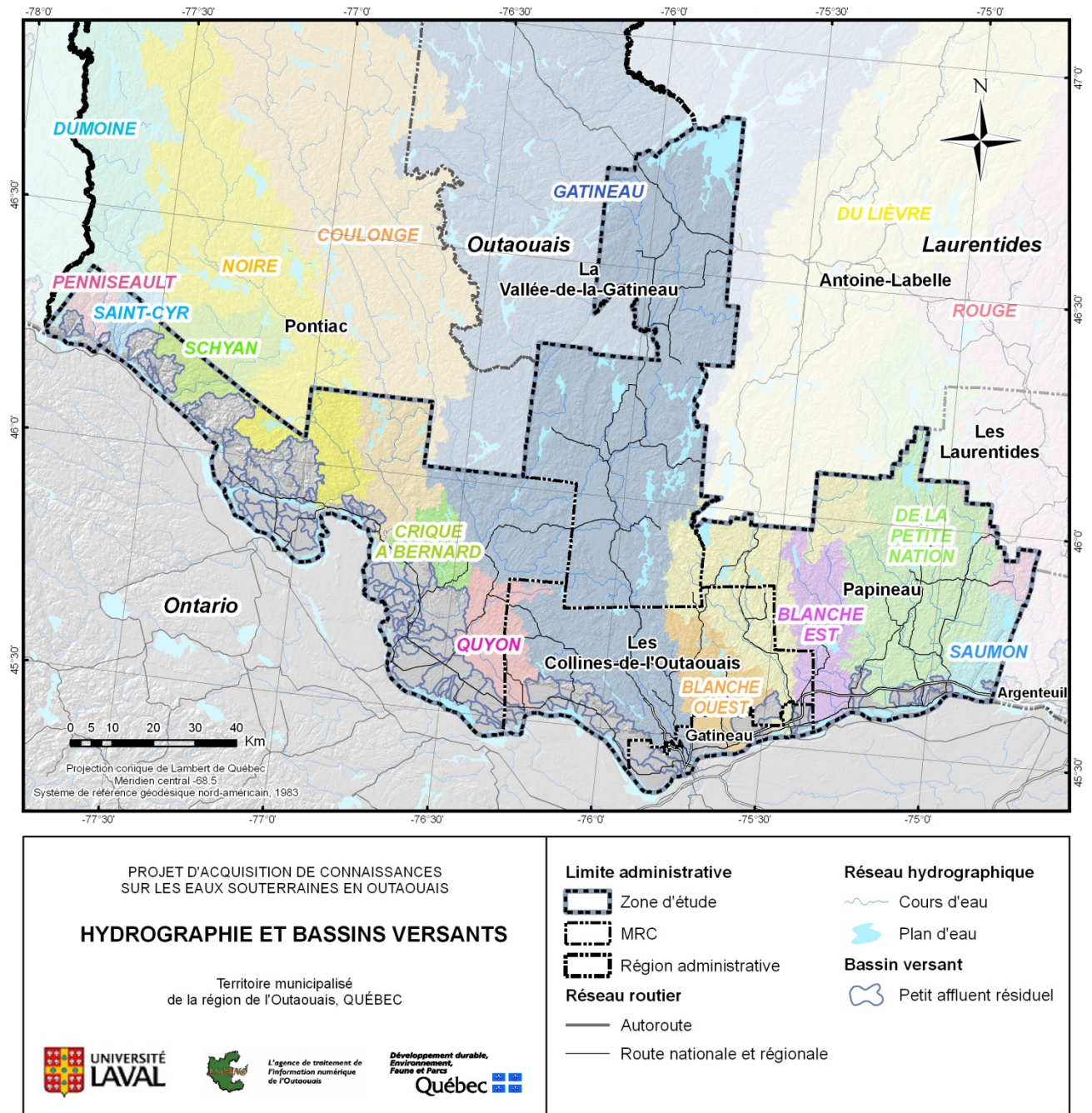


Figure 1.4 : Représentation de l'hydrographie et des bassins versants (Cartes 5 et 6)

Le PACES-OUT compte 15 bassins versants de niveau 2 tel que défini par le CEHQ, c'est-à-dire ayant leur exutoire au niveau de la rivière des Outaouais. Le Tableau 1.3 détaille les superficies de ces 15 bassins versants, en plus de celui de la rivière des Outaouais. Trois (3) organismes de bassins versants (OBV) se partagent la gestion des bassins versants en Outaouais : l'Agence de bassin versant des 7 (ABV des 7), le Comité de bassin versant de la rivière du Lièvre (COBALI) et l'Organisme de bassins versants des rivières Rouge, Petite Nation et Saumon (OBV RPNS). Ces organismes ont le mandat d'assurer la gestion intégrée de l'eau et des milieux de vie, en mobilisant les acteurs et les usagers dans un processus de concertation et de planification. La mission des OBV vise la protection, l'amélioration et la mise en valeur de la ressource en eau. Pour ce faire, ils élaborent, mettent à jour et assurent la mise en œuvre des plans directeurs de l'eau.

Tableau 1.3 : Superficie des bassins versants sur le territoire à l'étude

Rivière	Superficie du bassin versant	Superficie sur le territoire à l'étude		Organisme responsable
	(km ²)	(km ²)	(%) **	
Outaouais (des) *	96 198	2 438	17,7	ABV des 7
Rouge	5 549	128	0,9	OBV RPNS
Saumon	282	242	1,8	
Petite Nation (de la)	2 260	1 546	11,2	
Blanche Est	553	551	4,0	COBALI
Lièvre (du)	9 485	1 197	8,7	ABV des 7
Blanche Ouest	434	434	3,2	
Gatineau	23 840	5 234	38,0	
Quyón	418	418	3,0	
Crique-à-Bernard	231	231	1,7	
Coulonge	5 225	505	3,7	
Noire	2 645	420	3,1	
Schyan	562	171	1,2	
Saint-Cyr	170	104	0,8	
Penniseault	135	118	0,9	
Dumoine	4 339	25	0,2	

Notes : * toutes les rivières subséquentement mentionnées sont des affluents de la rivière des Outaouais

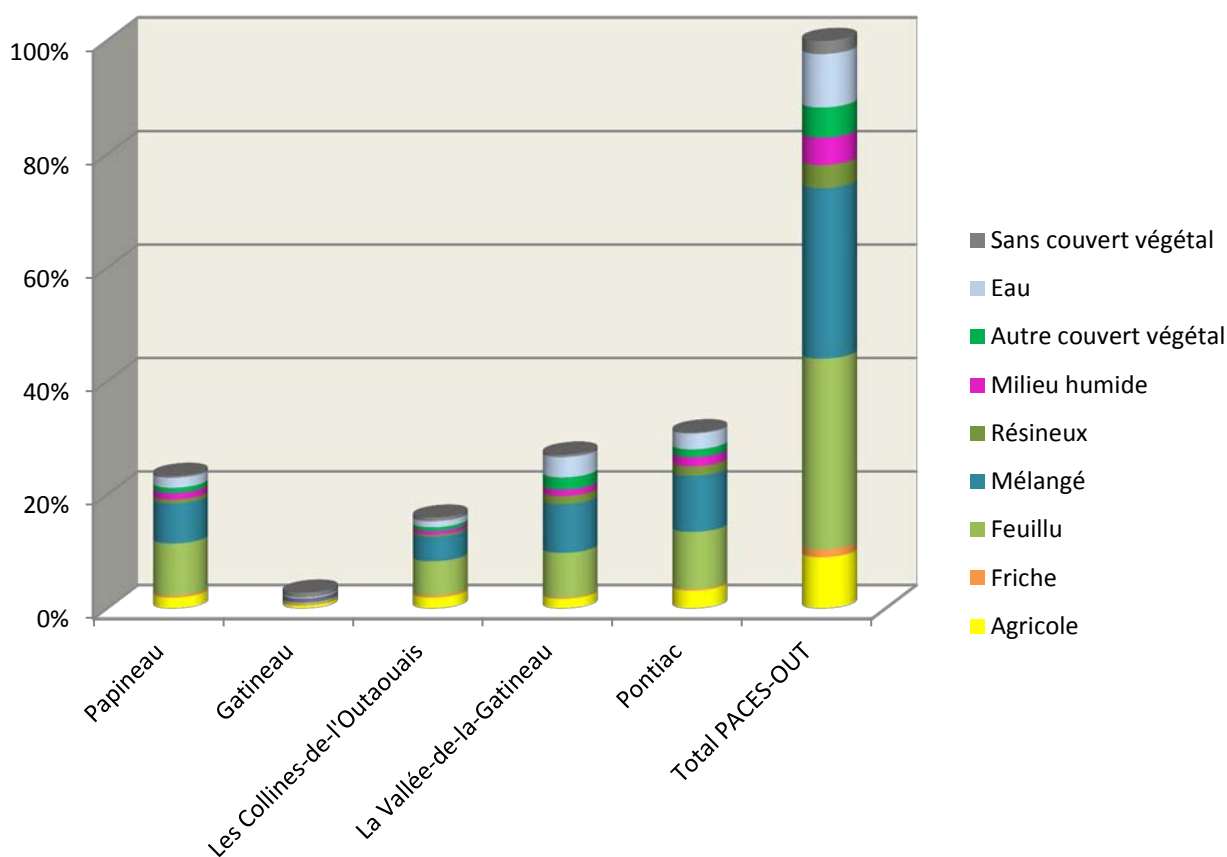
** rapport entre la superficie du bassin versant sur le territoire à l'étude et la superficie totale du territoire à l'étude

Sources : MDDEFP, 2011. SDA (MRN, 2010). Adapté par L'ATINO, 2013.

1.4.4 Couverture végétale

Les différentes catégories de couverture végétale sont illustrées à la Carte 8 (en annexe cartographique distincte du rapport) et en catégories généralisées à la Figure 1.6. Les données proviennent d'un amalgame de sources d'informations afin de bien représenter la réalité du territoire à l'étude. Ainsi, le Système d'information écoforestière (SIEF) du MRN (2005) représente la principale source d'informations sur laquelle s'ajoutent celles de la Base de données de cultures généralisées (BDCG) de la Financière agricole du Québec (2012) et la localisation des milieux humides. L'Annexe 1 : Méthodologie de classification de l'occupation du sol et de la couverture végétale, présente l'ensemble des informations sur l'assemblage des données et la définition des catégories pour la couverture végétale. La cartographie des milieux humides, dont la méthodologie est disponible à l'Annexe 2 : Méthodologie de classification des milieux humides, a été produite par Canards Illimités Canada (CIC) et complétée par L'ATINO (voir section 1.4.5).

La Figure 1.5 illustre la répartition des grandes catégories de couvert végétal par MRC. Le couvert forestier a été discriminé selon la maturité et la densité des peuplements afin de répondre aux besoins de la modélisation de la recharge qui nécessite l'évaluation de l'indice de surface foliaire et l'indice de profondeur d'évaporation (section 4.9).



Sources : SIEF, 2005 ; BDCG, 2012 et CIC, 2007. Adapté par L'ATINO, 2012.

Figure 1.5 : Couverture végétale sur le territoire à l'étude, par MRC et ville

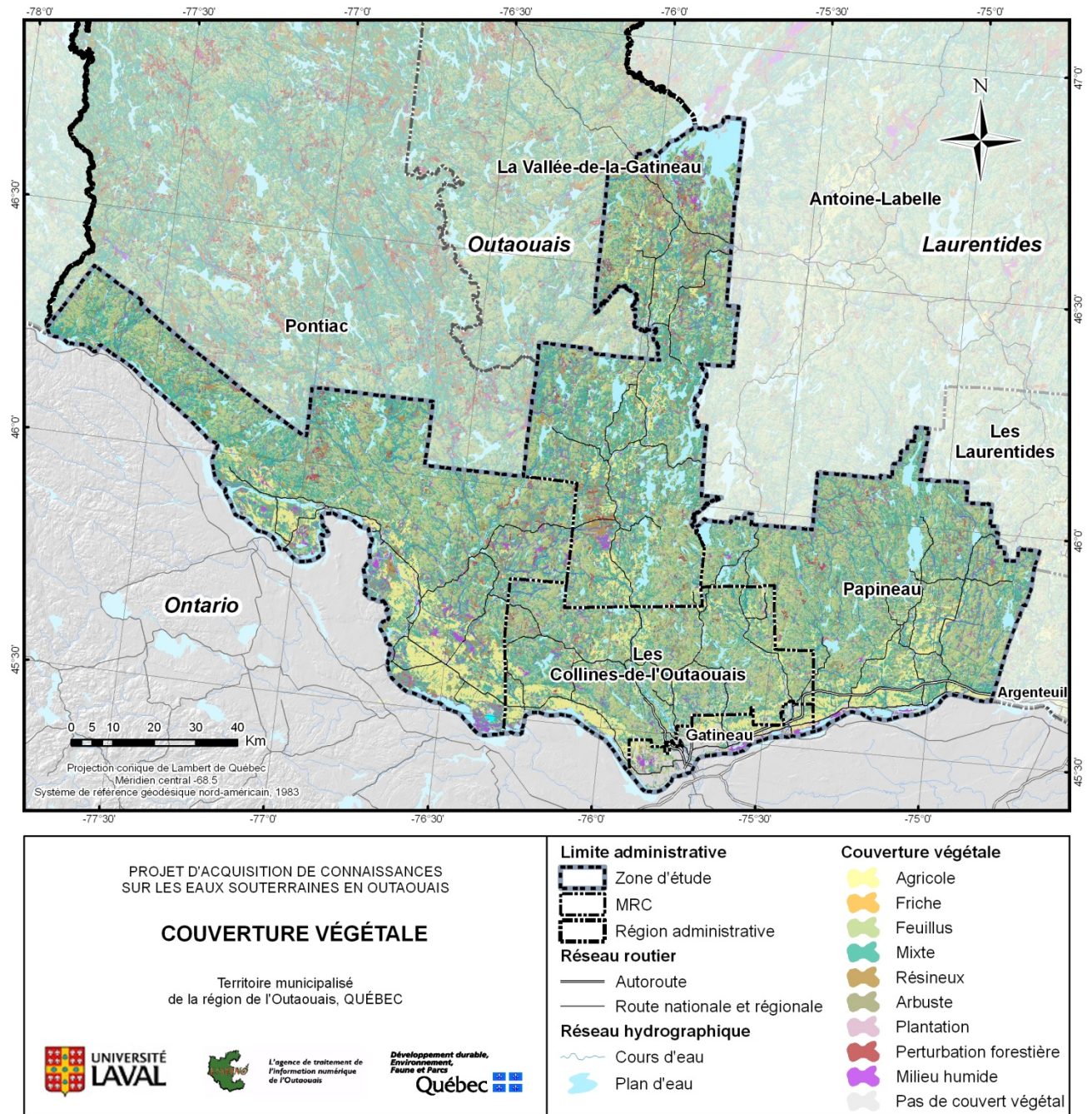
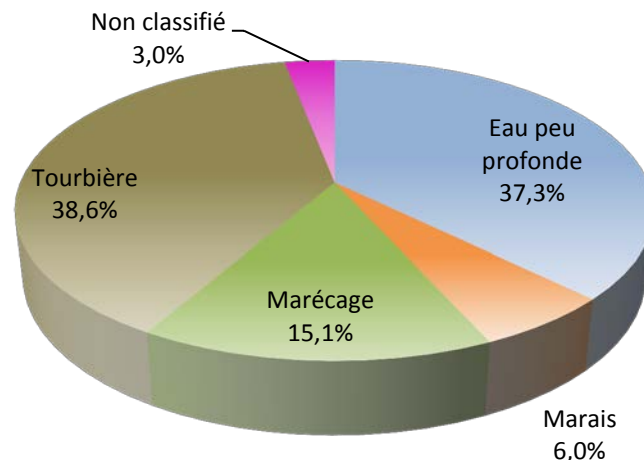


Figure 1.6 : Représentation de la couverture végétale (Carte 8)

Le couvert forestier couvre près des trois quarts (73 %) du territoire à l'étude avec une dominance pour les feuillus (33,6 %) et la forêt mélangée (30,0 %). La forêt de résineux, les arbustes, les plantations et les perturbations forestières complètent le couvert forestier. Le couvert forestier est dominant dans toutes les MRC mais ne couvre que 24,7% du territoire de la Ville de Gatineau. Le couvert agricole incluant les friches, est particulièrement important dans la MRC des Collines-de-l'Outaouais et la Ville de Gatineau et occupe 10,3 % du territoire à l'étude. Les milieux humides occupent 4,8 % du territoire à l'étude. La catégorie « Sans couvert végétal » correspond aux zones urbaines et périurbaines, concentrées dans la Ville de Gatineau et dans la MRC des Collines-de-l'Outaouais.

1.4.5 Milieux humides

Les milieux humides illustrés sur la Carte 9 (en annexe cartographie distincte du rapport) et la Figure 1.8 proviennent d'un amalgame entre les données de Canards Illimités Canada (CIC), disponibles en bordure de la rivière des Outaouais et une adaptation de la méthodologie de Boulfroy (2012) pour une reclassification du SIEF mettant l'accent sur les milieux humides. Cette combinaison permet de pallier l'imprécision des données de CIC dans les hautes terres. L'Annexe 2 : Méthodologie de classification des milieux humides présente plus de détails sur la méthodologie d'assemblage des données pour les milieux humides. Ces derniers se composent : d'eau peu profonde, de marais, de marécage, de tourbière et de milieux humides non classés (Figure 1.7).



Sources : CIC, 2007 et L'ATINO. 2012.

Figure 1.7 : Type de milieux humides sur le territoire à l'étude

Certains couverts forestiers ont été classés comme étant des milieux humides, justifiant ainsi les écarts considérables entre les statistiques présentées dans cette section (6,9 % de milieux humides sur le territoire à l'étude) et celles présentées aux sections 1.4.4 et 1.4.9 portant respectivement sur la couverture végétale et l'occupation du sol (4,8 % de milieux humides). Afin de bien comprendre les différences entre les 2 interprétations des milieux humides, il est nécessaire de se référer à l'Annexe 1 : Méthodologie de classification de l'occupation du sol et de la couverture végétale puis à l'Annexe 2 : Méthodologie de classification des milieux humides.

Les milieux humides inventoriés sur le territoire à l'étude représentent 960 km² (6,9 %), dont 602 km² (4,4 %) en milieu terrestre. Le Tableau 1.4 présente l'importance relative de chaque type de milieux humides par MRC et ville. Les zones d'eau peu profonde, les marais et les marécages se concentrent massivement le long de la rivière des Outaouais, alors que les tourbières sont plutôt présentes à l'intérieur des terres. Le marais des Balbuzards, dans la Ville de Gatineau, est le plus important milieu humide terrestre sur le territoire du PACES-OUT.

Tableau 1.4 : Répartition des types de milieux humides, par ville et MRC

Milieu humide	Papineau	Gatineau	Les Collines-de-l'Outaouais	La Vallée-de-la-Gatineau	Pontiac	Total, territoire à l'étude	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(km ²)	(%)
Eau peu profonde	9,5	1,1	6,8	8,9	11,0	358	37,3
Marais	1,8	1,2	0,3	0,1	2,7	57	6,0
Marécage	1,6	1,7	0,9	5,5	5,4	145	15,1
Tourbière	8,3	0,1	3,8	16,0	10,5	371	38,6
Non classé	0,6	0,0	0,5	0,9	1,0	29	3,0
TOTAL	21,8	4,0	12,2	31,4	30,6	960	100,0

Sources : CIC, 2007 et L'ATINO, 2012.

.

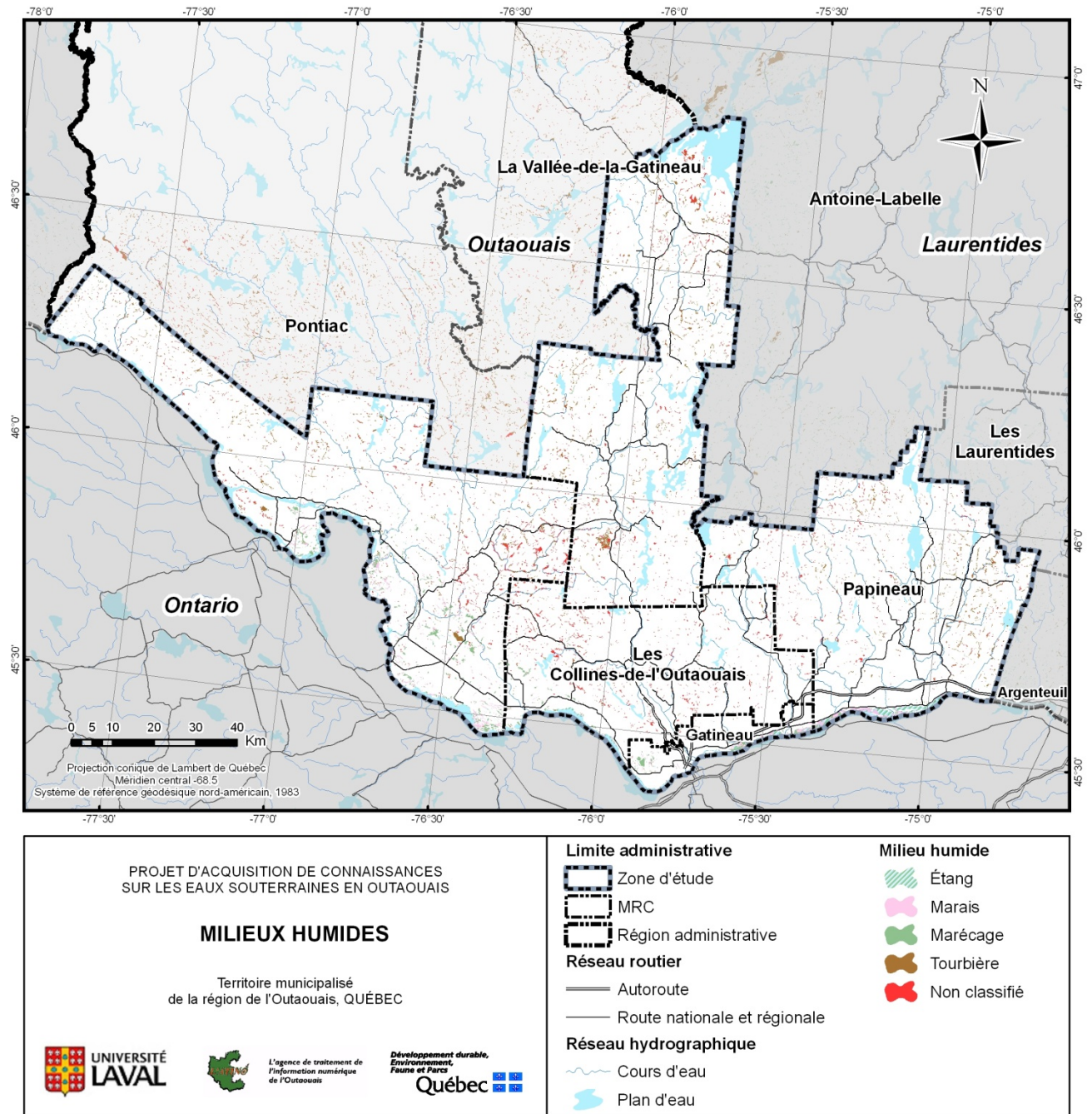


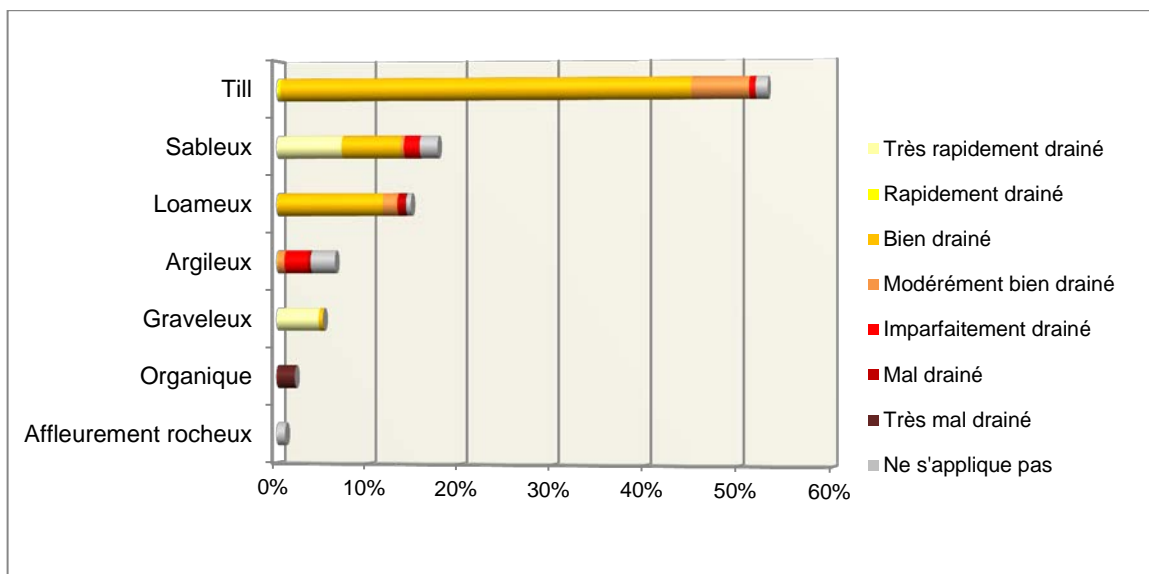
Figure 1.8 : Représentation des milieux humides (Carte 9)

1.4.6 Pédologie

La Carte 11 (en annexe cartographique distincte du rapport) et la Figure 1.10 représentent la pédologie du territoire municipalisé de l'Outaouais. Les sols y sont illustrés en fonction de leur texture et leur capacité de drainage. La pédologie résulte d'un amalgame de données puisqu'aucune source de données ne couvre le territoire du PACES-OUT dans son ensemble. La méthodologie sur l'assemblage des données des cartes pédologiques de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA, 1 / 20 000), des dépôts de surface du SIEF (1 / 20 000) et de la Base nationale de données sur les sols (BNDS) d'Agriculture Canada (1 / 1 000 000) est détaillée à l'Annexe 3 : Méthodologie de classification des unités pédologiques.

Les données de l'IRDA couvrent l'essentiel du territoire à l'étude (79,4 %), alors que celles du SIEF couvrent 20,5 % des unités pédologiques et celles de la BNDS, uniquement 0,1 %. Il importe de mentionner que dans la classification de l'IRDA, un sol graveleux ne comporte pas nécessairement une proportion élevée de gravier.

Les buttes et les flancs des collines du Bouclier canadien présentent généralement des sols bien drainés issus de dépôts de till (54,4 %). Les sols sableux (12,2 %), très rapidement drainés, les sols loameux (11,7 %) bien drainés et les sols graveleux très rapidement drainés (4,6 %) occupent généralement le fond des vallées laurentiennes. Les Basses-terres du Saint-Laurent sont dominées par des sols argileux imparfaitement drainés (22,8 %) dans la partie est du territoire à l'étude, montrant une transition puis une dominance des sols sableux très rapidement drainés à bien drainés (30,3 %) vers l'ouest. La Figure 1.9 informe sur la proportion des textures et leur capacité de drainage associée pour tout le territoire à l'étude.



Sources : IRDA, SIEF et BNDS. Adapté par L'ATINO, 2013.

Figure 1.9 : Texture et drainages des sols sur le territoire à l'étude

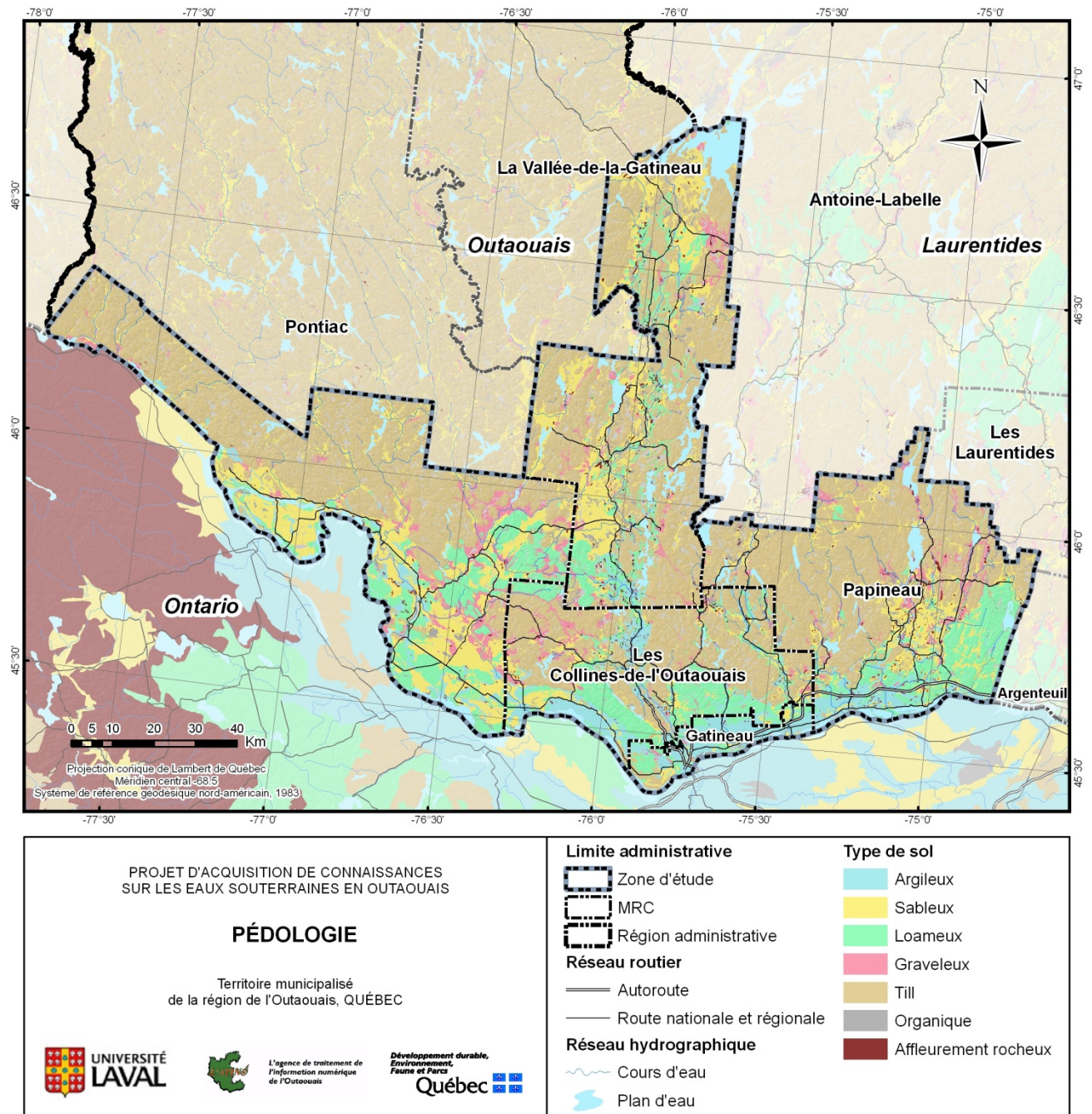


Figure 1.10 : Représentation de la pédologie (Carte 11)

1.4.7 Démographie

Le dernier recensement de Statistique Canada (2011) établit la population du territoire du PACES-OUT à 367 770 personnes (Tableau 1.5). La Ville de Gatineau accueille 265 349 habitants, soit 72,2 % de la population totale, représentant une densité de 697 habitants/km². La MRC périurbaine des Collines-de-l'Outaouais accueille 12,6 % de la population totale avec une densité de 21 habitants/km². Les MRC rurales de Papineau, La Vallée-de-la-Gatineau et Pontiac combinent 15,2 % de la population pour une densité de 5 habitants/km².

Tableau 1.5 : Population du territoire à l'étude

MRC ou territoire équivalent	Population	Densité de population
	(n hab.)	(hab./km ²)
Papineau	22 541	7
Gatineau	265 349	697
Les Collines-de-l'Outaouais	46 393	21
La Vallée-de-la-Gatineau	19 129	5
Pontiac	14 358	3
Total, territoire à l'étude	367 770	27

Sources : Statistique Canada, 2011. SDA (MRN), 2010. Adapté par L'ATINO, 2013

Les perspectives démographiques 2006-2031 de l'Institut de la statistique du Québec (ISQ, 2009) indiquent que la population devrait augmenter pour toutes les MRC, de 7,3 % dans la MRC La Vallée-de-la-Gatineau jusqu'à 29,7 % dans la MRC des Collines-de-l'Outaouais, pour une moyenne de 18,8 % sur tout le territoire à l'étude. À titre de comparaison, l'ensemble de la population du Québec devrait croître de 15,8 % pendant cette même période de référence de 25 ans.

1.4.8 Affectations du territoire et aires protégées

L'affectation du territoire, indication formelle de la part des MRC de la façon dont elles entendent utiliser le territoire, est présentée à la Carte 10a (en annexe cartographique distincte du rapport) et à la Figure 1.11. Les données proviennent de la numérisation des grandes affectations des schémas d'aménagement du territoire de chacune des MRC effectuée par le Système d'information et de gestion en aménagement du territoire (SIGAT) du MAMROT (2012). Elles distinguent 10 affectations dont les superficies sont présentées au Tableau 1.6.

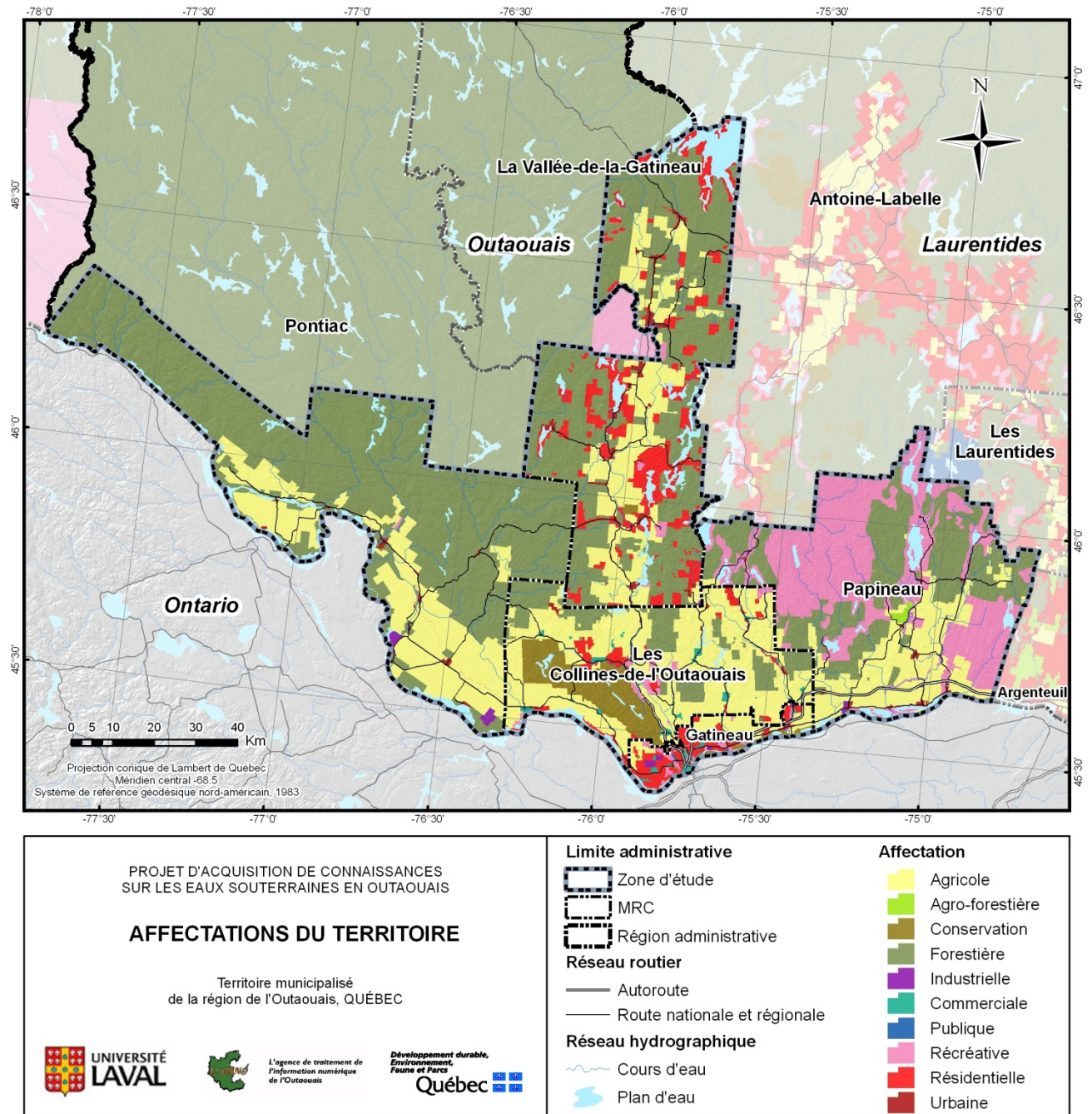


Figure 1.11 : Représentation des affectations du territoire (Carte 10A)

Afin de bien refléter la vision d'aménagement et de développement des MRC pour leur territoire, aucun effort d'harmonisation n'a été fait sur les données. Cette mention importante explique des incongruités observables sur le territoire. Le parc de la Gatineau, à la fois sur le territoire de la Ville de Gatineau et sur celui de la MRC des Collines-de-l'Outaouais, possède une affectation récréative dans la première et une affectation de conservation dans la seconde. De la même manière, les pourtours de lacs dans la MRC La Vallée-de-la-Gatineau sont classés « affectation résidentielle », ce qui n'est pas comparable aux affectations résidentielles dans la Ville de Gatineau par exemple.

Le nord du territoire à l'étude est clairement dominé par les affectations forestière et récréative (réserve faunique et villégiature). Les affectations agricoles se concentrent dans les vallées des grandes rivières, soit celles de l'Outaouais, Gatineau, du Lièvre et la portion sud de la Petite Nation. La Ville de Gatineau regroupe l'essentiel de l'affectation urbaine.

Tableau 1.6 : Affectation du territoire, par ville et MRC

Affectation	Papineau	Gatineau	Les Collines-de-l'Outaouais	La Vallée-de-la-Gatineau	Pontiac	Total, territoire à l'étude	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(km ²)	(%)
Agricole	20,3	35,6	33,5	20,6	22,6	3 231,3	23,6
Agroforestière	0,4	-	-	-	-	12,3	0,1
Forestière	31,4	-	17,4	47,1	76,2	6 370,9	46,5
Conservation	-	6,6	15,6	2,8	-	464,9	3,4
Récréative	47,1	9,6	2,0	2,3	0,3	1 680,3	12,3
Résidentielle	-	37,7	29,6	25,4	-	1 723,4	12,6
Urbaine	0,6	-	-	1,7	0,4	99,0	0,7
Commerciale	-	5,6	1,9	-	-	61,8	0,5
Industrielle	0,2	4,3	-	-	0,5	41,6	0,3
Publique	-	0,6	-	-	-	2,3	0,0

Les aires protégées illustrent les territoires juridiques voués à la protection et au maintien de la diversité biologique ainsi que des ressources naturelles et culturelles qui y sont associées (Carte 10b en annexe cartographique distincte du rapport et Figure 1.12). Les données proviennent du MDDEFP (2012b). Par ailleurs, les territoires à statut particulier sont également représentés sur la Carte 10b et la Figure 1.12. Ces derniers correspondent à des pourvoies, des réserves fauniques, des zones d'exploitation contrôlées (ZEC) ou encore à des aires fauniques communautaires. Les données sur les territoires à statut particulier proviennent du MRN (2012). Le Tableau 1.7 détaille chaque catégorie d'aire protégée et de territoire à statut particulier par MRC.

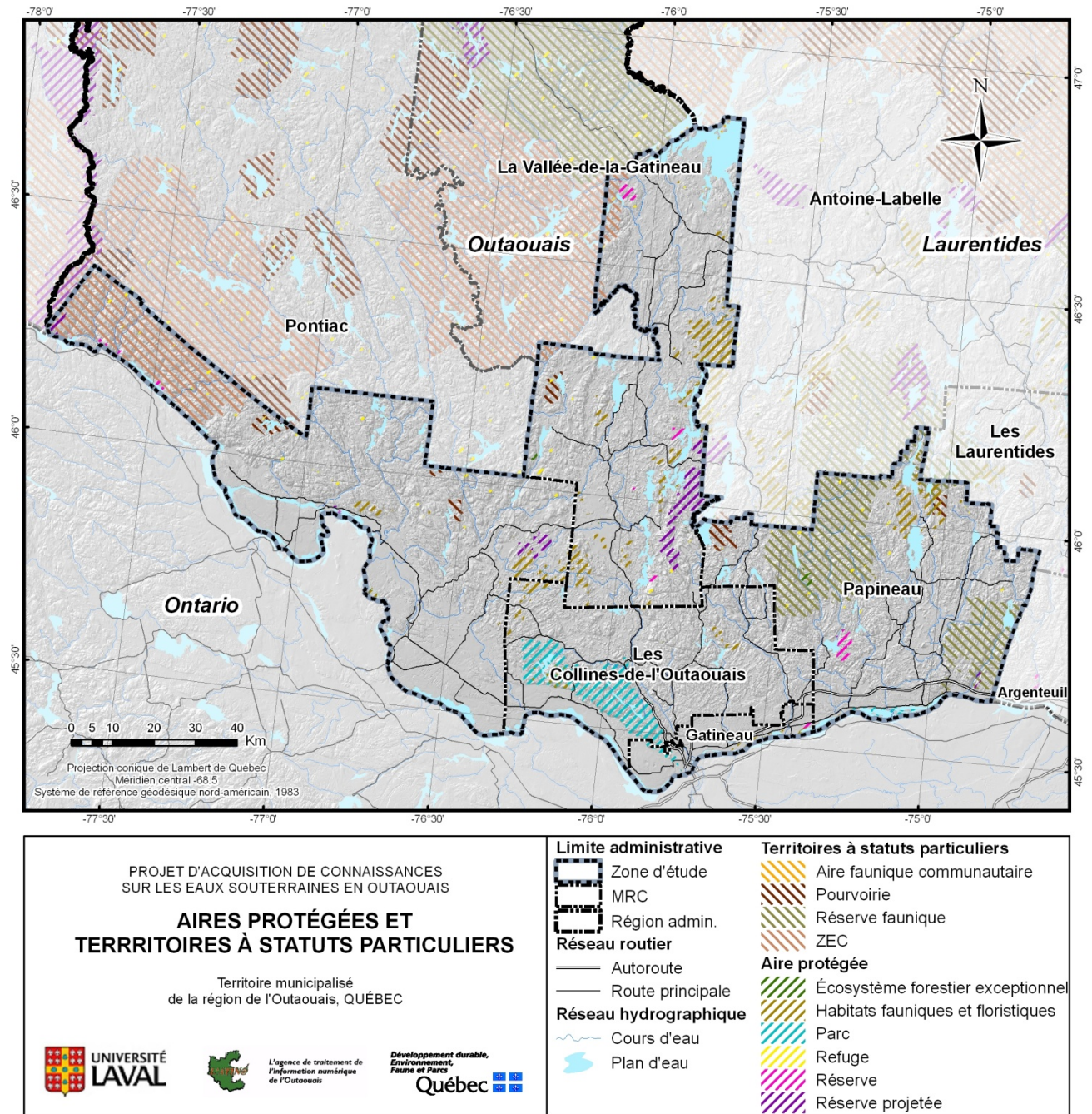


Figure 1.12 : Représentation des aires protégées et territoires à statuts particuliers (Carte 10B)

Le territoire du PACES-OUT compte 1 202 km² (8,7 %) d'aires protégées et 1 556 km² (11,3 %) de territoires à statuts particuliers. Le parc de la Gatineau (361 km²), sous la responsabilité de la Commission de la capitale nationale, est l'aire protégée occupant la plus grande superficie, suivi de l'aire de confinement du cerf de Virginie du Lac-des-Trente-et-Un-Milles (199 km²). La réserve faunique de Papineau-Labelle, les ZEC Saint-Patrice et Rapides-des-Joachims ainsi que la réserve Kenauk sont les principaux territoires à statut particulier. Certains territoires sont à la fois des aires protégées et à la fois des territoires à statuts particuliers, notamment certains ravages de cerf de Virginie (aire protégée) dans la réserve faunique de Papineau-Labelle (territoire à statut particulier).

Tableau 1.7 : Aire protégée et territoire à statut particulier sur le territoire à l'étude, par ville et MRC

Aire protégée	Papineau	Gatineau	Les Collines-de-l'Outaouais	La Vallée-de-la-Gatineau	Pontiac	Total, territoire à l'étude	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(km ²)	(%)
Aire protégée							
HFF *	10,1	2,7	6,5	18,9	6,4	537	3,9
Parc	2,03	1,1	28,4	-	-	382	2,8
Refuge	1,6	-	0,1	1,0	1,8	54	0,4
EFE **	0,7	-	-	0,7	0,1	19	0,1
Réserve	1,7	0,2	-	2,3	0,8	61	0,4
Réserve projetée	0,5	-	-	8,4	3,5	149	1,1
TOTAL	17,0	4,0	35,0	31,3	12,6	1 202	8,7
Territoire à statut particulier							
ZEC	-	-	-	7,0	40,6	741	5,4
Réserve faunique	44,3	-	-	-	-	690	5,0
Pourvoirie	3,1	-	-	1,7	3,2	125	0,9
TOTAL	47,4	-	-	8,7	43,8	1 556	11,3

Notes : * HFF = Habitat faunique et floristique; ** EFE = Écosystème forestier exceptionnel
Sources : MDDEFP et MRN. Adapté par L'ATINO, 2013.

1.4.9 Occupation du sol

L'occupation du sol (Carte 7 et Figure 1.13) renseigne sur les usages réels du territoire. Les données proviennent d'un amalgame de sources d'informations afin de bien représenter la réalité du territoire. Ainsi, le SIEF du MRNF (2005) représente l'information cartographique de base sur laquelle s'ajoutent les informations de la BDCG (Financière agricole du Québec, 2012) et la localisation des milieux humides de Canards Illimités Canada et L'ATINO, telle que détaillée à l'Annexe 2 : Méthodologie de classification des milieux humides. L'Annexe 1 : Méthodologie de classification de l'occupation du sol et de la couverture végétale présente plus d'informations sur l'assemblage des données et la définition des catégories pour l'occupation du sol.

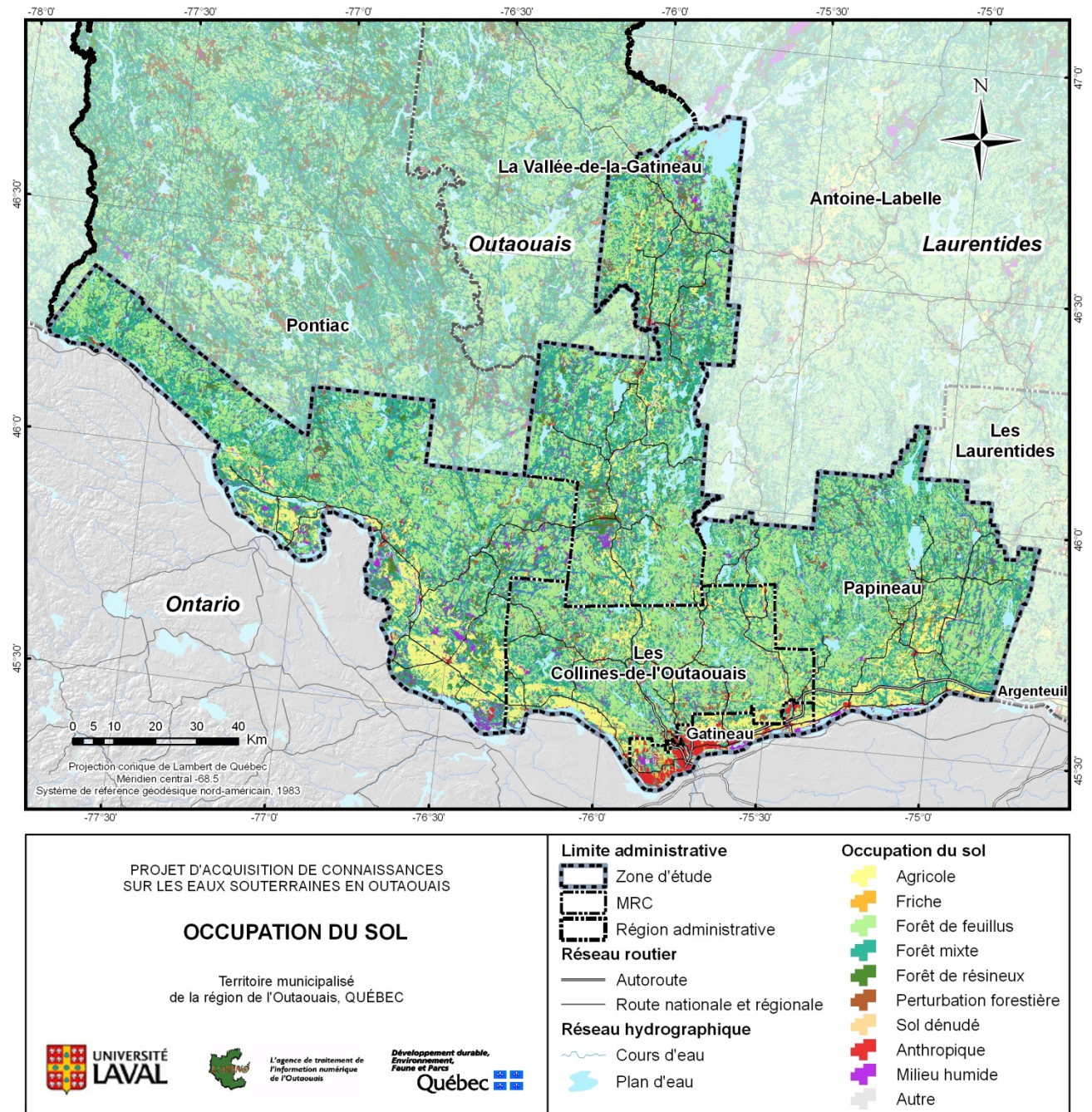


Figure 1.13 : Représentation de l'occupation du sol (Carte 7)

Le Tableau 1.8 indique les superficies de chaque classe d'occupation du sol sur le territoire à l'étude. Le territoire du PACES-OUT a la particularité de présenter de grandes superficies forestières (72,1 % se détaillant en 36,2 % de feuillus, 31,3 % de mélangés et 4,6 % de résineux) ainsi que de grandes étendues d'eau (9,3 %). L'agriculture incluant les friches couvre 10,3 % du territoire. Les milieux anthropiques occupent 2 % du territoire à l'étude et se concentrent dans la Ville de Gatineau. Les statistiques pour la couverture végétale présentées à la section 1.4.4 diffèrent légèrement de celles pour l'occupation du sol, car l'analyse du couvert végétal raffine certaines classes propres à la foresterie alors que d'autres classes sont regroupées différemment. L'Annexe 1 : Méthodologie de classification de l'occupation du sol et de la couverture végétale explique ces différences méthodologiques.

Tableau 1.8 : Superficie de l'occupation du sol, par ville et MRC

Occupation du sol	Papineau	Gatineau	Les Collines-de-l'Outaouais	La Vallée-de-la-Gatineau	Pontiac	Total, territoire à l'étude	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(km ²)	(%)
Grande culture	2,1	5,0	2,5	0,8	3,5	320	2,3
Culture maraîchère	0,1	0,1	-	-	-	4	0,1
Autre culture	5,6	12,7	9,6	5,5	6,5	920	6,7
Friche	1,6	7,0	2,3	0,7	0,7	183	1,3
Feuillu	41,0	15,5	40,8	32,8	34,9	4 975	36,2
Mélangé	31,1	12,6	27,5	34,0	32,7	4 309	31,3
Résineux	3,7	1,1	2,4	6,0	5,5	631	4,6
Perturbation forestière	0,6	0,2	0,5	1,8	1,2	152	1,1
Anthropique peu dense	0,2	1,9	0,7	0,6	0,2	62	0,5
Anthropique dense	0,9	28,1	1,8	0,6	0,3	209	1,5
Milieu humide	5,0	8,1	3,9	4,2	5,3	659	4,8
Sol dénudé	0,1	-	0,1	-	-	6	0,1
Autre	0,3	0,8	0,7	0,4	0,1	46	0,3
Eau	7,8	7,0	7,1	12,7	9,0	1 286	9,3

Sources : SIEF, BDCG, CIC. Adapté par L'ATINO, 2012.

2 ACQUISITION DE DONNÉES

Lors de la Phase I (Comeau *et coll.*, 2011) et de la Phase II (Comeau *et coll.*, 2012a) 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-OUT. Cette base de données a servi pour les analyses hydrogéologiques effectuées dans le cadre de ce projet ainsi que pour 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 de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT, telle que décrite dans cette section, diffère quelque peu de celle de la base de données qui sera diffusée par le MDDEFP étant donné que les outils informatiques utilisés sont différents. Le contenu demeure cependant identique. Le chapitre 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 pour le système d'information géographique (SIG) (section 1.4), plusieurs données ponctuelles en lien avec l'hydrogéologie ont été compilées dans la base de données hydrogéologiques PACES-OUT. Ces informations hydrogéologiques proviennent de diverses sources telles que des bases de données existantes ou de rapports techniques, publics ou privés. La base de données hydrogéologiques PACES-OUT contient non seulement de l'information à l'intérieur de la région à l'étude, mais aussi dans les régions 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 (68,9 % des 47 150 objets). Il faut également mentionner l'apport important de données de l'Université du Québec à Montréal, constituées en majeure partie d'observations d'affleurement, récoltées lors de la cartographie des formations superficielles de la région de l'Outaouais (23,3 %). Le programme H₂O-Chelsea, la Coalition canadienne de l'énergie géothermique (CCÉG) et les travaux de terrain de l'Université Laval dans le cadre du projet ont aussi contribué à la base de données PACES-OUT (2,1 %). L'information provenant de rapports techniques (5,7 %) 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	19 467
Université du Québec à Montréal (cartographie des formations superficielles)	11 016
Système d'informations géominières (SIGEOM) du MRN	10 177
Base de données de forage du MTQ	2 826
Rapports techniques de consultants (commandés par les villes, municipalités, ministères ou autres organismes publics ou privés)	2 677
H ₂ O-Chelsea	676
Université Laval	186
Coalition canadienne de l'énergie géothermique (CCÉG)	115
Base de données du milieu aquatique (BDMA) du MDDEFP	10
Total	47 150

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 l'Outaouais ont été des collaborateurs de premier plan à cet effet. 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 WESA Envir-Eau inc., firme retenue pour la collecte de l'information auprès des villes et municipalités, 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 :

- Études hydrogéologiques,
- Approvisionnement en eau potable,
- Études géotechniques,
- Caractérisations environnementales,
- Réhabilitation de site contaminé,
- Études géophysiques,
- Capacité de production d'un aquifère,
- Demandes 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
- Demandes 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 les différentes municipalités et MRC de la région de l'Outaouais, incluant la Ville de Gatineau, ont contribué pour une large part (42,1 % des 374 rapports), suivis des ministères provinciaux (32,0 %), de la Commission de la capitale nationale (17,4 %), de la Société de transport de l'Outaouais (3,2 %) et d'autres institutions publiques ou privées (5,3 %).

Tableau 2.2 : Synthèse des rapports obtenus par source

Source	Nombre de rapports
Municipalités et MRC de l'Outaouais	112
MDDEFP	101
Commission de la capitale nationale	65
Ville de Gatineau	46
MTQ	18
Société de transport de l'Outaouais	12
Bureau d'audiences publiques sur l'environnement	6
Ministère de l'environnement de l'Ontario	3
Commissions scolaires de l'Outaouais	2
Club de golf Thurso	1
Ottawa Riverkeeper	1
Ressources naturelles Canada	1
MRN	1
Alja Développement	1
Université du Québec à Montréal	1
Coalition de citoyens contre le projet de méga dépotoir de Danford Lake	1
Conseil régional de l'environnement et du développement durable de l'Outaouais	1
Coopérative de la Solidarité en loisirs de La Pêche	1
Total	374

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-OUT (Comeau *et coll.*, 2011).

2.2 Travaux de terrain

L'objectif principal 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 (choc hydraulique)
 - o Essais d'infiltration
- Échantillonnage de l'eau souterraine

La localisation de l'ensemble de ces travaux est indiquée à la Figure 2.1. Le rapport de la Phase II (Comeau *et coll.*, 2012a) donne plus de détails sur les travaux de terrain réalisés dans le cadre du projet.

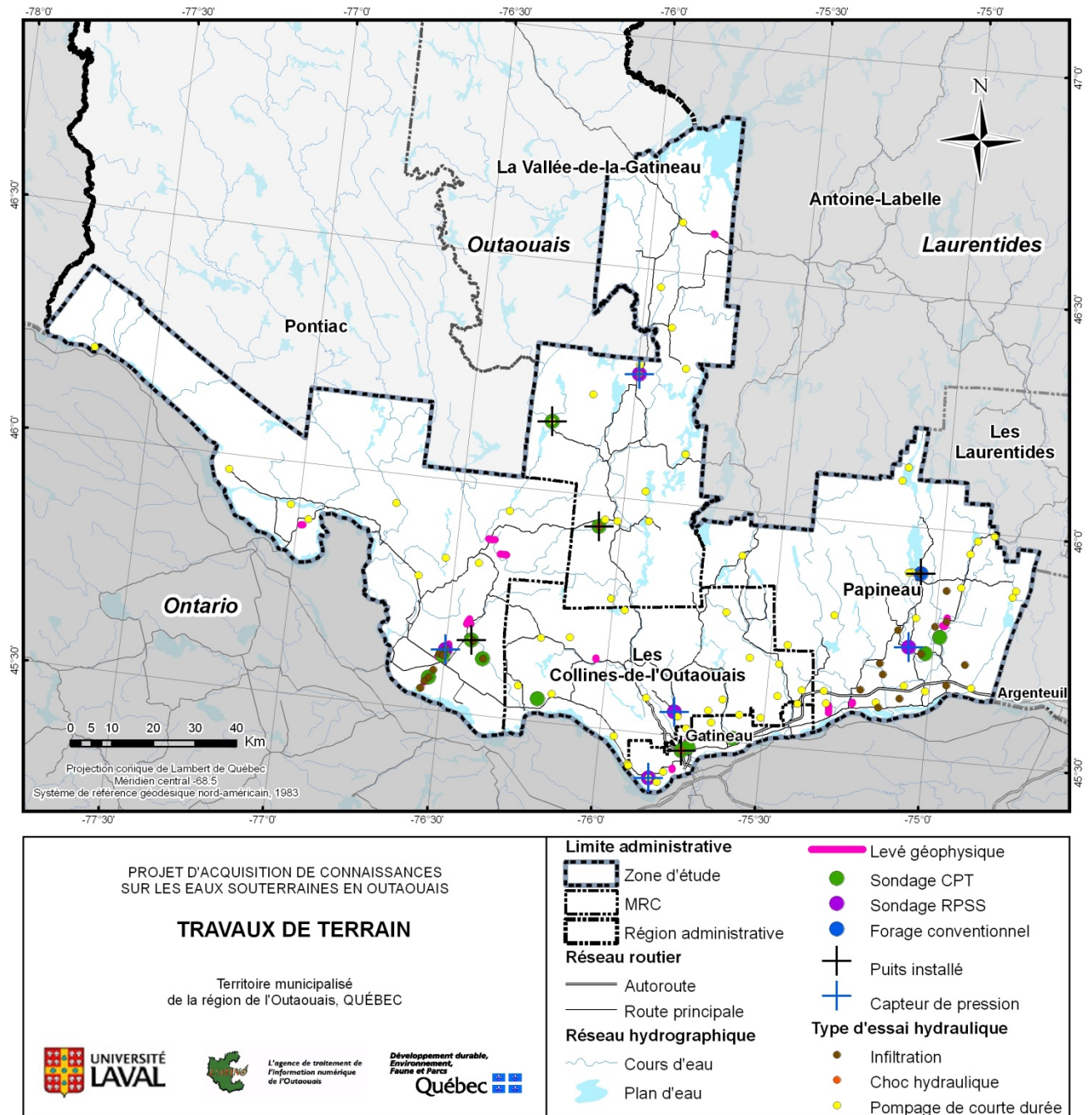


Figure 2.1 : Localisation des travaux de terrain effectués par l'Université Laval

2.2.1 Investigations hydrogéophysiques

Au cours de la campagne de terrain de l'été 2011 et 2012, 25 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.

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.

Préalablement à chaque levé effectué, la carte préliminaire Géologie du Quaternaire (Comeau *et coll.*, 2011) 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 dans le rapport II (Comeau *et coll.*, 2012a) et à l'Annexe 4 : Méthodologie pour la réalisation des travaux géophysiques.

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 : Coupes interprétatives des investigations hydrogéophysiques).

2.2.2 Sondages et forages

Des forages et des sondages ont été réalisés afin d'obtenir de l'information sur la nature des dépôts meubles et leurs épaisseurs dans des secteurs où l'information disponible était jugée insuffisante. Ces travaux visaient aussi à installer des puits d'observation. Les secteurs ciblés ont été déterminés à partir de l'information tirée des cartes préliminaires de la géologie du Quaternaire et de l'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles (Comeau *et coll.*, 2011). Les sondages et forages sont répartis sur l'ensemble du territoire de l'Outaouais et visent à représenter les différents contextes hydrostratigraphiques de la région et à compléter la couverture des secteurs où l'information est manquante. L'emplacement exact des travaux présentés à la Figure 2.1 dépend toutefois de certaines contraintes logistiques et administratives.

Cinq (5) forages conventionnels d'un diamètre de 15,24 centimètres (cm) ont été réalisés en novembre et décembre 2011 par Forage Géo-Pros Lapointe inc. à l'aide d'une foreuse de type rotative, modèle Foremost DR-24. 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 en juillet 2012. 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 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 à une profondeur prédéterminée. Une profondeur d'environ 40 m peut être atteinte dans des conditions optimales.

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.

Les rapports de forages et de sondages sont présentés à l'Annexe E2 : Rapports de forage et de sondage. Les descriptions stratigraphiques ont été intégrées à la base de données hydrogéologiques PACES-OUT et ont été priorisées lors des analyses hydrogéologiques en raison de leur plus grande fiabilité.

Dans le cas de 8 forages et sondages, il n'y a pas eu d'installation de puits, car aucun aquifère de dépôts meubles n'a été rencontré. Ils ont tout de même permis de recueillir de l'information pertinente sur la stratigraphie.

2.2.2.1 Installation de capteurs de pression dans les puits

Des capteurs de pression ont été introduits par l'Université Laval dans les 5 puits installés à la suite des forages conventionnels (indiqués à la Figure 2.1). L'objectif de ces installations est de mesurer les variations saisonnières du niveau d'eau. 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 à partir de décembre 2012. Les puits instrumentés seront ultérieurement cédés au MDDEFP et intégrés au Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (MDDEFP, 2013a).

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 4.7) 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 conventionnels et des sondages. La provenance de ces échantillons est indiquée à la Figure 2.1. Les résultats des 20 analyses granulométriques se retrouvent dans la base de données PACES-OUT.

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, qui 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 par l'Université Laval 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 (ou à choc hydraulique) et les essais d'infiltration. Leur localisation est présentée à la Figure 2.1. Les résultats des essais sont intégrés à la base de données hydrogéologiques PACES-OUT. Le rapport de la Phase II du projet (Comeau *et coll.*, 2012a) 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 pour la qualité de l'eau lors des campagnes de terrain des étés 2011 et 2012 (section 2.2.4). 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) (pour les aquifères 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 4.7).

2.2.3.2 Essais de perméabilité

Des essais de perméabilité (ou choc hydraulique) ont été effectués à l'été 2012 et 2013 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.

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, 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. Les résultats de ces essais ont aussi été compilés dans la base de données hydrogéologiques PACES-OUT et ont permis d'améliorer la qualité de l'estimation des conductivités hydrauliques des sols. Au cours de l'été 2011, 22 essais d'infiltration ont été réalisés et interprétés. Ces essais étaient localisés principalement dans la MRC Papineau et la MRC de Pontiac.

2.2.4 Échantillonnage d'eau souterraine

Les échantillons d'eau ont été recueillis lors des campagnes de terrain des étés 2011 (104 échantillons) et 2012 (35 échantillons). Les puits ont été échantillonnés suivant le «Protocole d'échantillonnage de l'eau souterraine» (Blanchette *et coll.*, 2010) préparé pour le GRIES. Les paramètres mesurés *in situ* ont été obtenus avec une sonde multiparamètre YSI Professional Plus®.

Une fois prélevés, les échantillons ont été conservés au frais puis envoyés dans un laboratoire accrédité par le MDDEFP pour l'analyse des paramètres physico-chimiques (Tableau 2.3). Les certificats d'analyse du laboratoire se trouvent en annexe électronique (Annexe E11 : Certificats d'analyses de la chimie de l'eau).

Tableau 2.3 : Paramètres chimiques analysés dans le cadre des travaux d'échantillonnage

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									
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				
Autres inorganiques									
Sulfures totaux									

Conformément au Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales (MDDEFP, 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.

Les résidents de la région de l'Outaouais exploitent généralement les aquifères de roc fracturé, car il s'agit souvent du seul type d'aquifère à proximité. C'est pour cette raison que la majorité des échantillons d'eau souterraine prélevés par l'Université Laval provient de puits forés dans le roc (71 %), principalement dans la Province de Grenville. Le reste des échantillons proviennent de puits crépinés dans les dépôts meubles (29%), à l'exception d'un seul dont l'origine était inconnue. La Figure 2.2 montre la répartition des échantillons dans la zone d'étude. La distribution, aussi homogène que possible, est sujette à l'occupation du territoire.

La qualité bactériologique de l'eau souterraine n'a pas été étudiée sur tout le territoire dans le cadre du PACES-OUT car ce type de paramètres est représentatif de conditions locales au puits de captage et non de la qualité régionale de l'eau souterraine. Cependant, dans la MRC des Collines-de-l'Outaouais, des analyses bactériologiques ont été réalisées sur des échantillons d'eau souterraine et d'eau de surface dans le cadre du Projet H₂O des Collines dont les résultats sont présentés par Fiset *et coll.*, 2012a et 2012b.

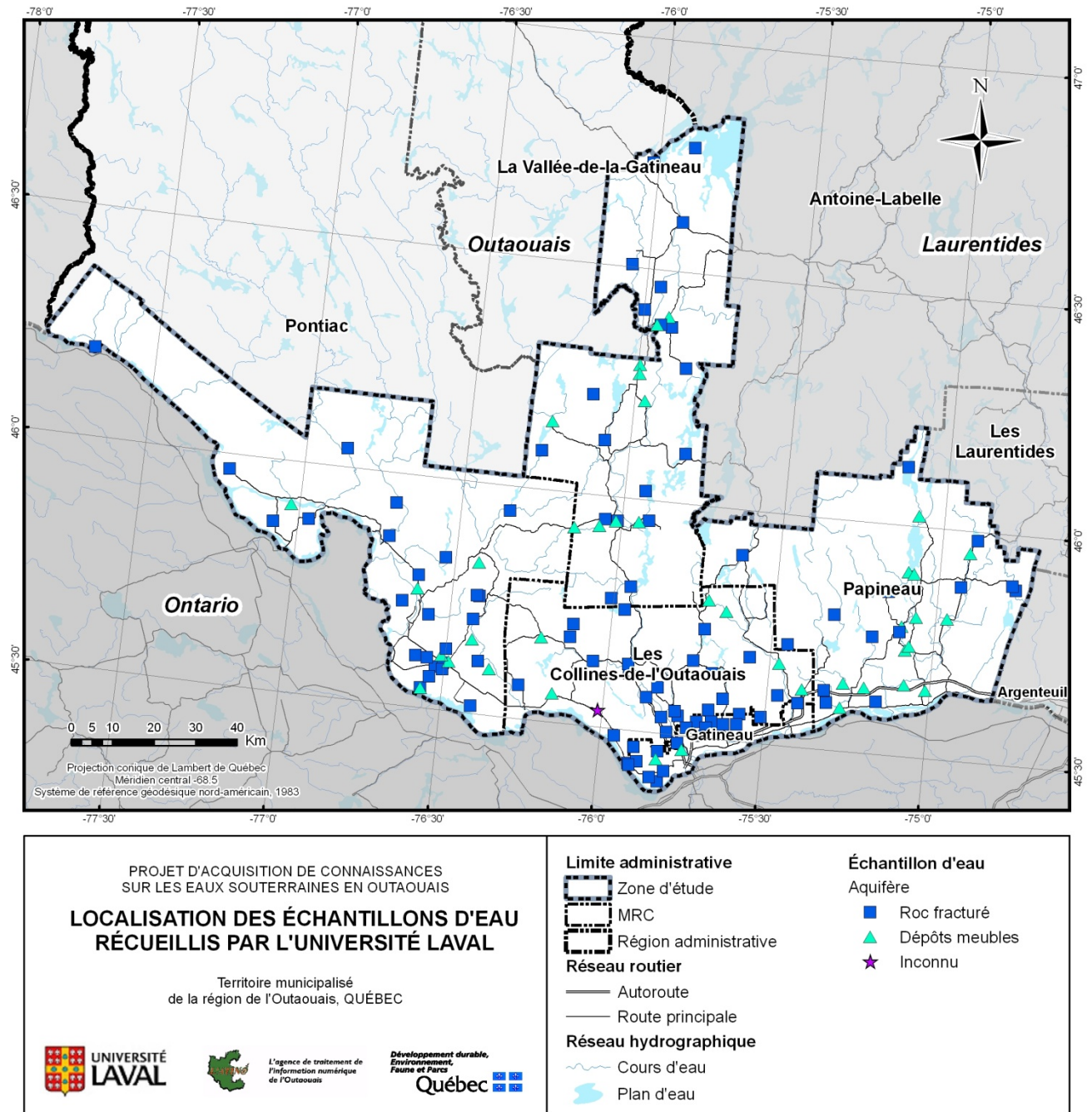


Figure 2.2 : Localisation des échantillons selon le type d'aquifère

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-OUT. Comme spécifiée précédemment, la structure de cette dernière diffère quelque peu de celle qui sera diffusée par le MDDEFP. La base de données hydrogéologiques PACES-OUT comprend des objets qui sont distingués selon leur type (Tableau 2.4) et pouvant être associés à de nombreuses observations (Tableau 2.5). 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 porte, non seulement sur l'information couvrant le territoire de l'Outaouais, mais aussi sur l'information couvrant les régions voisines qui se trouvent à l'intérieur des limites des cartes produites.

Près de la moitié des types d'objet sont des puits (46,0 % des 47 150 objets) (Tableau 2.4) et la plupart de ceux-ci sont des puits privés pour l'approvisionnement des résidences non raccordées à un réseau d'aqueduc. De nombreux affleurements sont répertoriés (36,5 %), provenant essentiellement du Système d'informations géominières (SIGEOM) du MRN et de la cartographie des formations superficielles par l'Université du Québec à Montréal. Des milliers de trous non aménagés (11,8 %), incluant les trous faits à la pelle mécanique, à la tarière ou par forage, ont servi à rapporter des informations hydrogéologiques. Les sondages géophysiques (2,1 %) et géotechniques (0,7 %) proviennent pour la plupart de la base de données du MTQ. Les sections stratigraphiques (2,0 %), informant sur la séquence des sédiments en profondeur, ont été réalisées par l'Université du Québec à Montréal. Plusieurs piézomètres conçus pour mesurer le niveau de l'eau souterraine ont été identifiés sur le territoire (0,7 %). Le reste des objets (0,2 %) retrouvés dans la base de données hydrogéologiques PACES-OUT correspondent à des stations d'échantillonnage d'eau de surface et des points de résurgences d'eau souterraine (ou sources).

Tableau 2.4 : Nombre d'objets de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT associés à chaque type d'objet

Type d'objet	Nombre
Puits	21 688
Affleurement rocheux	17 220
Trou non aménagé	5 542
Sondage géophysique	1 003
Section stratigraphique	955
Sondage géotechnique	334
Piézomètre	329
Station d'échantillonnage d'eau de surface	73
Résurgence d'eau souterraine	6
Total	47 150

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, les caractéristiques sur le type de pompe, la crépine, le tubage et la margelle sont compilées.

Plusieurs types d'observation sont rapportés dans la base de données hydrogéologiques PACES-OUT (Tableau 2.5). 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 2.5 : Nombre d'observations de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT associé à chaque type d'observation

Type d'observation	Nombre
Description stratigraphique	38 891
Niveau d'eau	16 874
Essai hydraulique	14 532
Analyse géochimique d'échantillon d'eau	4 065
Analyse granulométrique de sédiments	771

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 16 206 puits ou piézomètres (objets) différents. 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. La profondeur de l'eau est aussi 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 (76,3 %) concernent des échantillons d'eau souterraine qui proviennent de 1 134 puits différents. Les autres analyses géochimiques s'appliquent à des échantillons d'eau de surface. 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 213 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 : Protocole de numérisation et d'archivage), 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-OUT 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-OUT, 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

- Analyse granulométrique
- Modèle d'écoulement
- Activité polluante
- Essai géothermique
- 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

L'Annexe E4 : Protocole de fiabilité et de validation des données de forage (Lambert *et coll.*, 2010), 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 disponibles en Outaouais qui étaient 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-OUT. 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 à l'Annexe 5 : Cotes de fiabilité et critères de validation contenus dans la base de données hydrogéologiques PACES-OUT.

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, les critères de validation 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 à l'Annexe 5 : Cotes de fiabilité et critères de validation contenus dans la base de données hydrogéologiques PACES-OUT, qui présentent une synthèse des valeurs des critères de validation des données en Outaouais portant respectivement sur les objets et les observations.

3 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

3.1 Géologie du roc

La région de l'Outaouais comporte deux provinces géologiques, soit le Grenville et la Plate-forme du Saint-Laurent (Figure 3.1). La Province de Grenville, formée de roches métamorphiques et ignées, couvre plus de 90% de la région à l'étude et fait partie du Bouclier canadien. 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. Elle est composée de roches sédimentaires très peu déformées.

Les prochaines sections décrivent brièvement les événements géologiques ayant mené à la formation de ces deux 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 13 : Géologie du roc (en annexe cartographique du rapport), qui a été produite par la numérisation de la lithologie et des principales structures compilées par Bear *et coll.* (1971) de la Commission géologique du Canada. De plus, elle contient les linéaments régionaux cartographiés par Sterckx (2013). La Figure 3.1 offre un regroupement simplifié de la géologie du roc et des grandes structures.

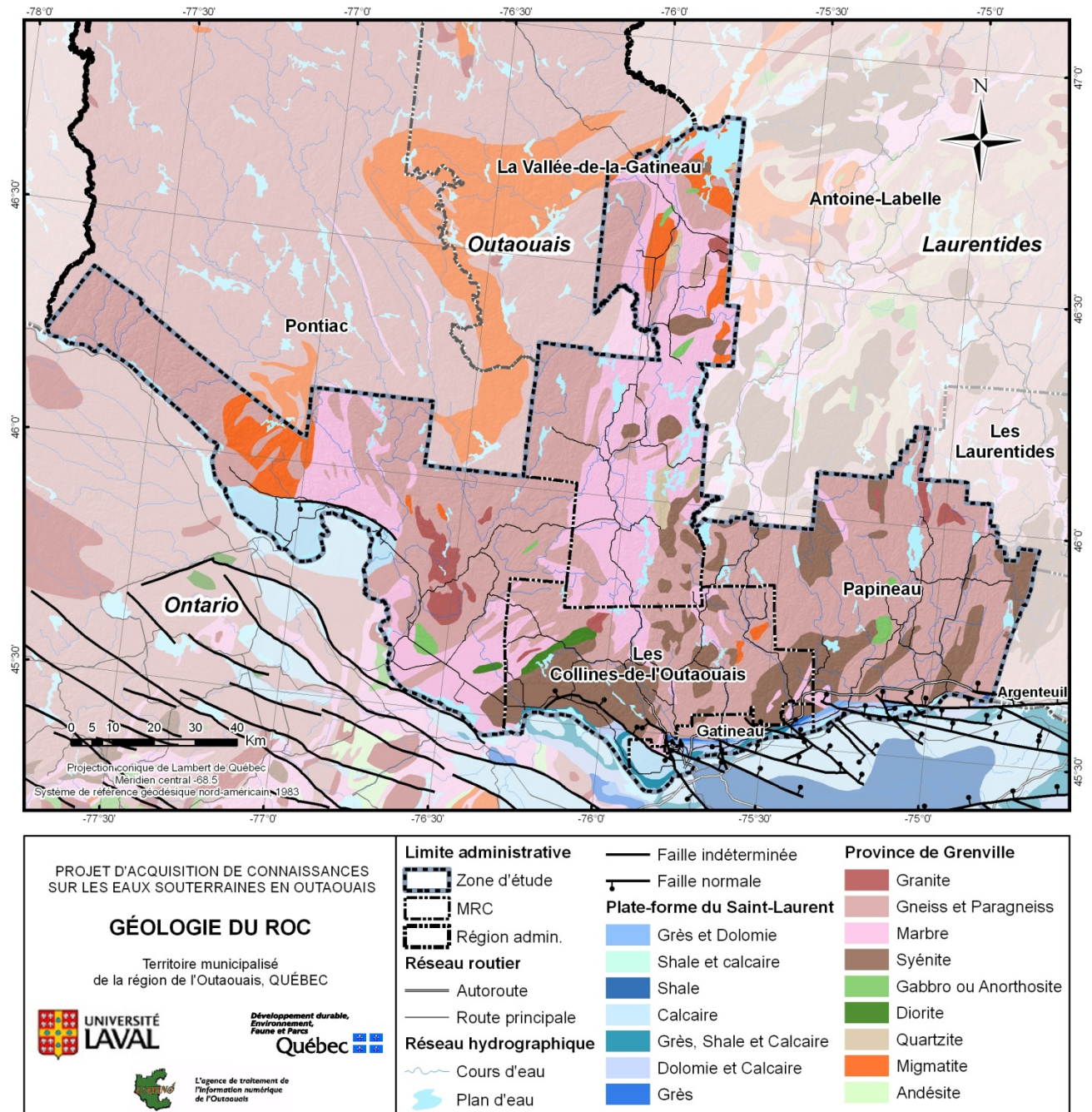
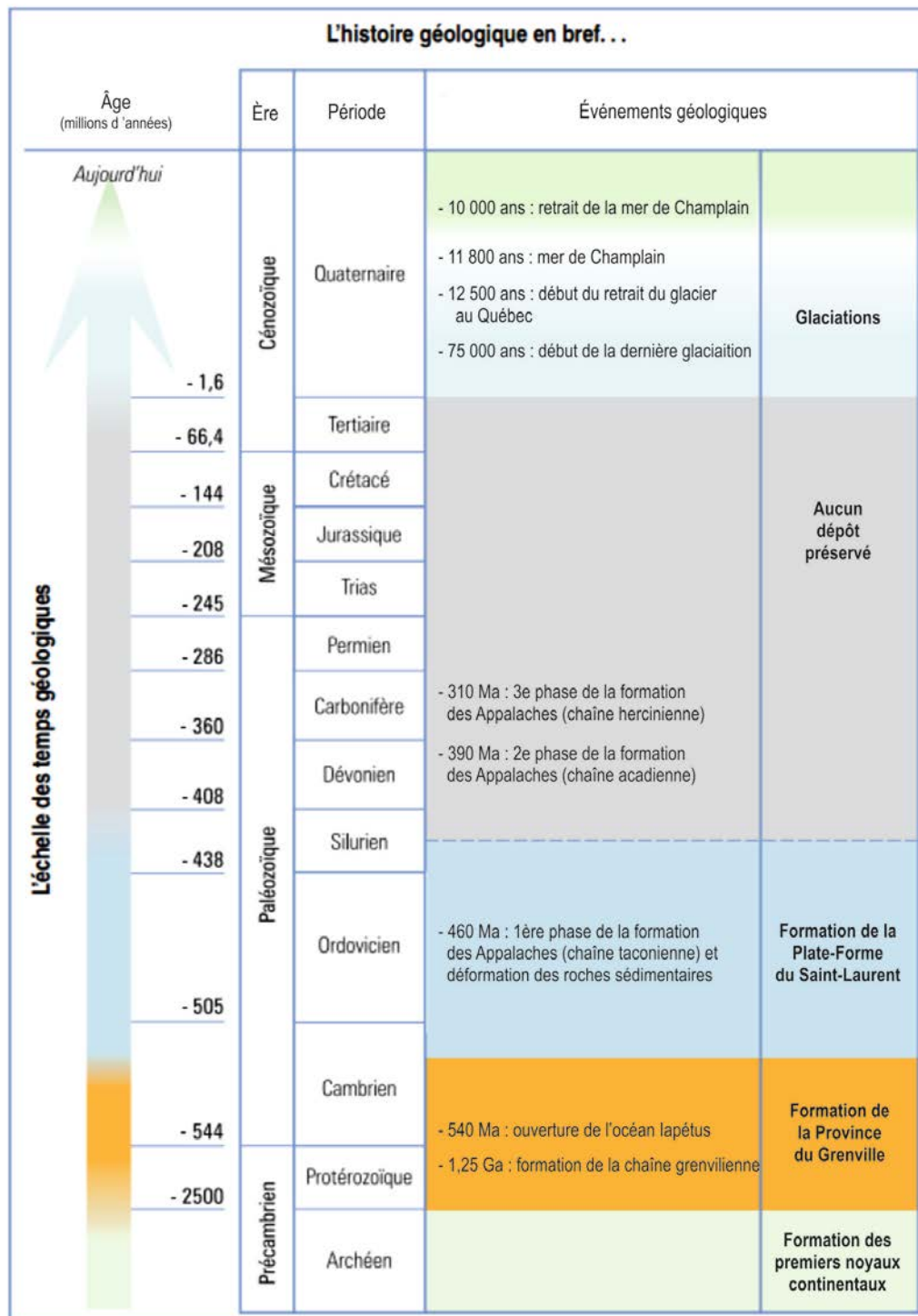


Figure 3.1 : Géologie simplifiée du roc (Carte 13)

L'histoire géologique de la province 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 ancienne chaîne de montagnes correspond aujourd'hui à la Province de Grenville et à la région physiographique des Laurentides. Cette province géologique est principalement composée de grands massifs de roches intrusives plus ou moins métamorphisées. Ces roches sont les racines de cette ancienne chaîne de montagnes qui ont été exposées à la suite de millions d'années d'érosion.

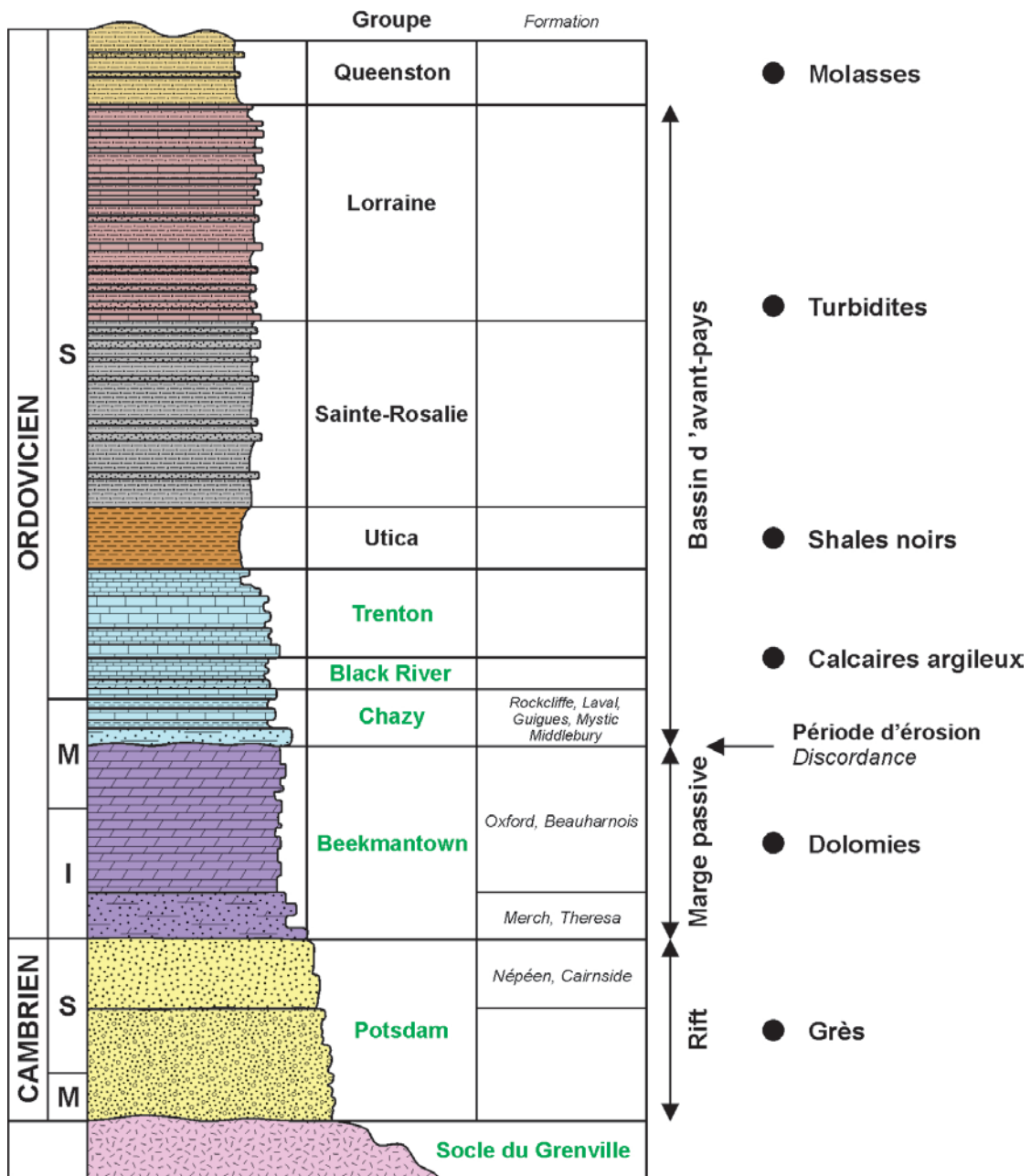
Il y a environ 600 millions d'années, le Bouclier canadien et la région de la province de Québec étaient situés près de l'équateur. C'est à cette époque que le continent Rodinia s'est fragmenté. Cette division s'est manifestée par la création d'un rift bordé de grandes failles normales telles que la Faille Eardley à l'ouest de la Ville de Gatineau et la Faille Lachute à l'est de Papineauville (Carte 13). 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 3.2), 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 3.3). Cette province est présente en une mince bande le long de la rivière des Outaouais de Gatineau vers l'extrême est de la région. Vers l'ouest la Plate-forme du Saint-Laurent est notamment présente à l'Isle-aux-Allumettes et à Fort-Coulonge. De la base au sommet de la Plate-forme du Saint-Laurent, seuls les groupes Potsdam, Beekmantown, Chazy, Black River et Trenton ont été cartographiés sur le territoire de l'Outaouais (Carte 13) et reposent en discordance sur le socle précambrien. Les roches du Groupe de Potsdam sont des grès. Le groupe sus-jacent est celui de Beekmantown, qui montre un environnement de transition des grès vers des dolomies. Le Groupe de Chazy est composé de grès, shales et calcaires tandis que le groupe de Black River comporte essentiellement des roches calcaires. Au sommet de la séquence stratigraphique de la Plate-forme du Saint-Laurent rencontrée en Outaouais, le Groupe de Trenton se compose principalement de calcaires argileux et de shales. Les descriptions des groupes et formations de la Plate-forme du Saint-Laurent proviennent Sanford et Arnott (2010) et Bear *et coll.* (1978); elles diffèrent quelque peu de celles fournies par Globensky (1987).



Source: modifié de Côté et al. (2006)

Figure 3.2 : Histoire géologique



Source : Comeau et coll., 2012b;

Note : Les formations géologiques dont le nom est en vert sont présentes sur le territoire de l'Outaouais.

Figure 3.3 : Colonne stratigraphique de la Plate-forme du Saint-Laurent

3.1.1 Structure et fracturation

Sur l'ensemble du territoire de l'Outaouais, 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 nord-est sud-ouest tel que mesuré par Sterkx (2013) dans la MRC des Collines-de-l'Outaouais 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.

3.2 Géologie des dépôts meubles

Cette section décrit les dépôts meubles présents sur le territoire d'étude. Dans un premier temps, un portrait de l'histoire géologique récente (Quaternaire) est présenté suivi d'une description des dépôts meubles présents dans la région, de leur empilement type et de leur épaisseur. La Carte 12 : Géologie du Quaternaire (en annexe cartographique distincte du rapport) présente la distribution spatiale des dépôts meubles sur l'ensemble du territoire d'étude. Elle est issue des travaux de l'Université du Québec à Montréal réalisés pour le Ministère des Ressources Naturelles (Roy *et coll.*, 2013; Daigneault *et coll.*, 2012; Caron *et coll.*, 2013; Dubois-Verret *et coll.*, 2012 et 2013; Godbout *et coll.*, 2012a, 2012b, 2012c, 2012d, 2013a, 2013b et 2013c; Horth *et coll.*, 2012 et 2013; Hurtubise *et coll.*, 2012 et 2013; Lamarche *et coll.*, 2013; Leduc *et coll.*, 2012a, 2012b, 2013a et 2013b; Millette *et coll.*, 2012a, 2012b, 2013a, 2013b, 2013c, 2013d, 2013e et 2013f). Ce travail est un apport considérable pour la région de l'Outaouais qui n'avait pas de couverture cartographique complète et uniforme des formations géologiques superficielles. La zone cartographiée pour la géologie du Quaternaire a servi de délimitation pour la plupart des analyses hydrogéologiques cartographiques bien qu'elle dépasse largement les limites officielles de la zone d'étude, soit la portion municipalisée de la région administrative de l'Outaouais.

3.2.1 Histoire du Quaternaire

Sur le territoire à l'étude, les dépôts meubles sont associés à la dernière glaciation et à la déglaciation subséquente (Roy *et coll.*, 2013). Les sédiments non consolidés, antérieurs à la dernière glaciation ne semblent pas avoir été préservés.

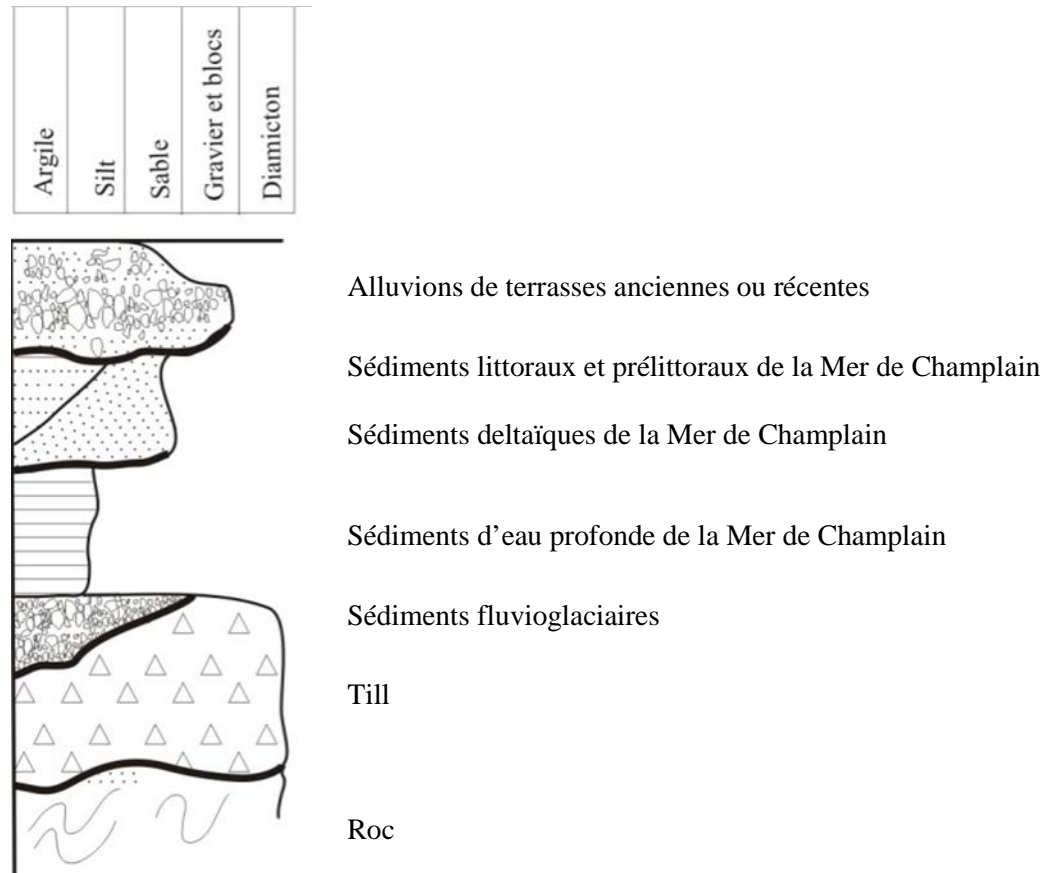
Durant les premiers stades de l'englaciation au Wisconsinien inférieur, un important cours d'eau glaciaire s'écoulait dans la vallée de la rivière Gatineau et dans les vallées adjacentes. Au Wisconsinien, une calotte glaciaire continentale, appelée Inlandsis laurentien, a recouvert l'ensemble de la région à l'étude. Vers la fin du Wisconsinien, en même temps que reculaient les glaciers continentaux à partir de leur position maximale, l'Inlandsis laurentien s'amincissait. Les hautes terres ont alors émergé et les langues glaciaires ne subsistaient plus que dans les vallées. L'eau de fonte glaciaire a transporté d'énormes quantités de sédiments au-delà de la marge glaciaire, les déposant sur les plaines d'inondation, dans les lacs proglaciaires et dans la Mer de Champlain.

Lors de la déglaciation, le poids de l'Inlandsis laurentien ayant abaissé la croûte terrestre sous le niveau de la mer, les vallées du Saint-Laurent et de l'Outaouais ont été envahies par les eaux marines de la Mer de Champlain. Dans la vallée moyenne du Saint-Laurent, l'invasion marine a duré environ 2 500 ans, soit de 12 à 9,5 ka, et, la limite marine s'est élevée à plus de 210 m du niveau actuel (Richard et Occhietti, 2004). Toutefois, dans la région de Gatineau, le retrait de la Mer de Champlain aurait commencé plus hâtivement vers 11,2 ka. Dans le secteur nord de la région, la limite marine a atteint jusqu'à 265 m par endroit alors que dans le reste de la région, l'altitude maximale se situait entre 177 m (au sud-ouest de la région) et 240 m (Roy *et coll.*, 2013; Daigneault *et coll.*, 2012; Daigneault, communication personnelle, 29 juillet 2013). Au cours de l'abaissement du niveau de la mer, l'action des vagues a érodé et remanié la surface des sédiments marins et glaciaires, redéposant les sédiments plus grossiers près de la rive et transportant les sédiments plus fins vers les eaux profondes.

Durant le retrait de la Mer de Champlain (vers 11,1 ka), le front glaciaire s'est stabilisé à 30 km environ au nord d'Ottawa. Les glaces se sont retirées de la partie amont de la vallée de l'Outaouais entre 11 et 10 ka, créant des ouvertures par où s'écoulaient les eaux fluvioglaciaires provenant des Grands Lacs supérieurs, des vastes lacs glaciaires du nord de l'Ontario et des Prairies canadiennes, en passant par la vallée des Outaouais. Les débits élevés du Proto-Outaouais ont entaillé les sédiments glaciaires et marins jusque vers 5,5 ka, formant de nombreuses terrasses le long de la vallée. Le soulèvement isostatique graduel de la croûte a réorienté le drainage des lacs nordiques et des prairies vers la baie d'Hudson, et celui des Grands Lacs supérieurs vers la vallée du St-Laurent, en passant par les Grands Lacs inférieurs, abandonnant un certain nombre de lits fluviaux de l'ancienne rivière des Outaouais. En 4,7 ka, le bassin de la rivière des Outaouais était à peu près semblable à celui d'aujourd'hui (Aylsworth *et coll.*, 1997; Fulton, 1989; Fulton et Richard, 1987; Gadd, 1987).

3.2.2 Stratigraphie des dépôts meubles

Une séquence stratigraphique typique de l'Outaouais est présentée à la Figure 3.4. À la base, le socle rocheux peut être constitué de roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent ou de roches ignées et métamorphiques de la Province de Grenville. Des dépôts mis en place directement par le glacier, du till composé de diamicton, recouvrent le roc de façon discontinue. Des dépôts de sable et gravier d'origine fluvioglaciaire mis en place par les eaux de fonte au contact ou à proximité du glacier se retrouvent ensuite par endroit. Sous la limite d'incursion marine, la séquence glaciaire est surmontée par des dépôts d'origine marine mis en place dans la Mer de Champlain. Ces sédiments comprennent des sédiments argileux déposés en eau profonde ainsi que des sédiments sableux deltaïques ou littoraux. Dans certains secteurs au nord de la région, des dépôts d'origine lacustre plutôt que marine sont présents par-dessus les sédiments fluvioglaciaires. Le sommet de la séquence stratigraphique est caractérisé par des alluvions anciennes et récentes composées de silt sableux, sable et gravier. La stratigraphie complète se retrouve dans plusieurs vallées, alors que les sommets rocheux ne sont recouverts que par une mince couche de till discontinue. La section suivante décrit la localisation des unités de surface et leur composition.



En gras : les contacts d'érosion

Figure 3.4 : Stratigraphie de la région de l'Outaouais

3.2.3 Description des dépôts meubles

Les tills sont des dépôts meubles d'origine glaciaire, mis en place directement par le glacier. Ils recouvrent en placage la majorité du territoire et se retrouvent principalement dans les hautes terres du Bouclier canadien (Figure 3.6). Ils se présentent en couverture mince ou continue pouvant atteindre jusqu'à 15 m d'épaisseur (Daigneault *et coll.*, 2012). Ils sont composés d'un diamicton à matrice sableuse provenant des débris de roches précambriennes. Le faciès de fond est compact et le faciès d'ablation, plus lâche, comporte de nombreux blocs anguleux (Roy *et coll.*, 2013; Daigneault *et coll.*, 2012).

Les sédiments fluvioglaciaires (juxtaglaciaires ou proglaciaires) ont été mis en place par les eaux de fonte au contact ou à proximité du glacier. Ils recouvrent environ 6 % du territoire et ils se retrouvent dans les vallées et dépressions du roc (Figure 3.5). Ils sont parfois enfouis sous les dépôts d'origine marine. Composés de sables, gravier, cailloux et blocs, ils constituent la plus importante source de matériaux granulaires de la région. Les sédiments juxtaglaciaires, pouvant dépasser 50 m d'épaisseur, forment des eskers, des delta-kames et des moraines. Les sédiments proglaciaires forment des accumulations tabulaires pouvant atteindre plus de 30 m d'épaisseur (Roy *et coll.*, 2013; Daigneault *et coll.*, 2012).

Les sédiments marins (ou glaciomarins) recouvrant environ 15 % du territoire ont été mis en place dans la Mer de Champlain. Ils se retrouvent sous la limite d'incursion marine (altitude maximale allant de 177 m à 265 m) principalement dans les basses terres bordant la rivière des Outaouais et dans les vallées des rivières tributaires de l'Outaouais (Figure 3.5). Les sédiments d'eau profonde sont composés d'argile ou de silt sensible gris foncé massif ou stratifié formant des plaines ravinées, localement affectées par des glissements de terrain. Les sédiments marins deltaïques, composés de sable comportant parfois des lits de silt et de gravier, ont été déposés à l'embouchure des rivières lors de la régression du plan d'eau marin. Ils se retrouvent en contact franc ou graduel sur les argiles marines ou directement sur les unités sous-jacentes (fluvioglaciaire, till ou roc). Des sédiments marins d'eau peu profonde, littoraux et pré-littoraux, constitués de sable et gravier stratifiés, ont été mis en place lors de la régression marine sous forme de cordons, flèches ou placages (Roy *et coll.*, 2013; Daigneault *et coll.*, 2012).

Des alluvions ont été déposées en discordance sur les unités sous-jacentes dans les plaines alluviales anciennes ou récentes. Ces dépôts meubles couvrant moins de 3 % du territoire sont composés de silt sableux, sable, gravier et cailloux. D'une épaisseur d'environ 5 m, elles forment des terrasses ou des plaines près des cours d'eau actuels surtout le long de la rivière des Outaouais.

Des dépôts composés de matière organique se retrouvent par endroit dans les dépressions topographiques mal drainées des hautes terres et dans la plaine alluviale de la rivière des Outaouais. Les dépôts organiques couvrent environ 3 % du territoire.

Les dépôts glaciolacustres et lacustres couvrent moins de 1 % du territoire. Ils se retrouvent au-dessus de la limite d'incursion marine dans les hautes terres. Les faciès d'eau profonde sont composés d'une alternance de silt et de sables fins alors que les faciès deltaïques et littoraux sont composés de sable. Leur épaisseur totale dépasse rarement 10 m (Daigneault *et coll.*, 2012 et Roy *et coll.*, 2013).

Des dépôts éoliens composés de sable fin, d'une épaisseur maximale de 5 m ont été observés dans certains secteurs (Daigneault *et coll.*, 2012 et Roy *et coll.*, 2013).

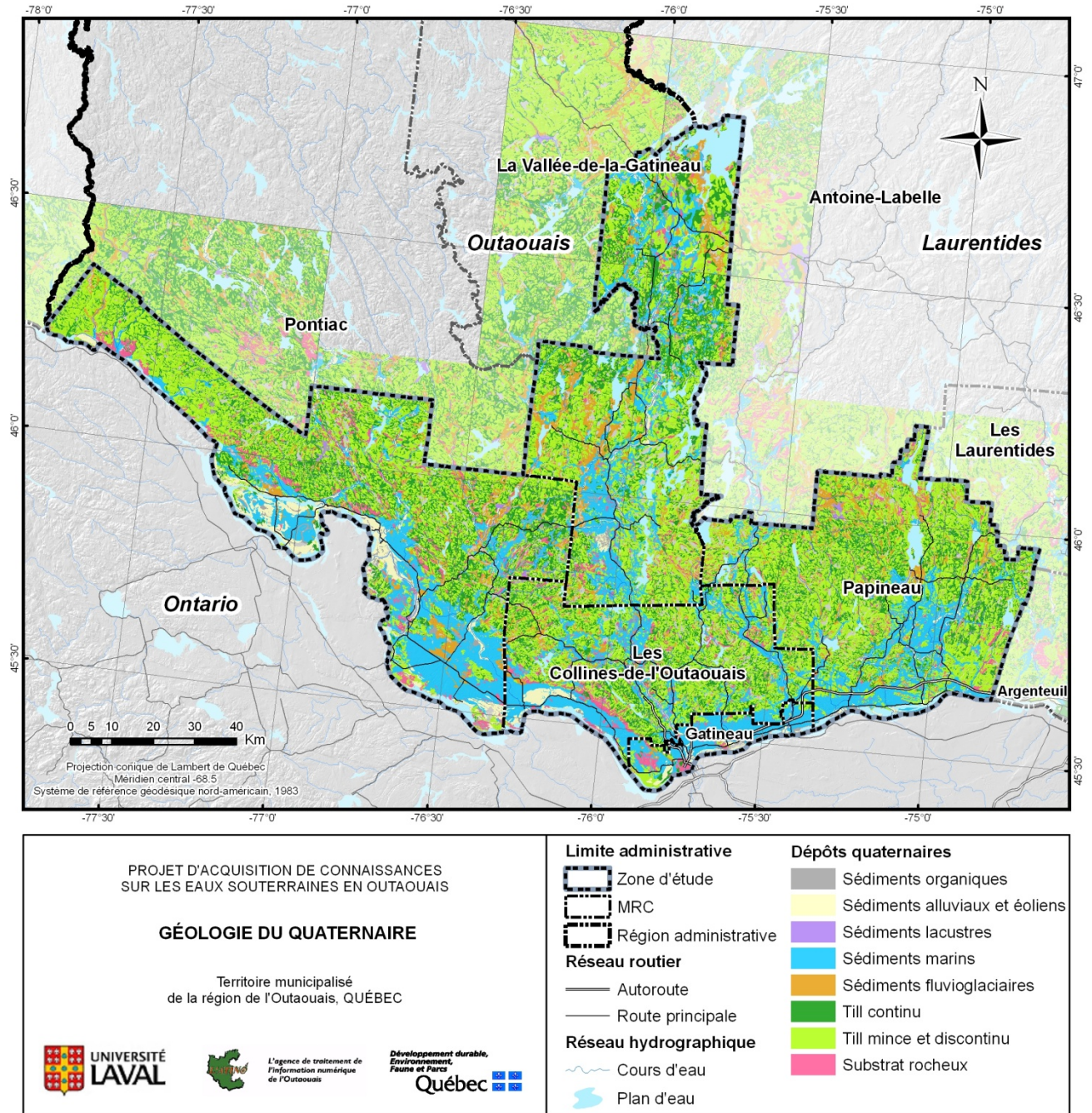


Figure 3.5 : Géologie simplifiée des dépôts meubles (Carte 12)

3.2.4 Épaisseur des dépôts meubles

La base de données hydrogéologiques PACES-OUT a été utilisée pour estimer l'épaisseur des dépôts meubles en considérant les forages qui ont atteint le roc. Trois techniques d'estimation ont été utilisées :

- 1) l'interpolation lorsqu'une densité raisonnable de mesures permettait d'appliquer cette technique,
- 2) l'attribution de l'épaisseur de dépôts mesurée en forage à la cellule sur laquelle il se trouve lorsqu'aucune mesure à proximité ne permet l'interpolation
- 3) la présentation des statistiques des dépôts meubles des forages dans des unités géologiques simplifiées.

La Carte 15 : Épaisseur des dépôts meubles (en annexe cartographique distincte du rapport) est présentée sous la forme d'une grille régulière avec des cellules de 250 m par 250 m. L'Annexe 6 : Méthodologie pour la réalisation des cartes d'épaisseur des dépôts meubles et de topographie du roc présente la méthodologie détaillée, modifiée du protocole développé par le GRIES (Annexe E5 : Protocole pour la préparation du Livrable 15 – Estimation de l'épaisseur des formations superficielles et Livrable 16 – Topographie du roc).

Un processus rigoureux de validation et de sélection a d'abord été appliqué afin d'identifier les forages à utiliser pour l'interpolation. Le territoire a ensuite été divisé en 2 zones au contexte physiographique et géologique différent, soit la zone sud, correspondant à la vallée de la rivière des Outaouais, et la zone nord correspondant au reste du territoire des hautes terres.

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, l'épaisseur des dépôts meubles dans les forages qui n'ont pas atteint le roc et les observations d'affleurement. Dans les secteurs où une faible densité de mesures menait à des résultats improbables, des points de contrôles ont été ajoutés et des données du Registre de puits de l'Ontario (MOE, 2012) ont aussi servi à améliorer l'estimation. Dans la vallée de la rivière des Outaouais, où une bonne densité de forages existe, l'interpolation a permis de couvrir toute la zone. Par opposition, la densité de forages dans les hautes terres est très variable et la technique d'interpolation ne permet d'estimer qu'environ 10 % de ce territoire.

Pour exploiter au maximum les informations de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT, pour les cellules de 250 m par 250 m n'ayant pas de résultat d'interpolation, l'épaisseur de dépôts mesurée en forage a été attribuée à la cellule sur laquelle le forage se trouve.

Pour le reste de la zone nord sans estimation, 6 sous-zones ont été tracées sur la carte finale et les unités géologiques simplifiées y ont été illustrées. Ces dernières sont accompagnées, pour chaque sous-zone, de diagrammes en boîtes contenant les statistiques des épaisseurs de dépôts des forages de chaque unité géologique simplifiée.

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 : Topographie du roc (en annexe cartographique du rapport). Dans ce cas-ci, à l'endroit des unités géologiques de roc et de till où la profondeur du roc n'a pas été estimée, une valeur médiane de 2 m de profondeur a été soustraite du modèle numérique d'élévation. Ceci n'a pas été fait pour les autres unités géologiques, car les statistiques démontrent que la profondeur peut être très variable.

La Carte 15 et la Figure 3.6 présentent l'épaisseur des dépôts meubles en Outaouais, tandis que la Carte 16 et la Figure 3.7 illustrent la topographie du roc. Les forages et les points de contrôle utilisés dans l'interpolation y sont aussi identifiés. La qualité de l'estimation d'un secteur dépend directement de la densité des forages et des points de contrôle dans ce secteur. Les limites des sous-zones statistiques, de même que les diagrammes en boîtes des statistiques des épaisseurs de dépôts des forages de chaque unité géologique simplifiée sont représentés sur les cartes.

De manière générale, les dépôts meubles ont comblé les dépressions du roc. Sous la limite marine variant de 177 à 265 m selon les secteurs (Roy *et coll.*, 2013; Daigneault *et coll.*, 2012; Daigneault, communication personnelle, 29 juillet 2013), les sédiments déposés ont aplani le relief, tel qu'observé dans la vallée de la rivière des Outaouais et les vallées des grandes rivières des hautes terres, où la topographie du roc est plus variable que celle de la surface.

Une hausse rapide de l'élévation du roc est observable à la limite entre les provinces géologiques de la Plate-forme du Saint-Laurent et du Grenville, par exemple, à l'endroit du Parc de la Gatineau, l'escarpement d'Eardley atteint jusqu'à 300 m de dénivelé.

Localement, les dépôts meubles de la zone sud atteignent des épaisseurs très importantes, parfois de plus de 100 m, aux embouchures des vallées des grandes rivières provenant du nord. Ceux-ci sont entrecoupés de secteurs de faible épaisseur, même d'affleurements rocheux. Dans la zone nord, des épaisseurs très importantes pouvant atteindre plus de 70 m sont présentes localement. Celles-ci sont situées dans les vallées des grandes rivières, telles que les rivières Gatineau, du Lièvre et de la Petite Nation. On observe également de faibles épaisseurs dans ces mêmes vallées, où le roc sous-jacent remonte. À l'extérieur des grandes vallées, la topographie de surface reflète celle du roc et les dépôts meubles y sont typiquement composés de till relativement mince.

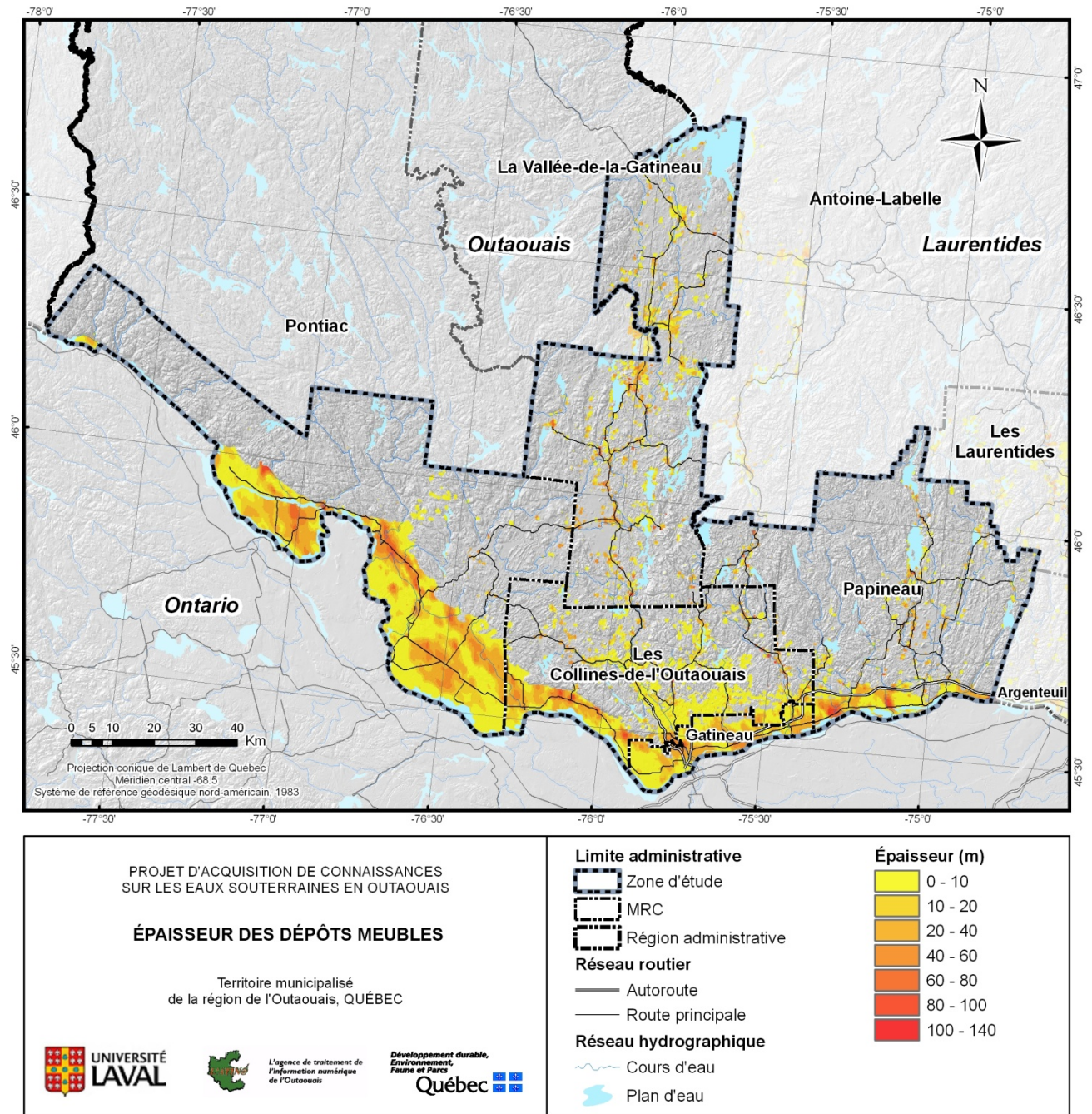


Figure 3.6 : Épaisseur des dépôts meubles (Carte 15)

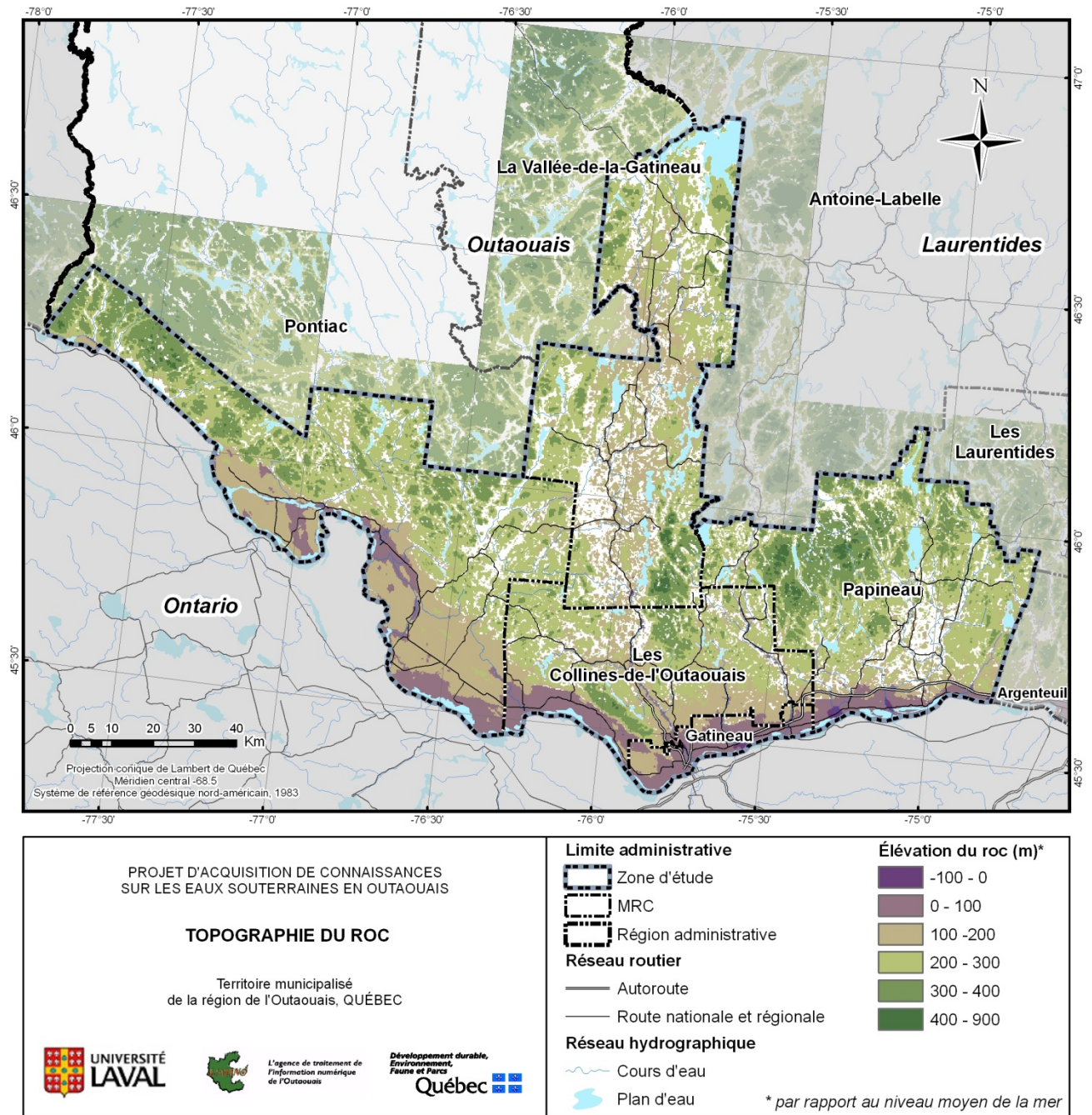


Figure 3.7 : Topographie du roc (Carte 16)

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 l'Outaouais, l'histoire géologique de la région a mené à la mise en place de deux 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 dans la région de l'Outaouais.

Dans un premier temps, des hydrofaciès régionaux sont définis pour les unités géologiques (dépôts meubles et roches) en fonction de leurs propriétés hydrauliques. À l'aide de ces hydrofaciès, des coupes et un modèle hydrostratigraphique tridimensionnel (3D) sont préparés. Par la suite, ce modèle est utilisé afin d'évaluer le confinement de l'aquifère de roc fracturé et l'épaisseur des aquifères de dépôts meubles de la région. Une carte de la piézométrie est ensuite présentée, accompagnée d'une compilation des propriétés hydrauliques du roc et des dépôts meubles. La recharge des aquifères est aussi évaluée et un bilan hydrologique régional est établi. Enfin, le portrait géochimique et la qualité naturelle de l'eau souterraine sont présentés.

4.1 Définition des hydrofaciès

Sept hydrofaciès ont été définis pour l'élaboration du modèle hydrostratigraphique, dont deux pour le roc et cinq pour les dépôts meubles (Tableau 4.1). Un hydrofaciès est composé de matériau géologique (dépôts meubles 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 hydrogéologiques sous forme de coupes (section 4.2) et d'un modèle 3D (section 4.3). Ces informations sont :

- La Carte 12 : Géologie du Quaternaire (en annexe cartographique distincte du rapport),
- Les rapports sur les travaux de cartographie des formations superficielles (Roy *et coll.*, 2013; Daigneault *et coll.*, 2012),
- Les 38 891 descriptions stratigraphiques de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT,
- La Carte 15 : Épaisseur des dépôts meubles (en annexe cartographique distincte du rapport),
- La Carte 11 : Pédologie (en annexe cartographique distincte du rapport),
- La Carte 3 : Modèle numérique d'élévation (en annexe cartographique distincte du rapport), et

- L'interprétation des levés géophysiques réalisés dans le cadre du projet (Annexe E1 : Coupes interprétatives des investigations hydrogéophysiques).

Tableau 4.1 : Définition des hydrofaciès

Hydrofaciès	Conductivité hydraulique	Matériau géologique	Principales unités géologiques correspondantes
HF1	Très faible	Argile, silt	Sédiments marins d'eau profonde
HF2	Faible	Silt sableux ou graveleux, alternances de silt et de sable	Sédiments marins deltaïques ou d'eau profonde, Sédiments lacustres
HF3	Moyenne	Sable ou gravier, silteux	Till, Sédiments marins deltaïques, Alluvions
HF4	Élevée	Sable fin à moyen	Sédiments fluvioglaciaires, Sédiments marins deltaïques et littoraux, Alluvions
HF5	Très élevée	Sable grossier, sable et gravier	Sédiments fluvioglaciaires
HF6	Très faible à Moyenne	Roche sédimentaire	Roches de la Plate-forme du Saint-Laurent
HF7	Très faible à Moyenne	Roche ignée ou métamorphique	Roches 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 leur continuité, leur étendue et leur épaisseur. Les hydrofaciès sont ensuite superposés aux unités géologiques. Les hydrofaciès ne correspondent pas nécessairement aux unités géologiques telles qu'expliquées à la section 4.1, puisque les hydrofaciès sont définis sur la base des propriétés hydrauliques tandis que les unités géologiques sont définies sur la base de l'environnement de déposition. Les coupes hydrostratigraphiques offrent une représentation simplifiée et visuelle des contextes géologiques et hydrogéologiques dans un secteur précis de la région d'étude.

La méthodologie utilisée par l'Université Laval pour l'élaboration des coupes hydrostratigraphiques diffère de celle présentée par le protocole du GRIES élaboré par l'UQAC (2011), bien que les principes de base de l'analyse soient les mêmes. 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.

Les critères suivants ont été utilisés afin de déterminer la localisation des coupes : 1) la coupe doit être localisée dans des dépôts quaternaires présentant un intérêt régional et dont la complexité nécessite une représentation verticale, 2) la coupe doit être perpendiculaire aux principales structures géologiques et physiographiques (rivières, collines, etc.) afin de permettre une représentation visuelle adéquate du contexte visé, et 3)

la présence d'un grand nombre de forages à proximité de la coupe avec des informations stratigraphiques de qualité est nécessaire.

La représentation verticale des descriptions géologiques a été réalisée à l'aide d'un outil développé à l'Université Laval. Cet outil permet, pour chaque trace de coupe, de créer un fichier en format ArcGIS® contenant les données des forages à proximité de la coupe, la représentation des dépôts meubles en surface et l'altitude de la surface du terrain. L'ajustement de la symbologie de ce fichier permettait ensuite de visualiser la stratigraphie des dépôts décrits en forages pour en faire l'interprétation. Il permettait aussi de visualiser la fiabilité et la validité des informations stratigraphiques.

La première étape de l'interprétation a consisté à l'élaboration d'un modèle conceptuel. 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. Huit (8) coupes, représentatives des principaux contextes hydrogéologiques de la région sont présentées. Leur localisation est illustrée à la Figure 4.1.

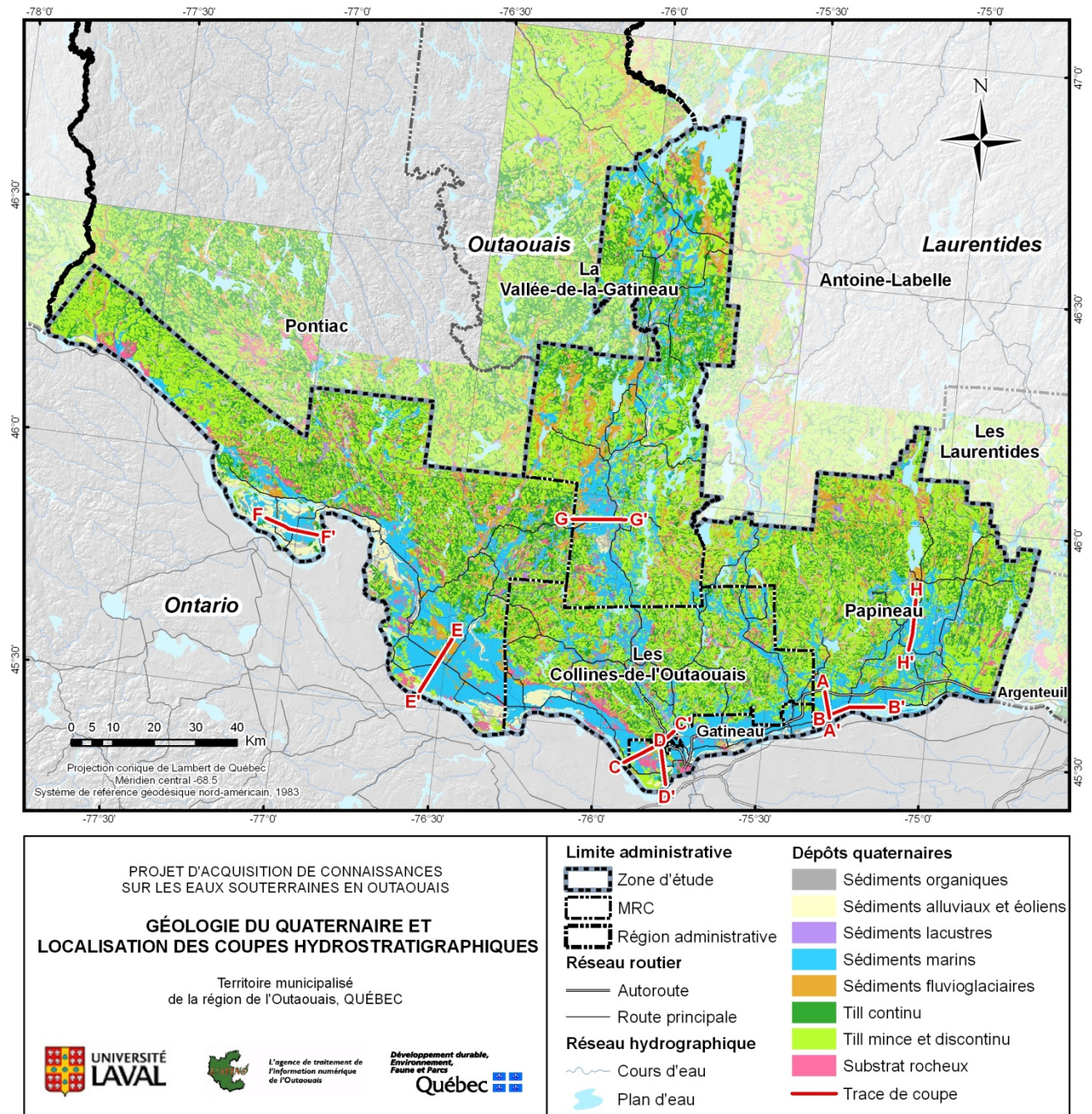


Figure 4.1 : Localisation des coupes hydrostratigraphiques

4.2.1 Coupes hydrostratigraphiques A-A' et B-B' : Lochaber-Ouest-Plaisance

La Figure 4.2 présente les coupes hydrostratigraphiques perpendiculaires A-A' et B-B' d'environ 6,5 et 14 km de longueur, localisées près de la rivière des Outaouais dans la MRC Papineau.

Dans la municipalité de Lochaber-Ouest (Coupe A-A'), l'épaisseur totale des dépôts meubles peut atteindre 100 m et un important amas de sédiments fluvioglaciaires composés de sable et graviers (HF5) enfoui sous les argiles marines (HF1) comble la dépression dans le roc de la Plate-forme du Saint-Laurent, à la limite de la Province de Grenville. Cet amas pourrait être un esker enfoui intercepté de biais par la coupe. Au nord de la coupe, le roc de la Province de Grenville remonte près de la surface et une couche de till (HF3) le recouvre par endroit. Près de la rivière des Outaouais, le roc est moins profond et les alluvions (HF3) de la rivière reposent directement sur le roc.

La coupe B-B' montre, à l'ouest, le même amas de dépôts fluvioglaciaires (HF5) enfoui que la coupe A-A', mais intercepté perpendiculairement à celle-ci. Vers l'est de la coupe B-B', le roc remonte et la présence d'amas de sédiments fluvioglaciaires (HF5) de faible envergure est fréquente. D'après les informations stratigraphiques, ces amas seraient affleurants en partie et partiellement enfouis sous les argiles (HF1). Dans le secteur ouest, la rivière Blanche a déposé des alluvions sablo-silteuses (HF3) peu épaisses alors qu'à l'extrême est de la coupe, dans la municipalité de Plaisance, du till (HF3) recouvre le roc d'une colline.

Dans ce secteur, l'aquifère de roc fracturé, et les aquifères de dépôts meubles sont en lien hydraulique et généralement confinés. L'eau souterraine s'écoule vers la rivière des Outaouais.

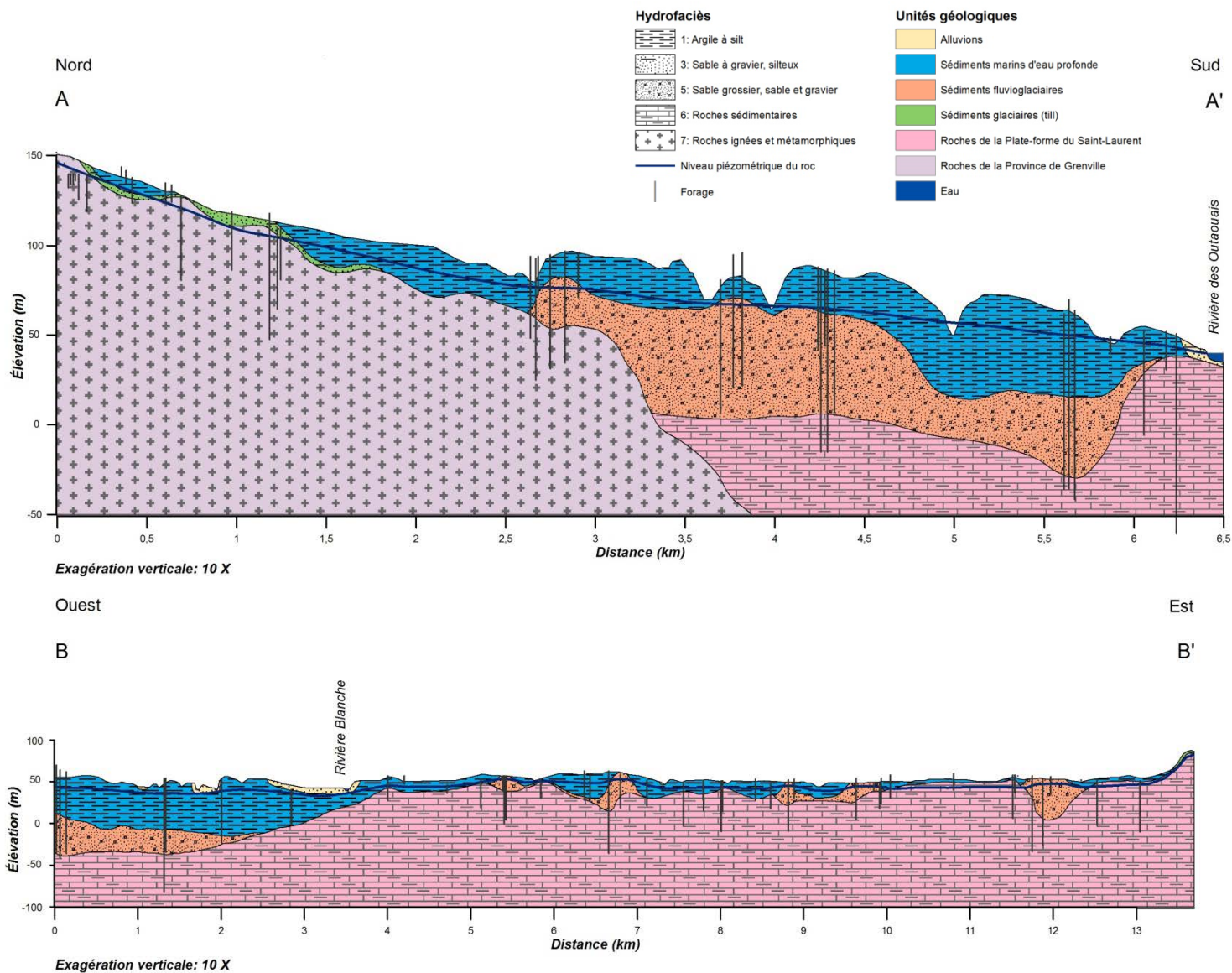


Figure 4.2 : Coupes hydrostratigraphiques A-A' et B-B' : Lochaber-Ouest-Plaisance

4.2.2 Coupes hydrostratigraphiques C-C' et D-D' : Gatineau-Aylmer-Chelsea

La Figure 4.3 présente les coupes hydrostratigraphiques C-C' et D-D' de 8 et 14 km situées dans la Ville de Gatineau et dans la municipalité de Chelsea.

Au sud-ouest de la coupe C-C', dans le secteur d'Aylmer, une mince couche de till (HF3) recouvre le roc de la Plate-forme du Saint-Laurent. À l'approche de l'escarpement d'Eardley, à la limite entre les 2 provinces géologiques, une couche de dépôts fluvioglaciaires de sable et gravier (HF5) est enfouie sous les argiles marines (HF1) et recouvre une mince couche de till (HF3). Sur la colline du Parc de la Gatineau, le roc de la Province de Grenville est affleurant ou recouvert d'une mince couche de till (HF3). L'épaisseur des dépôts atteint 60 m au nord-est de la coupe C-C', dans le secteur de Chelsea. Une épaisse couche d'argile est présente et de petits amas de dépôts fluvioglaciaires (HF5) se retrouvent par endroit. Des alluvions (HF3) recouvrant l'argile sont présentes près de la rivière Gatineau.

Le nord de la coupe D-D' se trouve sur la même colline rocheuse recouverte d'une mince couche de till (HF3). Au pied de la colline, à la limite des 2 provinces géologiques, la plaine argileuse recouvre le roc de la Plate-forme du Saint-Laurent. Des amas de dépôts fluvioglaciaires de sable et gravier (HF5) enfouis se retrouvent par endroit. Un placage de dépôts marins d'eau peu profonde sableux (HF4) est présent près de la base de la colline. Vers le sud de la coupe, des alluvions (HF3) recouvrent l'argile (HF1) par endroit et du till (HF3) se retrouve en profondeur sur le roc. Le till est affleurant près de la rivière des Outaouais.

L'aquifère de roc fracturé est confiné lorsqu'une couche d'argile est présente et non confiné en son absence. L'eau souterraine s'écoule de la colline du Parc de la Gatineau vers les rivières des Outaouais et de la Gatineau. Les aquifères de dépôts meubles formés par les dépôts fluvioglaciaires sont en lien hydraulique avec l'aquifère de roc.

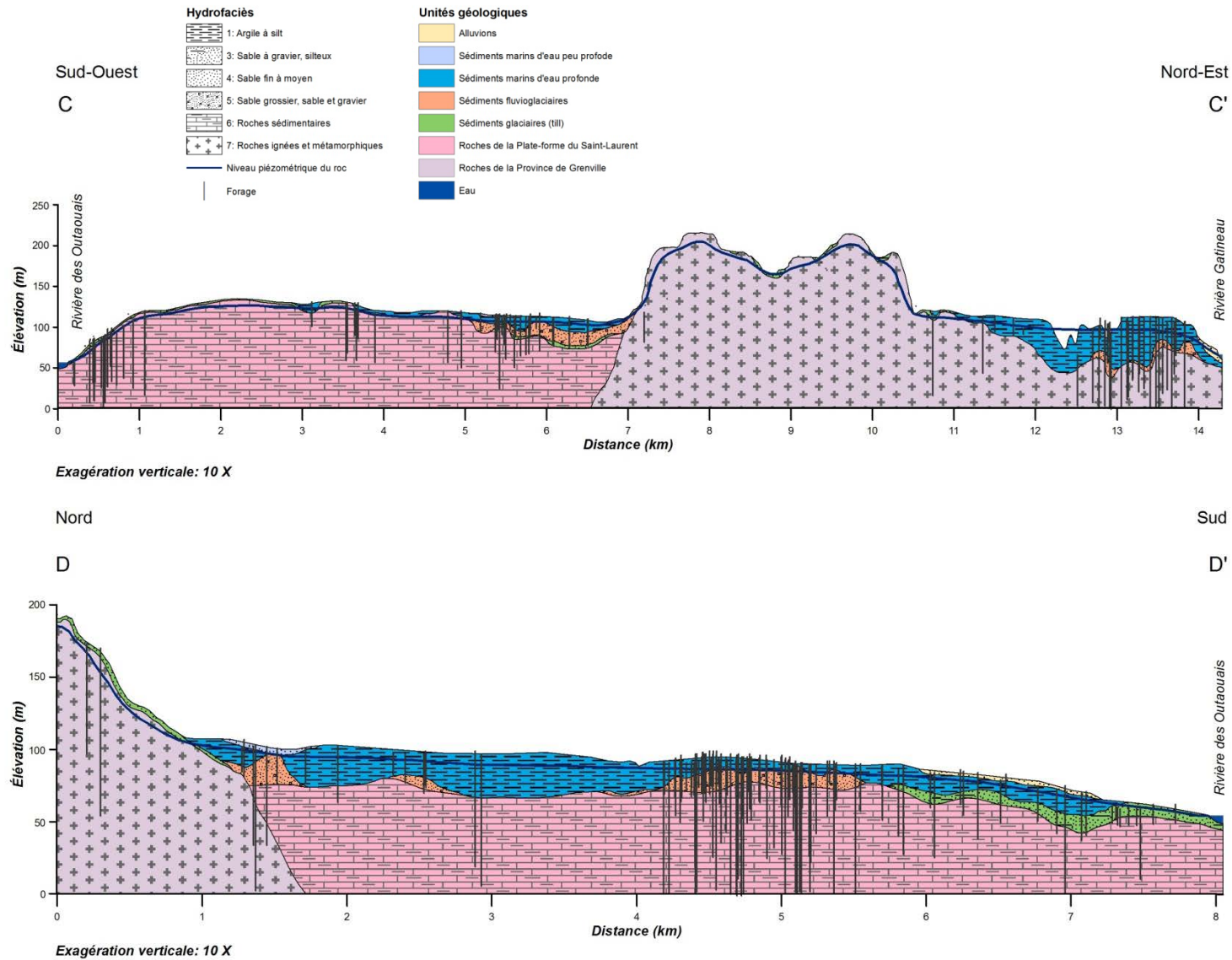


Figure 4.3 : Coupes hydrostratigraphiques C-C' et D-D' : Ville de Gatineau et Aylmer- Chelsea

4.2.3 Coupe hydrostratigraphique E-E' : Clarendon-Shawville

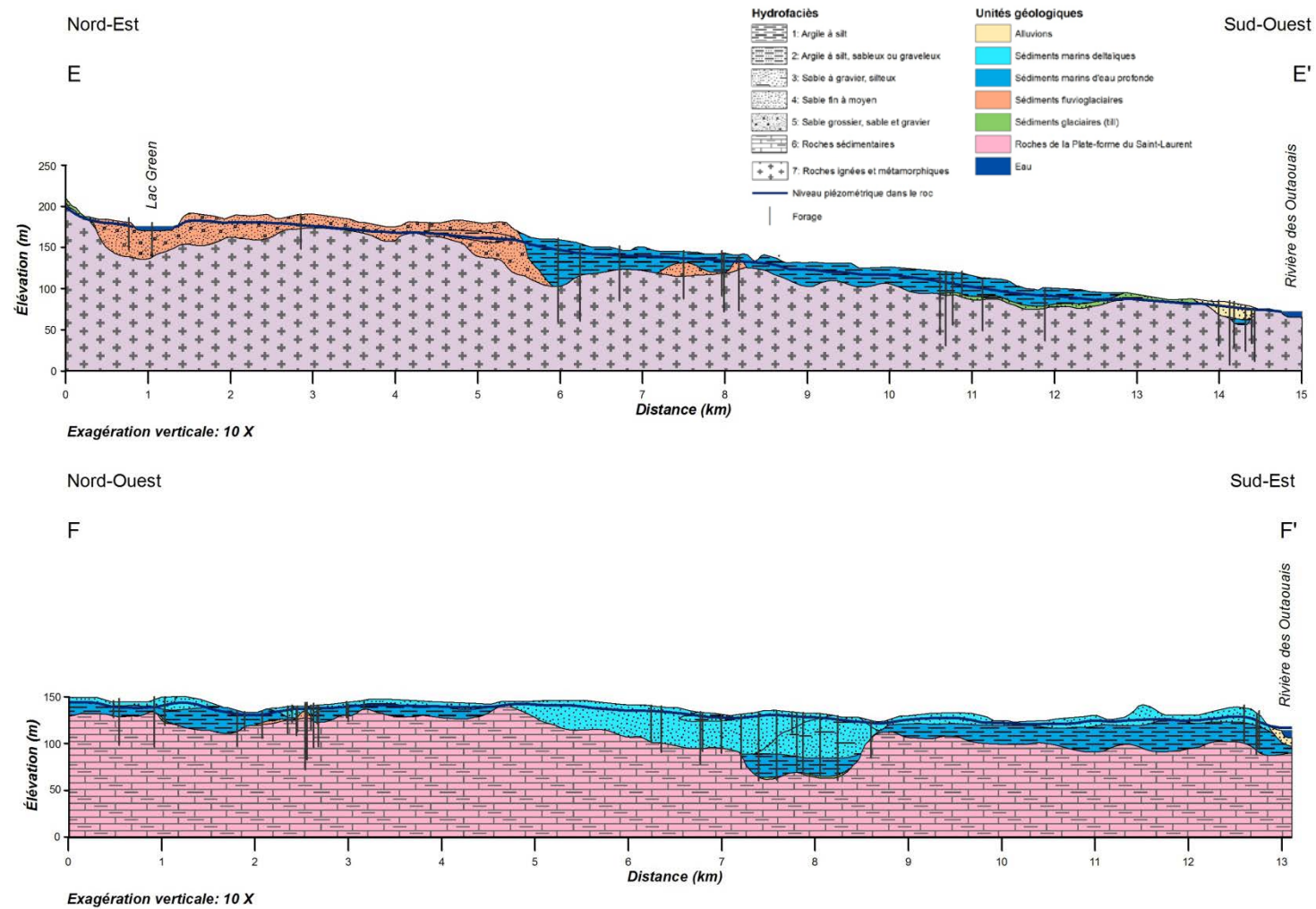
La Figure 4.4 présente la coupe hydrostratigraphique E-E' de 15 km située dans la MRC Pontiac, traversant, du nord-est au sud-est, les municipalités de Clarendon et de Shawville. Au nord-est de la coupe, des dépôts fluvioglaciers de sable et gravier (HF5) affleurent et recouvrent le roc de la Province de Grenville sur plus de 5 km. Un horizon de silt sableux (HF2) a été identifié à l'extrême sud de cet amas. Il s'agirait de sédiments d'origine prodeltaïque. Les dépôts les plus épais peuvent atteindre 60 m dans les dépôts fluvioglaciers tout comme dans les argiles (HF1) présentes au centre de la coupe. Cette couche argileuse recouvre le roc directement et, localement, un amas fluvioglacière de petite taille enfoui. À l'approche de la rivière des Outaouais, une couche de till (HF3) recouvre le roc et des alluvions (HF3) sont présentes.

L'eau souterraine s'écoule du nord-est vers le sud-est vers la rivière des Outaouais. Un important aquifère de dépôts meubles non confiné formé par les dépôts fluvioglaciers est présent. En descendant vers le sud, la plaine argileuse confine l'aquifère de roc fracturé qui devient non confiné à l'approche de la rivière.

4.2.4 Coupe hydrostratigraphique F-F' : L'Isle-aux-Allumettes

La Figure 4.4 présente la coupe hydrostratigraphique F-F' de 13 km située à l'Isle-aux-Allumettes dans la MRC Pontiac. L'ensemble du secteur est recouvert par des dépôts d'origine marine pouvant atteindre 75 m d'épaisseur, localement remaniés par l'action éolienne. Au nord-ouest et au sud-est de la coupe, des dépôts marins deltaïques sableux (HF4) recouvrent des dépôts marins d'eau profonde argileux (HF1). L'épaisseur de la couche deltaïque est variable. Un secteur (entre les km 2 et 3) présente un petit amas de dépôts fluvioglaciers de sable et gravier (HF5) enfoui sous les dépôts deltaïques. Au centre de la coupe, une dépression dans le roc de la Plate-forme du Saint-Laurent est comblée par une épaisse couche de dépôts deltaïques sableux (HF4) avec des horizons plus silteux (HF2 et HF3). Des dépôts marins d'eau profonde remplissent le creux de la dépression sous les dépôts deltaïques alors que les dépôts deltaïques sont en contact direct avec le roc ailleurs. Près de la rivière des Outaouais, des alluvions sableuses (HF4) recouvrent les argiles. Un mince placage de till recouvre le roc par endroit sous les dépôts marins.

L'eau souterraine s'écoule vers la rivière des Outaouais. L'aquifère de roc fracturé est confiné lorsque les argiles sont présentes et non confiné dans les autres cas. Des aquifères de dépôts meubles sont présents localement dans les dépôts deltaïques, leur lien hydraulique avec l'aquifère de roc fracturé dépend de la présence ou non de la couche d'argile qui les sépare. Cette coupe représente bien l'hétérogénéité des dépôts marins d'origine deltaïque et la discontinuité de la couche d'argile sous-jacente.



4.2.5 Coupe hydrostratigraphique G-G': Kazabazoua

La Figure 4.5 présente la coupe hydrostratigraphique G-G' de 13 km située dans la MRC de la Vallée-de-la-Gatineau, d'ouest en est de la municipalité de Kazabazoua où les dépôts les plus épais peuvent atteindre 70 m. À l'ouest, le roc de la Province de Grenville d'une colline affleure puis est recouvert de till. Des dépôts de sable et gravier (HF5) fluvioglaciers épais sont présents sur près de 4 km et recouverts en partie par des dépôts deltaïques sableux (HF4). Le roc remonte ensuite et est recouvert de till. Une épaisse masse de dépôts deltaïques est présente sur 5 km. Ces dépôts, sableux (HF4) en surface, deviennent graduellement plus silteux en profondeur (HF3 et HF2). Le roc remonte à l'approche de la rivière Gatineau et est recouvert de till (HF3).

L'eau souterraine s'écoule vers la rivière Gatineau. L'aquifère de roc est non confiné et en lien hydraulique avec les dépôts de sable et gravier (HF4 et HF5) qui le recouvrent. Toutefois, le confinement et le lien hydraulique sont plus variables en présence des dépôts deltaïques hétérogènes et plus fins du centre du secteur.

4.2.6 Coupe hydrostratigraphique H-H': Saint-André-Avellin

La Figure 4.5 présente la coupe hydrostratigraphique H-H' de 12 km située dans la MRC Papineau traversant la municipalité de Saint-André-Avellin du nord au sud. Dans ce secteur, une succession complexe de dépôts meubles est présente et leur épaisseur peut atteindre 70 m.

Au nord de la coupe, sur la colline, une mince couche de till (HF3) recouvre le roc de la Province de Grenville. Dans la plaine, en bas de cette colline, des dépôts marins deltaïques sableux (HF4) recouvrent des dépôts marins d'eau profonde argileux (HF1). Un amas de dépôts fluvioglaciers de sable et gravier (HF5) est présent en profondeur à la base de la colline. L'épaisseur et la granulométrie de la couche deltaïque sont variables. Les dépôts deltaïques, lorsqu'épais, sont silteux (HF2) en profondeur et directement en contact avec le roc. À partir du centre de la coupe, un important amas de dépôts fluvioglaciers (HF5 et HF4) est présent sur près de 6 km. Il est partiellement enfoui sous les dépôts marins (HF4 et HF1). Des alluvions sableuses (HF4) se retrouvent sur les sédiments marins d'eau profonde (HF1) en bordure de la rivière Petite Nation à l'extrême sud de la coupe.

L'aquifère de dépôts meubles dans les sédiments fluvioglaciers est en contact hydraulique avec l'aquifère de roc fracturé. L'eau souterraine de cet aquifère s'écoule vers la rivière Petite Nation. Il est confiné par les argiles marines à l'exception du secteur nord et centre de la coupe où les argiles sont absentes. Un aquifère granulaire non confiné est présent en surface dans les dépôts sableux d'origine marine deltaïque. Il est fréquent de rencontrer, localement, de tels aquifères de surface dans les dépôts deltaïques de la région. Leur épaisseur et leur étendue sont toutefois limitées.

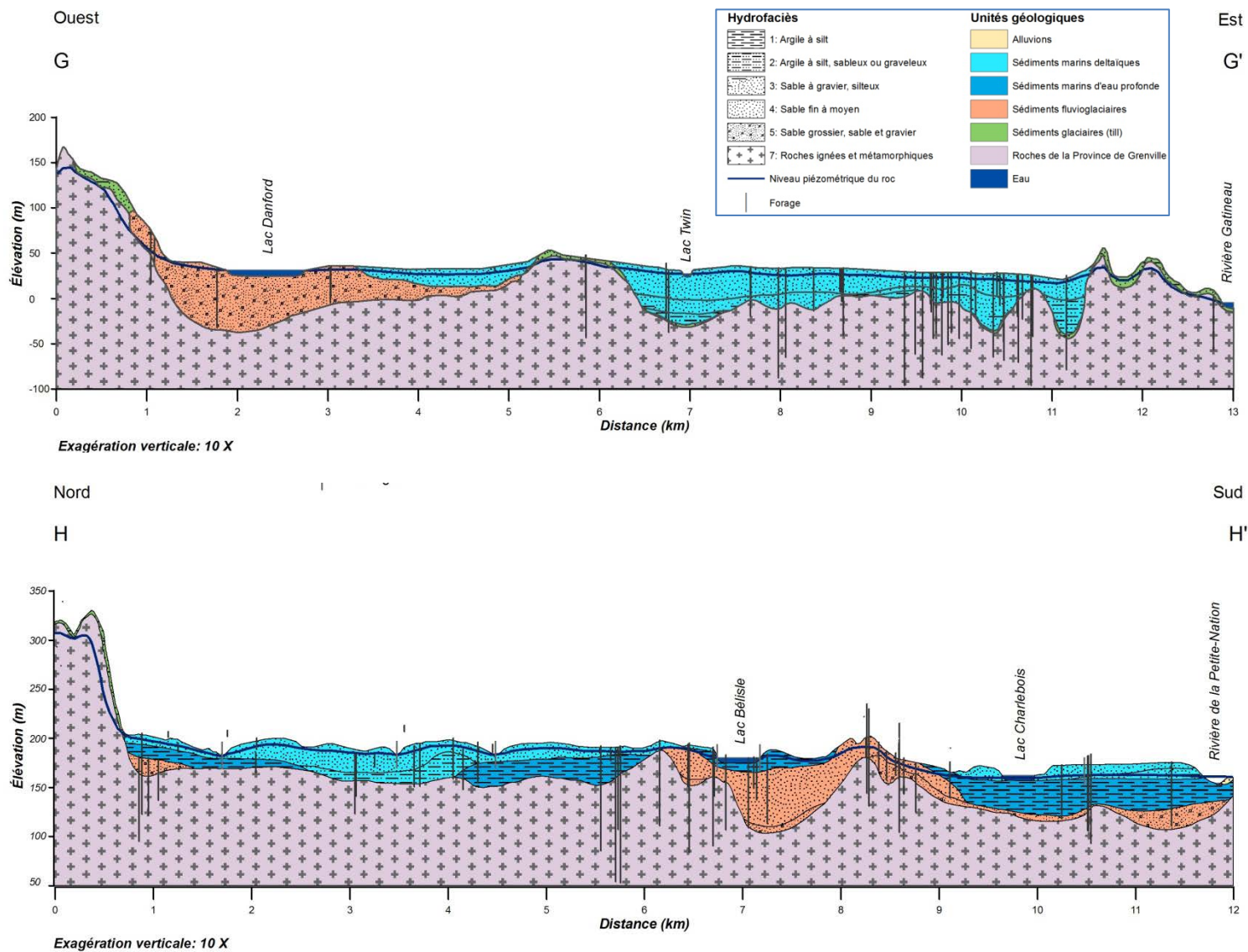


Figure 4.5 : Coupe hydrostratigraphique G-G' : Kazabazoua et H-H' : Saint-André-Avellin

4.3 Modèle hydrostratigraphique

Un modèle hydrostratigraphique 3D a été élaboré dans le but de définir la succession verticale des couches de dépôts meubles jusqu'au roc. Il s'agit d'un modèle simplifié, valide à l'échelle régionale et basé sur l'interprétation de données provenant 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). 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 trois couches de dépôts meubles se superposant verticalement sont définies. Pour chaque couche, le code de l'hydrofaciès et l'épaisseur de la couche sont indiqués. La méthodologie utilisée pour la production du modèle ainsi que des cartes représentant la distribution des hydrofaciès et l'épaisseur des couches du modèle sont présentées à l'Annexe 7 : Méthodologie pour la création du modèle hydrostratigraphique tridimensionnel (3D). Ce modèle est utilisé pour définir le degré de confinement des aquifères ainsi que l'épaisseur et l'étendue des aquifères de dépôts meubles. Il sert aussi aux calculs de la recharge des aquifères et de l'indice de vulnérabilité. Les lithologies rocheuses ont aussi été définies dans le modèle hydrostratigraphique (hydrofaciès HF6 et HF7). Les propriétés hydrauliques du roc et des dépôts meubles sont discutées à la section 4.7. Sur la majorité du territoire, une ou deux couches de dépôts meubles seulement ont été définies car, elles étaient suffisantes pour bien décrire la succession verticale des dépôts.

4.3.1 Incertitude sur le modèle hydrostratigraphique

Le niveau d'incertitude sur la définition du modèle hydrostratigraphique dépend principalement de deux facteurs : 1) la répartition et la qualité de l'information stratigraphique disponible et 2) la complexité des empilements de dépôts meubles. La Carte 17 : Confinement de l'aquifère de roc et incertitude du modèle hydrostratigraphique (en annexe cartographique distincte du rapport) ainsi que la Figure 4.6 illustre ces deux facteurs.

De façon générale, plus il y a de données stratigraphiques de qualité, moins il y a d'incertitude sur le modèle hydrostratigraphique. L'épaisseur des dépôts a surtout été interpolée dans la vallée de l'Outaouais (Figure 3.6 et Carte 15) car les données de profondeur du roc étaient généralement insuffisantes ailleurs. Dans les hautes terres, des valeurs d'épaisseur constante par unité de la carte du Quaternaire ont été posées selon les statistiques présentées par les diagrammes en boîtes de la Carte 15 (voir section 3.2.4). La variabilité de l'épaisseur des dépôts est alors lissée et la construction du modèle est élaborée selon des hypothèses plus régionales et conceptuelles. Les données stratigraphiques sont aussi plus rares dans ces secteurs.

Plus les empilements de dépôts meubles sont complexes et hétérogènes, plus il y a d'incertitude sur le modèle. Les dépôts d'origine deltaïque ainsi que les alluvions et dépôts éoliens qui les traversent sont les empilements de dépôts meubles les plus difficiles à

définir en profondeur. En effet, tel qu'illustré par les coupes F-F', G-G' et H-H' (Figure 4.4 et Figure 4.5), les dépôts deltaïques sont hétérogènes et la présence d'argile ou de silt en profondeur est souvent discontinue.

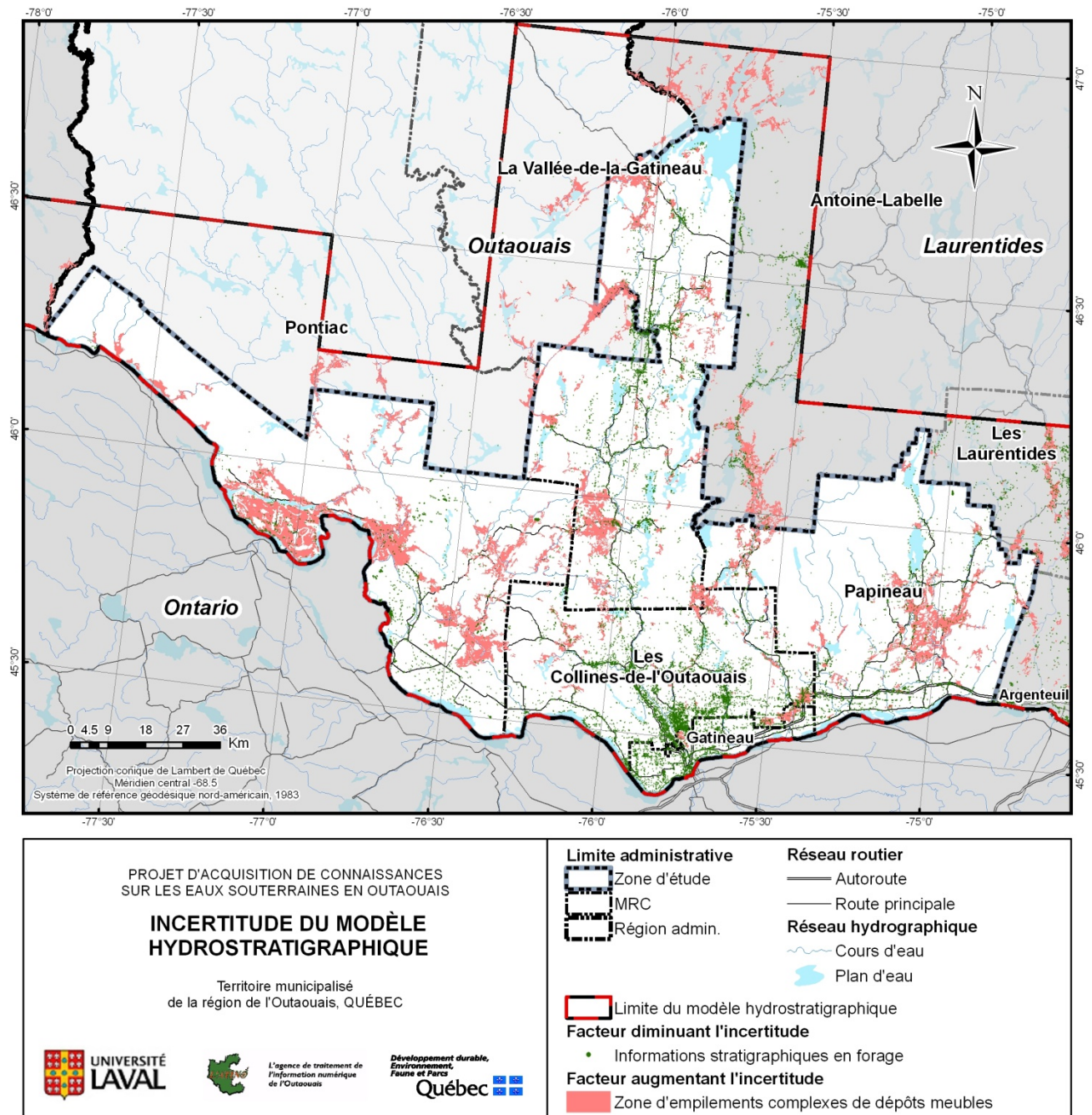


Figure 4.6 : Facteurs déterminant l'incertitude du modèle hydrostratigraphique

L'incertitude sur le modèle hydrostratigraphique subsiste dans les résultats des analyses subséquentes utilisant le modèle tels que l'évaluation du degré de confinement, de l'épaisseur des aquifères de dépôts meubles, de la recharge et de la vulnérabilité des aquifères. Ainsi dans les secteurs ne disposant que de peu de données stratigraphiques et présentant des empilements de dépôts meubles complexes, l'incertitude sur les analyses est plus grande. Au contraire, il y a moins d'incertitude sur les résultats pour les zones disposant de beaucoup de données comme dans certains secteurs de la vallée de l'Outaouais. Les contextes très simples comme les zones de till recouvrant le roc dans les hautes terres sont aussi définis avec moins d'incertitude. Toutefois, lorsque les résultats sont considérés en respectant l'échelle régionale de l'étude, la qualité des analyses est considérée comme adéquate pour l'ensemble du territoire. Ces mises en garde s'appliquent essentiellement au lecteur qui voudrait utiliser les résultats à une échelle plus locale.

4.4 Confinement des aquifères de roc fracturé

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 juxtaposant un aquifère, combinée à leur épaisseur, confère différents degrés de confinement aux aquifères.

Le degré de confinement de l'aquifère de roc fracturé a été déterminé à partir du modèle hydrostratigraphique 3D. Les couches des hydrofaciès HF1 (argile 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. Puisque l'hydrofaciès HF2 est composé de matériaux plus perméables que l'hydrofaciès 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 3 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 :

$$\text{Épaisseur confinante} = \sum (\text{Épaisseurs des couches HF1} + 3/8 \text{ Épaisseurs des couches HF2})$$

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

Tableau 4.2 : Définition du degré de confinement

Confinement	Épaisseur confinante (m)
Non confiné	≤ 1
Semi confiné	]1 - 3[
Confiné	> 3

L'aquifère de roc fracturé est confiné et semi confiné lorsqu'il est recouvert de dépôts argileux ou silteux. La Carte 17 et la Figure 4.7 illustrent le confinement du roc à l'échelle régionale.

Dans la plaine de l'Outaouais, l'aquifère de roc fracturé est majoritairement confiné lorsqu'une couche d'argile d'origine marine est présente. Toutefois, dans la MRC Pontiac, l'aquifère de roc fracturé est non confiné sur de nombreux secteurs. L'aquifère de la partie ouest de la Ville de Gatineau (secteur d'Aylmer) est aussi non confiné. Dans les hautes terres, le long des vallées des grandes rivières où des dépôts marins sont présents, l'aquifère de roc fracturé est confiné ou semi confiné de façon discontinue. À l'extérieur de ces zones, l'aquifère de roc fracturé est non confiné.

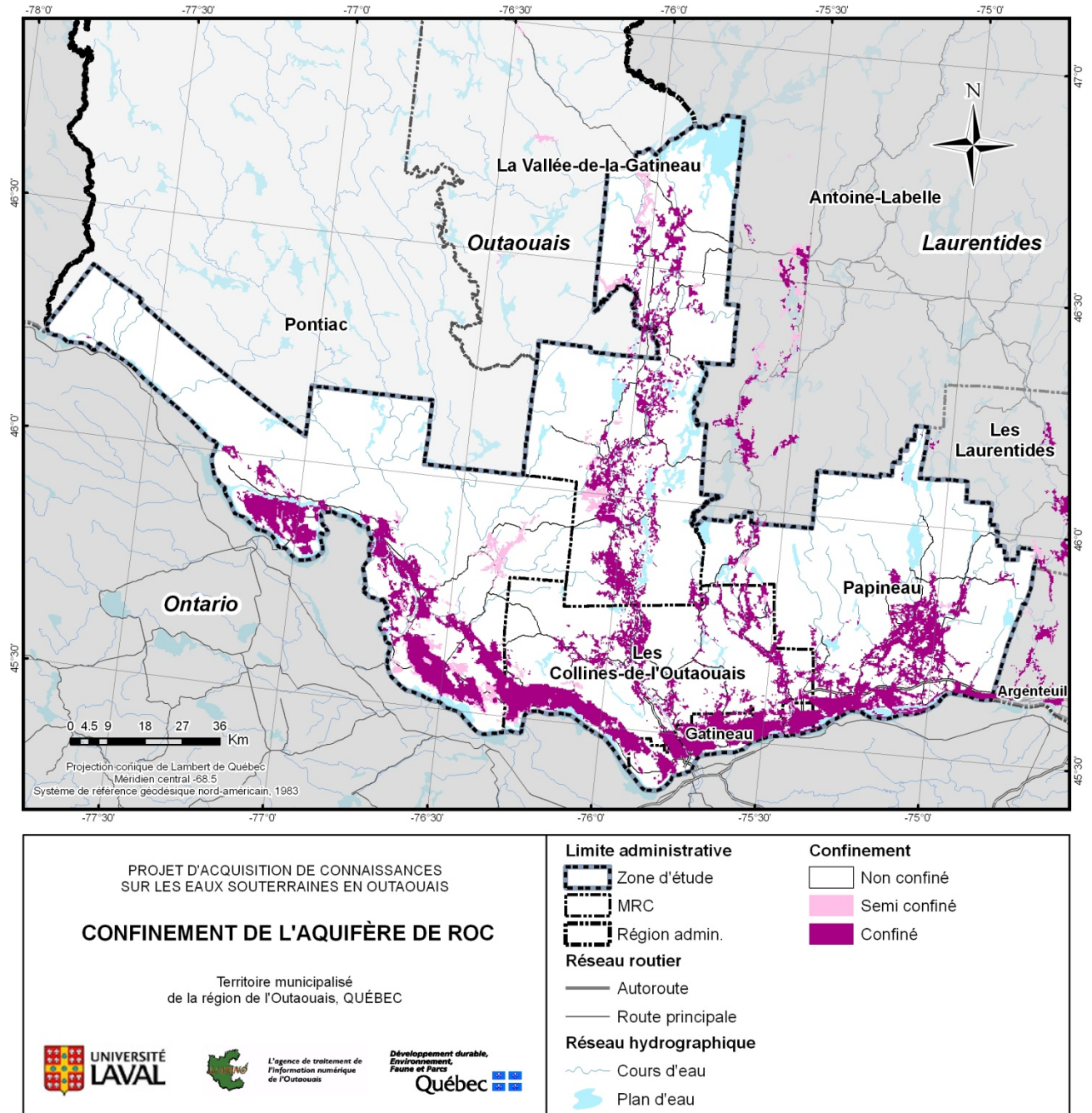


Figure 4.7 : Confinement des aquifères de roc fracturé (Carte 17)

4.5 Épaisseur des aquifères de dépôts meubles

L'épaisseur des aquifères de dépôts meubles a été calculée en additionnant les épaisseurs des couches HF4 et HF5 qui sont saturées en eau, c'est-à-dire sous le niveau piézométrique. Ils sont illustrés à la Carte 18 : Épaisseur des aquifères de dépôts meubles (en annexe cartographique distincte du rapport) et à la Figure 4.8.

Les principales unités géologiques pouvant constituer des aquifères de dépôts meubles sont les sédiments fluvioglaciaires et les sédiments marins d'origine deltaïque. Les aquifères dans les sédiments marins d'origine deltaïque sont en surface et généralement peu épais. L'épaisseur et la composition de ce type de dépôt varient rapidement et ce type d'aquifère est généralement peu important à l'échelle régionale comme discuté à la section 4.2. De plus, l'hétérogénéité de ces dépôts entraîne une plus grande incertitude sur leur définition dans le modèle hydrostratigraphique (section 4.3.1). Les aquifères dans les sables et graviers d'origine fluvioglaciaire représentent des volumes plus importants et mieux définis dans le modèle. Ces aquifères sont en lien hydraulique avec l'aquifère de roc fracturé sous-jacent et leur degré de confinement est le même.

Les aquifères de dépôts meubles importants se retrouvent souvent à la limite des provinces géologiques de la Plate-forme du Saint-Laurent et de la Province de Grenville, comme dans le secteur de Lochaber-Ouest (Figure 4.2) et de Gatineau (Figure 4.3). Dans la MRC Pontiac, ces aquifères sont de grande étendue et de grande épaisseur (atteignant plus de 50 m) principalement dans les municipalités de Clarendon (Figure 4.4) et de Mansfield-et-Pontefract. Ailleurs sur le territoire, la présence de ces aquifères est fréquente dans les vallées, mais leur taille est plus limitée. Dans certains secteurs, l'aquifère de dépôts meubles est constitué d'une combinaison de dépôts sableux d'origine deltaïque et de dépôts d'origine fluvioglaciaire. Les coupes hydrostratigraphiques de Kazabazoua (Figure 3.12) et de Saint-André-Avellin (Figure 4.5) montrent des exemples typiques.

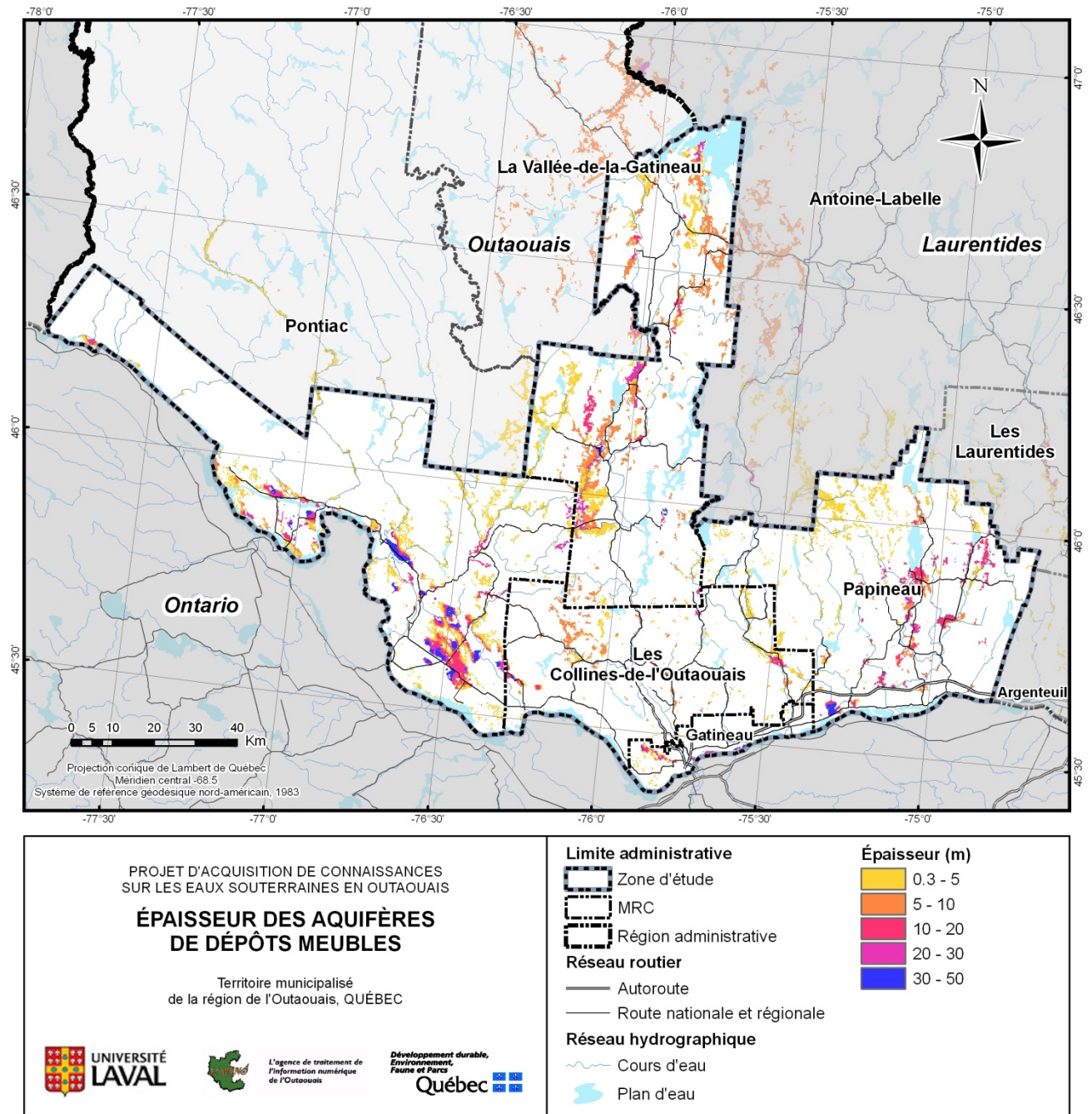


Figure 4.8 : Épaisseur des aquifères de dépôts meubles (Carte 18)

4.6 Piézométrie et écoulement

Une carte piézométrique permet de mieux comprendre l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle régionale. Sur le territoire à l'étude, les aquifères de dépôts meubles d'intérêt régional sont en lien hydraulique avec l'aquifère de roc fracturé. Les Cartes 19 et 20 : Piézométrie combinée des aquifères de roc fracturé et de dépôts meubles et la Figure 4.9 illustrent l'élévation piézométrique de l'eau souterraine par rapport au niveau moyen de la mer.

La carte piézométrique a été produite 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-OUT. Ces niveaux d'eau correspondent à la profondeur de l'eau dans un puits par rapport à la surface du sol. La méthodologie détaillée pour la réalisation de ce produit est présentée en annexe (Annexe 8 : Méthodologie pour la réalisation des cartes piézométriques) et est inspirée du protocole développé par le GRIES (Annexe E6 : Protocole pour la préparation du Livrable 19 et 20 – Piézométrie dans les formations superficielles et dans le roc).

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'estimation. 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. Les niveaux d'eau provenant des aquifères de dépôts meubles en lien hydraulique avec le roc ont été ajoutés au sous-échantillon de l'aquifère de roc afin de le bonifier. D'autres critères basés sur le jugement professionnel, dont certaines analyses statistiques, ont permis d'identifier les données douteuses qui ont été comparées visuellement à leurs voisins immédiats avant d'être éliminées. Le territoire a ensuite été divisé en deux zones au contexte hydrogéologique différent, soit la zone sud, correspondant à la vallée de l'Outaouais, et la zone nord correspondant aux hautes terres.

Des analyses géostatistiques des niveaux d'eau de l'aquifère de roc ont été réalisées pour chaque zone, qui ont été interpolées séparément en employant la méthode du krigeage ordinaire. L'interpolation a couvert la majeure partie de la zone sud, mais s'est avérée inadéquate pour la zone nord. En effet, la combinaison de la très courte portée du modèle analytique ajusté au semi-variogramme de cette zone, la variation rapide de la topographie et la très faible densité de niveaux d'eau nécessite d'utiliser une autre méthode d'estimation. Une valeur de profondeur de niveau d'eau de 6 m a été attribuée à toutes les hautes terres et aux secteurs non interpolés de la vallée de l'Outaouais. Cette valeur correspond à la moyenne et à la médiane de tous les niveaux d'eau du territoire.

La carte de la piézométrie combinée des aquifères de roc et de dépôts meubles a été obtenue en soustrayant du modèle numérique d'élévation du terrain les grilles régulières d'interpolation du niveau d'eau. Une carte distincte de la piézométrie des formations superficielles n'a pas été produite, car aucun aquifère de dépôts meubles d'intérêt régional et séparé de l'aquifère de roc par du matériel confinant n'a été identifié lors de la production du modèle hydrostratigraphique (section 4.3).

Comme illustré aux Cartes 19 et 20 et à la Figure 4.9, la topographie influence la piézométrie qui s'apparente à une reproduction adoucie du modèle numérique d'élévation. De plus, les changements importants de la piézométrie ont lieu aux endroits où des variations rapides de la topographie sont observées. L'eau souterraine s'écoule des hauts piézométriques vers les bas, où elle fait résurgence dans les cours d'eau.

Le niveau piézométrique passe de près de 900 m sur les plus hauts sommets des hautes terres à moins de 100 m en bordure de la rivière des Outaouais, cette dernière constituant la zone de résurgence principale de l'eau souterraine de toute la région. L'écoulement régional s'effectue donc globalement du nord vers le sud. Dans les hautes terres, la piézométrie varie rapidement, reflétant ainsi la topographie de la surface. On y observe localement des écoulements vers les cours d'eau, où l'eau souterraine fait résurgence. À plus petite échelle, des écoulements est-ouest vers les grandes rivières telles que les rivières Gatineau, du Lièvre, Petite Nation, Coulonge et Noire sont observables. La piézométrie de la plaine de l'Outaouais est pour sa part beaucoup plus adoucie, dépassant rarement les 200 m en élévation.

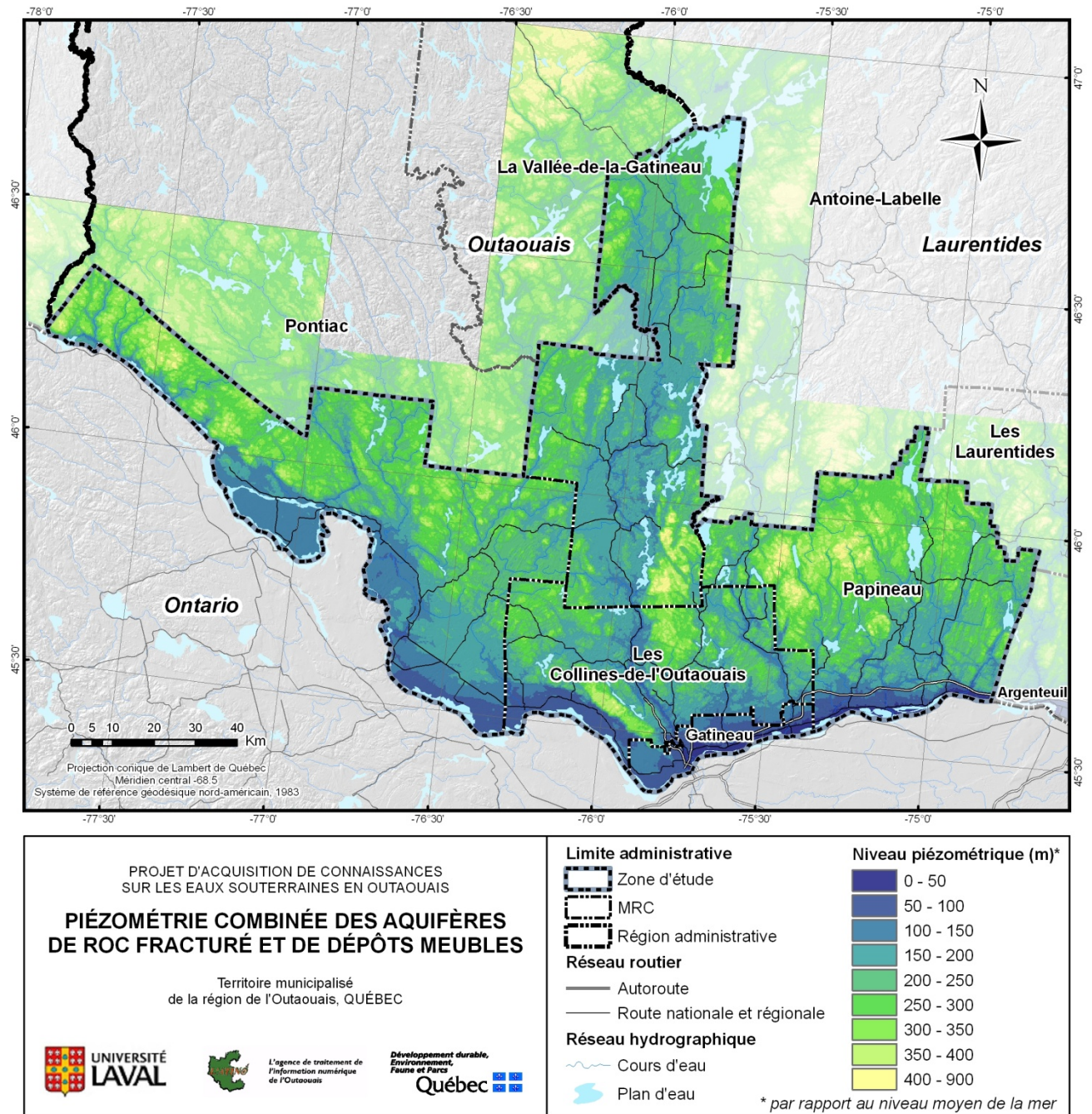


Figure 4.9 : Élévation du niveau piézométrique combiné des aquifères de roc fracturé et de dépôts meubles (Cartes 19 et 20)

4.7 Propriétés hydrauliques

La connaissance des propriétés hydrauliques des couches géologiques est importante pour quantifier la capacité d'un matériau 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 et d'évaluer le potentiel aquifère des formations géologiques.

Les propriétés hydrauliques d'intérêt sont le coefficient d'emmagasinement (S), la transmissivité (T), la conductivité hydraulique (K) et la capacité spécifique (C_{sp}). 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 l'emmagasinement spécifique et b (en m) est l'épaisseur de l'aquifère. 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 des essais hydrauliques, typiquement à partir de l'analyse de l'abaissement du niveau d'eau (« rabattement » s en m) en fonction du temps (t en secondes) induit dans des puits d'observation par le pompage dans un puits voisin. Enfin, la capacité spécifique (C_{sp} ou Q/s en $m^3/s/m$) est le débit de pompage par unité de rabattement. 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. Toutefois, il est possible de la transformer afin d'évaluer la transmissivité en posant certaines hypothèses.

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 PACES-OUT. 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 contenues dans le SIH qui sont adéquates, 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. 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 élevé et la conductivité hydraulique de la formation est faible. Dans ce cas, la descente du niveau d'eau dans le puits est plus représentative du pompage de la réserve d'eau du puits plutôt que de l'eau de l'aquifère qui est captée par le puits. Aussi, les essais ayant duré moins d'une 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 susmentionnés, 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 d'estimer ensuite la conductivité hydraulique à partir de l'épaisseur de l'aquifère. Cette transformation ne permet pas d'isoler les propriétés intrinsèques de l'aquifère puisque la capacité spécifique est aussi dépendante de la conception du puits. Cependant, à défaut de détenir un grand nombre de données, cette transformation des capacités spécifiques peut mener à une meilleure approximation des conductivités hydrauliques des aquifères (Sterckx, 2013). Seuls les puits ayant respecté les critères de sélection du paragraphe précédent ont subi la transformation, soit 12 751 puits (42 % des puits ayant subi un essai hydraulique).

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 (essai à choc hydraulique), 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 des 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 PACES-OUT était converti en hydrofaciès selon les catégories définies à la section 4.1. Pour le roc, 11 % des forages ont été écartés de l'analyse statistique, car leur lithologie décrite en forage n'était pas typique de celles rencontrées dans l'une ou l'autre de la Province de Grenville (roches ignées ou métamorphiques) ou de la Plate-forme du Saint-Laurent (roches sédimentaires) (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-OUT pour les dépôts meubles et le roc fracturé (Tableau 4.3). Ce tableau montre 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. Les valeurs moyennes des propriétés hydrauliques rapportées dans ce tableau

serviront au calcul de la recharge et de la vulnérabilité des aquifères (sections 4.9 et 5.1). La distribution statistique des conductivités hydrauliques des hydrofaciès peut également être consultée sous forme d'histogrammes ou de diagrammes en boîtes à l'Annexe 9 : Propriétés hydrauliques des matériaux géologiques.

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 les hydrofaciès HF1 et HF2. Il est commun d'avoir peu de valeurs pour les dépôts à texture plus fine, car les essais hydrauliques qui y sont pratiqués sont 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 données de conductivités hydrauliques des hydrofaciès plus fins (HF1, HF2 et HF3) est aussi plus grand que celui des hydrofaciès plus grossiers. L'hydrofaciès HF4 correspondant à un sable fin et moyen et l'hydrofaciès HF5, sable grossier ou sable et gravier ont donné des valeurs de conductivités hydrauliques moyennes identiques. Le manque de précision de plusieurs descriptions stratigraphiques pourrait expliquer que les valeurs moyennes soient confondues.

Les propriétés hydrauliques du roc selon les différentes formations rocheuses cartographiées et selon la lithologie décrite en forage sont présentées à l'Annexe 9 : Propriétés hydrauliques des matériaux géologiques. Les roches ignées et métamorphiques de la Province de Grenville ont des conductivités hydrauliques moindres (3×10^{-6} m/s) que les roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent (1×10^{-5} m/s). L'écart-type des données de conductivité hydraulique des deux types de roche est d'environ un ordre de grandeur, ce qui est jugé raisonnable en raison de la variabilité de niveau de fracturation du roc.

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

Hydrofaciès		Emmagasinement S			Capacité spécifique C_{sp}			Transmissivité T			Conductivité hydraulique K		
Code	Matériau géologique	<i>n</i> (-)	μ_g (m ³ /m ³)	σ_{log} (log m ³ /m ³)	<i>n</i> (-)	μ_g (m ² /s)	σ_{log} (log m ² /s)	<i>n</i> (-)	μ_g (m ² /s)	σ_{log} (log m ² /s)	<i>n</i> (-)	μ_g (m/s)	σ_{log} (log m/s)
HF1	Argile, silt	-	-	-	25	4x10 ⁻⁵	0,8	-	-	-	38	2x10 ⁻⁷	1,7
HF2	Silt sableux ou graveleux, alternances de silt et de sable	-	-	-	14	4x10 ⁻⁵	0,7	-	-	-	17	6x10 ⁻⁶	1,9
HF3	Sable ou gravier, silteux	6	3x10 ⁻³	1,2	59	3x10 ⁻⁴	1,2	19	6x10 ⁻³	0,8	185	8x10 ⁻⁵	1,2
HF4	Sable fin à moyen	2	3x10 ⁻²	0,1	88	1x10 ⁻⁴	1,2	14	6x10 ⁻³	0,9	202	3x10 ⁻⁴	0,6
HF5	Sable grossier, sable et gravier	3	3x10 ⁻³	1,8	955	5x10 ⁻⁵	0,6	13	3x10 ⁻³	1,6	121	3x10 ⁻⁴	0,8
HF6	Roche sédimentaire de la Plate-forme du Saint-Laurent	-	-	-	830	3x10 ⁻⁵	0,9	237	1x10 ⁻⁴	0,7	237	1x10 ⁻⁵	1,0
HF7	Roche ignée ou métamorphique de la Province de Grenville	6	6x10 ⁻³	1,6	9 594	8x10 ⁻⁶	0,8	1 324	5x10 ⁻⁵	0,7	1 306	3x10 ⁻⁶	1,1

Note : *n* : nombre d'échantillons; μ_g : moyenne géométrique; σ_{log} : écart-type du logarithme des valeurs.

4.8 Météorologie, hydrométrie et suivi piézométrique

La Carte 27 : Emplacement des stations météorologiques, hydrométriques et de suivi piézométrique (en annexe cartographique distincte du rapport) et la Figure 4.10 présentent l'emplacement des stations météorologiques, hydrométriques et piézométriques sur le territoire de l'Outaouais. Certaines stations sont en activité alors que d'autres sont aujourd'hui fermées, mais leurs données sont toujours disponibles.

Les stations météorologiques font partie du Programme de surveillance du climat du MDDEFP (18 actives et 13 inactives) et du réseau d'Environnement Canada (2 actives et 15 inactives). Les stations hydrométriques sont celles opérées par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) du MDDEFP (5 actives et 23 inactives) et par Environnement Canada (8 actives et 8 inactives). La plupart des stations mesurent le débit des cours d'eau et d'autres uniquement leur niveau. Aucun puits faisant partie du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec du MDDEFP (2013a) n'est présent en Outaouais. Cependant, les travaux de forage et d'installation de puits réalisés dans le cadre du PACES-OUT permettront d'intégrer, à ce réseau, les 5 puits de suivi piézométrique présentés sur la Carte 27 et la Figure 4.10.

Les données météorologiques, hydrométriques et de suivi piézométrique mesurées à ces stations ont servi à l'analyse du bilan hydrologique et au calcul de la recharge des aquifères et seront discutées à la section 4.9.2.

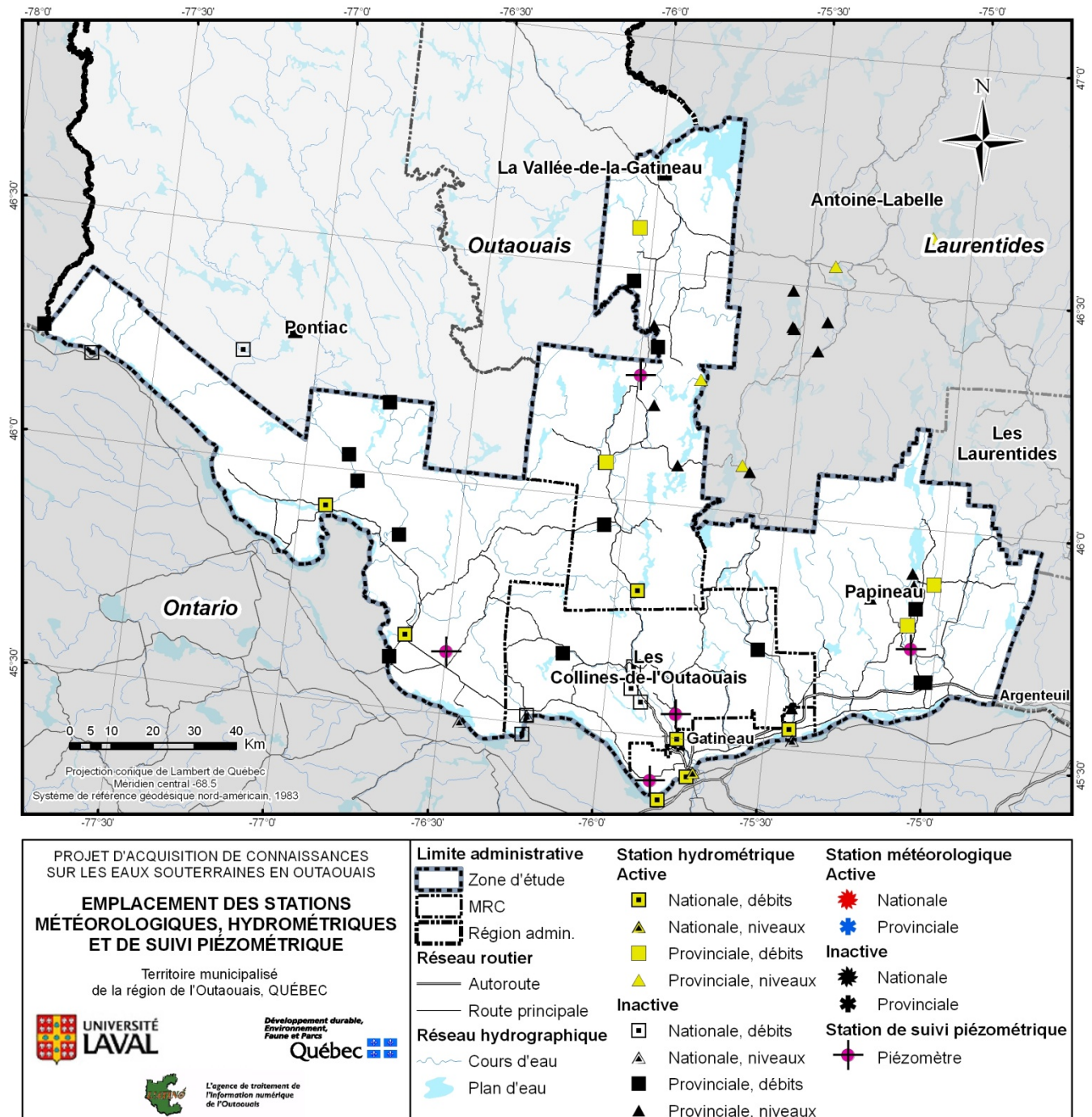


Figure 4.10 : Emplacement des stations météorologiques, hydrométriques et de suivi piézométrique (Carte 27)

4.9 Bilan hydrologique et recharge des aquifères

L'établissement d'un bilan hydrologique permet de quantifier les 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 Performance*) 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 municipalisé de l'Outaouais, soient la préparation des données à intégrer au modèle, la comparaison des composantes du bilan hydrologique avec une autre méthode d'estimation et, finalement, l'évaluation de la recharge des aquifères.

4.9.1 Architecture du modèle HELP[®]

À la base destiné pour la conception ou l'évaluation de l'efficacité des sites d'enfouissement, le modèle HELP[®] a été appliqué dans plusieurs études hydrogéologiques régionales (Talbot Poulin *et coll.*, 2013 ; 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 avec un minimum de données.

Le modèle HELP[®] simule l'infiltration verticale unidimensionnelle (1D) de l'eau dans la zone non saturée. Le territoire à l'étude 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 18). Tout comme les autres composantes du bilan hydrologique, la recharge est calculée pour les 30 années de simulation (1980 à 2009) 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.

4.9.2 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). Les données utilisées sont présentées brièvement dans les sections

suyvantes et sont détaillées à l'Annexe 10 : Données d'entrée et résultats de la modélisation avec HELP® de la recharge et des autres composantes du bilan hydrologique.

4.9.2.1 *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 10 : 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, la modélisation a été effectuée avec des données climatiques journalières sur une période de 30 années, soit de 1980 à 2009 inclusivement. Selon Gerardin et McKenney (2001), deux bioclimats sont présents dans la région. Une zone septentrionale est sous l'influence d'un climat de type subpolaire doux, subhumide avec une longue saison de croissance tandis que la zone méridionale présente un climat de type modéré, subhumide avec une longue saison de croissance. Bien que la séparation du territoire en plusieurs zones météorologiques ait été testée, des valeurs moyennes pour l'ensemble du territoire ont été retenues.

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 à partir des températures minimales et maximales a été retenue. Étant donné l'absence de stations de mesures de radiation solaire, ces données ont été générées avec un module d'HELP® (WGEN) s'appuyant sur les travaux de Richardson et Wright (1984).

4.9.2.2 *Données sur la végétation et l'occupation du sol*

Plusieurs cartes produites dans le cadre du projet ont servi à la préparation et à l'intégration des données sur la végétation et l'occupation du sol, soit 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 conditionnent 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. Le groupe hydrologique du sol est une classification en fonction de la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol. Le coefficient de ruissellement est pris en compte dans le calcul du ruissellement de surface.

4.9.2.3 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. Cela comprend 1 à 6 couches pédologiques, 1 à 3 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 exigés 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 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 peut aller jusqu'à 80 m en présence d'aquifères confinés par des dépôts d'argile.

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-OUT (section 4.7, Tableau 4.3) et des valeurs rapportées par Croteau, (2006) et TecSult (2008).

4.9.3 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. En effet, si on suppose que les réserves d'eau dans l'aquifère sont constantes, le débit de base des cours d'eau, soit l'eau souterraine qui fait résurgence dans un cours d'eau, doit correspondre à la recharge de l'aquifère. L'utilisation des débits de base pour estimer la recharge est recommandée 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.

4.9.3.1 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 4.11).

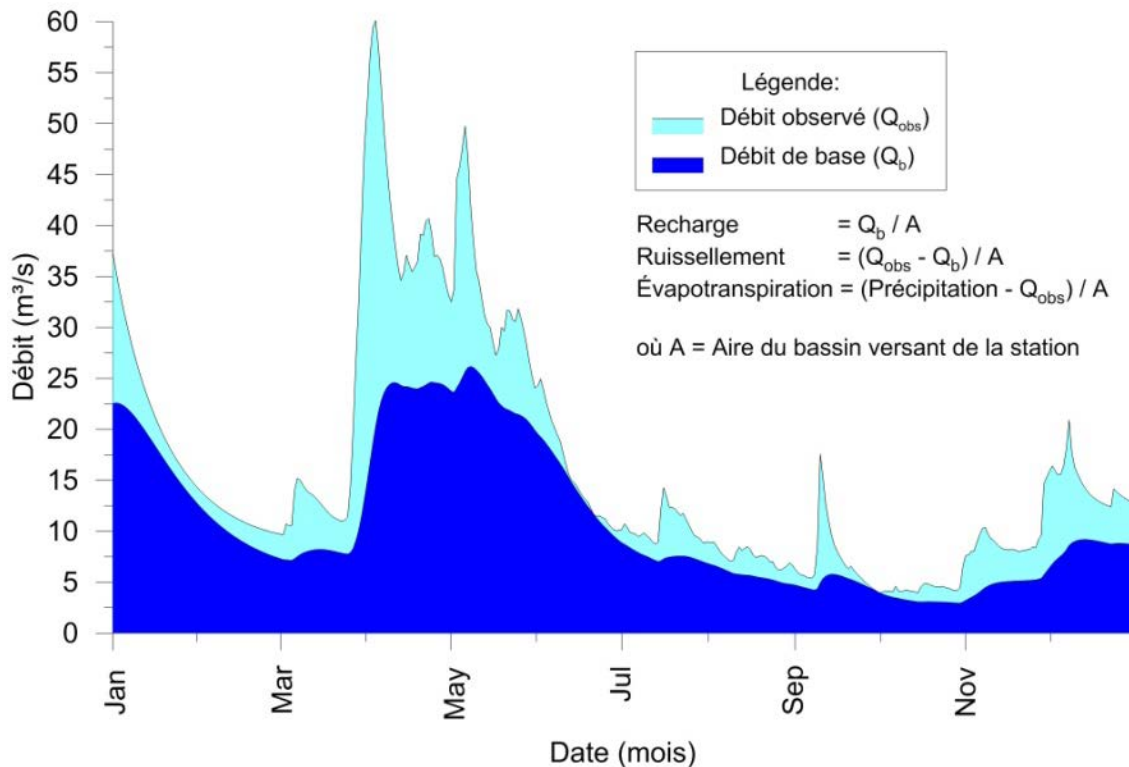


Figure 4.11 : Courbe typique des débits observés et débits de base de la rivière Picanoc (en Outaouais) pour l'année 2004

Le bilan hydrologique a été calé à l'aide des mesures de débits aux stations hydrométriques des rivières Désert, Picanoc et Petite Nation 2 (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. Selon les deux méthodes employées, les estimations de la recharge diffèrent seulement de 3 et 5 % pour la station de la rivière Petite Nation et de la rivière Picanoc, respectivement. Cependant, pour le bassin versant de la station hydrométrique de la rivière Désert, la recharge moyenne estimée montre un écart de 12 %. Il faut noter que ce bassin versant ne se retrouve pas entièrement sur la portion modélisée par HELP[®] et qu'il n'a pas été jugé adéquat de modifier les paramètres d'entrée pour obtenir une correspondance parfaite entre les deux méthodes. Aucune station hydrométrique du CEHQ n'est disponible en zone urbaine ou dans les secteurs des Basses-terres du Saint-Laurent dominés par une épaisse couverture argileuse. Même si aucun calage n'a pu être effectué dans ces conditions, l'ordre de grandeur de la recharge résultant de la modélisation est jugé satisfaisant. Suite aux travaux de calage, les paramètres qui sont retenus pour la modélisation de la recharge sont présentés au Tableau 4.5.

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

Composantes du bilan hydrologique	Rivière Désert (S = 1 780 km ²) mm/an (% des précipitations)		Rivière Picanoc (S = 1 290 km ²) mm/an (% des précipitations)		Rivière Petite Nation 2 (S = 1 990 km ²) mm/an (% des précipitations)	
	Méthode débits*	Modèle HELP®	Méthode débits^	Modèle HELP®	Méthode débits#	Modèle HELP®
Précipitation totale	1 001 (100%)	1 001 (100%)	1 001 (100%)	1 001 (100%)	1 001 (100%)	1 001 (100%)
Recharge	218 (22%)	338 (34%)	278 (28%)	325 (33%)	329 (33%)	301 (30%)
Ruissellement de surface	180 (18%)	114 (11%)	154 (15%)	129 (13%)	144 (14%)	142 (14%)
Ruissellement hypodermique		0 (0%)		2 (0%)		22 (2%)
Évapotranspiration	603 (60%)	551 (55%)	569 (57%)	547 (55%)	528 (53%)	538 (54%)
Emmagasinement	-	-2 (0%)	-	-2 (0%)	-	-2 (0%)

Notes : * : Pour les années 1960-1971
^ : Pour les années 1976-2004
: Pour les années 1942-1971
S : Superficie du bassin versant de la station

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	Matériel géologique	<i>n</i> (m ³ /m ³)	<i>C_c</i> (m ³ /m ³)	<i>P_f</i> (m ³ /m ³)	<i>K_v</i> (m/s)
HF1	Argile, silt	0,51	0,37	0,21	2x10 ⁻⁹
HF2	Silt sableux ou graveleux, alternances de silt et de sable	0,46	0,36	0,14	6x10 ⁻⁷
HF3	Sable ou gravier, silteux	0,47	0,25	0,10	8x10 ⁻⁵
HF4	Sable fin à moyen	0,42	0,17	0,05	3x10 ⁻⁴
HF5	Sable grossier, sable et gravier	0,44	0,19	0,12	3x10 ⁻⁴
HF6	Roche sédimentaire (Plate-forme du Saint-Laurent)	0,09	0,07	0,05	1x10 ⁻⁵
HF7	Roche ignée ou métamorphique (Province de Grenville)	0,08	0,07	0,05	3x10 ⁻⁶

4.9.4 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 : Recharge moyenne annuelle des aquifères (en annexe cartographique distincte du rapport) et la Figure 4.12 montrent la distribution spatiale de la recharge moyenne sur la période de simulation (1980-2009). L'Annexe 10 : Données d'entrée et résultats de la modélisation avec HELP[®] de la recharge et des autres composantes du bilan hydrologique peut être consultée afin de voir la répartition spatiale de chaque composante dans le bilan hydrologique : l'évapotranspiration (Figure A20), le ruissellement de surface (Figure A21), le ruissellement hypodermique (Figure A22) et la recharge (Figure 4.12 et Figure A23).

Dans certains secteurs de la vallée de l'Outaouais, entre autres dans la portion est, la nature argileuse des dépôts, combinée à l'imperméabilisation du terrain par la densification urbaine, favorisent grandement le ruissellement de surface (Figure A21) et le ruissellement hypodermique (Figure A22) au dépend de la recharge des aquifères (Figure 4.12). À ces endroits, la recharge des aquifères est limitée à des taux de 100 mm/an, ce qui correspond environ à 10 % des précipitations moyennes annuelles. Plus à l'ouest dans la vallée de l'Outaouais, les aquifères de roc fracturé dans la MRC Pontiac sont recouverts par de plus faibles épaisseurs de dépôts argileux. À ces endroits, la recharge est modérée, soit de 100 à 300 mm/an et parfois élevée, 300 à 400 mm/an lorsque le roc est sub-affleurant.

Dans les hautes terres, les taux de recharge se distinguent selon les contextes de vallées ou de collines. Dans les vallées, des taux de recharge similaires à ceux du contexte de la vallée de l'Outaouais sont observables, soient inférieurs à 100 mm/an. Sur les collines, où l'aquifère de roc est recouvert par des dépôts de tills, la recharge est de l'ordre de 300 à 400 mm/an. Quant à eux, les aquifères de dépôts d'origine fluvioglaciales se renouvellent à des taux légèrement supérieurs (350 à 450 mm/an) car leur perméabilité est plus grande et qu'aucun couvert argileux ne limite l'infiltration des précipitations dans les sols.

La recharge n'a pas été calculée aux endroits où des étendues d'eau ou des milieux humides étaient cartographiés et dominants sur les mailles du modèle (250 m par 250 m).

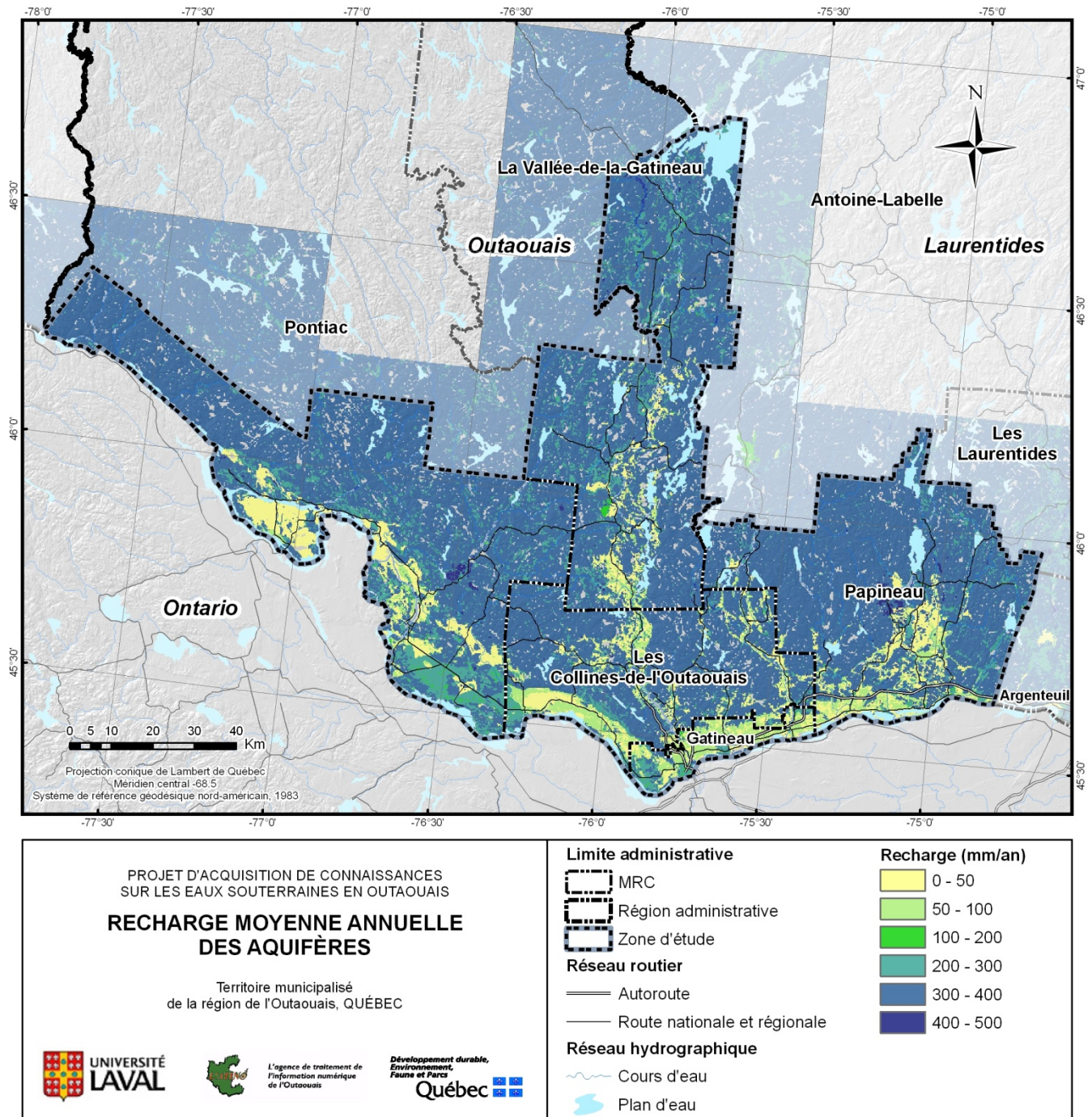


Figure 4.12 : Distribution spatiale de la recharge des aquifères (Carte 28)

4.10 Géochimie de l'eau souterraine

L'analyse et l'interprétation géochimiques ont été effectuées à partir de deux ensembles de données : celles recueillies dans le cadre des campagnes d'échantillonnage du projet et celles issues de la compilation d'études existantes dans la base de données hydrogéologiques PACES-OUT (Tableau 4.6).

Comme mentionnées à la section 2.2.4, les données recueillies dans le cadre du projet PACES proviennent de deux campagnes d'échantillonnage d'eau souterraine réalisées en 2011 et 2012, pour un total de 139 échantillons. La validation des analyses des échantillons repose sur le calcul de la balance électronique. Cette méthode permet de vérifier que les échantillons sont électriquement neutres (tel est le cas pour toute solution aqueuse). La procédure pour effectuer ce calcul est expliquée à l'Annexe 11 : Méthode de calcul de la balance électronique. Sur les 139 échantillons récoltés, 127 échantillons présentent une balance électronique entre $\pm 10\%$. Les 12 échantillons non validés n'ont pas été considérés dans ce qui suit, exception faite pour les cartes de qualité de l'eau.

En ce qui concerne les analyses en provenance de la base de données hydrogéologiques, 923 ont été retenues pour l'analyse statistique. Le choix des analyses repose sur les critères suivants : une seule analyse par puits, la plus récente et plus complète possible. Pour un puits, une analyse avec la balance électronique comprise entre $\pm 10\%$ a été prioritairement considérée même si ce n'est pas la plus récente et/ou la plus complète.

Tableau 4.6 : Description des données géochimiques disponibles et utilisées

	Données PACES	Données BD
Nombre total d'échantillons	139	923
Échantillons avec B.E. $\leq \pm 10\%$	127 (91%)	162 (18%)
Echantillons avec B.E. $> \pm 10\%$	12 (9%)	10 (1%)
Echantillons avec B.E. non calculable	-	751 (81%)
Échantillons pour les types d'eau	127 (91%)	90 (10%)

Note : B.E. = Balance électronique ; BD = Base de données hydrogéologiques PACES-OUT

Pour ce qui est des échantillons provenant de la base de données, la différence entre le nombre d'échantillons pour lesquelles la balance électronique est correcte et ceux utilisés pour la détermination des types d'eau s'explique par le fait que les concentrations en calcium et magnésium sont inconnues, mais leur somme (dureté totale) est connue. Ainsi, la balance peut être calculée, mais les types d'eau, qui nécessitent les concentrations pour chaque espèce, ne peuvent pas être déterminés.

4.10.1 Portrait géochimique des eaux souterraines

4.10.1.1 Détermination des types d'eau (ions majeurs)

La détermination des types d'eau permet de distinguer les échantillons en fonction de leur degré d'évolution. Les eaux souterraines récemment infiltrées ont généralement une composition chimique proche de celle de l'eau de pluie, c'est-à-dire une faible minéralisation, de type d'eau Ca-HCO₃. Lors de son écoulement dans l'aquifère, l'eau devient

progressivement minéralisée suite à la lente dissolution des minéraux présents dans les roches rencontrées.

L'analyse des données provenant des campagnes d'échantillonnage PACES uniquement (Tableau 4.7), montre que le type d'eau dominant est Ca-HCO₃ (82/127, soit 65 %). Ce type d'eau se retrouve dans une proportion plus importante parmi les puits dans les dépôts meubles (28/37, soit 76 %) et dans les aquifères non confinés (41/82, soit 50 %). Ce type d'eau est typique des eaux faiblement minéralisées et récemment infiltrées. Les types d'eau tels que Na-HCO₃ et Na-Cl sont également retrouvés dans un grand nombre de puits (18 % et 4 % respectivement) et caractérisent les aquifères confinés (18/23 et 9/9), en particulier les aquifères fracturés. Ces types d'eau sont typiques d'eaux ayant une forte minéralisation, donc plus évoluées. Les autres types d'eau sont intermédiaires et ne concernent que peu d'échantillons.

Tableau 4.7 : Répartition des faciès selon le type d'aquifère et son niveau de confinement pour les données PACES

Faciès	Aquifères fracturés				Dépôts meubles				Inconnu	Total général				
	C	L	NP	SC	C	L	NP	SC	C	C	L	NP	SC	Total
Ca-Cl		4					1				4	1		5
Ca-HCO ₃	13	25	1	15	9	16		3		22	41	1	18	82
Ca-Mixte		1				1					2			2
Ca-SO ₄		1				1					2			2
Mg-HCO ₃					1					1				1
Mixte-Cl	1									1				1
Mixte-HCO ₃	1									1				1
Na-Cl	6				2				1	9				9
Na-HCO ₃	16	3		1	2	1				18	4		1	23
Na-SO ₄		1									1			1
Total général	37	35	1	16	14	19	1	3	1	52	54	2	19	127

Note : C : confiné ; L : libre = non confiné ; SC : semi confiné et NP : inconnu

Les tendances décrites à partir du Tableau 4.7 sont bien visibles sur les diagrammes de Piper (Figure 4.13), où la géologie du roc est plus détaillée.

Dans les aquifères de la Province de Grenville, la majorité des échantillons sont de type Ca-HCO₃ et proviennent d'aquifères non confinés. Les échantillons de type Na-HCO₃ et Na-Cl sont localisés généralement dans les aquifères confinés. Les types d'eau intermédiaires sont souvent situés à des profondeurs supérieures à 70 m. Pour les puits dans les roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent, les six échantillons de type Na-Cl et Na-HCO₃ se situent dans des aquifères confinés. Pour les six échantillons de type Ca-HCO₃, ils ont été recueillis majoritairement dans des aquifères non confinés. Le niveau de confinement de l'aquifère, ou plus précisément la présence ou non d'une couche d'argile déposée par la Mer de Champlain, semble être le facteur qui détermine le type d'eau dans les roches sédimentaires.

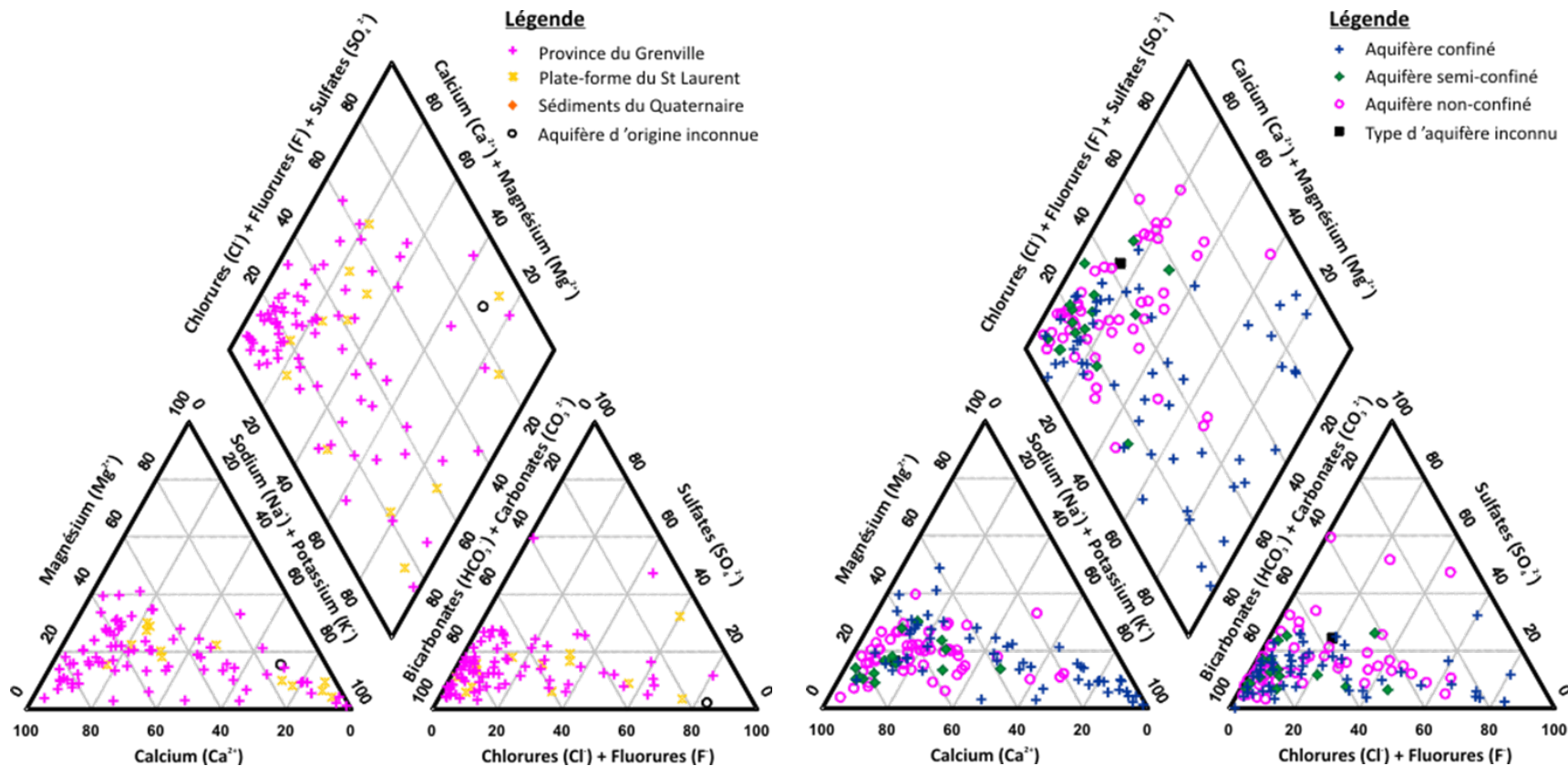
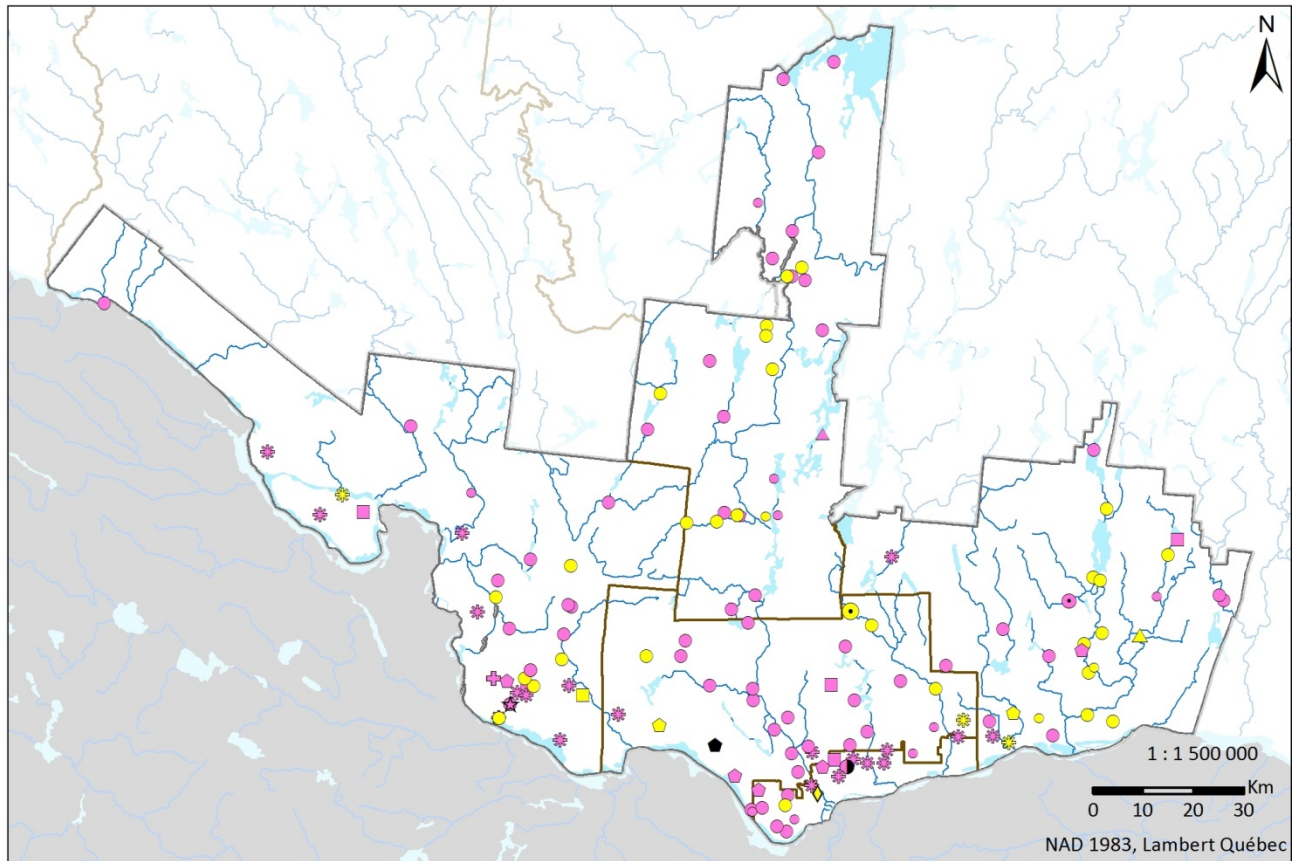


Figure 4.13 : Diagrammes de Piper pour les données PACES selon le type d'aquifère (à gauche) et le niveau de confinement (à droite)

La Figure 4.14 présente la répartition spatiale des types d'eau. Les échantillons de type Ca-HCO₃ sont répartis sur l'ensemble de la zone d'étude, mais en moins grand nombre le long de la rivière des Outaouais, où les types d'eau Na-Cl et Na-HCO₃ dominent.



Types d'eau

Puits dans les aquifères fracturés

- Ca-Cl
- Ca-HCO₃
- ⊙ Ca-Mixte
- ▲ Ca-SO₄
- Mixte-Cl
- ☆ Mixte-HCO₃
- ◆ Na-Cl
- ✱ Na-HCO₃
- ⊕ Na-SO₄
- Non calculable

Puits dans les dépôts du Quaternaire

- Ca-Cl
- Ca-HCO₃
- ▲ Ca-SO₄
- ⊙ Ca-Mixte
- ◆ Mg-HCO₃
- ◆ Na-Cl
- ✱ Na-HCO₃
- Non calculable

Type d'aquifère inconnu

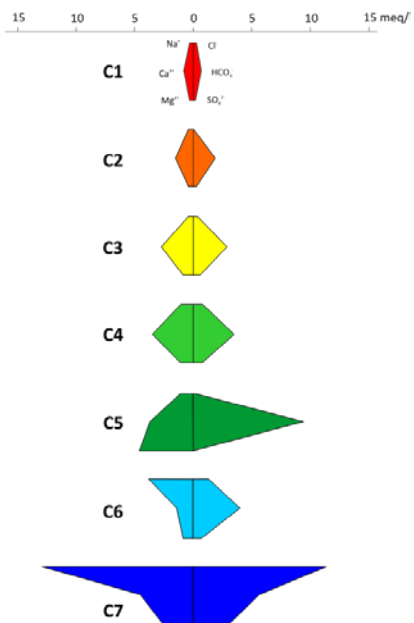
- Na-Cl

Figure 4.14 : Répartition spatiale des types d'eau en fonction du type d'aquifère

4.10.1.2 Analyse statistique multivariée

La détermination des types d'eau permet de mettre en évidence trois types d'eau représentatifs de la région, mais ne tient compte que des concentrations en ions majeurs. Une étude plus approfondie a été entreprise dans le cadre de travaux de doctorat concernant l'hydrochimie de la région de l'Outaouais (Montcoudiol *et coll.*, en préparation). Une analyse statistique multivariée, utilisant jusqu'à 14 paramètres, a permis de classer les échantillons en 7 groupes. Les détails de cette analyse multivariée sont disponibles dans les travaux de Montcoudiol *et coll.* (en préparation). Le Tableau 4.8 présente les caractéristiques de chacun des groupes.

Tableau 4.8 : Caractéristiques des groupes d'échantillons tels que définis lors de l'analyse statistique multivariée



Type d'eau	Géologie	Confinement	Valeurs faibles	Valeurs élevées
Ca-HCO ₃ (7/12)	Q (10/12)	L (11/12)	B, Ba ²⁺ , Br ⁻ , F ⁻ , Mn ²⁺ , NH ₄ ⁺ , Sr ²⁺ , alcalinité, dureté, TDS, pH	NO ₃ ⁻ , ORP, O ₂
Ca-HCO ₃ (30/32)	PG (23/32)	L (18/32)	Br ⁻ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻	
Ca-HCO ₃ (20/21)	PG (15/21)	L (9/21)	Mn ²⁺ , NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
Ca-HCO ₃ (17/21)	PG (12/18)	L (6/18) SC (6/18) C (6/18)	Br ⁻ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻	Ba ²⁺ , Mn ²⁺
Mg-HCO ₃ (1/1)	Q (1/1)	C (1/1)		
Na-HCO ₃ (18/25)	PG (16/25)	C (19/25)	NO ₃ ⁻ , ORP, O ₂	B, F ⁻ , NH ₄ ⁺ , pH
Na-Cl (8/19) Ca-HCO ₃ (4/19)	PG (8/19) PFSL (7/19)	C (10/19) L (7/19)		B, Br ⁻ , F ⁻ , NH ₄ ⁺ , Sr ²⁺ , alcalinité, dureté, TDS

Note : Q : Quaternaire ; PG : Province de Grenville ; PFSL : Plate-forme du St Laurent ; L : Libre = non confiné ; SC : Semi confiné ; C : Confiné.

Pour les groupes C1 à C4, la forme des diagrammes de Stiff (présentés à gauche du Tableau 4.8) est assez similaire et montre une prédominance du calcium et des ions bicarbonates en tant que cation et anion majeurs, respectivement. Ainsi, le type d'eau Ca-HCO₃ est dominant dans ces quatre groupes. Le groupe C1 correspond à des eaux faiblement minéralisées, assez proche de la composition des eaux de pluie, avec des concentrations les plus faibles par rapport aux autres groupes pour la plupart des paramètres chimiques tels que le pH. En revanche, les concentrations en NO₃⁻ sont assez élevées, s'expliquant par le fait que la majorité des puits sont localisés dans des aquifères superficiels non confinés. Les concentrations en oxygène ainsi que les valeurs de potentiel d'oxydo-réduction sont élevées, indiquant des conditions oxydantes, typiques des zones de recharge. Les groupes C2 à C4 représentent des eaux un peu plus évoluées, avec une augmentation de la minéralisation (identifiable par l'aire du polygone du diagramme de Stiff ; Tableau 4.8) due à la dissolution de

la roche en place (dissolution des carbonates et des silicates par les eaux de recharge riches en CO₂ dissous).

Le groupe C5 n'est composé que d'un seul échantillon avec une chimie assez particulière. La chimie de ce groupe n'est pas encore bien comprise et des travaux sont en cours afin de mieux la comprendre.

Les groupes C6 et C7 présentent des degrés d'évolution d'eaux plus anciennes. Les échantillons du groupe C7 se caractérisent par une forte minéralisation (moyenne supérieure à 1000 mg/L). Au sein de ce groupe, deux types d'évolution sont distingués selon le type d'aquifère. Durant l'invasion par la Mer de Champlain, les eaux de recharge dans la zone inondée étaient d'origine marine (un mélange de 34 % d'eau de mer et 66 % d'eau douce en provenance des glaciers et de la pluie, d'après Cloutier *et coll.* (2010)). La signature marine, associée à la présence de bromures dans l'eau, est encore présente dans les échantillons du groupe C7 en provenance d'aquifères confinés où la recharge est faible. Ces échantillons sont de type Na-Cl. Pour les échantillons du groupe C7 collectés dans des aquifères non confinés, la recharge est plus importante et les échantillons sont trop dilués pour que la signature marine soit encore visible (concentrations en bromures inférieures aux limites de détection). Ces échantillons présentent différents faciès lorsqu'ils sont prélevés dans les roches de la Province de Grenville (Ca-Cl, Na-Cl et Na-HCO₃) et Ca-HCO₃ dans les roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent. Le diagramme de Stiff du groupe C6 est typique des eaux avec un faciès Na-HCO₃, résultant de l'échange cationique entre le sodium et le calcium. Le sodium a remplacé le calcium sur les échangeurs cationiques lors de l'épisode de la Mer de Champlain. Une fois la Mer de Champlain retirée de la région, le sodium est progressivement remplacé par le calcium contenu dans l'eau de recharge (de type Ca-HCO₃ - groupe C1) résultant en des eaux riches en sodium et bicarbonates.

La Figure 4.15 présente la répartition des échantillons en fonction de leur groupe. Les échantillons des groupes C1 et C2 sont localisés dans les zones d'altitude où la recharge des aquifères a lieu. Ceux des groupes C3 et C4 sont situés dans les vallées, en particulier le long de la vallée de la Gatineau tandis que C6 et C7 sont concentrés le long de la rivière des Outaouais, où les aquifères sont confinés par les argiles de la Mer de Champlain.

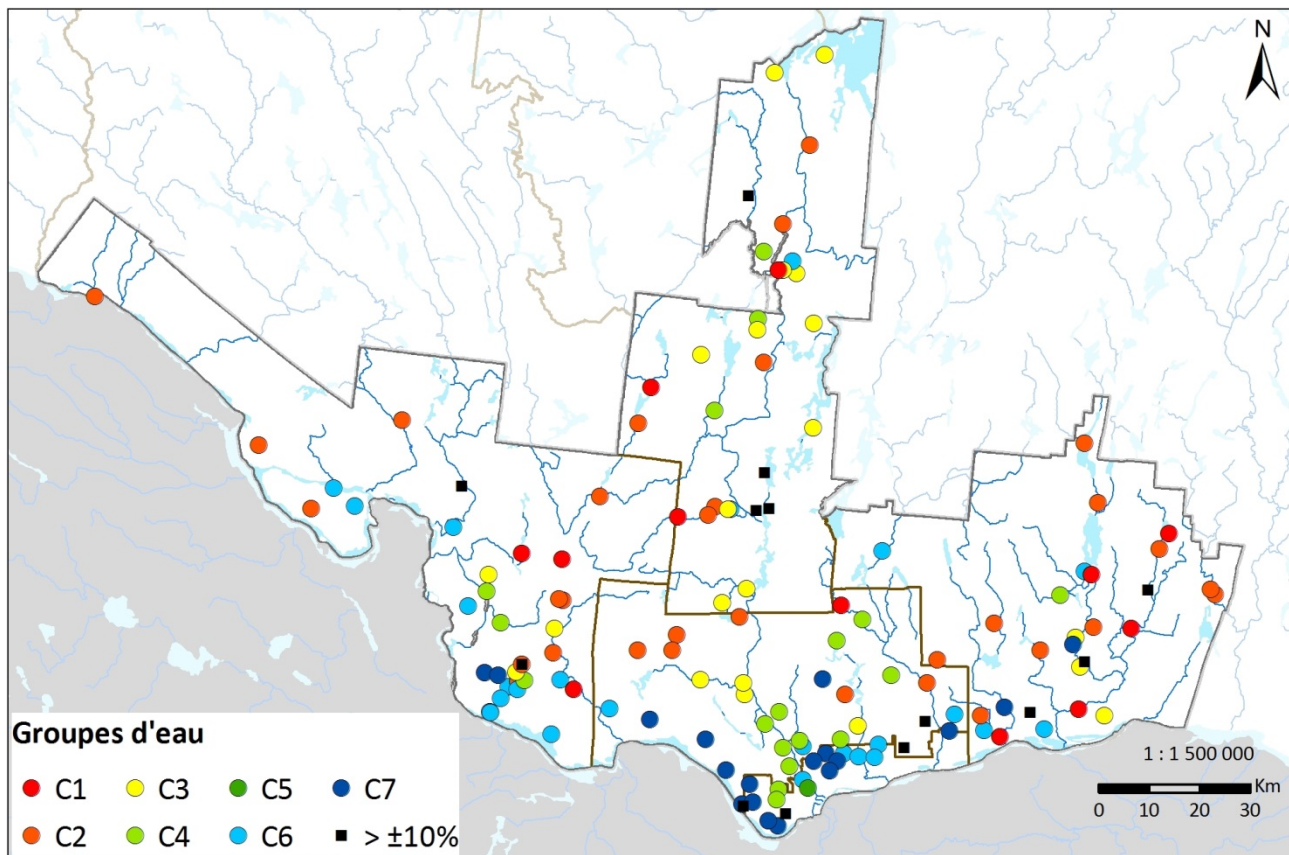


Figure 4.15 : Répartition spatiale des échantillons selon les groupes d'eau définis par l'analyse statistique multivariée.

4.10.2 Qualité naturelle de la ressource

Afin de définir la qualité de l'eau souterraine dans les aquifères du territoire à l'étude, 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), 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).

4.10.2.1 Dépassements des critères de potabilité

Les critères de potabilité sont établis pour des substances qui pourraient avoir des impacts sur la santé humaine. Le Tableau 4.9 présente les statistiques et les dépassements observés pour les critères de potabilité pour les données provenant des campagnes d'échantillonnage réalisées dans le cadre du projet et celles en provenance de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT. Les fluorures et l'uranium mesurés dans le cadre du projet montrent des dépassements significatifs (7,2 % et 5 % des échantillons respectivement; en

chiffres foncés). Pour ces deux paramètres, les dépassements sont principalement observés dans des puits d'aquifères fracturés, assez profonds (Figure 4.16). Les résultats d'analyses en provenance de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT corroborent les dépassements observés dans le secteur de Chelsea (partie aval de la rivière Gatineau), d'où proviennent la plupart des analyses de la base de données. Cependant, peu de données sont disponibles ailleurs qu'à Chelsea. Des problèmes de contamination par l'uranium sont connus dans la région, par exemple dans la réserve indienne de Kitigan Zibi Anishinabeg (INSPQ, 2003), mais n'ont pas pu être mis en évidence par les résultats d'échantillonnage PACES.

Quelques gisements de fluorite (MRN, 2013) sont exploités dans la partie ouest de la zone d'étude ainsi que dans le nord, et suggèrent que les dépassements en fluorures soient expliqués par la nature des roches. Les dépassements en fluorures concernent les échantillons ayant un faciès Na-HCO₃ où l'échange cationique entre Ca et Na augmente la dissolution de la fluorite suite à la suppression du calcium par adsorption. De plus, les conditions de pH basique de ces eaux limitent l'adsorption des fluorures.

Des gisements d'uranium (MRN, 2013) sont présents dans la région et les dépassements observés en uranium auraient une origine naturelle. Les dépassements concernent des puits avec des conditions oxydantes et des pH proches de la neutralité, conditions favorables à la formation de complexes avec les carbonates, contribuant à une augmentation de la dissolution de l'uranium.

Les dépassements en bore et nitrates-nitrites (1 chacun) des échantillons PACES sont similaires à ceux des échantillons de la base de données hydrogéologiques. Les faibles taux de dépassements dans les deux sources de données ne mettent pas en évidence une contamination à l'échelle régionale. Tout au plus, ils peuvent indiquer une contamination ponctuelle dans le temps et l'espace.

En ce qui concerne les autres paramètres, les statistiques de la base de données hydrogéologiques mettent en évidence des dépassements élevés pour le cadmium, le nickel et le plomb. Cependant, ces statistiques ne reflètent pas très bien les résultats d'analyses dans la mesure où certaines limites de détection sont plus élevées que les CMA. Il faut rappeler que, lorsque la valeur mesurée est inférieure à la limite de détection, la valeur est remplacée par la moitié de la limite de détection et que celle-ci peut être supérieure à la CMA, surestimant ainsi le nombre de dépassements. En effet, si les limites de détection supérieures aux CMA sont exclues, les dépassements sont bien moindres : 1 pour le cadmium (0.2 %), 31 pour le nickel (17 %) et 17 pour le plomb (3 %). De plus, selon les sources des données recueillies dans la base de données hydrogéologiques, les dépassements concernent majoritairement des sites contaminés.

Tableau 4.9 : Sommaire des dépassements de potabilité (les dépassements significatifs sont soulignés en chiffres foncés).

	CMA (mg/l)	Échantillons PACES						Échantillons BD					
		n valeurs	Quartile 25	Quartile 50	Quartile 75	n dép.	n dép. (%)	n valeurs	Quartile 25	Quartile 50	Quartile 75	n dép.	n dép. (%)
Ag	0,1	139	0,00005	0,00005	0,00005	0	0,0	49	0,0002	0,0005	0,01	2	4,1
As	0,01	139	0,0005	0,0005	0,0005	0	0,0	498	0,0005	0,0005	0,0005	16	3,2
B	5	139	0,0135	0,035	0,135	1	0,7	427	0,02	0,045	0,14	3	0,7
Ba	1	139	0,0185	0,047	0,085	0	0,0	468	0,03	0,08	0,2	1	0,2
Cd	0,005	139	0,0001	0,0001	0,0001	0	0,0	553	0,00005	0,00005	0,0005	102	18,4
Cr total	0,05	139	0,00025	0,00025	0,000625	0	0,0	527	0,001	0,003	0,008	3	0,6
F⁻	1,5	139	0,1	0,3	0,65	10	7,2	485	0,23	0,46	0,94	44	9,1
Mo	0,07	139	0,00025	0,0012	0,00245	1	0,7	56	0,005	0,006	0,015	0	0,0
Ni	0,02	139	0,0005	0,0005	0,0013	0	0,0	183	0,0015	0,05	0,026	82	44,8
NO₂⁻+NO₃⁻ (N)	10	139	0,02	0,07	0,53	1	0,7	206	0,015	0,05	0,31	0	0,0
Pb	0,01	139	0,00005	0,00005	0,00023	0	0,0	537	0,0005	0,0005	0,0025	94	17,5
Sb	0,006	139	0,0005	0,0005	0,0005	0	0,0	412	0,00005	0,00005	0,0005	10	2,4
Se	0,01	139	0,0005	0,0005	0,0005	0	0,0	448	0,0005	0,0005	0,0005	6	1,3
U	0,02	139	0,0005	0,0005	0,002	7	5,0	460	0,001	0,004	0,022	125	27,2

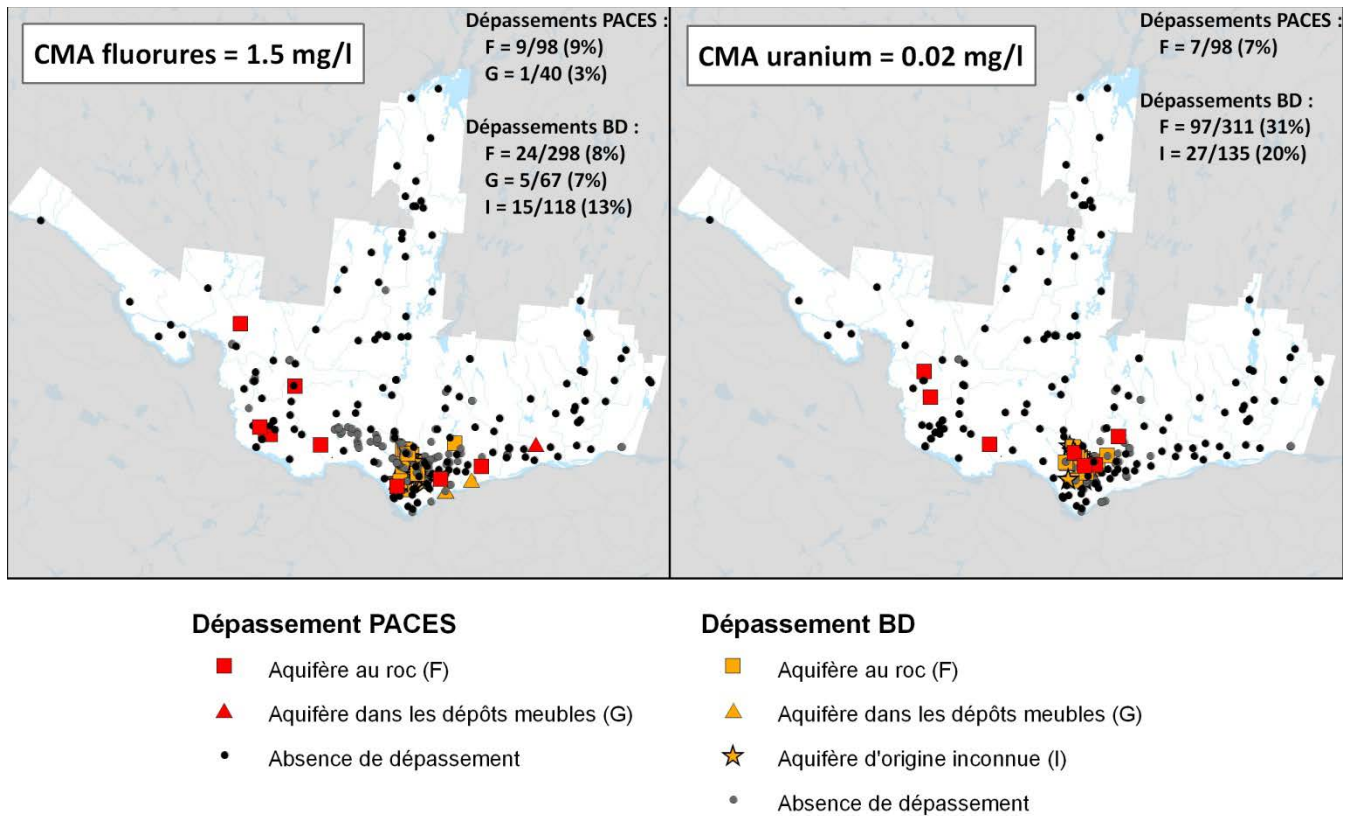


Figure 4.16 : Distribution spatiale des dépassements en fluorures et uranium

4.10.2.2 Dépassement des objectifs esthétiques

Les statistiques concernant les dépassements des objectifs esthétiques sont regroupées dans le Tableau 4.10. D'après les statistiques sur les échantillons PACES, des dépassements significatifs sont observés pour de nombreux paramètres : chlorures, fer, manganèse, matières dissoutes totales (MDT), sodium et pH (valeurs foncées dans le tableau). Pour ces paramètres, les dépassements sont également élevés pour les échantillons de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT.

D'après la carte des dépassements (Figure 4.17), un dépassement en fer est généralement accompagné par un dépassement en manganèse (16/18, soit 89 % pour les données PACES et 130/260, soit 50 % pour la base de données). Dans la région, le sous-sol est riche en fer comme en témoigne la présence de quelques gîtes minéraux en fer ainsi que de minéraux riches en fer tels que l'ocre (MRN, 2013). Il en est probablement de même pour le manganèse. Les dépassements sont répartis sur l'ensemble de la région et proviennent de tout type d'aquifère. Le fer et le manganèse auraient donc une origine naturelle.

Les distributions des dépassements en chlorures, sodium et matière dissoute totale (MDT ou TDS pour *Total dissolved solids*) sont assez semblables : ils sont localisés principalement le long de la rivière des Outaouais et principalement dans les puits aménagés dans le roc (Figure 4.17). Les échantillons PACES présentant un ou des dépassements pour ces paramètres proviennent des groupes C4 (3/21), C5 (1/1), C6 (7/25) et C7 (18/19). Pour le groupe C4 et C5, les échantillons sont de type Ca-HCO₃ (groupe C4) et Mg-HCO₃ (C5) et présentent des

dépassements uniquement pour les MDT. Les dépassements sont liés au vieillissement de l'eau (milieu confiné) et à la dissolution des carbonates et silicates (dureté supérieure à 200 mg/L). Pour le groupe C6, les dépassements concernent seulement les MDT ou les MDT et le sodium selon l'intensité de l'échange cationique (dureté généralement inférieure à 200 mg/L). Dans le groupe C7, une distinction peut être effectuée entre les aquifères confinés et non confinés. Les échantillons reliquats de la Mer de Champlain (de type Na-Cl, dans les aquifères confinés) présentent des dépassements pour les trois paramètres tandis que les autres (aquifères non confinés dans les roches sédimentaires, de type Ca-HCO₃) ne présentent généralement qu'un seul dépassement (pour les MDT) dû à la dissolution de la roche encaissante (calcaire), entraînant des valeurs élevées de la dureté de l'eau.

Tableau 4.10 : Sommaire des dépassements des objectifs esthétiques (les dépassements significatifs sont soulignés en chiffres foncés).

	OE (mg/l)	Échantillons PACES						Échantillons BD					
		n valeurs	Quartile 25	Quartile 50	Quartile 75	n dép.	n dép. (%)	n valeurs	Quartile 25	Quartile 50	Quartile 75	n dép.	n dép. (%)
Al	0,1	139	0,0005	0,0038	0,005	3	2,2	80	0,015	0,05	0,05	13	16,3
Cl⁻	250	139	2,8	14	49,5	13	9,4	372	5	21,5	102,25	29	7,8
Cu	1	139	0,00025	0,00025	0,00205	0	0,0	578	0,004	0,012	0,036	0	0,0
Dureté totale	500	127	81,1	135	226	4	3,2	337	90	176	280	20	5,9
Fe	0,3	139	0,05	0,05	0,05	18	12,9	752	0,015	0,1	0,58	260	34,6
Mn	0,05	139	0,00215	0,0099	0,039	28	20,1	718	0,005	0,025	0,108	229	31,9
MDT/TDS	500	127	191	313	486	30	23,6	115	235	362	593,5	36	31,3
Na	200	139	5,15	13	67	15	10,8	328	5,675	18,8	61	22	6,7
pH	6,5-8,5	138	7,39	7,93	8,49	39	28,3	343	7	7,5	7,84	41	12
SO₄²⁻	500	139	13	22	41	1	0,7	333	14	24	42	5	1,5
Sulfures totaux	0,05	139	0,01	0,01	0,01	6	4,3	153	0,015	0,03	0,09	53	34,6
Zn	5	139	0,0025	0,0061	0,0105	0	0,0	232	0,01	0,02	0,03	2	0,9

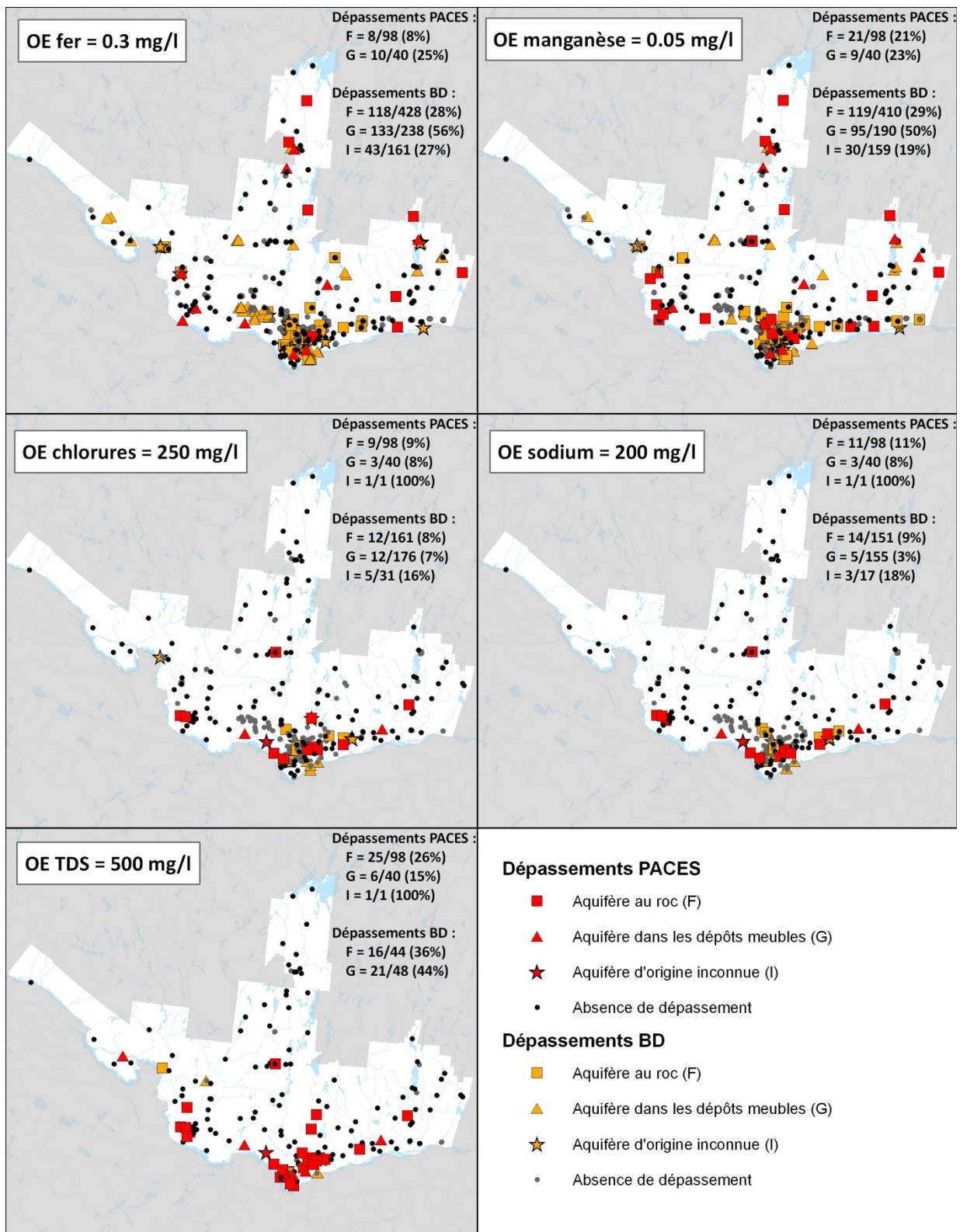


Figure 4.17 : Distribution spatiale des dépassements pour les objectifs esthétiques en fer, manganèse, chlorures, sodium et matière dissoute totale

La Figure 4.18 présente les dépassements pour le pH. Le pourcentage de dépassements pour les données PACES est plus important que pour la base de données hydrogéologiques et concernent principalement les pH basiques (33), essentiellement pour les groupes C6 et C2. Ils sont répartis sur l'ensemble du territoire, mais sont majoritaires le long de la rivière des Outaouais, dans les aquifères confinés. Les pH acides (6 dépassements) concernent les échantillons du groupe C1 (4/6), représentatif des eaux de recharge et ceux du groupe C4 (2/6).

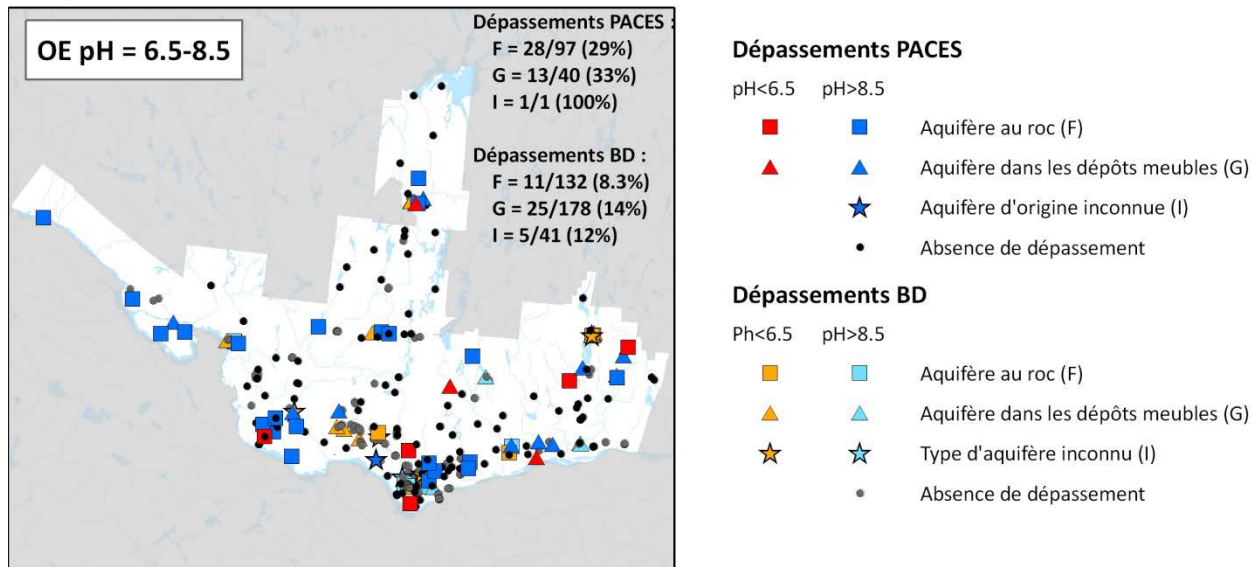


Figure 4.18 : Distribution spatiale des dépassements pour le pH

4.11 Synthèse des contextes hydrogéologiques

Les sections 4.1 à 4.10 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 l'hydrostratigraphie des dépôts. 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 région de l'Outaouais peut être synthétisée en trois grands contextes hydrogéologiques (Figure 4.19) :

1. Les collines des hautes terres
2. Les grandes vallées des hautes terres
3. La vallée de l'Outaouais

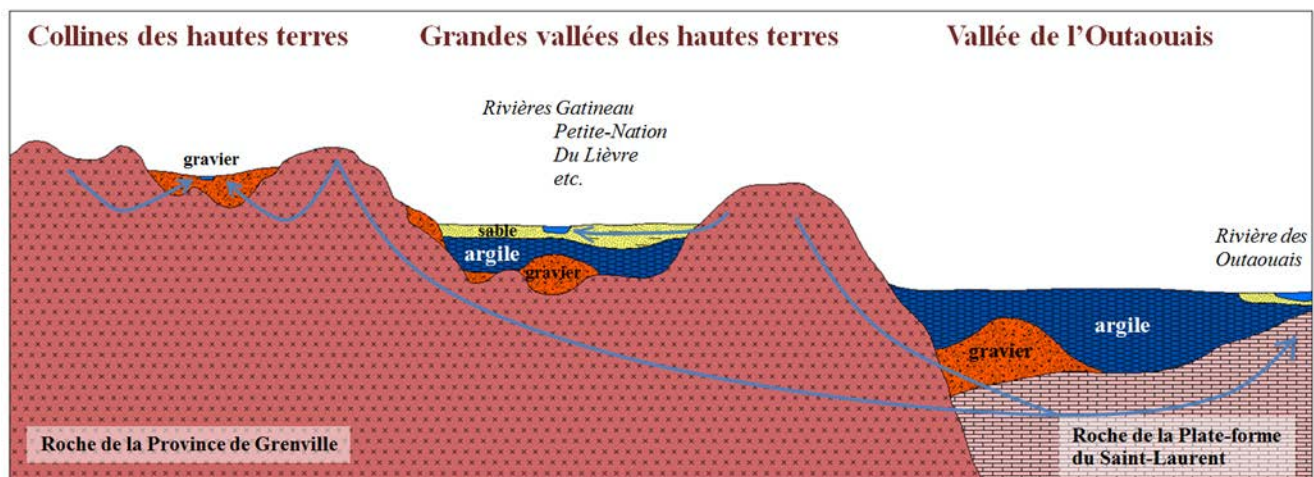


Figure 4.19 : Synthèse des contextes hydrogéologiques

4.11.1 Les collines des hautes terres

Le contexte hydrogéologique des collines des hautes terres se trouve dans la région physiographique du Bouclier canadien et couvre la majorité du territoire de l'Outaouais. Des dépôts de tills, composés de sable et gravier silteux y sont généralement minces et ont des perméabilités moyennement élevées. Les vallées entre les collines sont comblées, par endroit, de dépôts de sables et gravier d'origine fluvioglaciale ou alluvionnaire. Les sédiments d'origine marine sont absents de ces hautes terres dont l'altitude est au-dessus de la limite d'incursion de la mer de Champlain. Par conséquent, l'aquifère régional de roc fracturé de même que les aquifères de dépôts meubles de plus petite envergure est non confiné. L'aquifère de roc fracturé de la Province de Grenville est caractérisé par des perméabilités faibles qui dépendent de l'ouverture, de l'espacement et de la connectivité des réseaux de 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 sont élevés, car cette portion du territoire bénéficie 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. Ainsi, l'eau souterraine de ce secteur est généralement très peu évoluée du point de vue géochimique et donc, peu chargée en ions majeurs. Lors des campagnes d'échantillonnage, des dépassements des critères de potabilité (Gouvernement du Québec, 2013b) pour l'uranium et le fluorure ainsi que des objectifs esthétiques (CEP, 2012) pour le fer et le manganèse ont été mesurés dans des puits répartis sur tout le territoire municipalisé de l'Outaouais. La présence de ces éléments serait liée à la composition minéralogique naturelle de la roche.

4.11.2 Les grandes vallées des hautes terres

Les grandes vallées des hautes terres se trouvent également dans la région physiographique du Bouclier canadien. L'épaisseur des dépôts est particulièrement importante dans les vallées des rivières Gatineau, Petite Nation et du Lièvre où elle atteint souvent 70 mètres. Des dépôts fluvioglaciaires de sable et gravier et des dépôts marins argileux ou sableux sont présents dans ces vallées dont l'altitude se situe sous la limite d'incursion de la mer de Champlain. Les aquifères dans les dépôts de sable et gravier fluvioglaciaires ont des perméabilités élevées et sont en lien hydraulique avec l'aquifère de roc fracturé de la Province de Grenville dont la perméabilité est plus faible. L'aquifère de roc fracturé est confiné ou semi confiné par endroit dépendamment de la présence d'une couche d'argile ou de silt d'origine marine. Dans les secteurs où des sédiments marins deltaïques, des alluvions ou des dépôts éoliens se retrouvent en surface, la stratigraphie des dépôts est parfois complexe. En effet, les couches de silt ou d'argile très peu perméables présentes en profondeur sont discontinues et difficiles à définir. Des aquifères sableux non confinés se retrouvent par endroit en surface dans les dépôts marins d'origine deltaïque; leur épaisseur et leur étendue sont toutefois limitées.

L'eau souterraine s'écoule régionalement vers la rivière des Outaouais au sud et, plus localement, des hauts topographiques vers le fond des vallées des rivières tributaires de l'Outaouais. Toutefois, la stratigraphie des dépôts peut entraîner des directions d'écoulement locales plus complexes. La recharge de l'aquifère dans ce contexte est variable. En effet, la présence de dépôts marins argileux très peu perméables limite la recharge par endroit alors que des dépôts fluvioglaciaires en surface favorisent l'infiltration des précipitations dans le sol jusqu'à l'aquifère. La signature géochimique de l'eau souterraine échantillonnée dans ce secteur est généralement caractéristique des eaux faiblement minéralisées et récemment infiltrées bien que des types d'eau intermédiaire soient présents par endroit.

4.11.3 La vallée de l'Outaouais

Dans la vallée de l'Outaouais correspondant à l'ensemble physiographique des Basses-terres du Saint-Laurent, l'épaisseur totale des dépôts peut atteindre plus de 100 mètres. Une épaisse couche d'argile d'origine marine, très peu perméable et relativement continue recouvre la majorité des aquifères de roc fracturé. D'importants complexes de dépôts de sable et gravier fluvioglaciaires très perméables sont présents dans la vallée de l'Outaouais particulièrement à la limite des deux ensembles physiographiques. Dans les secteurs est (MRC Papineau) et sud de la région (Ville de Gatineau), ces aquifères de dépôts meubles sont généralement confinés par une épaisse couche d'argile. Par contre, vers l'ouest dans la MRC Pontiac, ces aquifères de dépôts meubles sont parfois non confinés. La présence de dépôts marins deltaïques, d'alluvions ou de dépôts éoliens en surface dans le secteur ouest entraîne aussi, dans ce contexte, une certaine incertitude sur la présence de couches d'argile en profondeur bien que celles-ci soient généralement plus épaisses et continues que dans le contexte des grandes vallées des hautes terres. Les aquifères de dépôts meubles sont en lien hydraulique avec l'aquifère de roc fracturé qui est confiné sur la majorité du territoire de ce contexte.

L'eau souterraine de l'aquifère de roc fracturé de la Plate-forme du Saint-Laurent ou de la Province de Grenville s'écoule vers la rivière des Outaouais où elle fait résurgence. La nature argileuse des dépôts limite la recharge des eaux souterraines dans le secteur. Elle est toutefois plus élevée lorsque l'aquifère de roc fracturé ou de dépôts fluvioglaciaires est subaffleurant. La signature géochimique de l'eau souterraine ayant une forte minéralisation témoigne du confinement des aquifères. Des dépassements des objectifs esthétiques (CEP, 2012) en chlorures, sodium, matière dissoute totale et pH sont relativement fréquents dans la vallée de l'Outaouais, principalement dans les aquifères de roc confiné.

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), mais 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.

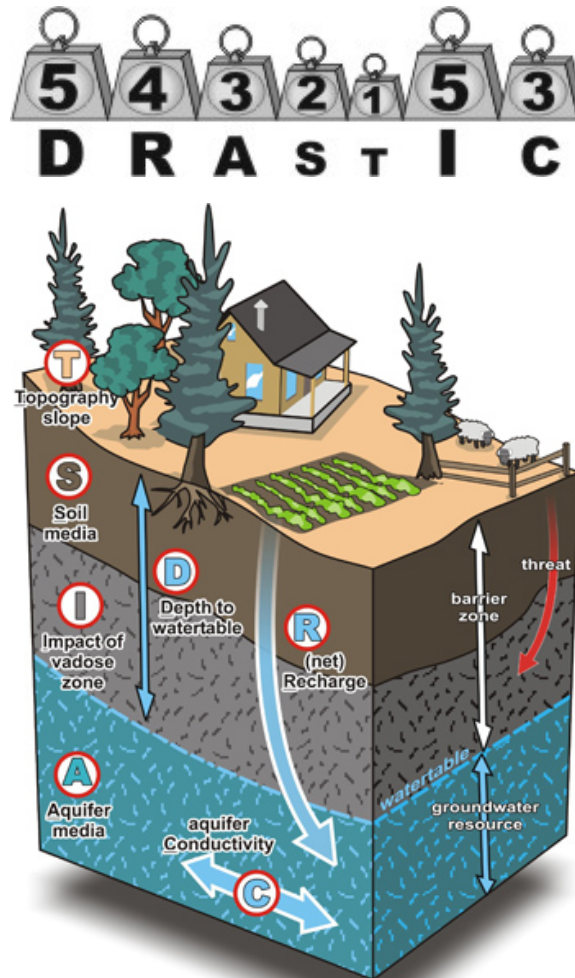
Dans le cadre de l'étude PACES-OUT, la vulnérabilité a été calculée selon la méthode DRASTIC (Aller *et coll.*, 1987) tel que recommandé par le MDDEFP. Cette méthode, dont l'utilisation est répandue, est d'ailleurs citée dans l'article 13 du Règlement sur la qualité de l'eau potable (Q-2, r.40) (Gouvernement du Québec, 2013b) et dans l'article 25 du Règlement sur le captage des eaux souterraines (Q-2, r.6) (Gouvernement du Québec, 2013c). La méthode DRASTIC prend en compte les sept paramètres suivants qui sont illustrés à la Figure 5.1 : 1) la profondeur de l'aquifère ($D = \textit{groundwater Depth}$), 2) la recharge ($R = \textit{net Recharge}$), 3) le milieu aquifère ($A = \textit{Aquifer media}$), 4) le type de sol ($S = \textit{Soil media}$), 5) la pente ($T = \textit{Topography}$), 6) l'impact de la zone vadose ($I = \textit{Impact of vadose zone media}$) et 7) la conductivité hydraulique de l'aquifère ($C = \textit{hydraulic Conductivity}$). 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. La valeur étant relative, plus la valeur est élevée, plus un aquifère est vulnérable à la contamination.

La vulnérabilité a été calculée selon le protocole proposé par le GRIES (Rivard *et coll.*, 2012) (Annexe E8 : Protocole pour la préparation du Livrable 22 – Vulnérabilité de l'aquifère de roc régional), 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 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. 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 4.9), 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.



Source: Rivard et coll. (2012)

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

La vulnérabilité des aquifères est présentée à la Carte 22 : Vulnérabilité des aquifères selon l'indice DRASTIC (en annexe cartographique distincte du rapport) et à la Figure 5.2 tandis que l'établissement des cotes pour chacun des paramètres DRASTIC est détaillé à l'Annexe 12 : Cotes et distribution spatiale des paramètres DRASTIC.

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, la Carte 22 présente de nombreuses similitudes avec la Carte 12 : Géologie du Quaternaire. 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 en

Outaouais 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.

Dans certains secteurs de la vallée de l'Outaouais, entre autres dans la portion est, la nature argileuse de la zone vadose limite la recharge et favorise ainsi la protection des aquifères contre des sources potentielles de contamination situées à la surface du sol. À ces endroits, l'indice de vulnérabilité est faible, soit inférieur à 100. Du secteur Hull jusqu'à l'extrémité ouest de la vallée de l'Outaouais, la vulnérabilité des aquifères varie énormément en réponse à la diversité des contextes. Par exemple, les aquifères des quelques amas de sables et graviers fluvioglaciaires dans le secteur de Shawville sont plus vulnérables que l'aquifère de roc fracturé dans le secteur de Eardley-Luskville où il est recouvert par d'importantes épaisseurs d'argile. À certains endroits, des dépôts de faibles épaisseurs couvrent l'aquifère de roc et ce contexte se traduit par une vulnérabilité intermédiaire (100 à 140).

Dans les hautes terres, la vulnérabilité des aquifères est très variable et se distingue selon les contextes de vallées ou de collines. Dans les grandes vallées telles que celles des rivières Gatineau, de la Petite Nation ou du Lièvre, les aquifères montrent généralement un faible indice de vulnérabilité, c'est-à-dire inférieur à 100, car ils sont confinés par des dépôts silto-argileux. À l'opposé, certaines dépressions topographiques, comblées par des dépôts fluvioglaciaires affichent de forts indices de vulnérabilité qui sont supérieurs à 140. Sur les collines où l'aquifère de roc est recouvert par des dépôts de till, la vulnérabilité est intermédiaire avec des indices DRASTIC de 100 à 140. Ce dernier contexte de till recouvrant des aquifères de roc est prédominant dans la région de l'Outaouais.

Tout comme la recharge, la vulnérabilité n'a pas été calculée aux endroits où des étendues d'eau ou des milieux humides étaient cartographiés et dominants sur les mailles du modèle (250 m par 250 m).

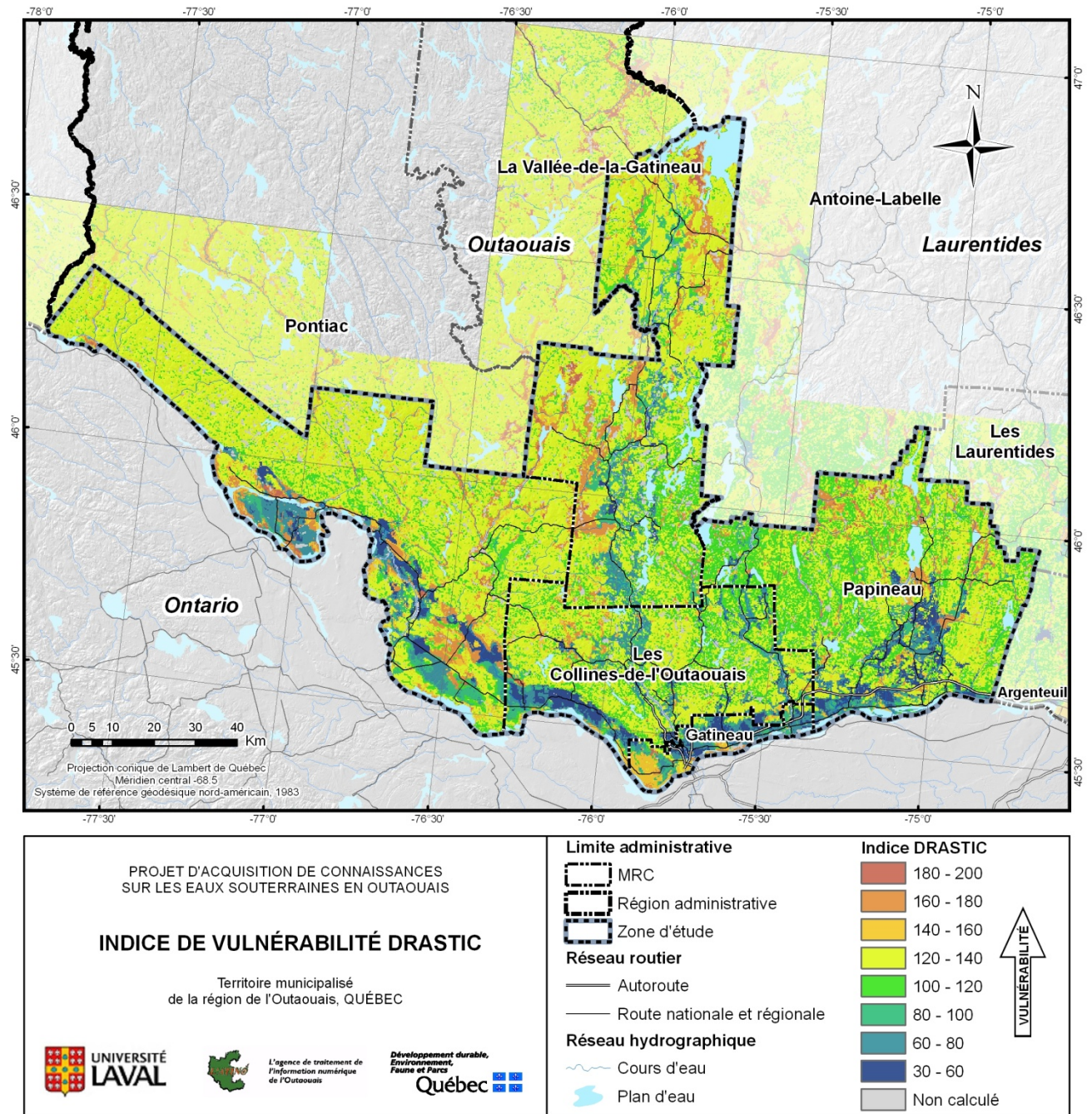


Figure 5.2 : Indice de vulnérabilité DRASIC des aquifères (Carte 22)

5.2 Risque potentiel de contamination des eaux souterraines

Les activités anthropiques représentent des sources potentielles de contamination pour les eaux souterraines. Ces activités sur le territoire du PACES-OUT sont illustrées à la Carte 23 : Activités potentiellement polluantes et sites contaminés (en annexe cartographique distincte du rapport) et à la Figure 5.3. Les données proviennent des rôles d'évaluation de chacune des MRC sur lesquelles a été appliquée la méthodologie de l'UQAT et INRS-ETE (2013) (Annexe E9 : Protocole pour la préparation du Livrable 23 – Indice de densité d'activités anthropiques). La Carte 23 et la Figure 5.4 présentent également les sites contaminés recensés dans les répertoires provinciaux (Répertoire des terrains contaminés (MDDEFP, 2013c) et Répertoire des dépôts de sol et des résidus industriels (MDDEFP, 2013d)) et fédéral (Inventaire des sites contaminés fédéraux (SCT, 2013)). Le milieu affecté (sol, eau souterraine ou mixte) est identifié.

La méthodologie de l'UQAT et INRS-ETE (2013) associe à chaque code d'utilisation des biens-fonds (CUBF) une classe de risque en fonction des 4 facteurs suivants : 1) la toxicité des contaminants, 2) la quantité de contaminants, 3) la superficie de la zone d'impact de l'activité et 4) la récurrence du rejet possible vers l'environnement. Le risque illustré représente uniquement le risque intrinsèque lié à l'activité puisqu'il n'a pas été mis en corrélation avec la vulnérabilité des aquifères (section 5.1).

Les sites contaminés tout comme les activités industrielles, commerciales et institutionnelles potentiellement polluantes se concentrent dans les zones urbaines et périurbaines de la Ville de Gatineau et des municipalités les plus développées.

Les risques associés aux activités agricoles et aux résidences avec installation septique n'ont pas été classifiés considérant les grandes disparités des risques possibles à l'intérieur même de chaque catégorie. Le risque de contamination des activités agricoles diffère selon le secteur d'activité (élevage, grandes cultures, production laitière, etc.). Il en est de même pour les résidences avec installation septique (l'âge, le type et l'entretien du système septique). De plus, ces informations ne sont pas toutes connues. L'agriculture se concentre dans les vallées des rivières du Lièvre, de la Gatineau et de l'Outaouais, dans les MRC des Collines-de-l'Outaouais et Pontiac. Les résidences avec installation septique se concentrent spécifiquement dans la MRC des Collines-de-l'Outaouais et plus diffusément sur le territoire, autour des lacs où se pratique la villégiature (MRC de La Vallée-de-la-Gatineau et MRC Papineau).

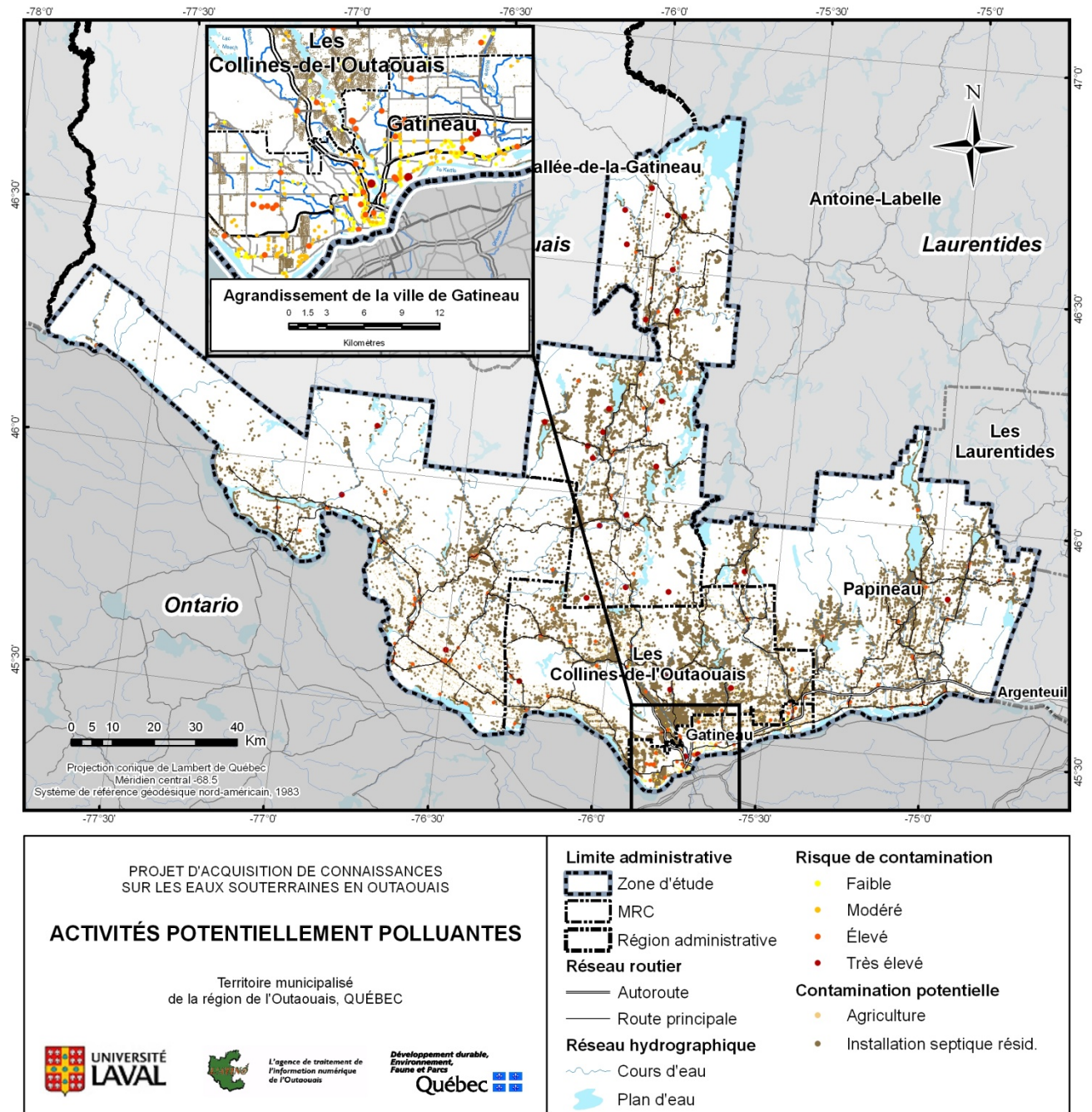


Figure 5.3 : Représentation du risque potentiel de contamination lié aux activités anthropiques (Carte 23)

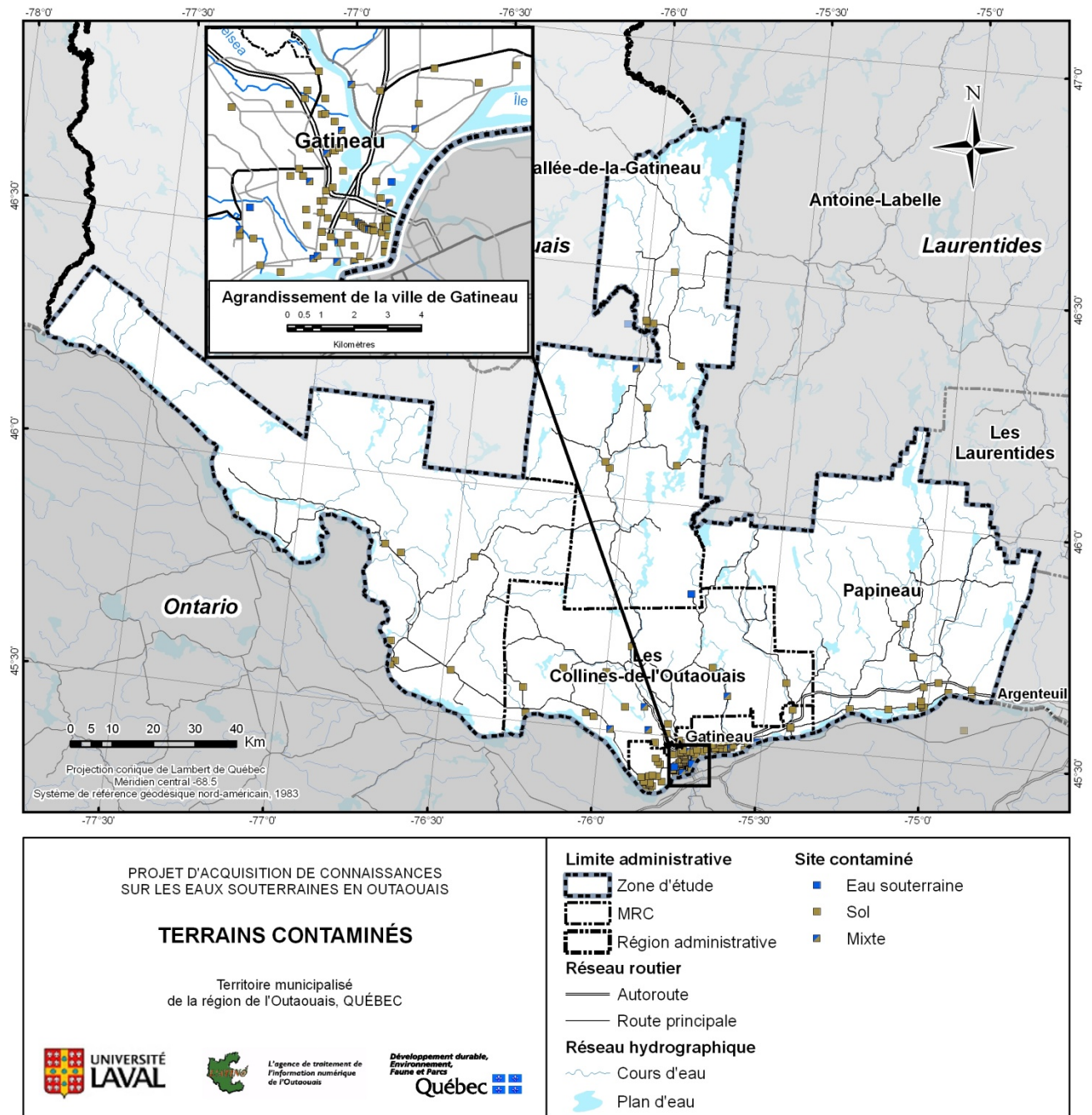


Figure 5.4 : Représentation des terrains contaminés (Carte 23)

5.3 Utilisation de l'eau souterraine

La Carte 26 : Utilisation de l'eau (en annexe cartographique distincte du rapport) et la Figure 5.6 illustrent l'estimation de l'utilisation de la ressource en eau selon l'origine (souterraine ou surface) pour chaque municipalité sur le territoire à l'étude. La Carte 26 contient également une évaluation des différents usages de l'eau.

Les données proviennent de sources multiples selon les utilisations de la ressource. L'annexe E10 présente le protocole proposé par le GRIES pour l'évaluation de l'utilisation de l'eau (INRS-ETE *et coll.*, 2012). La méthodologie utilisée spécifiquement sur le territoire municipalisé de l'Outaouais est présentée à l'Annexe 13 : Méthodologie d'évaluation de l'utilisation de l'eau. Les municipalités sont la principale source d'information; elles renseignent sur leur type d'approvisionnement en eau (souterraine ou de surface) et sur les volumes prélevés par leur réseau de distribution d'eau potable. Cette information est ensuite répartie selon 3 types d'utilisations : 1) résidentielle, 2) agricole et 3) institutionnelle, commerciale et industrielle (ICI). La région de l'Outaouais étant la 4^e région en importance au Québec pour la villégiature, la méthodologie d'évaluation de la consommation résidentielle tient compte à la fois des résidents permanents et des résidents saisonniers. La consommation résidentielle est estimée à 250 L/personne/jour pour les résidents permanents et est pondérée par un facteur de 0,25 pour les résidents saisonniers, telle que décrit à l'Annexe 13 : Méthodologie d'évaluation de l'utilisation de l'eau.

Le Tableau 5.1 présente la synthèse de l'estimation de l'utilisation de l'eau pour chacune des MRC et la Ville de Gatineau tandis que la Figure 5.5 illustre les parts du prélèvement en eau souterraine selon les usages pour chaque MRC, pour la Ville de Gatineau et pour le territoire à l'étude.

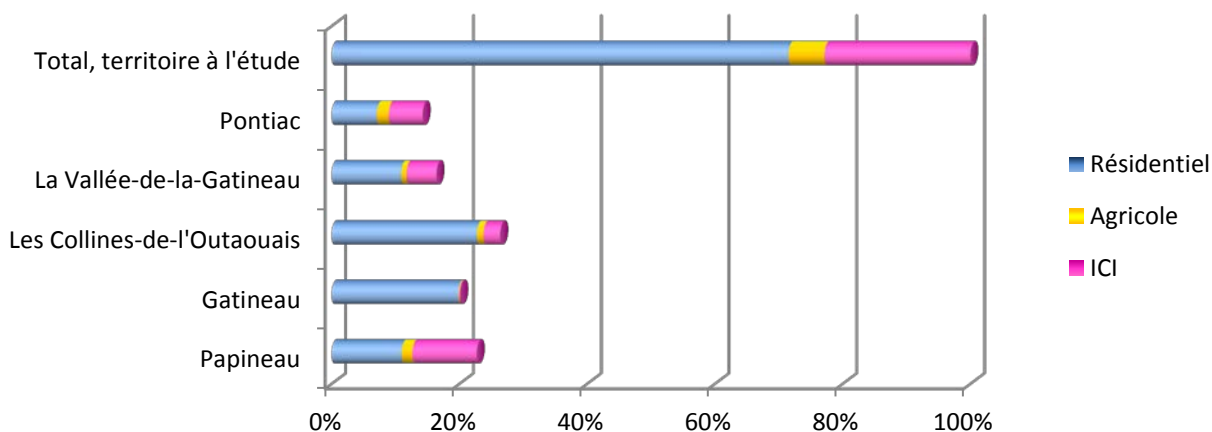


Figure 5.5 : Estimation de l'usage de l'eau souterraine, par ville et MRC

Tableau 5.1 : Synthèse de l'utilisation de l'eau (en m³/an), par ville et MRC

Utilisation de l'eau		Papineau	Gatineau	Les Collines-de-l'Outaouais	La Vallée-de-la-Gatineau	Pontiac	Total, territoire à l'étude	
Souterraine	Réseau	Résidentielle	676 336	-	16 053	560 583	372 480	1 625 452
		Agricole	87 003	-	-	13 476	488	100 967
		* ICI	334 066	-	-	225 871	727 406	1 287 343
		Sous-total	1 097 404	-	16 053	799 930	1 100 374	3 013 761
	Hors-réseau	Résidentielle	1 449 627	3 841 317	4 394 798	1 550 224	1 000 000	12 235 966
		Agricole	243 019	31 115	199 481	146 758	361 208	981 581
		ICI	1 612 950	34 015	507 153	683 280	300 262	3 137 660
		Sous-total	3 305 595	3 906 447	5 101 432	2 380 262	1 661 469	16 355 205
	Total	Résidentielle	2 125 962	3 841 317	4 410 851	2 110 808	1 372 479	13 861 417
		Agricole	330 022	31 115	199 481	160 234	361 696	1 082 548
		ICI	1 947 015	34 015	507 153	909 151	1 027 667	4 425 001
		Sous-total	4 402 999	3 906 447	5 117 485	3 180 192	2 761 843	19 368 966
	Surface	Réseau	Résidentielle	262 434	20 372 201	86 109	79 114	83 554	20 883 412
Agricole			1 927	10 431	17 765	1 349	49	31 521
ICI			294 448	24 223 813	65 577	182 337	20 224	24 786 399
Sous-total			558 809	44 606 445	169 451	262 800	103 827	45 701 332
Hors-réseau		Résidentielle	-	-	-	-	-	-
		Agricole	620 819	53 243	441 461	185 162	379 080	1 679 765
		ICI	21 243 135	5 794 702	773 865	336 346	2 137	28 150 185
		Sous-total	21 863 954	5 847 945	1 215 326	521 508	381 216	29 829 949
Total		Résidentielle	262 434	20 372 201	86 109	79 114	83 554	20 883 412
		Agricole	622 746	63 674	459 226	186 511	379 129	1 711 286
		ICI	21 537 583	30 018 515	839 442	518 683	22 361	52 936 584
		Sous-total	22 422 762	50 454 390	1 384 777	784 308	485 043	75 531 280
Total		Réseau	Résidentielle	938 770	20 372 201	102 162	639 697	456 034	22 508 864
	Agricole		88 930	10 431	17 765	14 825	537	132 488
	ICI		628 514	24 223 813	65 577	408 208	747 630	26 073 742
	Sous-total		1 656 214	44 606 445	185 504	1 062 730	1 204 201	48 715 094
	Hors-réseau	Résidentielle	1 449 627	3 841 317	4 394 798	1 550 224	1 000 000	12 235 966
		Agricole	863 838	84 358	640 942	331 920	740 288	2 661 346
		ICI	22 856 085	5 828 717	1 281 018	1 019 626	302 399	31 287 845
		Sous-total	25 169 549	9 754 392	6 316 758	2 901 770	2 042 685	46 185 154
	Total	Résidentielle	2 388 397	24 213 518	4 496 960	2 189 921	1 456 034	34 744 830
		Agricole	952 768	94 789	658 707	346 745	740 825	2 793 834
		ICI	23 484 599	30 052 530	1 346 595	1 427 834	1 050 029	57 361 587
		Total	26 825 763	54 360 837	6 502 262	3 964 500	3 246 886	94 900 248

Note : * ICI = Industriel, commercial et institutionnel

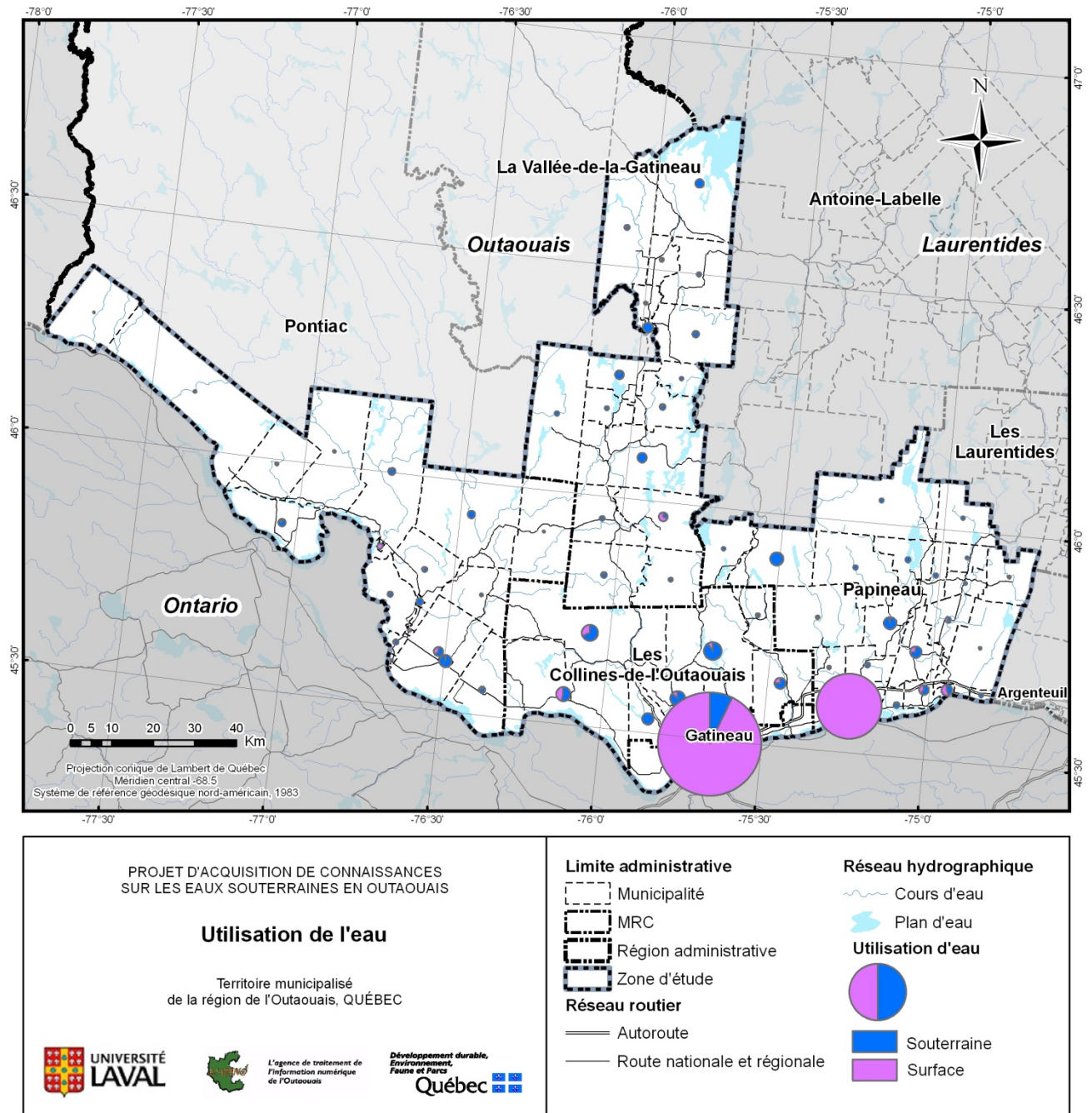


Figure 5.6 : Représentation de l'utilisation de l'eau souterraine et de surface (Carte 26)

La consommation totale annuelle du territoire du PACES-OUT est estimée à 94,9 Mm³/an, dont 19,4 Mm³/an proviennent de l'eau souterraine, soit l'équivalent de 20,4 %. Une population d'environ 137 700 résidents permanents et 56 700 résidents secondaires s'alimente en eau souterraine. La MRC Papineau et la Ville de Gatineau sont les seuls territoires pour lesquels l'approvisionnement en eau de surface domine l'approvisionnement en eau souterraine (respectivement 83,6 % et 92,8 % d'approvisionnement en eau de surface). Pour la MRC Papineau, ce sont les ICI qui expliquent cette consommation importante d'eau de surface, alors que pour la Ville de Gatineau, c'est son importante population alimentée en eau de surface. Dans les autres MRC, l'approvisionnement en eau souterraine comble entre 78,7 % (MRC des Collines-de-l'Outaouais) et 85,1 % (MRC Pontiac) des besoins, essentiellement pour l'approvisionnement en eau potable.

Les ICI expliquent à eux seuls 87,5 % de l'utilisation en eau de la MRC Papineau et 55,3 % de la Ville de Gatineau. Pour les MRC des Collines-de-l'Outaouais et de la Vallée-de-la-Gatineau, ce sont les usages résidentiels qui constituent la majorité (respectivement 69,2 % et 55,2 %) des prélèvements. Bien que les usages résidentiels de la MRC Pontiac constituent 44,8 % des besoins et les ICI 32,2 %, la MRC se démarque par l'utilisation de l'eau à des fins agricoles (22,8 %), nettement supérieure aux autres MRC.

Dans toutes les MRC, l'eau souterraine sert avant tout à l'alimentation en eau potable (71,5 %, dont 8,4 % par des réseaux municipaux et 63,1 % par des puits individuels). Même dans la Ville de Gatineau, qui approvisionne son réseau de distribution à partir d'eau de surface, 98,3 % de l'eau souterraine prélevée l'est pour les besoins résidentiels. Les utilisations agricoles de l'eau souterraine représentent 5,6 % des prélèvements de la ressource sur le territoire à l'étude. La MRC Pontiac est celle qui utilise le plus l'approvisionnement souterrain pour ses activités agricoles (13,1 %). Les prélèvements d'eau souterraine à des fins d'ICI représentent 22,8 % pour le territoire municipalisé de l'Outaouais. La MRC Papineau (44,2 %) et la MRC Pontiac (37,2 %) sont les deux MRC prélevant le plus d'eau souterraine pour les usages ICI.

5.4 Potentiel d'exploitation aux fins de consommation

Le potentiel d'exploitation des aquifères de dépôts meubles est généralement beaucoup plus élevé que celui des formations de roc. Bien que le roc fracturé contienne de l'eau souterraine, sa faible capacité à soutenir un débit important de prélèvement en eau ne permet généralement que l'installation de puits de captage à des fins domiciliaires.

Le potentiel d'exploitation de l'eau souterraine aux fins de consommation dépend, entre autres, des paramètres suivants :

- le volume d'eau souterraine contenu dans les aquifères de dépôts meubles :
Le volume d'eau souterraine efficace (V_e) contenu dans un aquifère de dépôts meubles se calcule en multipliant la porosité de drainage (S_y) des couches de dépôts meubles 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.

- la capacité à prélever l'eau souterraine aisément (la transmissivité) :
La transmissivité totale, T_{tot} , d'un empilement de n couches de dépôts meubles est donnée par l'équation :

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

où K_i est la conductivité hydraulique de la couche i et b_i est son épaisseur.

- le taux de renouvellement de l'eau souterraine (la recharge)
- la qualité globale de l'eau souterraine.

À l'échelle de la région de l'Outaouais, le volume d'eau souterraine contenu dans les aquifères de dépôts meubles n'a pas été évalué. La raison principale est qu'il n'existe pas de relation directe entre le volume d'eau souterraine contenue dans les aquifères et le volume d'eau qu'il est possible d'exploiter. Ainsi, une présentation des volumes d'eau souterraine contenu dans les aquifères représenterait une information trompeuse sur le potentiel d'exploitation des eaux souterraines. Toutefois, il est possible d'apprécier le volume d'eau disponible à l'aide des nombreuses cartes présentées dans ce rapport. Par exemple, la Carte 18 et la Figure 4.8 de la section 4.5 présentant l'épaisseur et l'étendue des aquifères de dépôts meubles donnent une indication des secteurs à forts volumes d'eau souterraine correspondants aux aquifères de dépôts meubles les plus étendus et les plus épais. Les analyses de la section 4.7 traitant des propriétés hydrauliques des matériaux géologiques renseignent sur la transmissivité des aquifères. La recharge des aquifères est quantifiée sur la Carte 28 et à la Figure 4.12 de la section 4.9, alors que la qualité globale de l'eau souterraine est établie en détail à la section 4.10.

L'exploitation de l'eau souterraine doit aussi tenir compte du concept de gestion durable des aquifères (voir section suivante). Ce concept peut être défini comme étant 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. Sophocleous (1997, 2000), Bredehoeft (2002), et Devlin et Sophocleous (2005) ajoutent plus de détails sur le concept de la durabilité des eaux souterraines.

5.5 Gestion durable de la ressource

Le captage de l'eau souterraine peut servir à des fins d'approvisionnement domestique, agricole et industriel ou encore pour l'énergie géothermique. 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 5.7, 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 détail 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, 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 5.8). 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. L'étape suivante de modélisation des eaux souterraines proposée par le conseil ne requiert pas obligatoirement l'utilisation des modèles mathématiques complexes, 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 des modèles HELP[®] et DRASTIC dans le cadre de ce projet pour calculer la recharge et la vulnérabilité des aquifères sont des exemples de modélisation reposant sur ces étapes précédentes.

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 préliminaire du potentiel d'un aquifère, mais pour éviter la surexploitation, plusieurs caractéristiques du système hydrogéologique doivent être considérées, incluant les taux de pompage et la localisation des puits de captages.

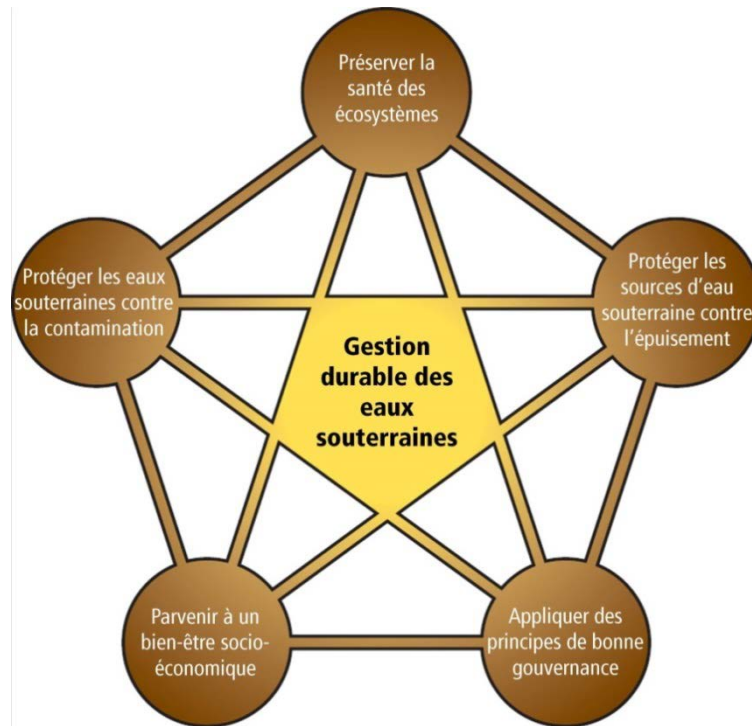


Figure 5.7 : Pentagone de la gestion durable des eaux souterraines (d'après CAC, 2009)

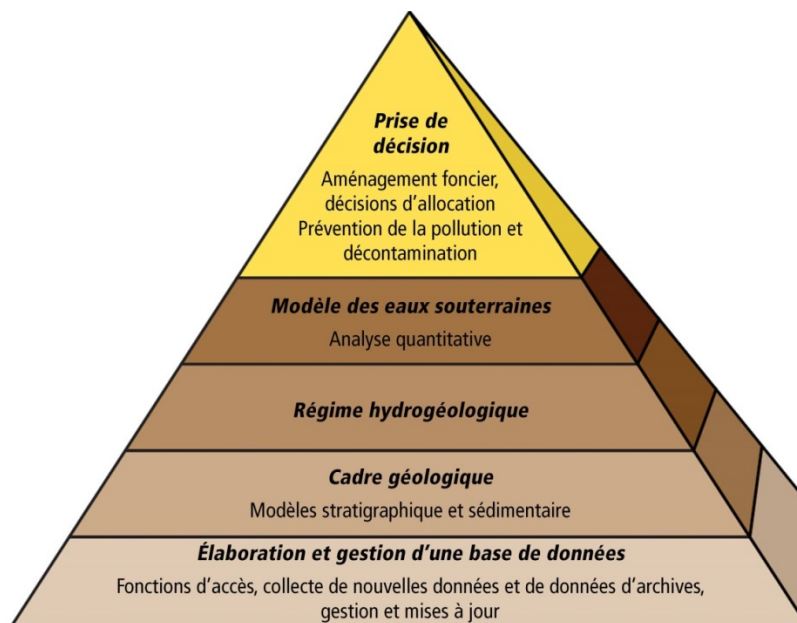


Figure 5.8 : Connaissances scientifiques nécessaires pour une gestion durable des eaux souterraines (d'après CAC, 2009)

6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusions

Le Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Outaouais (PACES-OUT) a pour objectif de dresser le portrait régional de la ressource en eau souterraine sur le territoire municipalisé de cette région 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. 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

La nature et la distribution spatiale des unités géologiques exercent un contrôle déterminant sur l'écoulement et la composition chimique de l'eau souterraine. L'histoire géologique de la région de l'Outaouais a mené à la formation de deux provinces géologiques: le Grenville et la Plate-forme du Saint-Laurent. Ces roches sont recouvertes d'une architecture tridimensionnelle complexe de dépôts meubles d'origines glaciaire, marine et alluvionnaire. Les dépôts meubles ont été définis par des hydrofaciès régionaux sur la base de leurs propriétés hydrauliques. Des coupes et un modèle hydrostratigraphiques ont permis de définir cette architecture sur l'ensemble du territoire.

Dans les collines des hautes terres, les dépôts de till sableux sont généralement peu épais et ne confinent pas l'aquifère de roc fracturé sous-jacent. Des sables et graviers d'origine alluvionnaire ou fluvioglaciaire se retrouvent par endroit dans les vallées et peuvent former des aquifères de dépôts meubles non confinés de petite envergure.

Plus bas en altitude, dans les grandes vallées des hautes terres, la succession des dépôts est parfois complexe comprenant des dépôts fluvioglaciaires de sable et gravier, des dépôts marins argileux et des dépôts sableux, d'origines marine, alluvionnaire ou éolienne. Une couche d'argile ou de silt est présente par endroit et confine de façon discontinue les aquifères sous-jacents. Les dépôts de sable et gravier fluvioglaciaire forment localement des aquifères de dépôts meubles en lien hydraulique avec l'aquifère régional de roc fracturé. Des aquifères de surface, de petite taille, formés de dépôts marins deltaïques sableux sont présents par endroit.

Dans la vallée de l'Outaouais, la majorité de l'aquifère de roc fracturé est confiné par une épaisse couche d'argile d'origine marine. Des complexes de dépôts de sable et gravier fluvioglaciaires sont présents par endroit et forment d'importants aquifères de dépôts meubles en lien hydraulique avec l'aquifère de roc sous-jacent. Dans le secteur ouest de la vallée de l'Outaouais, certains de ces aquifères sont non confinés alors qu'ils sont généralement confinés dans l'est et le centre de la vallée. Tout comme dans les grandes vallées des hautes terres, la présence en surface de dépôts marins deltaïques sableux, d'alluvions et de dépôts éoliens entraîne une incertitude sur la présence d'une couche d'argile en profondeur et, par conséquent, sur le confinement des aquifères sous-jacents. La disponibilité et la qualité de l'information stratigraphique influencent aussi l'incertitude sur le modèle hydrostratigraphique.

Sur le territoire municipalisé de l'Outaouais, la carte piézométrique illustre que le niveau piézométrique est généralement peu profond (en moyenne 6 m) et que l'écoulement régional se fait vers la rivière des Outaouais; plus localement, des hauts topographiques vers le fond des vallées. Les aquifères de dépôts meubles présents localement dans les dépôts fluvioglaciaires sont en lien hydraulique avec l'aquifère régional de roc fracturé alors que les aquifères de surface de petite envergure présents dans certains dépôts marins deltaïques sableux ne le sont pas toujours.

Les propriétés hydrauliques issues de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT ont été analysées en fonction de chaque hydrofaciès. Les valeurs obtenues sont cohérentes avec celles tirées de la littérature sauf pour les hydrofaciès de dépôts fins (HF1 et HF2) pour lesquels peu de données sont disponibles. Les aquifères de sable ou de sable et gravier (HF4 et HF5) sont les plus perméables, suivi des aquifères dans les roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent (HF6) et de ceux dans les roches de la Province de Grenville (HF7). Ces propriétés permettent de calculer la recharge et de parfaire la compréhension de l'écoulement régional.

Un bilan hydrologique a été réalisé et a permis de quantifier ses principales composantes dont la précipitation, l'évapotranspiration, le ruissellement et la recharge des aquifères. En hydrogéologie, la recharge permet de quantifier les taux de renouvellement des aquifères et est souvent utilisée pour le développement d'outils de gestion durable des eaux souterraines. 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 collines des hautes terres qui représentent la majorité du territoire à l'étude, les taux de recharge sont les plus importants avec des valeurs entre 300 et 500 mm/an. Dans les grandes vallées des hautes terres, la recharge est variable. Les aquifères affleurants de dépôts d'origine fluvioglaciaire se renouvellent à des taux élevés (350 à 500 mm/an) alors que les secteurs présentant des dépôts marins argileux ont des recharges de moins de 100 mm/an. Dans la vallée de l'Outaouais, la recharge est limitée à des taux de 100 mm/an dans les secteurs est, où la nature argileuse des dépôts favorise le ruissellement, alors que des valeurs modérées à élevées ont été calculées dans la MRC de Pontiac là où les aquifères sont sub-affleurants.

La détermination des types d'eau, ou faciès géochimiques, permet de comprendre l'évolution des eaux souterraines et les différents contextes hydrogéologiques. Dans les hautes terres, 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. La signature géochimique de l'eau souterraine de la vallée de l'Outaouais ayant généralement une forte minéralisation témoigne du confinement des aquifères.

Les principaux dépassements de critère de potabilité (Gouvernement du Québec, 2013b) mesurés dans les échantillons prélevés lors du PACES-OUT, sont pour le fluorure et l'uranium, dans des puits d'aquifères fracturés, assez profonds. Des dépassements des objectifs esthétiques (CEP, 2012) répartis sur tout le territoire ont aussi été mesurés pour le fer et le manganèse. Des dépassements en chlorures, sodium, matière dissoute totale et pH sont également relativement fréquents dans la vallée de l'Outaouais, principalement dans les aquifères de roc confiné. L'ensemble de ces dépassements serait d'origine naturelle.

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. La carte de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC produite 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. 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 fortement de la nature des dépôts meubles définis dans le modèle hydrostratigraphique. Ainsi l'incertitude liée à la définition du modèle, s'applique aussi à la carte de la vulnérabilité. Dans certains secteurs de la vallée de l'Outaouais, entre autres dans la portion est, la nature argileuse de la zone vadose limite la recharge et favorise ainsi la protection des aquifères contre des sources potentielles de contamination situées à la surface du sol. À ces endroits, l'indice de vulnérabilité est faible, soit inférieur à 100. Du centre jusqu'à l'extrémité ouest de la vallée de l'Outaouais, la vulnérabilité des aquifères varie énormément. En effet, la vulnérabilité est très élevée (160 à 200) au droit des aquifères de dépôts meubles non confinés alors qu'elle est faible (30 à 80) lorsque d'épaisses couches d'argile recouvrent l'aquifère de roc. Elle se traduit par des valeurs intermédiaires (110 à 140) lorsque l'aquifère de roc est peu profond. Dans les grandes vallées des hautes terres, les aquifères montrent généralement un faible indice de vulnérabilité (inférieur à 100) car ils sont confinés ou semi confinés par des dépôts silto-argileux. À l'opposé, certaines dépressions topographiques, comblées par des dépôts fluvioglaciaires affichent de forts indices de vulnérabilité (supérieur à 140). Dans les collines des hautes terres où l'aquifère de roc est recouvert par des dépôts de till, la vulnérabilité est intermédiaire avec des indices DRASTIC de 100 à 140. Ce dernier contexte de till recouvrant des aquifères de roc est prédominant dans la région de l'Outaouais.

Une cartographie des activités anthropiques représentant une source potentielle de contamination des eaux souterraines et des sites contaminés a été réalisée. Les activités industrielles commerciales et institutionnelles ont été classifiées en fonction de leur niveau de risque selon une méthodologie élaborée par l'UQAT et INRS-ETE (2013). Les sites contaminés tout comme les activités potentiellement polluantes se concentrent dans les zones urbaines et périurbaines de la Ville de Gatineau et des municipalités les plus développées. Les activités agricoles et les résidences avec installation septique sont des activités potentiellement polluantes, mais leur niveau de risque n'a pas été déterminé. Elles se retrouvent dans les secteurs ruraux et de villégiature répartis sur l'ensemble du territoire. 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 et d'eau de surface prélevés par chaque municipalité ou ville ont été estimés pour les utilisations résidentielle, agricole et ICI (industrielle, commerciale et institutionnelle). La consommation totale annuelle sur territoire municipalisé de l'Outaouais est estimée à 94,9 Mm³/an, dont 19,4 Mm³/an (20,4%) proviennent de l'eau souterraine. Par contre, la MRC Papineau et la Ville de Gatineau sont les seuls territoires pour lesquels l'approvisionnement en eau de surface domine l'approvisionnement en eau souterraine. Sur l'ensemble du territoire, l'eau souterraine sert principalement à l'alimentation en eau potable alors que les eaux de surface sont surtout utilisées par les industries, commerces et institutions.

Le potentiel d'exploitation des aquifères de dépôts meubles est généralement beaucoup plus élevé que celui des formations de roc et dépend : du volume d'eau souterraine contenu dans les aquifères, de la transmissivité (capacité à prélever l'eau aisément), de la recharge et de la qualité de l'eau souterraine. Les résultats du projet tels que les cartes de l'épaisseur des aquifères de dépôts meubles, de la piézométrie et de la recharge de même que les analyses des propriétés hydrauliques et de la qualité de l'eau souterraine permettent une évaluation qualitative du potentiel d'exploitation de l'eau souterraine. L'exploitation de l'eau souterraine doit aussi tenir compte du concept de gestion durable des aquifères qui 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 d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Outaouais a mené à l'élaboration d'une base de données hydrogéologiques, à la compréhension des contextes hydrogéologiques régionaux et à la modélisation de la recharge et de la vulnérabilité des aquifères. Ces travaux représentent les connaissances scientifiques nécessaires pour la gestion durable de la ressource et constituent une avancée notable pour la province de Québec et la région de l'Outaouais, maintenant plus outillées face aux enjeux reliés aux eaux souterraines.

6.1.3 Limitations de l'étude

Le projet PACES-OUT a pour objectif l'amélioration des connaissances sur les eaux souterraines d'un vaste territoire de 13 762 km². Compte tenu le caractère régional de l'étude et étant donné la disponibilité limitée des informations de forages dans certains secteurs, il importe de rappeler que les analyses ne sont valables qu'à l'échelle régionale. Les résultats provenant d'études locales pourraient différer des résultats présentés dans ce rapport et auraient alors préséance sur celui-ci.

De manière générale, la profondeur d'investigation considérée dans le cadre du PACES-OUT se limite à une centaine de mètres, profondeur maximale à laquelle les puits de captage sont généralement aménagés sur le territoire municipalisé de l'Outaouais. L'architecture et les propriétés des dépôts meubles sont considérées comme bien connues, à l'exception des dépôts d'origine deltaïque, alluvionnaire et éolienne car ils sont hétérogènes et la présence d'argile ou de silt en profondeur est souvent discontinue. Étant normalement plus difficile à caractériser, les propriétés hydrauliques du roc ainsi que son degré de fracturation sont moins bien connus. Des études locales seront requises pour approfondir ces connaissances limitées.

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 contre la contamination, de préserver les écosystèmes, de parvenir à un bien-être socio-économique et d'appliquer des principes de bonne gouvernance.

Le PACES-OUT 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 organismes publics afin qu'elles soient 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-OUT 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, ou DRASTIC pour estimer la vulnérabilité, peut déjà aider les gestionnaires de la ressource. Si les objectifs futurs de gestion nécessitent de faire appel à des modèles plus complexes, par exemple des modèles numériques 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

- Acreman *et coll.*, 2003 – ACREMAN, M. ET A. BULLOCK. «The role of wetland in the hydrological cycle». *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 7, No. 3. pp. 358-389.
- 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.
- 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.
- Arnold *et coll.*, 2011 – ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., SRINIVASAN, R., WILLIAMS, J.R., HANEY, E.B., NEITSCH, S.L. *Soil and Water Assesment Tool Input/Output Documentation version 2009*. Grasseland, soil and Water Research laboratory – Agricultural Research Service Blackland Research Center – Texas AgriLife Research.
- Aylsworth *et coll.*, 1997 – AYLSWORTH, J.M., LAWRENCE, D.E. ET EVANS, S.G. *Landslide and settlement problems in sensitive marine clay, Ottawa Valley*. Geological Association of Canada. Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, 1997, Ottawa, Field Trip B1, 63 p.
- Bear *et coll.*, 1971 – BEAR, A.J., POOLE, W.H., SANFORD, B.V., SAUVAGEAU, J.A.R., ET ST-PIERRE SAVARD, Y.F. *Map 1334A, Rivière Gatineau, Québec-Ontario, 1:1000,000 Geological Atlas, Sheet 31*. Geological Survey of Canada, Ottawa, Canada.
- 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 Parcs. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Québec, Canada.
- 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.
- Blayo *et coll.*, 2008. BLAYO, Y. ET P. HÉRAULT. *Analyse des coûts/bénéfices de la villégiature sur territoire public en Outaouais dans une perspective municipale – Phase I : MRC La Vallée-de-la-Gatineau*, 93 p.
- Bouffroy *et coll.*, 2012 – BOUFFROY, E. ET G. LESSARD. *Identification, classification et proposition de priorisation pour la conservation de certains milieux humides en Estrie*. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2012-16. 41 p. + 4 annexes.
- 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.

- BPR, 2003 – BPR GROUPE-CONSEIL. *Analyse des questions d'approvisionnement en eau pour le secteur de l'agriculture*, Programme national d'approvisionnement en eau, Province de Québec, Rapport final. Préparé pour Agriculture et Agroalimentaire Canada, Bureau de l'environnement, Direction générale des politiques stratégiques.
- Bradbury et Rothschild, 1985 – BRADBURY, K.R., ROTHSCCHILD, 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, 2002 – BREDEHOEFT, J. D., «The water budget myth revisited: Why hydrogeologists model.» *Ground Water* 40(4), pp. 340-345.
- 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.
- 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. » *Ecologia* 108 (4), pp. 583-595.
- Caron et coll., 2013 – CARON, O., MILETTE, S., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Grand-Remous* (31J02). carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- 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://geogratias.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

- Cloutier *et coll.*, 2010 – CLOUTIER, V., LEFEBVRE, R., SAVARD, M. M. et THERRIEN, R. « Desalination of a Sedimentary Rock Aquifer System Invaded by Pleistocene Champlain Sea Water and Processes Controlling Groundwater Geochemistry. » *Environmental Earth Sciences*. 59(5): pp. 977-994.
- Comeau *et coll.*, 2011 – COMEAU, G., AYOTTE, S., MOLSON, J., LEMIEUX, J.M., MORENO, A., THERRIEN, R., THERRIEN, P., MONTCOUDIOL, N., ROY, É., DABBADIE, M., LAMARCHE, L. *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines en Outaouais*. Rapport d'étape I, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, mars 2011, 81 p.
- Comeau *et coll.*, 2012a – COMEAU, G., MOLSON, J., LEMIEUX, J.M., TALBOT, M.C., THERRIEN, R., MONTCOUDIOL, N., AYOTTE, S., BÉRUBÉ, S., FABIEN-OUELLET, G., FISET, P., FORTIER, R., GRAF, T., MORENO, A., STERCKX, A. *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, 54 p.
- Comeau *et coll.*, 2012b – 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.
- 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.
- Daigneault *et coll.*, 2012 – DAIGNEAULT, R.-A., ROY, M., LAMOTHE, M., GODBOUT, P.-M., MILETTE, S., LEDUC, É., HORTH, N., DUBOIS-VERRET, M., HURTUBISE, M.-A., LAMARCHE, O., *Rapport sur les travaux de cartographie des formations superficielles réalisés dans la portion est du territoire municipalisé de l'Outaouais en 2011-2012*. Département des sciences de la Terre et de l'Atmosphère et Département de géographie, Université du Québec à Montréal, 13 avril 2012.
- Devlin et Sophocleous, 2005 – DEVLIN, J.F., SOPHOCLEOUS, M. « The persistence of the water budget myth and its relationship to sustainability. » *Hydrogeology Journal* 13, pp.549-554.
- Dubé *et coll.*, 1985 – DUBÉ, P.-A. ET ROCHETTE, P. CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC. Conférence : *Les déficits hydriques*, Symposium sur l'eau : L'eau vue sous l'aspect agrométéorologique, Tome II, Québec, p. 32.
- Dubois-Verret *et coll.*, 2012 – DUBOIS-VERRET, M., MILETTE, S., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Maniwaki (31J05)*. Carte présentée au Ministère des ressources naturelles et de la Faune du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Dubois-Verret *et coll.*, 2013 – DUBOIS-VERRET, M., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région du lac Pythonga (31K08)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Environnement Canada, 2011 – ENVIRONNEMENT CANADA. *Rapport 2011 sur l'utilisation de l'eau par les municipalités*. Adresse URL : <http://www.ec.gc.ca/doc/publications/eau-water/COM1454/survey2-fra.htm>.

- Environnement Canada, 2012 – ENVIRONNEMENT CANADA. *Climat-Québec – Normales climatiques*. Adresse URL : www.climat-quebec.qc.ca, consulté le 6 décembre 2012.
- 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.
- Fiset et coll., 2012a – FISET, P., LEMIEUX, J.M., MOLSON, J., DORNER, S. *Synthèse et analyse préliminaire des résultats provenant du programme H₂O des Collines pour la période comprise entre le mois de janvier et septembre 2011*, Université Laval, Département de géologie et de génie géologique, janvier 2012, 97 p.
- Fiset et coll., 2012b – FISET, P., LEMIEUX, J.M., MOLSON, J., DORNER, S. « Groundwater and Surface Water Quality of the Regional Municipality of Collines-de-l'Outaouais, Quebec, Canada. » *Proceedings: IAH 2012 International Conference*, Niagara Falls, Canada.
- Freeze et Cherry, 1979 – FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.
- Fulton, 1989 – FULTON, R.J. *Foreword to the Quaternary Geology of Canada and Greenland; in Geology of Canada and Greenland*. R.J. Fulton, (ed.); Geological Survey of Canada, Geology of Canada no. 1.
- Fulton et Richard, 1987 – FULTON, R.J. ET RICHARD S.H. *Chronology of late Quaternary events in the Ottawa region; in Quaternary Geology of the Ottawa Region, Ontario and Québec*. Fulton, R.J., (ed.), Geological Survey of Canada, paper 86-23.
- Gadd, 1987 – GADD, N.R. *Geological setting and Quaternary deposits of the Ottawa region; in Quaternary 30 Geology of the Ottawa Region, Ontario and Québec*. Fulton, R.J., (ed.), Geological Survey of Canada, paper 86-23.
- 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>.
- Gilman, 2003 – GILMAN, E. *Planting trees in landscapes*, University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences.
- Globensky, 1987 – GLOBENSKY, Y. *Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent*. Ministère des Ressources naturelles du Québec, rapport MM 85-02.
- Godbout et coll., 2012a – GODBOUT, P.M., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE M. *Géologie des formations superficielles de la région Hawksbury (31G10 partie nord)*. Carte présentée au Ministère des ressources naturelles et de la Faune du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Godbout et coll., 2012b – GODBOUT, P.M., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Duhamel (31J03)*. Carte présentée au Ministère des ressources naturelles et de la Faune du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Godbout et coll., 2012c – GODBOUT, P.M., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE M. *Géologie des formations superficielles de la région de Saint-Jovite (31J02)*. Carte présentée au Ministère des ressources naturelles et de la Faune du Québec, échelle de 1 :50 000.

- Godbout *et coll.*, 2012d – GODBOUT, P.M., LAMARCHE, O., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Bouchette (31J04)*. Carte présentée au Ministère des ressources naturelles et de la Faune du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Godbout *et coll.*, 2013a – GODBOUT, P.M., ROY, M., DAIGNEAULT, R.A., ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Rolphton (31K04)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Godbout *et coll.*, 2013b – GODBOUT, P.M., ROY, M., DAIGNEAULT, R.A. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région du lac Kellog (31K16)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Godbout *et coll.*, 2013c – GODBOUT, P.M., ROY, M., DAIGNEAULT, R.A. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Chalk River (31K03)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Gogolev, 2002 – GOGOLEV, M.I. « Assessing groundwater recharge with two unsaturated zone modeling technologies. » *Environmental Geology* 42 (2-3), pp. 428-458.
- Gohier marketing, 2006 – GOHIER MARKETING. *Étude sur les villégiateurs de la MRC des Laurentides*, 117 p.
- Gouvernement du Québec, 2013a – GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Loi sur la qualité de l'environnement (Q-2)*. mise à jour 1^{er} 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 1^{er} 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 1^{er} mai 2013, Adresse URL : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=%2F%2FQ_2%2FQ2R40.htm.
- 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, pp. 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.
- Horth *et coll.*, 2012 – HORTH, N., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Arundel (31G15)*. Carte présentée au Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, échelle de 1 :50 000.

- Horth *et coll.*, 2013 – HORTH, N., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M., ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région du lac Usborne (31K02)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Hounslow, 1995 – HOUNSLOW, A. W. *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. Lewis Publisher. Boca Raton, Florida, USA.
- Hurtubise *et coll.*, 2012 – HURTUBISE, M.A., MILETTE, S., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE M. *Géologie des formations superficielles de la région de Thurso (31G11)*. Carte présentée au Ministère des ressources naturelles et de la Faune du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Hurtubise *et coll.*, 2013 – HURTUBISE, M.A., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Moncerf (31K09)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- INRS-ETE *et coll.*, 2012 – INRS-ETE, CGC, IRDA, OBV YAMASKA, *Protocole pour la préparation du livrable 26 – Utilisation de l'eau, Version préliminaire*, 19 avril 2012, 10 p.
- INSPQ, 2003 – INSTITUT NATIONAL DE LA SANTÉ PUBLIQUE DU QUÉBEC. Groupe scientifique sur l'eau, *Fiche Uranium*, Adresse URL: <http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/198-CartableEau/Uranium.pdf>.
- IRDA, 1998-2006 – INSTITUT DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT. *Feuillets pédologiques numériques*. Données du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) et de l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA). Échelle de numérisation : 1 / 20 000, échelle des données originales : variables.
- ISQ, 2009 – INSTITUT DE LA STATISTIQUE DU QUÉBEC, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Perspectives démographiques des MRC du Québec 2006-2031*.
- 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.
- Lajoie, 1960 - LAJOIE, P. G. *Les sols des comtés d'Argenteuil, Deux-Montagnes et Terrebonne (Québec)*. Service de recherches, ministère de l'Agriculture du Canada en collaboration avec le ministère de l'Agriculture du Québec et le collège Macdonald, Université McGill. 159 p. et cartes en annexe.
- Lajoie, 1962 - LAJOIE, P.G. *Étude pédologique des comtés de Gatineau et Pontiac (Québec)*. Service de recherches, ministère de l'Agriculture du Canada en collaboration avec le ministère de l'Agriculture du Québec et le collège Macdonald, Université McGill. 100 p. et cartes en annexes.
- Lajoie, 1967 – LAJOIE, P.G. *Étude pédologique des comtés de Hull, Labelle et Papineau (Québec)*. Direction de la recherche, ministère de l'Agriculture du Canada en collaboration avec le ministère de l'Agriculture et de la Colonisation de la province de Québec et le collège Macdonald, Université McGill. 104 p. et cartes en annexes.
- Lamarche *et coll.*, 2013 – LAMARCHE, O., ROY, M., DAIGNEAULT, R.A. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région du lac Blue-Sea (31K01)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- 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.

- Leduc *et coll.*, 2012a – LEDUC, É., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région d'Ottawa (31G05 partie nord)*. Carte présentée au Ministère des ressources naturelles et de la Faune du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Leduc *et coll.*, 2012b – LEDUC, É., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Wakefield (31G12)*. Carte présentée au Ministère des ressources naturelles et de la Faune du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Leduc *et coll.*, 2013a – LEDUC, E., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M., ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Cobden (31F10)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Leduc *et coll.*, 2013b – LEDUC, E., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M., ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région d'Arnprior-Quyon (31F08-31F09)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- 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.
- MAPAQ, 2013 – MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION DU QUÉBEC, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Production animale par municipalité*. Direction régionale de l'Outaouais.
- MAPAQ, 2013a – MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION DU QUÉBEC, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Localisation des bâtiments agricoles*. Direction régionale de l'Outaouais.
- MAPAQ, 2011 – MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION DU QUÉBEC, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Répertoire des piscicultures*. Direction régionale de l'Outaouais.
- 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, 2011 – MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA FAUNE ET DES PARCS, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Registre des grands préleveurs*.

- MDDEFP, 2012a – 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, 2012b – 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, 2013a – 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 de la Faune et des Parcs, gouvernement du Québec, Adresse URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/piezo/index.htm>.
- 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. *Répertoire des dépôts de sol et des résidus industriels*, Adresse URL : http://www.mddefp.gouv.qc.ca/sol/residus_ind/recherche.asp, consulté le 20 janvier 2013.
- Ménard, S., 2007 – MÉNARD, S. *Régionalisation des habitats humides du Québec forestier méridional*. Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en biologie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- 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>.
- Millette et coll., 2012a – MILETTE, S., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Low (31G13)*. Carte présentée au Ministère des ressources naturelles et de la Faune du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Millette et coll., 2012b – MILETTE, S., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Chénéville (31G14)*. Carte présentée au Ministère des ressources naturelles et de la Faune du Québec, échelle de 1 :50 000.

- Milette *et coll.*, 2013a – MILETTE, S., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Pembroke (31F14)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Milette *et coll.*, 2013b – MILETTE, S., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région du lac St-Patrice (31K06)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Milette *et coll.*, 2013c – MILETTE, S., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Kazabazua (31F16)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Milette *et coll.*, 2013d – MILETTE, S., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région du lac Pinceau (31K05)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Milette *et coll.*, 2013e – MILETTE, S., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région de Fort Coulonge (31F15)*. Carte présentée au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Milette *et coll.*, 2013f – MILETTE, S., DAIGNEAULT, R.A., ROY, M. ET LAMOTHE, M. *Géologie des formations superficielles de la région du réservoir Baskatong (31J13)*. carte présentée Ministère des Ressources Naturelles du Québec, échelle de 1 :50 000.
- Ministère de l'agriculture de l'Ontario, 2003 – MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE L'ONTARIO. *Irrigation des cultures légumineuses*.
- MOE, 2012 – MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DE L'ONTARIO. Water well record. Adresse URL: http://www.ene.gov.on.ca/environment/en/subject/wells/STDPROD_075977.html, consulté le 15 décembre 2011
- 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.
- Montcoudiol *et coll.*, en préparation – MONTCOUDIOL, N., MOLSON, J., LEMIEUX, J.-M. *Hydrogeochemical characterization of groundwater in the Outaouais region (Quebec, Canada) – A regional scale study*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, 43 p.
- MRC Charlevoix, 2006 – MUNICIPALITÉ RÉGIONALE DE COMTÉ DE CHARLEVOIX. *Schéma d'aménagement, chapitre 8 – Villégiature*.
- MRC La Vallée-de-la-Gatineau, 2013 – MUNICIPALITÉ RÉGIONALE DE COMTÉ LA VALLÉE-DE-LA-GATINEAU. *Rôle d'évaluation*.
- MRC Les Collines-de-l'Outaouais, 2013 – MUNICIPALITÉ RÉGIONALE DE COMTÉ LES COLLINES-DE-L'OUTAOUAIS. *Rôle d'évaluation*.
- MRC Papineau, 2013 – MUNICIPALITÉ RÉGIONALE DE COMTÉ DE PAPINEAU. *Rôle d'évaluation*.
- MRC Pontiac, 2013 - MUNICIPALITÉ RÉGIONALE DE COMTÉ DE PONTIAC. *Rôle d'évaluation*.
- MRN, 2013 – MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU QUÉBEC. *Activités minières – Région de l'Outaouais (07)*. Adresse URL : <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/mines/act-min-outaouais.pdf>. Échelle 1/350 000.

- MRNF, 2005 - MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE DU QUÉBEC. *Système d'information écoforestier (SIEF)*. Direction des inventaires forestiers, ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, Gouvernement du Québec. Échelle : 1 / 20 000.
- 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.
- 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.
- O'Connor, 2002 – O'CONNOR, D. *Report of the Walkerton Inquiry*, Part 2. Ontario Ministry of the Attorney General.
- 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.
- Réseau de veille en tourisme, 2010. RÉSEAU DE VEILLE EN TOURISME & CHAIRE DE TOURISME TRANSAT. *Portrait du marché des résidences de tourisme de villégiature au Québec*.
- Richard et Ochietti, 2004 – RICHARD, P. ET OCCHIETTI, S. *Meltwater discharge and the triggering of Younger Dryas : new data on the chronology of Champlain Sea transgression in the St-Lawrence River Valley*. Spring Meeting 2004. American Geophysical Union.
- 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.
- Roy *et coll.*, 2013 – ROY, M., DAIGNEAULT, R.-A., LAMOTHE, M., MILETTE, S., DUBOIS-VERRET, M., GODBOUT, P.-M., HORTH, N., HURTUBISE, M.-A., LAMARCHE, O., LEDUC, É. *Cartographie des formations superficielles du territoire municipalisé de l'Outaouais – Secteur ouest*. Département des sciences de la Terre et de l'Atmosphère et Département de géographie, Université du Québec à Montréal, 29 avril 2013.
- Sanford et Arnott, 2010 – SANFORD, B.V. et ARNOTT, R.W.C. *Stratigraphic and structural framework of the Potsdam Group in eastern Ontario, western Quebec, and northern New York State*. Geological Survey of Canada, Bulletin no. 597, 2010.
- 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.
- Schenk et Jackson, 2002 – SCHENK, H.J., JACKSON, R.B. « *Rooting depths, lateral root spreads, and belowground/aboveground allometries of plants in water limited ecosystems.* » *Journal of Ecology* 90: pp. 480-494.
- 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.
- Sophocleous, 2000 – SOPHOCLEOUS, M. « From safe yield to sustainable development of water resources: The Kansas experience. » *Journal of Hydrology* 235, pp. 27-43.
- Sophocleous, 1997 – SOPHOCLEOUS, M. « Managing water resources systems: Why "Safe Yield" is not sustainable » Editorial, *Ground Water*, 35(4).
- 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>.
- Statistique Canada, 2011a. – STATISTIQUE CANADA. *Recensement de l'agriculture de 2011.* Adresse URL : <http://www.statcan.gc.ca/ca-ra2011/index-fra.htm>.
- Sterckx, 2013 – STERCKX, A. *Étude des facteurs influençant le rendement des puits d'alimentation de particuliers qui exploitent le roc fracturé en Outaouais, Québec, Canada.* Mémoire de maîtrise. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval.
- Talbot Poulin *et coll.*, 2013 – 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. *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 p., 19 annexes, 28 cartes.
- 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, Technical release 55, 210-VI-TR-55, Second Edition, June 1986, Adresse URL: <https://engineering.purdue.edu/mapserve/sedspec/doc/tr55.pdf>, consulté le 16 janvier 2013.
- USDA, 2011 – UNITED STATES DEPARTEMENT OF AGRICULTURE. *Soil survey manual*. Adresse URL: <http://soils.usda.gov/technical/manual/contents/chapter3.html>.
- Varady-Szabo *et coll.*, 2008. VARADY-SZABO, H., CÔTÉ, M., BOUCHER, Y., BRUNET, G. ET JETTÉ, J.-P. *Guide pour la description des principaux enjeux écologiques dans les plans régionaux de développement intégré des ressources et du territoire – Document d'aide à la mise en œuvre de l'aménagement écosystémique*. Consortium en foresterie de la Gaspésie-Les-Îles et ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.
- Ville de Gatineau, 2013 – VILLE DE GATINEAU. *Rôle d'évaluation*.

ANNEXES

Annexe 1 : Méthodologie de classification de l'occupation du sol et de la couverture végétale

Assemblage des données

La classification de l'occupation du sol et de la couverture végétale est une combinaison de plusieurs sources de données. Afin d'améliorer la représentativité des données, elles ont été assemblées dans un ordre bien précis. Le Système d'information écoforestière (SIEF, 2005) joue le rôle de « fond de carte » au-dessus duquel ont été greffées les données agricoles de la Base de données des cultures généralisées (BDCG, 2012) de la Financière Agricole du Québec ainsi que les données des milieux humides (issues d'un amalgame entre les données de Canards Illimités (2007) et des interprétations de L'ATINO (2012), voir l'Annexe 2 : Méthodologie de classification des milieux humides).

Lors de l'assemblage des données, une clé décisionnelle permet de connaître la source initiale des données et de les prioriser en fonction de leur fiabilité. Ainsi, pour chaque entité, un rang de « fiabilité » a été attribué (Tableau A1).

Tableau A1 : Rang de fiabilité attribué aux sources de données, selon le type de données

Type de données	Échelle	Rang de fiabilité
BDCG, Financière agricole, 2012.	1 / 40 000	1
Milieux humides, Canards Illimités, 2007.	1 / 20 000	1
Interprétation des milieux humides du SIEF, 2005	1 / 20 000	2
SIEF, couche agricole, MRNF, 2005	1 / 20 000	2
SIEF, couches forestières et autres, 2005	1 / 20 000	1

Occupation du sol

L'occupation du sol est présentée en 14 classes thématiques adaptées par L'ATINO pour une meilleure représentation cartographique du territoire. Le Tableau A2 indique les différentes sources des données utilisées. Les classes 04 à 14 sont issues du SIEF, les classes 01, 02, 03 proviennent de la BDCG et la classe 08 (milieu humide) est issue de l'inventaire des milieux humides effectué par Canards Illimités en 2007 et de la réinterprétation du SIEF par L'ATINO suivant la méthodologie de Boulfroy *et coll.* (2012) (Annexe 2 : Méthodologie de classification des milieux humides).

Tableau A2 : Classes retenues pour l'occupation du sol et sources des données

Classe	Description	Rang fiabilité	Code de donnée	Source des données
Grande culture	Blé, foin, soya, canola, avoine, maïs, orge et autres céréales	1	01	Financière Agricole du Québec. 2012. BDCG, 1 / 40 000.
Culture maraîchère	Maraicher et petits fruits	1	02	Financière Agricole du Québec. 2012. BDCG, 1 / 40 000.
Autre culture	Cultures mixtes et pas d'informations	1	03	Financière Agricole du Québec. 2012. BDCG, 1 / 40 000.
	Zone agricole et zone agricole avec potentiel forestier	2	03 bis	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.
Friche	Friche	2	04	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.
Anthropique dense	Milieu fortement perturbé par l'activité humaine (non-boisé), route et autoroute (emprise)	1	05	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.
Anthropique peu dense	Milieu faiblement perturbé par l'activité humaine (boisé)	1	06	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.
Eau	Lac, rivière et site inondé	1	07	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.
Milieu humide	Milieu humide	1	08	Canards Illimités Canada. 2007. Milieux humides, 1 / 20 000.
	Aulnaie, dénudé et semi-dénudé humide	2	08 bis	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000 adapté par L'ATINO suivant la méthodologie du CERFO.
Sol dénudé	Sol dénudé et semi-dénudé sec	1	09	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.
Perturbation forestière	Coupe par bandes, coupe d'ensemencement finale, chablis total, coupe avec protection de la régénération, coupe avec protection des petites tiges marchandes et des sols, récolte des tiges résiduelles et des rebuts, coupe avec réserve de semencier, coupe totale, épidémie grave, élimination des tiges résiduelles, regarnissage du couvert forestier équivalent à la plantation, récupération en vertu d'un plan spécial d'aménagement	1	10	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.
Forêt de feuillus	Groupe d'essence de feuillus	1	11	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.
Forêt mélangée	Groupe d'essence mélangé	1	12	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.
Forêt de résineux	Groupe d'essence résineuse	1	13	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.
Autre	Gravière, île superficie < 1 ha et ligne de transport d'énergie	1	14	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.

Le Tableau A3 détaille les statistiques des classes d'occupation du sol par ville et MRC sur le territoire à l'étude. La forêt domine nettement l'occupation du sol (72,1 % du territoire à l'étude avec une dominance pour les feuillus, 36,2 %, suivi de la forêt mélangé, 31,3 % et de la forêt de résineux, 4,6 %). L'agriculture incluant les friches couvre 10,3 % du territoire.

Tableau A3 : Occupation du sol par ville et MRC

Occupation du sol	Papineau	Gatineau	Les Collines-de-l'Outaouais	La Vallée-de-la-Gatineau	Pontiac	Total, territoire à l'étude	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(km ²)	(%)
Grande culture	2,1	5,0	2,5	0,8	3,5	317	2,3
Culture maraîchère	0,1	0,1	-	-	-	4	0,0
Autre culture	5,6	12,7	9,6	5,5	6,5	922	6,7
Friche	1,6	7,0	2,3	0,7	0,7	179	1,3
Anthropique dense	0,9	28,1	1,8	0,6	0,3	206	1,5
Anthropique peu dense	0,2	1,9	0,7	0,6	0,2	69	0,5
Eau	7,8	7,0	7,1	12,7	9,0	1 294	9,3
Milieu humide	5,0	8,1	3,9	4,2	5,3	661	4,8
Sol dénudé	-	-	0,1	-	-	3	0,0
Perturbation forestière	0,6	0,2	0,5	1,8	1,2	151	1,1
Feuillus	41,0	15,5	40,8	32,8	34,9	4 982	36,2
Mélangés	31,1	12,6	27,5	24,0	32,7	4 308	31,3
Résineux	3,7	1,1	2,4	6,0	5,5	633	4,6
Autres	0,3	0,8	0,7	0,4	0,1	41	0,3

Sources: Canards illimités, 2007. Financière Agricole du Québec, 2012. SIEF, 2005. Adapté par L'ATINO, 2012.

Couverture végétale

Les données sont classées initialement en 3 grandes classes forestières que sont les feuillus (F), les mélangés (M), et les résineux (R). Ces trois couverts forestiers ont été raffinés selon la maturité (arbuste, jeune et mature) et la densité (faible à moyenne et forte à très forte) (Tableau A4 et Tableau A5). Cette reclassification prépare les variables de profondeur racinaire maximale et d'indice de surface foliaire, nécessaires au calcul de la recharge en eau souterraine (voir Annexe 10 : Données d'entrée et résultats de la modélisation avec HELP[®] de la recharge et des autres composantes du bilan hydrologique).

Tableau A4 : Classification de l'âge de la couverture végétale

Maturité du couvert végétal	Classe d'âge	Code SIEF
Arbuste ¹	10 ans	-
Jeune	30 ans, 50 ans, jeune peuplement inéquienne et jeune peuplement irrégulier	30; 50; JIN; JIR
Mature	70 ans, 90 ans, 120 ans, vieux peuplement inéquienne et vieux peuplement irrégulier	70; 90; 120; VIN; VIR

¹ Dans le sens de jeune arbre de moins de 10 ans.

Pour la zone d'étude, 4 classes de densité du couvert végétal sont initialement définies dans le SIEF. Elles ont été regroupées en deux classes afin d'harmoniser la représentation cartographique finale. Ainsi, la classe de densité faible à moyenne regroupe les classes de 0% à 60% et la classe de densité forte à très forte regroupe les classes de 61% à 100% de couverture végétale (Tableau A5).

Tableau A5 : Classification des densités de la couverture végétale

Densité du couvert végétal	Pourcentage de densité	Code SIEF
Forte à très forte	de 61% à 100% de couvert	A et B
Faible à moyenne	de 0% à 60% de couvert	C et D

La classification des âges et de la densité s'appuie sur Croteau (2006), Varady-Szabo *et coll.* (2008) et Canadell *et coll.* (1996).

En plus des 3 classes principales (feuillus, mélangés et résineux) détaillées en fonction de la maturité et de la densité de la couverture végétale, 4 autres classes viennent raffiner la classification de la couverture végétale : plantation, perturbation forestière, arbuste et zone sans couvert végétal. La classification finale détaille 22 classes de couverture végétale (Tableau A6). Les statistiques pour la couverture végétale présentées au Tableau A7 diffèrent légèrement de celles pour l'occupation du sol (Le Tableau A3), car l'analyse du couvert végétal raffine certaines classes propres à la foresterie en lien avec le Tableau A4 et le Tableau A5 alors que d'autres classes sont redéfinies en fonction des besoins de la modélisation de la recharge.

Tableau A6 : Description des classes de couverture végétale

Type de couvert	Description	Source des données
Grande culture	Blé, foin, soya, canola, avoine, maïs, orge et autres céréales	Financière Agricole du Québec. 2012. BDCG, 1 / 40 000.
Culture maraîchère	Maraicher et petits fruits	Financière Agricole du Québec. 2012. BDCG, 1 / 40 000.
Autres cultures	Cultures mixtes et pas d'informations	Financière Agricole du Québec. 2012. BDCG, 1 / 40 000 et MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.
Feuillus, jeune, densité faible à moyenne	Forêt de feuillus jeunes, densité faible à moyenne	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000.
Feuillus, jeune, densité forte à très forte	Forêt de feuillus jeunes, densité forte à très forte	
Feuillus, mature, densité faible à moyenne	Forêt de feuillus matures, densité faible à moyenne	
Feuillus, mature, densité forte à très forte	Forêt de feuillus matures, densité forte à très forte	
Mélangés, jeune, densité faible à moyenne	Forêt mixte (feuillus et résineux) jeune, densité faible à moyenne	
Mélangés, jeune, densité forte à très forte	Forêt mixte (feuillus et résineux) jeune, densité forte à très forte	
Mélangés, mature, densité faible à moyenne	Forêt mixte (feuillus et résineux) mature, densité faible à moyenne	
Mélangés, mature, densité forte à très forte	Forêt mixte (feuillus et résineux) mature, densité forte à très forte	
Résineux, jeune, densité faible à moyenne	Forêt de résineux jeunes, densité faible à moyenne	
Résineux, jeune, densité forte à très forte	Forêt de résineux jeunes, densité forte à très forte	
Résineux, mature, densité faible à moyenne	Forêt de résineux matures, densité faible à moyenne	
Résineux, mature, densité forte à très forte	Forêt de résineux matures, densité forte à très forte	
Arbuste	Jeune arbre feuillu ou résineux de 10 ans et moins	
Plantation	Plantation	
Friche	Friche	
Perturbation forestière	Coupe par bandes, coupe d'ensemencement finale, chablis total, coupe avec protection de la régénération, coupe avec protection des petites tiges marchandes et des sols, récolte des tiges résiduelles et des rebuts, coupe avec réserve de semencier, coupe totale, épidémie grave, élimination des tiges résiduelles, regarnissage du couvert forestier équivalent à la plantation, récupération en vertu d'un plan spécial d'aménagement	
Sans couvert végétal	Anthropique peu dense, anthropique dense, sol dénudé et autre	
Eau	Eau et zone inondable	
Milieu humide	Milieu humide	Canards illimités Canada. 2007. Milieux humides, 1 / 20 000.
	Aulnaie, dénudé et semi-dénudé humide	MRNF. 2005. SIEF, 1 / 20 000. Adapté par L'ATINO

Le Tableau A7 donne un aperçu de la répartition des différents types de couverture végétale sur le territoire à l'étude.

Tableau A7 : Couverture végétale par ville et MRC

Couverture végétale	Papineau	Gatineau	Les Collines-de-l'Outaouais	La Vallée-de-la-Gatineau	Pontiac	Total, territoire à l'étude	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(km ²)	(%)
Grande culture	2,1	5,0	2,5	0,8	3,5	317	2,3
Culture maraîchère	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	4	0,0
Autre culture	5,6	12,7	9,6	5,5	6,5	922	6,7
Friche	1,6	7,0	2,3	1,7	0,7	179	1,3
Feuillu, jeune, densité faible à moyenne	3,6	3,3	5,9	3,1	2,9	495	3,6
Feuillu, jeune, densité forte à très forte	18,1	5,7	23,8	10,8	12,8	2 064	15,0
Feuillu, mature, densité faible à moyenne	6,9	1,3	2,1	3,6	4,9	619	4,5
Feuillu, mature, densité forte à très forte	10,7	2,5	5,9	11,8	12,3	1 455	10,5
Mélangé, jeune, densité faible à moyenne	4,2	5,1	6,3	5,7	4,8	702	5,1
Mélangé, jeune, densité forte à très forte	12,5	4,3	13,9	11,0	12,0	1 638	11,9
Mélangé, mature, densité faible à moyenne	4,2	0,8	1,9	4,8	7,2	661	4,8
Mélangé, mature, densité forte à très forte	9,2	0,7	4,8	10,4	8,0	1 129	8,2
Résineux, jeune, densité faible à moyenne	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	96	0,7
Résineux, jeune, densité forte à très forte	1,0	0,2	0,8	1,7	1,6	179	1,3
Résineux, mature, densité faible à moyenne	0,6	0,2	0,3	0,9	1,3	110	0,8
Résineux, mature, densité forte à très forte	1,0	0,1	0,5	2,0	1,5	179	1,3
Arbuste	3,3	4,5	3,8	6,2	3,1	564	4,1
Plantation	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	14	0,1
Perturbation forestière	0,6	0,2	0,5	1,8	1,2	151	1,1
Milieu humide	5,0	8,1	3,9	4,2	5,3	661	4,8
Eau	7,8	7,0	7,1	12,7	9,0	1 294	9,3
Sans couvert végétal	1,4	30,8	3,3	1,6	0,7	317	2,3

Sources: Canards illimités, 2007. Financière Agricole du Québec, 2012. MRNF, 2005. Adapté par L'ATINO, 2013.

Annexe 2 : Méthodologie de classification des milieux humides

Introduction

Dans le cadre d'un projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, il est important de connaître l'étendue des milieux humides sur le territoire à l'étude. Il est reconnu que les milieux humides ont plusieurs fonctions écosystémiques (Acreman *et coll.*, 2003). Ces milieux permettent entre autres une filtration, un stockage et une recharge des eaux de surface et souterraines (Acreman *et coll.*, 2003). Par ces fonctions écosystémiques, les milieux humides constituent un chaînon important du cycle hydrologique. Ces milieux sont si importants que certains modèles d'évaluation de la recharge des aquifères (p. ex. SWAT[®] ; Arnold *et coll.*, 2011) les incorporent afin de mieux définir les effets de recharge et de stockage induits par les milieux humides.

Sources de données

Deux sources de données distinctes ont été utilisées afin d'obtenir une fiabilité accrue de l'étendue des milieux humides sur le territoire du PACES-OUT. La première donnée utilisée est la cartographie des milieux humides produite par Canards Illimités Canada (CIC) en 2007 à l'échelle 1 / 20 000. Cette cartographie comporte une classification exhaustive des milieux humides pour la portion longeant la rivière des Outaouais. Le reste du territoire à l'étude comprend des milieux humides non classifiés par CIC. Pour combler cette lacune, L'ATINO a procédé à une reclassification du SIEF (MRN, 1 / 20 000) selon la méthodologie développée par Boulfroy *et coll.* (2012).

Reclassification de la carte écoforestière (SIEF)

Afin de faire ressortir les milieux humides de la carte écoforestière, il faut reclassifier les attributs de cette donnée. La méthodologie de Boulfroy *et coll.* (2012) a pour objectif de caractériser les milieux humides de la région de l'Estrie afin de produire des recommandations sur la conservation de ces milieux. Cette méthodologie est en fait une version améliorée de Ménard (2007) qui a défini une procédure de reclassification à partir de la carte écoforestière du 3^e décennal (SIEF, 1998). Les classes retenues dans la méthodologie de Boulfroy *et coll.* (2012) proviennent des définitions environnementales du MDDEFP.

Variable discriminante

Selon la méthodologie de Boulfroy *et coll.* (2012), la première variable discriminante est le type de milieu physique. Cet attribut se retrouve dans le code de milieu physique (4^e caractère). Par la suite, selon le milieu, la seconde variable est soit le dépôt de surface soit le code de terrain. Par exemple, pour le milieu 8, la seconde variable est le type de sol (organique ou non organique) que l'on retrouve dans le code de dépôt de surface. Pour tous les autres milieux, la seconde variable est le code de terrain improductif afin de répartir les milieux soient en forestier ou en non-forestier.

Définition des variables

Milieu Physique (extrait du code du type écologique)

- Aucun code : présence d'eau ou absence de milieu humide,
- 0 à 6 : absence de milieu humide,
- 7 : milieu ombrotrophe minéral (milieu alimenté par les précipitations et dont le dépôt de surface est minéral),
- 8 : milieu minérotrophe (milieu alimenté par le ruissellement et les eaux souterraines),
- 9 : milieu ombrotrophe organique (milieu alimenté par les précipitations et dont le dépôt de surface est organique).

Organique ou non organique (code du dépôt de surface)

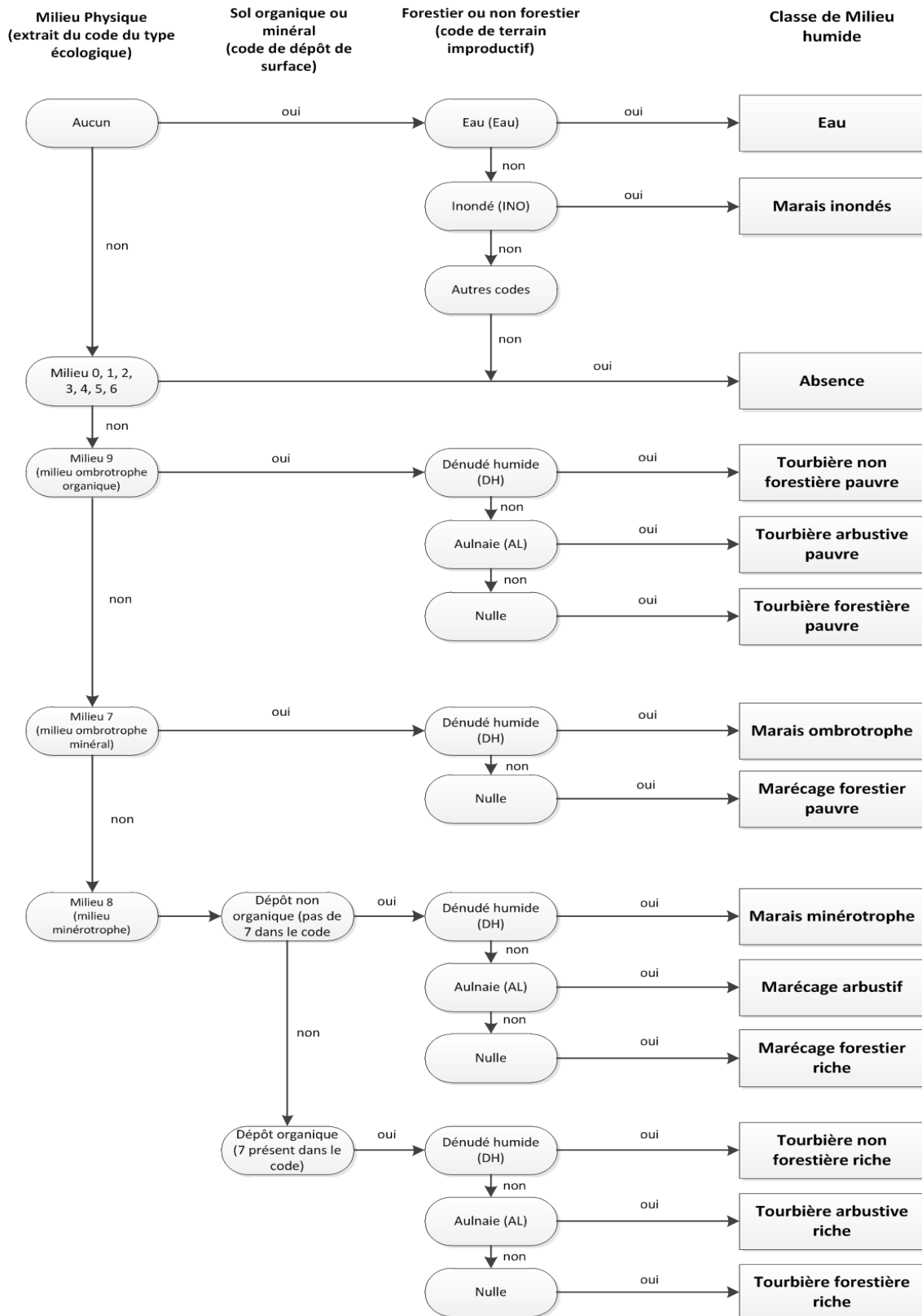
Pour cette variable, la discrimination se fait au niveau de la présence ou non d'un 7 dans le code du dépôt de surface. Le code 7 représente un dépôt de sol de type organique. Si le 7 n'est pas présent, cela veut dire que le dépôt de sol est non organique.

Forestier ou non forestier (code de terrain improductif)

- Eau : présence d'eau
- INO : présence de terrain inondé
- DH : Dénudé humide
- AL : Aulnaie
- Nulle : présence de forêt
- Autre : absence de milieu humide

Méthodologie

La méthodologie de Boulfroy *et coll.* (2012) a été modifiée afin d'assurer une meilleure représentativité des milieux humides pour le territoire du PACES-OUT. La première différence réside dans l'ajout de 2 classes que sont les marécages arbustifs pauvres et les tourbières arbustives riches. La seconde différence est l'amalgame des types forestiers. Dans la classification originale, la dernière étape de discrimination correspond au type de peuplement pour les milieux humides forestiers. Pour les besoins du projet, ce niveau de détail n'était pas nécessaire. La Figure A1 présente le diagramme décisionnel déterminant la reclassification de la carte écoforestière afin de faire ressortir l'étendue des milieux humides.



Source : Boulfroy et coll. (2012), adapté par L'ATINO (2012).

Figure A1 : Diagramme décisionnel pour la classification des milieux humides à partir du SIEF

La classification unifiée Boulfroy *et coll.* (2012) et Canards Illimités

Plusieurs problèmes surviennent lorsque vient le temps de produire une classification unifiée comprenant un amalgame de différentes sources de données. Le premier problème est la détermination d'un rang de priorisation lorsqu'il y a chevauchement entre les différentes données. Le second problème est la correspondance des classes entre les couches.

Les classes initiales de Canards Illimités et celles issues de la reclassification de la carte écoforestière sont différentes. Dans le cas du projet PACES-OUT, les classes suivantes sont retenues : eau peu profonde, étang, marais, marécage, tourbière et milieu humide non classifié (Tableau A8).

Tableau A8 : Classification finale à partir de Boulfroy *et coll.* (2012) et de Canards Illimités

Classe retenue	Classes utilisées	Source	Année	Échelle	Priorité
Eau peu profonde	Eau peu profonde	CIC	2005	1 / 20 000	1
	Marais inondé	SIEF	2007	1 / 20 000	2
Marais	Herbier aquatique	CIC	2007	1 / 20 000	1
	Marais	CIC	2007	1 / 20 000	1
	Prairie humide	CIC	2007	1 / 20 000	1
	Marais minérotrophe	SIEF	2005	1 / 20 000	2
	Marais ombrotrophe	SIEF	2005	1 / 20 000	2
Marécage	Marécage arboré ou arbustif	CIC	2007	1 / 20 000	1
	Terre agricole inondée	CIC	2007	1 / 20 000	1
	Marécage arbustif riche	SIEF	2005	1 / 20 000	2
	Marécage forestier pauvre	SIEF	2005	1 / 20 000	2
	Marécage forestier riche	SIEF	2005	1 / 20 000	2
Tourbière	Tourbière naturelle	CIC	2007	1 / 20 000	1
	Tourbière arbustive pauvre	SIEF	2005	1 / 20 000	2
	Tourbière arbustive riche	SIEF	2005	1 / 20 000	2
	Tourbière forestière pauvre	SIEF	2005	1 / 20 000	2
	Tourbière forestière riche	SIEF	2005	1 / 20 000	2
	Tourbière non forestière pauvre	SIEF	2005	1 / 20 000	2
	Tourbière non forestière riche	SIEF	2005	1 / 20 000	2
Milieu humide non classifié	Milieu humide non classifié	CIC	2007	1 / 20 000	3

Synthèse

Deux répartitions spatiales différentes ont été réalisées. La première tient compte de l'ensemble des résultats du jumelage entre Boulfroy *et coll.* (2012) et CIC. Celle-ci est utilisée pour la production de la Carte 9 : Milieux humides. La seconde répartition spatiale exclut les peuplements forestiers des milieux humides pour ne pas empiéter sur la couverture forestière dans l'occupation du sol. Celle-ci est utilisée pour la production de la

Carte 7 : Occupation du sol et de la Carte 8 : Couverture végétale. Les tableaux suivants présentent respectivement la répartition spatiale des milieux humides sur le territoire du PACES-OUT en incluant les couverts forestiers (Tableau A9) et en excluant les couverts forestiers (Tableau A10).

Tableau A9 : Milieux humides (incluant les milieux humides forestiers), par MRC

Couverture végétale	Papineau	Gatineau	Les Collines-de-l'Outaouais	La Vallée-de-la-Gatineau	Pontiac	Total, territoire à l'étude	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(km ²)	(%)
Eau peu profonde	9,5	1,1	6,8	8,9	11,0	358	2,6
Marais	1,8	1,2	0,3	0,1	2,7	57	0,4
Marécage	1,6	1,7	0,9	5,5	5,4	145	1,1
Tourbière	8,3	0,1	3,8	16,0	10,5	371	2,7
Milieu humide non classifié	0,6	0,0	0,5	0,9	1,0	29	0,2
Total	21,8	4,0	12,2	31,4	30,6	960	7,0

Tableau A10 : Milieux humides (excluant les milieux humides forestiers), par MRC

Couverture végétale	Papineau	Gatineau	Les Collines-de-l'Outaouais	La Vallée-de-la-Gatineau	Pontiac	Total, territoire à l'étude	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(km ²)	(%)
Eau peu profonde	4,4	1,7	1,2	-	3,7	51	0,4
Marais	3,7	2,4	0,5	0,1	5,6	57	0,4
Marécage	0,7	1,8	1,2	1,8	7,3	59	0,4
Tourbière	8,3	0,1	1,5	10,2	9,4	136	1,0
Milieu humide non classifié	6,6	0,1	7,5	9,1	11,1	159	1,2
Total	23,7	6,2	11,9	21,2	37,1	461	3,3

Annexe 3 : Méthodologie de classification des unités pédologiques

Dans le cadre du PACES-OUT, la pédologie sert deux finalités bien distinctes : illustrer la nature des sols du territoire d'étude (Carte 11 : Pédologie) et servir d'intrant pour les modélisations de la recharge et de la vulnérabilité des aquifères.

Assemblage des données

La carte pédologique qui a été préparée pour le projet combine plusieurs sources d'informations puisqu'aucune source ne couvre entièrement le territoire à l'étude. Trois sources d'informations ont été assemblées dans un ordre bien précis, selon leur fiabilité et leur échelle cartographique (Figure A2).

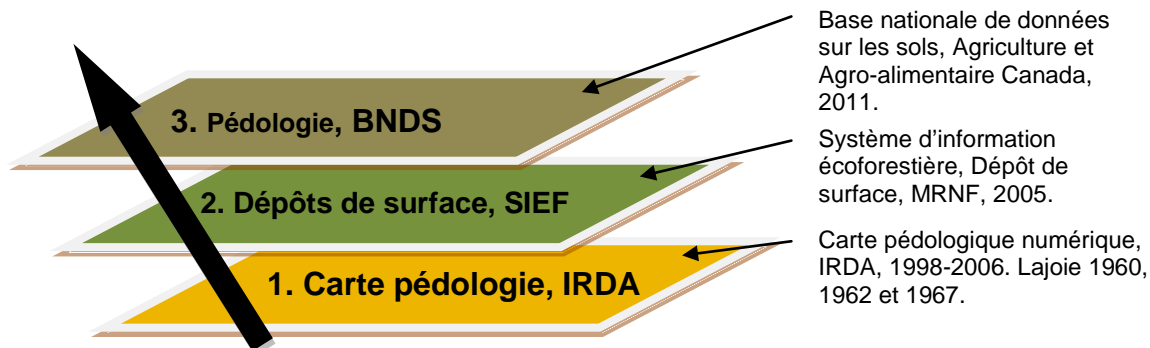


Figure A2 : Assemblage des données pour la cartographie de la pédologie

La carte pédologique de l'IRDA, issue de la numérisation des études pédologiques régionales de Lajoie (1960, 1962 et 1967) joue le rôle de donnée de référence. Elle couvre près de 80% du territoire d'étude (Tableau A11). Les données sur les dépôts de surface du SIEF interviennent surtout dans la MRC Pontiac pour les zones non cartographiées par les études pédologiques. Les données de l'IRDA et du SIEF sont priorisées puisque leur grande échelle (1 / 20 000) permet d'apprécier les variations locales sur le territoire. La Base nationale de données sur les sols (BNDS) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (1 / 1 000 000) vient combler le territoire ontarien et apporte une généralisation sur les secteurs correspondant à des non-sols (ravins, éboulis et alluvions) dans les 2 bases de données précédentes.

Tableau A11 : Source des données pédologiques par ville et MRC

Source de données	Papineau	Gatineau	Les Collines-de-l'Outaouais	La Vallée-de-la-Gatineau	Pontiac	Territoire à l'étude, total	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(km ²)	(%)
IRDA	21,1	2,4	14,7	23,0	18,2	10 924	79,4
SIEF	2,2	0,3	1,3	4,0	12,7	2 805	20,4
BNDS	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	14	0,1
Proximité IRDA	0,0	-	0,0	0,0	0,0	4	0,0
Proximité SIEF	-	-	-	0,1	0,0	14	0,1

Des équivalences entre l'IRDA et le SIEF ont dû être construites au niveau de la texture des sols pour bâtir l'assemblage des données. Le Tableau A12 illustre les clés décisionnelles des équivalences texturales IRDA/SIEF.

Tableau A12 : Équivalence texturale IRDA/SIEF

Équivalence texturale	Origine du dépôt	Code du SIEF
Till	Dépôts glaciaires	1A, 1AA, 1AD, 1AS, 1BD, 1BF, 1BP, 2AK
	Substrat rocheux	R1A
Sableux	Dépôts fluvioglaciaires	2AT, 2BE
	Dépôts fluviatiles	3A, 3AC, 3AE, 3AN, 3ANM, 3ANY, 3DD
	Dépôts lacustres	4GS, 4GSM, 4GSY
	Dépôts littoraux marins	6A, 6S
	Dépôts éoliens	9S
	Substrat rocheux	R3AN, R4GS
Loameux	Dépôts lacustres	4A
Argileux	Dépôts lacustres	4GA, 4GAY
	Dépôts marins	5A, 5AM, 5AY, 5S, 5SM, 5SY
	Substrat rocheux	R5A, R5S
Graveleux	Dépôts fluvioglaciaires	2A, 2AE, 2B, 2BD, 2BP
Organique	Dépôts organiques	7E, 7R, 7T, 7TM, 7TY, 7T
Affleurement rocheux	Substrat rocheux	R

Malgré l'assemblage des données de l'IRDA, du SIEF et de la BNDS, certains secteurs sont toujours dépourvus d'information pédologique. Plusieurs règles complémentaires ont été appliquées afin de compléter le portrait du territoire. L'information relative à ces secteurs provient des zones limitrophes pour lesquelles de l'information pédologique est disponible, et ce en fonction de la priorisation de l'assemblage des données et de l'abondance de la nature des sols (texture et drainage). La règle de proximité s'applique à seulement 18,1 km² (0,1 %) du territoire à l'étude (Tableau A11).

Les sols issus de dépôts de tills bien drainés dominent dans la zone d'étude (39,7 %) suivis par les sols loameux bien drainés (10,4 %) (Tableau A13). Plus généralement, les sols issus de dépôts de tills sont grandement majoritaires sur le territoire, suivi des sols sableux, des sols loameux, des sols argileux, des sols graveleux, des sols organiques et finalement des affleurements rocheux.

Tableau A13 : Nature des sols, territoire à l'étude

Texture Drainage	Till	Sable	Loam	Argile	Gravier	Organique	Affleurement rocheux	Eau	Tota
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Très rapidement drainé	0,1	6,4	-	-	4,1	-	-	-	10,6
Rapidement drainé	0,3	-	-	-	-	-	-	-	0,3
Bien drainé	39,7	5,7	10,4	0,1	0,4	-	-	-	56,3
Modérément bien drainé	5,5	0,3	1,4	0,7	-	-	-	-	8,0
Imparfaitement drainé	0,6	1,5	0,1	2,3	-	-	-	-	4,4
Mal drainé	-	-	0,7	0,3	-	0,1	-	-	1,1
Très mal drainé	-	-	0,1	-	-	1,7	-	-	1,8
Ne s'applique pas	1,2	1,7	0,5	2,4	-	-	0,8	10,9	17,5
Total	47,4	15,7	13,1	5,7	4,6	1,8	0,8	10,9	100,0

Annexe 4 : Méthodologie pour la réalisation des travaux géophysiques

Méthodologie

Trois méthodes géophysiques ont été utilisées dans le cadre du projet PACES-OUT : 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-OUT Phase II (Comeau *et coll.*, 2012a) 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'étude.

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 : Coupes interprétatives des investigations hydrogéophysiques). Le Tableau A14 fait la synthèse des travaux effectués. La qualité des modèles géologiques a été regroupée en 3 catégories: bonne, moyenne et faible. La catégorie « bonne » indique que les modèles générés sont vraisemblablement justes et concordent bien avec les informations de forages. Les modèles de la catégorie « moyenne » présentent des informations partielles ou ambiguës, mais tout de même utilisables. L'interprétation des levés de la catégorie « faible » est non utilisable. Les planches de cette dernière catégorie ne sont pas présentées en annexe.

Tableau A14 : Lignes de levés géophysiques réalisés

MRC ou Ville	Nom du levé	Longueur de la ligne (m)	Méthode géophysique			Qualité du modèle géologique
			Géoradar	Électrique	Sismique	
MRC Les Collines-de - l'Outaouais	Municipalité Pontiac	85	X	X		Bonne
	Ste-Cécile-de-Masham	275		X	X	Bonne
Ville de Gatineau	Boulevard de la Vérendry Ouest	290		X	X	Moyenne
	Parc des Trembles 1	115		X	X	Moyenne
	Parc des Trembles 2	105		X		Moyenne
	Parc des Vignes 1	185	X	X		Bonne
	Parc des Vignes 2	180	X	X		Bonne
	Rue du Sous-bois	275		X	X	Bonne
MRC Papineau	Halte routière	285	X	X		Bonne
	Lac-Simon 1	1340	X			Bonne
	Lac-Simon 2	420		X		Bonne
	Lochaber	1795			X	Bonne
	Plantation Notre-Dame-de-la-Paix	320	X	X		Moyenne
	Rang Ste-Augustine	390		X		Bonne
	Rang Ste-Augustine NS	730	X			Bonne
	Rang Ste-Augustine EO 1	325	X			Bonne
	Rang Ste-Augustine EO 2	1150	X			Bonne
	Thurso-bas	220		X	X	Bonne
MRC Pontiac	Thurso-haut	145		X	X	Bonne
	Chemin 8e Concession 1	415		X		Bonne
	Chemin 8e Concession 2	775	X			Bonne
	Chemin Moffat	450			X	Bonne
	Chemin Sandbay Partie 1	470			X	Bonne
	Chemin Sandbay Partie 2	880			X	Bonne
	Chemin Sandbay Sisimique	100			X	Bonne
	Clarendon 1a	840	X			Bonne
	Clarendon 1b	570	X			Bonne
	Clarendon 2	1035	X			Bonne
	Îles-aux-Allumettes 1	290		X		Faible
	Îles-aux-Allumettes 2	580	X			Faible
	King's road	1585	X			Faible
	Lac Green	140			X	Bonne
	Otter Lake	310		X		Faible
	Otter Lake 1	1155	X			Faible
	Otter Lake 2	455	X			Faible
	Thornlake	285		X		Bonne
	Thornlake 1	275	X			Bonne
	Thornlake 2	765	X			Bonne
MRC La Vallée-de-la-Gatineau	Aéroport	315	X	X		Bonne
	Forêt école	215	X	X		Bonne
	Plantation Cayaman 1	165		X		Bonne
	Plantation Cayaman 2	265	X	X		Bonne
	Traitement des boues 1a	390	X			Moyenne
	Traitement des boues 1b	290		X		Moyenne
	Traitement des boues 2	350	X			Moyenne

Annexe 5 : Cotes de fiabilité et critères de validation contenus dans la base de données hydrogéologiques PACES-OUT

Cotes de fiabilité

Le Tableau A 15 fait la synthèse des valeurs des cotes de fiabilité associées aux objets de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT.

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

Tableau A 15 : Synthèse des valeurs des cotes de fiabilité associées aux objets de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT

	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	182	0,4
			2	Les coordonnées proviennent du document source	46 968	99,6
			3	Erreur évidente corrigée dans les coordonnées sources	0	0,0
	FL2	Degré d'incertitude sur les coordonnées géographiques	1	Précision entre 0 m et 1 m (ex. : GPS haute précision, arpentage)	444	0,9
			2	Précision entre 1 m et 10 m (ex. : GPS simple)	11 299	24,0
			3	Précision entre 10 m et 100 m (ex. : extraites par géoréférencement, extraites d'une carte topographique, localisation visuelle)	2 414	5,1
			4	Inconnu	32 993	70,0
	FL3-A	Degré d'incertitude sur le géoréférencement par géocodage ou à partir d'une carte	1	Les coordonnées géographiques fournies	33 926	72,0
			2	Géoréférencement excellent	11 279	23,9
			3	Géoréférencement bon	1 057	2,2
			4	Géoréférencement acceptable	220	0,5
			5	Aucun géoréférencement, localisation visuelle	668	1,4
	FL3-B	Degré d'incertitude sur la localisation visuelle	1	Les coordonnées géographiques fournies ou géoréférencement	46 482	98,6
			2	Plan à grande échelle (1:20 000 et plus grand)	276	0,6
			3	Plan à moyenne échelle (1:50 000)	375	0,8
			4	Plan à petite échelle (1:100 000 et plus petit)	0	0,0
			5	Repères visuels peu fiables ou inexistant	17	0,0
	FL4	Degré d'incertitude de l'élévation	1	Précision entre 0 m et 1 m (ex. : GPS haute précision, arpentage)	1 362	2,9
			2	Précision entre 1 m et 20 m (ex. : GPS simple)	9 949	21,1
3			Précision entre 20 m et 100 m (ex. : extraites par géoréférencement d'une carte, extraites d'une carte topographique, localisation visuelle)	32 797	69,6	
4			Inconnu	3 042	6,5	
SOURCE	FS1	Provenance de l'information	1	Forages réalisés dans le cadre du PACES	11 202	23,8
			2	Données extraites de rapports techniques obtenus dans le cadre du PACES	2 676	5,7
			3	Données extraites d'une compilation de données de même source	3 512	7,4
			4	Données extraites d'une compilation de sources multiples	10 177	21,6
			5	SIH	19 583	41,5
			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	2 389	5,1
			2	Les valeurs ne peuvent être vérifiées à l'aide des données sources (source non disponible)	44 761	94,9

Critères de validation

Le Tableau A 16 fait la synthèse des valeurs des critères de validation associés aux objets de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT alors que le Tableau A 17 traite des valeurs des critères de validation associés aux observations de la base de données.

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 Carte 12 Géologie du Quaternaire (en annexe cartographique distincte du rapport) 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.

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. Toutefois, ce critère n'a pas été déterminé dans ce projet, car l'expérience acquise du projet PACES de la Communauté urbaine de Québec (CMQ) réalisé par l'Université Laval a démontré que la méthode est longue et fastidieuse et que le gain en qualité des résultats des analyses hydrogéologiques est minimal. De plus, lors des estimations de l'épaisseur des dépôts de surface et de la piézométrie, une seule observation des doublons est automatiquement conservée par la méthode d'interpolation utilisée.

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 des aquifères. 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 statiques et dynamiques.

Le seul critère de validation de type scientifique porte sur la balance ionique (ou balance électronique) 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 (SO_4).

Tableau A 16 : Synthèse des valeurs des critères de validation associés aux objets de la base de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT

	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	45 264	96,0
			2	Conflit spatial avec le réseau hydrographique, mais localisation adéquate	804	1,7
			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	16	0,0
			4	Conflit spatial avec le réseau hydrographique, mais forage localisé à moins de 10 m de la rive	247	0,5
			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	7	0,0
			6	Conflit spatial avec le réseau hydrographique et forage localisé à plus de 10 m de la rive	812	1,7
	VL2	Cohérence de la profondeur au roc identifiée en forage avec les zones d'affleurement et de till mince de la Carte 12: Géologie du Quaternaire	1	Forage situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince et montrant une épaisseur de dépôts <= 5 m	12 372	26,2
			2	Forage situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince et montrant une épaisseur de dépôts > 5 m et <= 10 m	1 021	2,2
			3	Forage situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince et montrant une épaisseur de dépôts > 10 m	1 342	2,8
			4	Forage n'est pas situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince	21 244	45,1
			5	Forage situé à l'extérieur de la zone cartographiée	2 912	6,2
			6	Forage ne contient pas de description stratigraphique	8 259	17,5
	VL3	Cohérence des altitudes rapportées de la source des données avec le modèle numérique de terrain	1	Différence <= 1 m	3 455	7,3
			2	Différence > 1 m et <= 20 m	11 145	23,6
			3	Altitude disponible, mais localisation à l'extérieur du cadre du MNT	0	0,0
			4	Altitude non disponible, mais localisation à l'intérieur du cadre du MNT	31 575	67,0
			5	Altitude non disponible et localisation à l'extérieur du cadre du MNT	519	1,1
			6	Différence > 20 m	456	1,0
TECHNIQUE	VT1	Cohérence de la profondeur des forages avec l'épaisseur totale des séquences stratigraphiques	1	Différence <= 1 m	23 061	48,9
			2	Profondeur non disponible, mais épaisseur des séquences stratigraphiques disponible	15 830	33,6
			3	Profondeur disponible, mais épaisseur des séquences stratigraphiques non disponible	285	0,6
			4	Profondeur et épaisseur des séquences stratigraphiques non disponibles	7 974	16,9
			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	38 868	82,4
			2	Une séquence de roc au-dessus des dépôts meubles est identifiée	23	0,0
			3	Le forage ne contient pas de descriptions stratigraphiques	8 259	17,5
	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.		
			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.		
			3	Un (ou plusieurs) doublon stratigraphique "certain" en lien avec cet objet a été identifié. La description stratigraphique de cet objet a été rejetée.		
			4	Le forage ne contient pas de description stratigraphique		

Tableau A 17 : Synthèse des valeurs des critères de validation associés aux observations de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT

	Critère de validation	Description	Valeurs possibles		Observation	
					nombre	%
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	40	0,2
			2	Niveau statique < Profondeur du puits, mais Niveau dynamique non disponible	16 588	98,3
			3	Niveau statique < Niveau dynamique, mais profondeur du puits non disponible	20	0,1
			4	Profondeur du puits et Niveau dynamique non disponible	107	0,6
			5	Pas un niveau statique (niveau dynamique)	113	0,7
			6	Niveau statique > Profondeur du puits	1	0,0
			7	Niveau statique > Niveau dynamique	5	0,0
			TOTAL		16 874	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)	755	5,2
			2	Aucun paramètre hydrogéologique rapporté de la source, mais suffisamment d'information pour estimer la transmissivité (Q, t, Δs)	13 649	93,9
			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	4	0,0
			5	Aucun paramètre hydrogéologique rapporté de la source, et insuffisamment d'information pour estimer la transmissivité	124	0,9
			TOTAL		14 532	100,0
SCIENTIFIQUE	VS1	Balance ionique des analyses géochimiques	1	Balance ionique <= 5%	339	8,3
			2	Balance ionique > 5% et <= 10%	102	2,5
			3	Balance ionique > 10%	77	1,9
			4	Données insuffisantes pour le calcul de la balance ionique	3 547	87,3
			TOTAL		4 065	100,0

Annexe 6 : Méthodologie pour la réalisation des cartes d'épaisseur des dépôts meubles et de topographie du roc

La préparation de la Carte 15 : Épaisseur des dépôts meubles et de la Carte 16 : Topographie du roc, s'est inspirée du Protocole du GRIES (Annexe E5 : Protocole pour la préparation du Livrable 15 – Estimation de l'épaisseur des formations superficielles et Livrable 16 – Topographie du roc) (ci-après nommé Protocole). 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-OUT.

Sources de données

Les mêmes sources de données que le Protocole ont été employées, soit les descriptions stratigraphiques des forages répertoriés sur le territoire de l'étude contenus dans la base de données hydrogéologiques PACES-OUT. La Carte 3 : Modèle numérique d'élévation, la Carte 12 : Géologie du Quaternaire, la Carte 13 : Géologie 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, ont également servis.

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-OUT 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 description stratigraphique est incohérente,
- les forages dont la profondeur est incohérente avec l'épaisseur totale de leur séquence stratigraphique,
- les forages qui n'ont pas atteint le roc, et
- les observations d'affleurement qui ne constituent pas des forages.

Sur les 38 891 observations de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT qui ont une description stratigraphique, 21 215 forages ont été conservés suite à ce processus de validation. De ce nombre, 19 224 sont localisés dans la zone d'analyse à cartographier correspondant à la couverture de la Carte : 12 Géologie du Quaternaire.

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). Un histogramme accompagné d'une analyse statistique a aussi été produit afin d'identifier les valeurs extrêmes.

Une moyenne mobile a été calculée à chaque forage lorsqu'un minimum de 3 valeurs d'épaisseur étaient disponibles 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 10 m,
- le rejet d'un forage est confirmé par visualisation spatiale et comparaison avec leurs voisins immédiats, tout en tenant compte du contexte hydrogéologique.

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 dont l'écart avec la moyenne locale est supérieur à deux écarts-types locaux ont 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. Tous les forages ont ultimement été comparés visuellement à leurs voisins immédiats, même s'ils n'avaient pas préalablement été identifiés comme douteux par les méthodes précédentes. Les forages qui n'ont pas atteint le roc ont aussi été considérés dans le processus de validation, car 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. La fiabilité des sources de données a aussi été prise en considération à chacune des étapes de sélection et de validation.

Suite à ce processus de validation basé sur le jugement professionnel, 18 626 forages ont été conservés pour produire les cartes d'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles et de la topographie du roc.

Le territoire a ensuite été divisé en deux zones aux contextes physiographiques et géologiques distincts, et pour lesquelles les moments statistiques des épaisseurs sont différents :

- la zone sud, correspondant à la vallée de la rivière des Outaouais couvrant 2 227 km², contenant 4 776 forages validés, et
- la zone nord, correspondant au reste du territoire des hautes terres couvrant 11 541 km², contenant 13 850 forages validés.

Traitement des données

Interpolation

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). Les paramètres du modèle sphérique ajusté à chaque semi-variogramme pour chaque zone sont donnés au Tableau A18.

Tableau A18 : Paramètres des semi-variogrammes directionnels des données des épaisseurs de dépôts meubles pour chaque zone de l'Outaouais

Zone	Effet pépité (m ²)	Seuil (m ²)	Portée maximale (m)	Rapport d'anisotropie géométrique	Direction de la portée maximale (degrés)
Sud	30	260	3 400	1,8	105
Nord	5	80	450	1	s.o.

Note : s.o. = sans objet

L'interpolation par krigeage ordinaire de l'épaisseur des dépôts meubles a été effectuée séparément pour chaque zone sur une grille régulière dont la taille des mailles est de 250 m par 250 m. Les paramètres de recherche employés par l'interpolation sont indiqués au Tableau A19. Une validation croisée et une étude spatiale des résidus ont aussi été réalisées afin d'évaluer la fiabilité de l'interpolation.

Tableau A19 : Paramètres de recherche de l'interpolation par krigeage ordinaire des épaisseurs de dépôts meubles pour chaque zone de l'Outaouais

Zone	Rayon maximal de l'ellipse de recherche (m)	Rayon minimal de l'ellipse de recherche (m)	Angle du rayon maximal de l'ellipse de recherche	Nombre de secteurs de recherche	Nombre minimal de forages	Nombre maximal de forages
Sud	3 400	1 900	105	1	4	64
Nord	450	450	s.o.	1	2	64

Note : s.o. = sans objet

Les résultats de l'interpolation ont été comparés avec la topographie, la Carte 12 : Géologie du Quaternaire, l'épaisseur des dépôts dans les forages qui n'ont pas atteint le roc et les observations d'affleurement.

Points de contrôle

Dans les secteurs où une faible densité de mesures menait à des résultats improbables de l'interpolation, 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 :

- 10 119 forages du Registre de puits de l'Ontario,
- 1 351 forages qui n'ont pas atteint le roc (épaisseurs variables),
- 104 points de contrôle le long des levés géophysiques (épaisseurs variables),
- 459 points de contrôle (2 m d'épaisseur) dans les polygones d'affleurement de la Carte 12 : Géologie du Quaternaire, et
- 17 points de contrôle afin de combler les zones non interpolées.

Les données du Registre de puits de l'Ontario (MOE, 2012) ont servi à améliorer l'interpolation en bordure de la rivière des Outaouais. Les données ont été extraites pour une bande de 5 km le long de la rivière, dans les comtés ontariens faisant face à la région de l'Outaouais. Ces données ne sont pas comprises dans la base de données hydrogéologiques PACES-OUT.

De nombreux forages n'atteignant pas le roc ont été ajoutés surtout dans la zone nord, où la densité des forages est faible. Cela a permis d'améliorer cette densité afin que l'interpolation puisse couvrir une plus grande superficie. De plus, on retrouve de nombreux secteurs où l'épaisseur des dépôts meubles est très importante (50 m et plus, voir 100 m). Afin de représenter ces secteurs profonds, il s'est avéré important d'ajouter ces forages profonds n'atteignant pas le roc.

Les points de contrôle d'affleurements ont servi à mieux représenter les affleurements rocheux dans le résultat de l'interpolation de la zone sud seulement. La portée (et par conséquent le rayon de l'ellipse de recherche utilisé) de la zone nord étant relativement courte, l'interpolation des secteurs où l'épaisseur des dépôts meubles est importante n'affecte généralement pas les secteurs où le roc affleure. Il n'a donc pas été jugé nécessaire d'ajouter de points de contrôle d'affleurements dans cette zone.

Selon les statistiques des forages du territoire de l'Outaouais situés à l'endroit des polygones d'affleurement et de till mince (Carte 12 : Géologie du Quaternaire), l'épaisseur médiane des dépôts meubles est de 2 m. Cette valeur médiane a été attribuée aux points de contrôle d'affleurements.

Des points de contrôle permettant de combler les trous laissés par l'interpolation ont été ajoutés sur la zone sud seulement, afin que la couverture de l'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles y soit complète. L'épaisseur des dépôts meubles de ces points de contrôles s'est fait sur la base de la compréhension du système hydrogéologique et en comparaison avec les forages les plus près. Cette méthode n'a pas été employée pour la zone nord car la proportion du territoire non-interpolée est trop importante.

Toutes les étapes décrites ci-dessus ont été reprises autant de fois qu'il a été nécessaire afin d'obtenir un résultat de qualité.

Autres méthodes d'estimation

Dû à une faible densité de forage, environ 10 % de la zone nord a été couverte par la méthode d'interpolation. C'est pourquoi le nombre minimal de forages à l'intérieur du cercle de recherche nécessaire pour effectuer l'interpolation a été fixé au minimum possible, soit 2. La fiabilité de l'estimation y est par contre affectée à la baisse.

Afin d'exploiter les données de forage de la zone nord au maximum, pour les mailles n'ayant pas de résultat d'interpolation, l'épaisseur de dépôts mesurée en forage a été attribuée à la cellule sur laquelle le forage se trouve. Cette estimation est encore moins fiable que celle par interpolation.

Pour le reste de la zone nord sans estimation, les statistiques des épaisseurs des dépôts meubles en forage en fonction de la Carte 12 : Géologie du Quaternaire ont été utilisés. En premier lieu, la zone a été séparée en 6 sous-zones. En second lieu, les polygones de la Carte 12 : Géologie du Quaternaire ont été simplifiés en unités géologiques semblables. En troisième lieu, pour chaque sous-zone, une analyse statistique a été réalisée pour les données validées d'épaisseur de dépôts qui se situent sur chacun des polygones simplifiés. Ces statistiques sont indiquées sous forme de diagramme en boîte sur la Carte 15 : Épaisseur des dépôts meubles. Les polygones géologiques simplifiés y sont aussi illustrés

dans les secteurs où l'épaisseur des dépôts meubles n'a pas été estimée par les méthodes précédentes. Ces statistiques indiquent ainsi un ordre d'idée sur l'épaisseur des dépôts. Il a été décidé de ne pas y attribuer directement de valeur non vérifiée par forage afin de ne pas induire en erreur un futur utilisateur.

Pour les besoins du modèle hydrostratigraphique 3D, une valeur de dépôt meuble devait être attribuée à chaque maille. La médiane des épaisseurs de dépôts de chaque sous-zone a donc été utilisée pour toute la surface du polygone géologique simplifié correspondant (Tableau A20).

Tableau A20 : Épaisseur médiane de dépôts meubles à l'endroit des polygones géologiques simplifiés de la Carte 12 : Géologie du Quaternaire (zone nord)

Polygone géologique simplifié	Sous-zone					
	1	2	3	4	5	6
Alluvions	21,3	9,9	38,0	13,7	11,6	10,1
Fluvioglaciale	9,4	19,6	7,3	16,2	6,1	12,2
Lacustre	8,5	-	8,2	-	35,0	9,2
Marin	12,2	16,0	9,8	8,1	17,1	10,4
Organique	2,1	6,4	1,5	2,6	4,1	8,9
Roc	2,1	3,0	1,6	2,6	1,4	2,7
Till continu	3,0	3,9	2,4	2,4	1,2	4,6
Till mince	2,4	2,4	1,8	1,8	1,4	3,3

Topographie du roc

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. À l'endroit des polygones géologiques simplifiés de roc et de till où la profondeur du roc n'a pas été estimée, une valeur de 2 m de profondeur a été soustraite du modèle numérique d'élévation. Cette profondeur correspond, pour toute la région de l'Outaouais, à la médiane de l'épaisseur des dépôts des forages localisés à l'intérieur de ces polygones simplifiés. Cette valeur représente relativement bien la réalité, car il est rare qu'un forage profond soit localisé dans ces unités. Par contre, pour les autres polygones simplifiés tels que les dépôts alluvionnaires, fluvioglaciaux, lacustres et marins, la médiane de 12 m n'a pas été attribuée, car elle représente mal la réalité. En effet, il est fréquent que certains secteurs atteignent des profondeurs beaucoup plus importantes. Ceci est également démontré par la moyenne et l'écart-type, tous deux de 19 m, indiquant qu'environ un tiers des valeurs s'éloignent de plus de 19 m de la moyenne.

Annexe 7 : 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 l'Outaouais en 2 secteurs:
 - a. La vallée de l'Outaouais : où une carte d'épaisseur de dépôts meubles interpolée est disponible.
 - b. Le nord du territoire, divisé en 6 sous-zones, où l'épaisseur des dépôts a été posée comme étant constante par sous-zone pour chaque unité géologique de la Carte 12 : Géologie du Quaternaire (voir Annexe 6 : Méthodologie pour la réalisation des cartes d'épaisseur des dépôts meubles et de topographie du roc et Carte 15 : Épaisseur des dépôts meubles).
2. Définition d'un modèle conceptuel des successions verticales possibles de dépôts meubles pour chaque unité quaternaire définie en surface sur la Carte 12 : Géologie du Quaternaire.
3. Vérification et modification du modèle conceptuel à partir des données stratigraphiques des forages fiables, des coupes hydrostratigraphiques, de la Carte 15 : Épaisseur des dépôts meubles et d'autres sources d'information.
4. Création d'un fichier cartographique d'unité de surface contenant les polygones de la Carte 12 : Géologie du Quaternaire modifiés par endroit.
5. Pour chaque polygone d'unité de surface, création de 3 champs pour les 3 couches de dépôts meubles définissant :
 - a. Dans les zones nord :
 - a) le code quaternaire de la couche,
 - b) l'hydrofaciès de la couche, et
 - c) l'épaisseur de la couche.
 - b. Dans la vallée de l'Outaouais :
 - a) le code quaternaire de la couche,
 - b) l'hydrofaciès de la couche, et
 - c) l'épaisseur maximale de la couche.

Dans le cas du secteur de la vallée de l'Outaouais, l'épaisseur réelle de chaque couche est calculée à partir des grilles (avec mailles de 250 m par 250 m) d'épaisseur maximale des couches et de la grille d'épaisseur des dépôts. Une épaisseur maximale constante est posée pour certaines couches, généralement les couches de surface telles que les alluvions, les sédiments marins littoraux, deltaïques et dans certains cas, d'eau profonde. L'épaisseur des couches sous-jacentes correspond aux épaisseurs résiduelles de l'épaisseur totale des dépôts meubles.

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,
 - b. d'hydrofaciès,
 - c. de code quaternaire (pour chacune des 3 couches de dépôts).
2. Extraction des données au centre de chaque maille et traitement des données dans un tableur Excel[®].
3. 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 les hydrofaciès du roc (HF6 et HF7) lorsqu'il n'y a pas de dépôts.

Sur la majorité du territoire de l'Outaouais, une ou deux couches de dépôts seulement étaient définies lorsqu'elles étaient suffisantes pour bien décrire la succession des dépôts meubles. Des cartes des hydrofaciès des couches de dépôts meubles 1 à 3 et de leurs épaisseurs sont présentées aux Figure A3 à Figure A8.

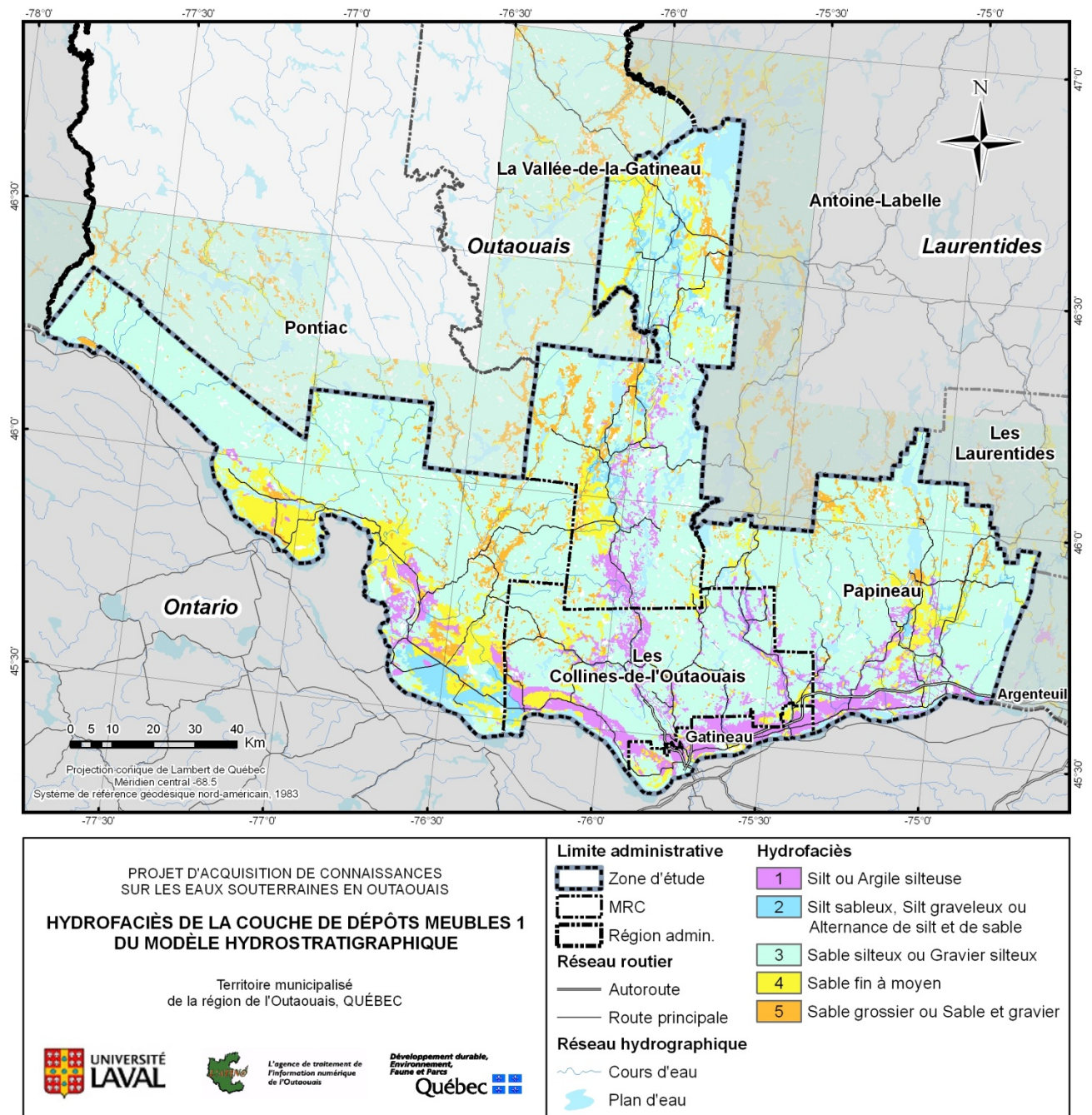


Figure A3 : Hydrofaciès de la première couche (à partir de la surface du terrain) de dépôts meubles du modèle hydrostratigraphique

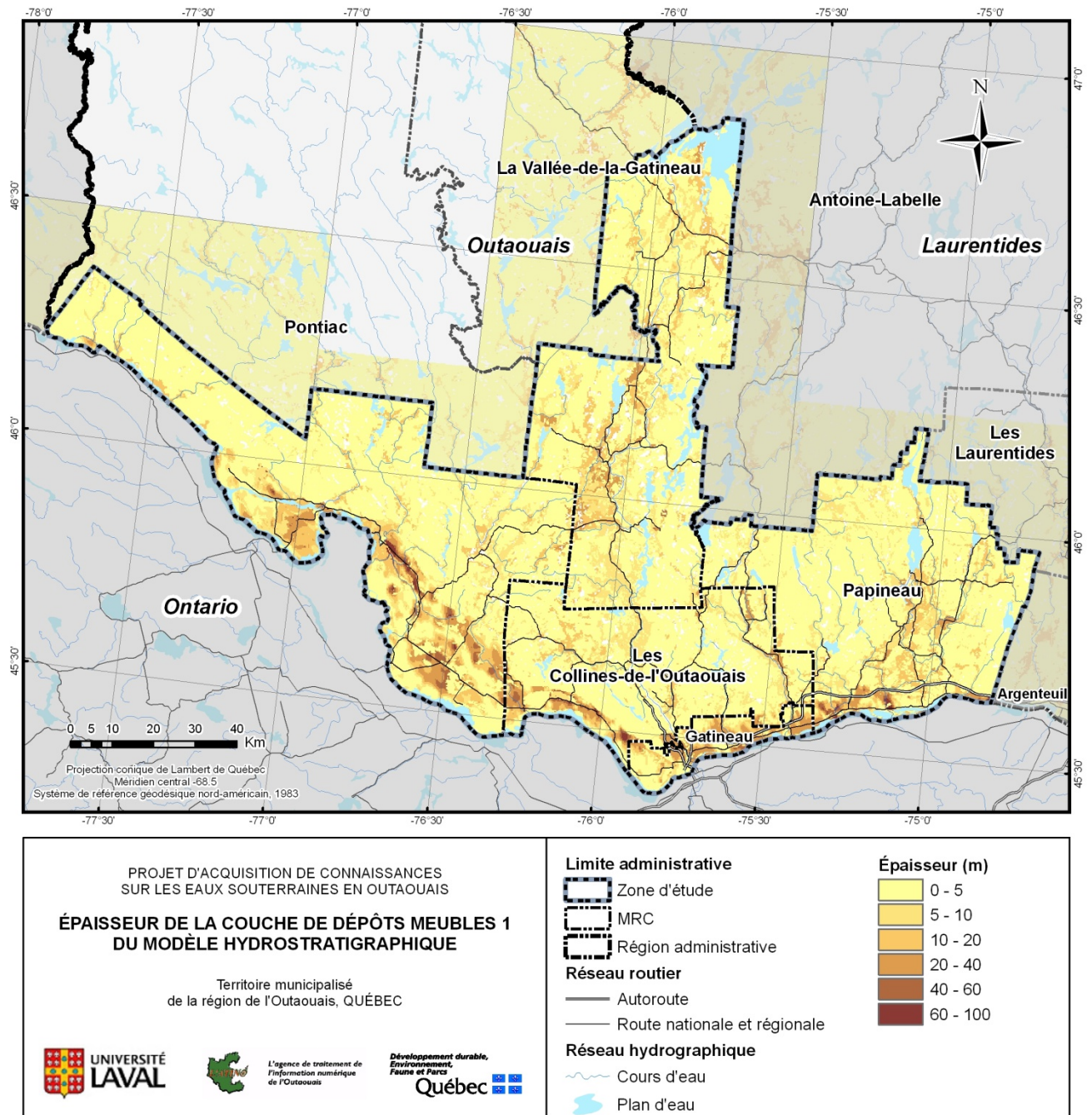


Figure A4 : Épaisseur de la première couche (à partir de la surface du terrain) de dépôts meubles du modèle hydrostratigraphique

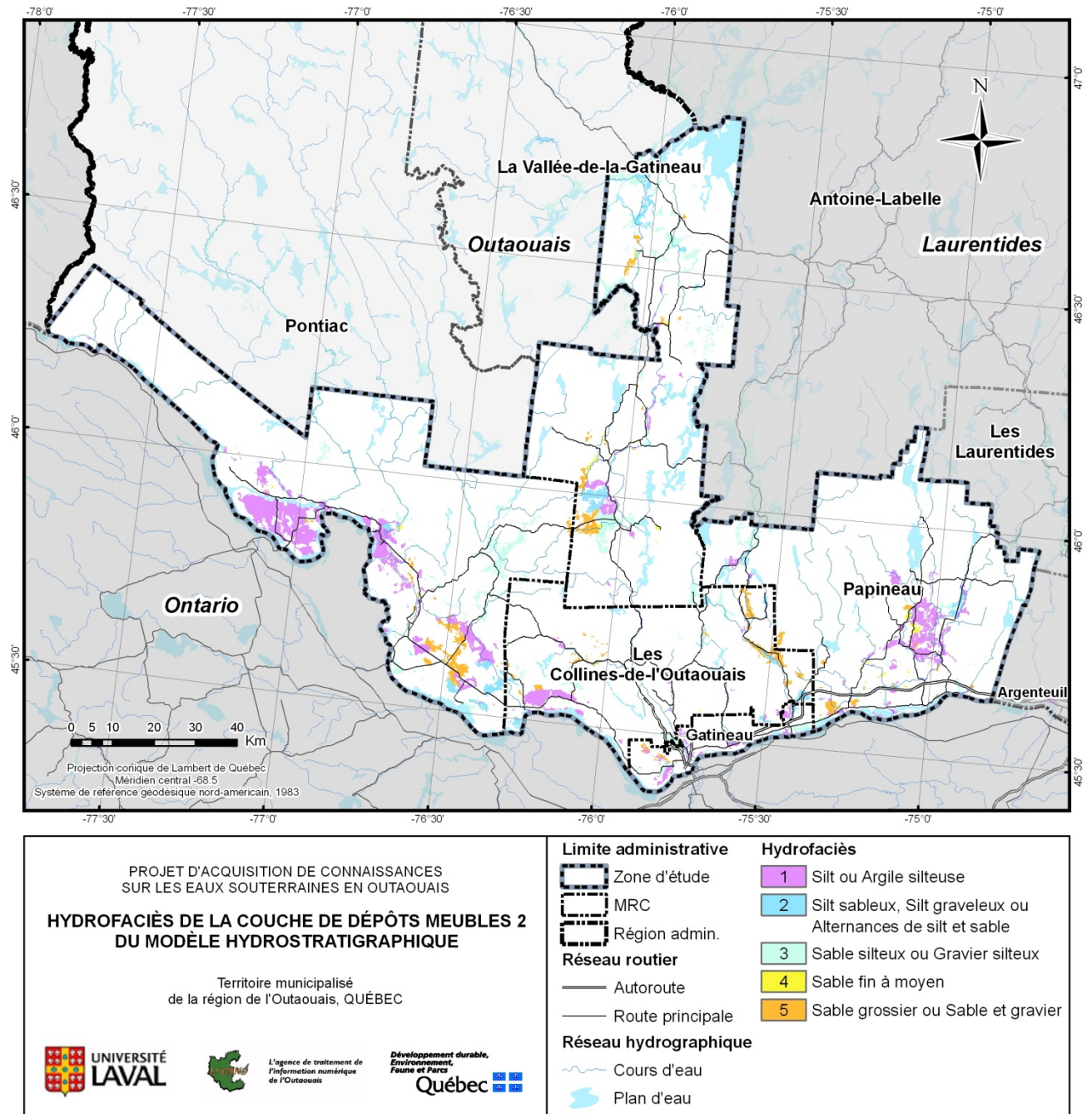


Figure A5 : Hydrofaciès de la deuxième couche (à partir de la surface du terrain) de dépôts meubles du modèle hydrostratigraphique

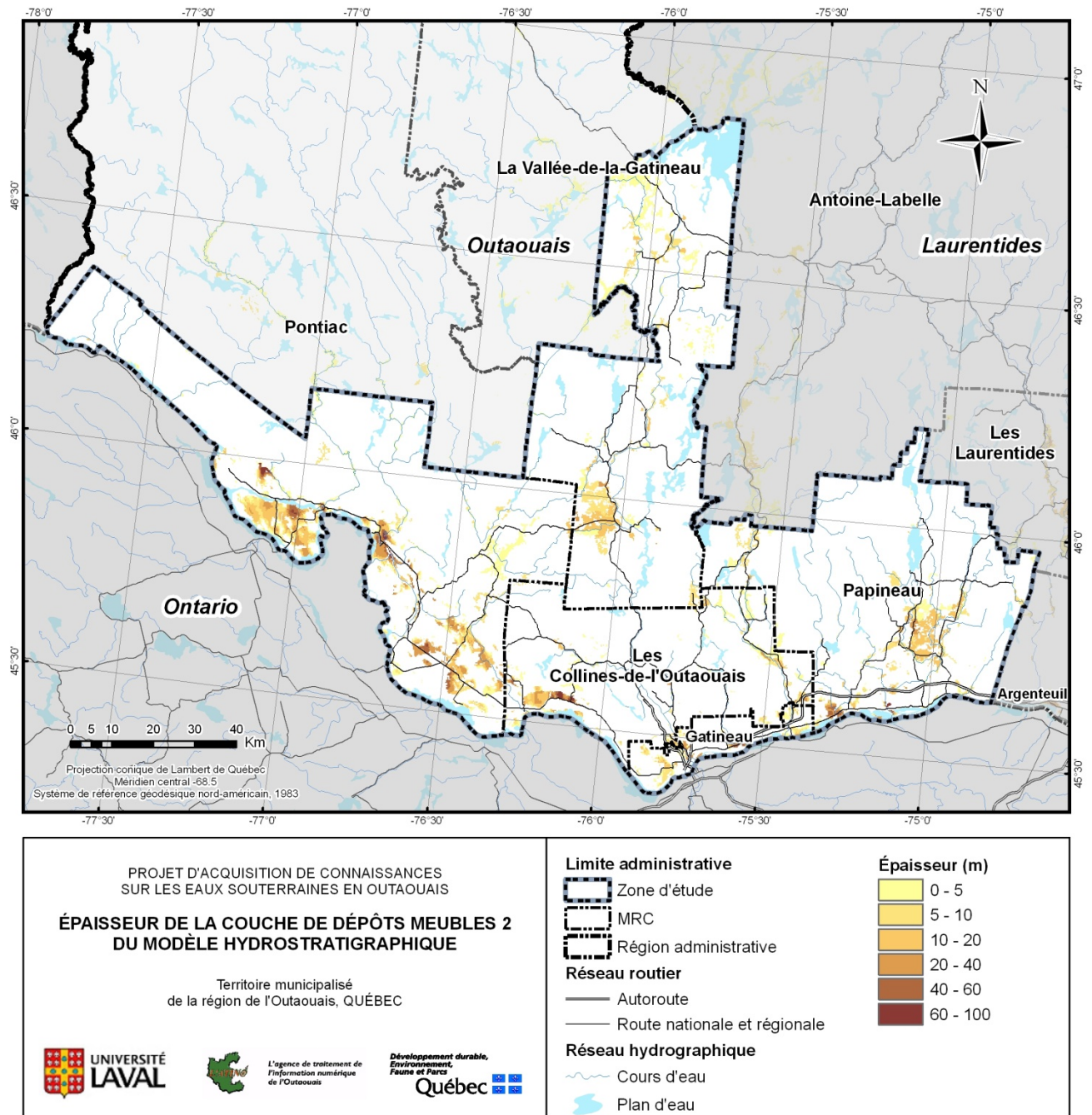


Figure A6 : Épaisseur de la deuxième couche (à partir de la surface du terrain) de dépôts meubles du modèle hydrostratigraphique

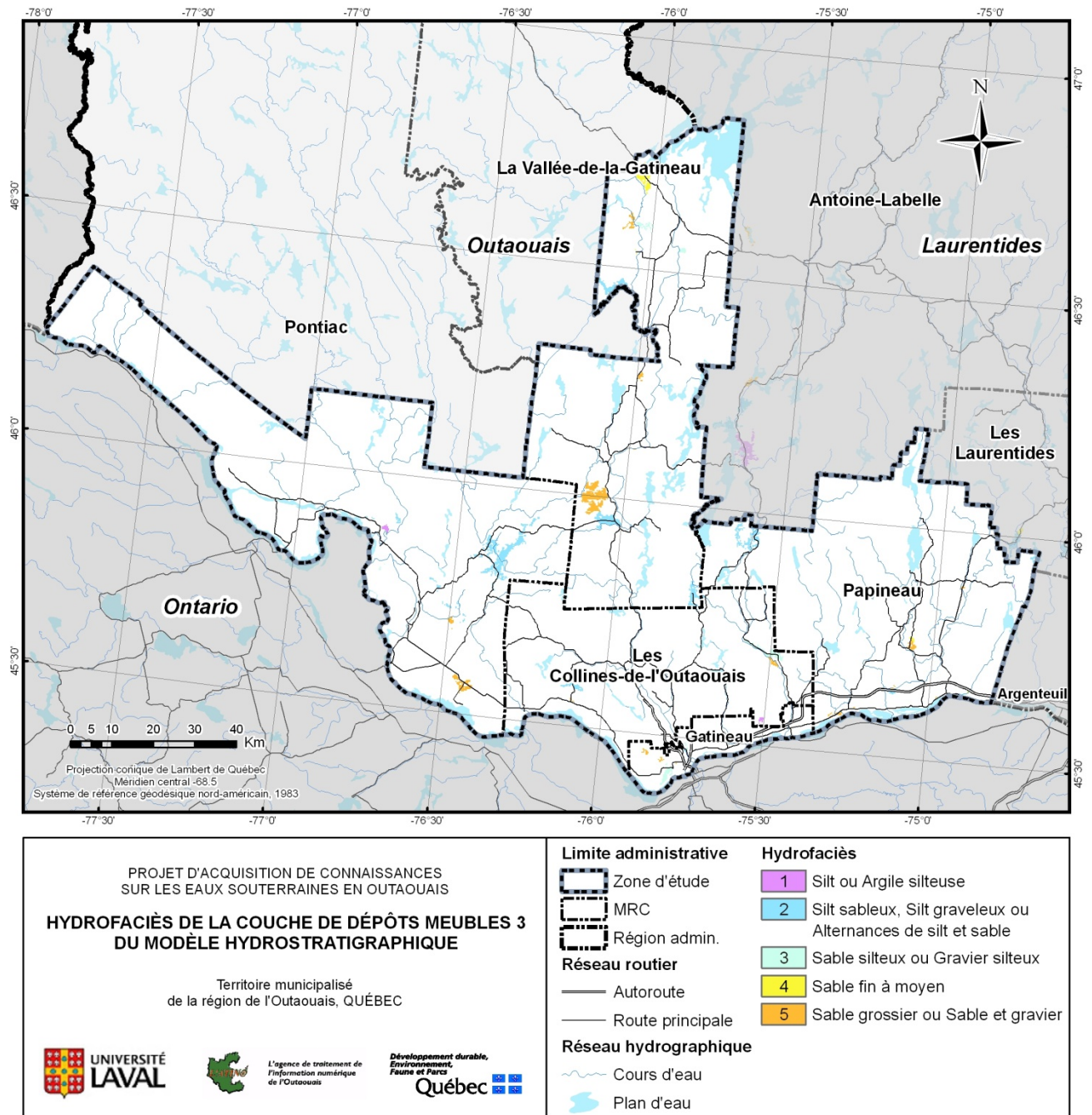


Figure A7 : Hydrofaciès de la troisième couche (à partir de la surface du terrain) de dépôts meubles du modèle hydrostratigraphique

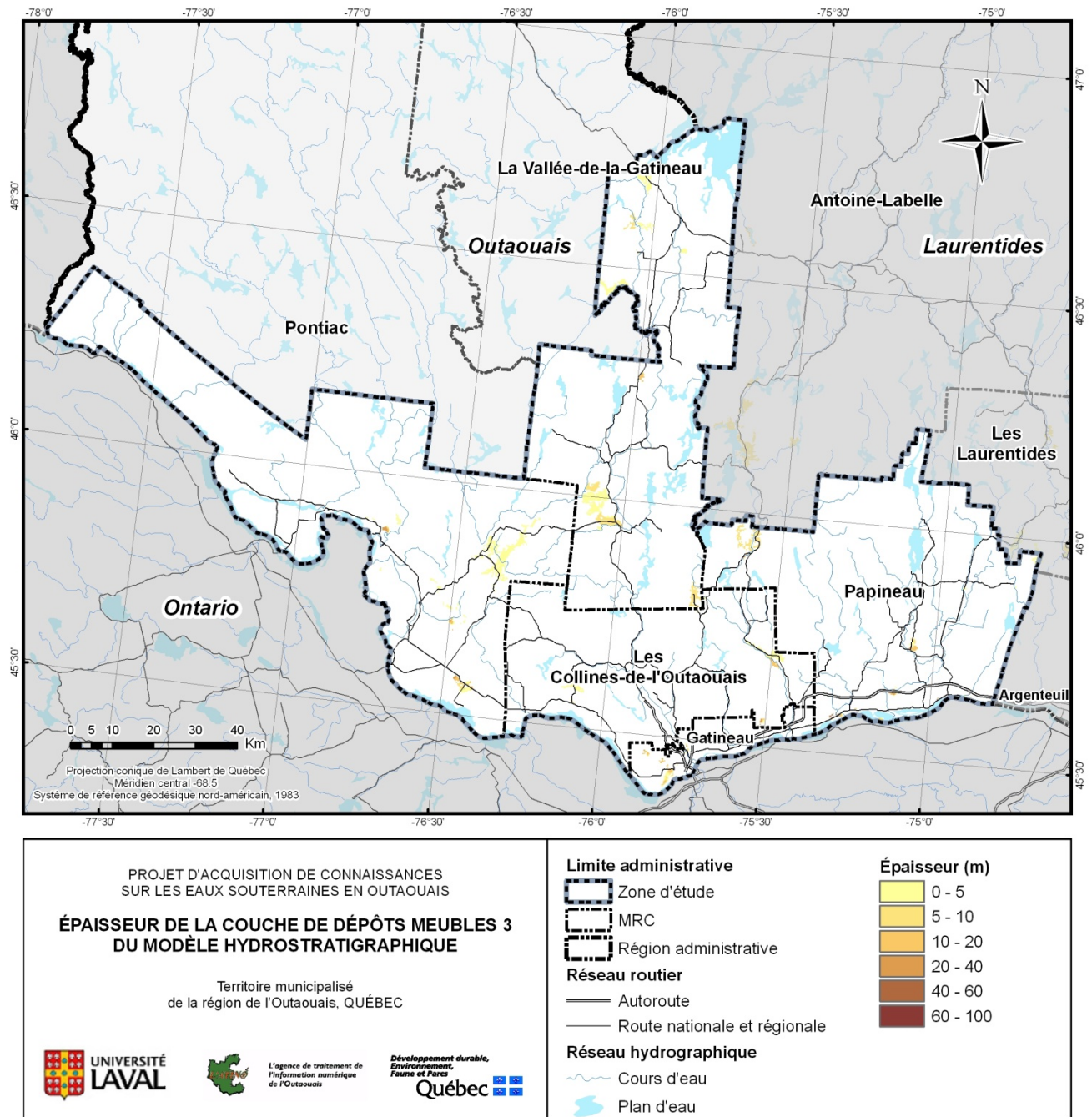


Figure A8 : Épaisseur de la troisième couche (à partir de la surface du terrain) de dépôts meubles du modèle hydrostratigraphique

Annexe 8 : Méthodologie pour la réalisation des cartes piézométriques

La préparation de la Carte 20 : Piézométrie combinée des aquifères de roc fracturé et de dépôts meubles s'est inspirée du Protocole du GRIES (Annexe E6 : Protocole pour la préparation du Livrable 19 et 20 – Piézométrie dans les formations superficielles et dans le roc) ci-après nommé Protocole. La présente annexe vise une présentation plus détaillée de la méthodologie employée dans le cadre du PACES-OUT.

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-OUT. La Carte 3 : Modèle numérique d'élévation, la Carte 5 et 6 : Hydrographie et Bassins versants, la Carte 12 : Géologie du Quaternaire, la Carte 15 : Épaisseur des dépôts meubles et la Carte 17 : Confinement de l'aquifère de roc 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-OUT 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 dynamiques,
- les niveaux d'eau qui sont plus profonds que la profondeur totale des puits,
- 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 16 874 niveaux d'eau de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT, 15 593 ont été conservés selon les critères énumérés ci-dessus. De ce nombre, 14 789

sont localisés dans la zone d'analyse à cartographier correspondant à la couverture de la Carte 12 : Géologie du Quaternaire.

Le type d'aquifère (roc fracturé ou de dépôts meubles) a été identifié pour chaque niveau d'eau relevé dans la base de données hydrogéologiques PACES-OUT. 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, 1 905 proviennent d'un aquifère de dépôts meubles et 12 699 d'un aquifère de roc fracturé. La provenance de 185 niveaux d'eau demeure indéterminée.

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). Un histogramme et une analyse statistique ont aussi été produits afin d'éliminer les données extrêmes. Étant donné que 95 % 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 la rivière des Outaouais ont été rejetés, car ces plans d'eau sont généralement en lien hydraulique avec les aquifères.

Pour chaque milieu aquifère (de roc fracturé et de dépôts meubles), 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 vérifiés puis 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 calculées 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 supérieur à deux écarts-types locaux ont été identifiés comme valeurs potentiellement aberrantes et ont été éliminés en fonction des valeurs voisines immédiates et du contexte hydrogéologique.

Puisque la topographie en Outaouais peut varier rapidement sur de courtes distances, la méthode de filtration avec moyenne mobile ci-dessus a été reprise avec un rayon de 100 m afin d'identifier d'avantages de données problématiques. Ces méthodes ont servi à mettre en évidence certaines données douteuses, mais pas toutes. Tous les niveaux d'eau ont ultimement été comparés visuellement à leurs voisins immédiats, même s'ils n'avaient pas préalablement été identifiés comme douteux. La fiabilité des sources de données a aussi été prise en considération à chacune des étapes de sélection et de validation.

Dans les secteurs où les aquifères de dépôts meubles sont en lien hydraulique avec l'aquifère de roc, les niveaux d'eau de ce premier milieu aquifère ont servi à bonifier l'échantillon des niveaux d'eau du deuxième milieu aquifère.

Suite au processus de validation basé sur le jugement professionnel, 12 223 niveaux d'eau ont été conservés pour l'aquifère de roc fracturé et 1 155 niveaux d'eau pour les aquifères de dépôts meubles.

Le territoire a ensuite été divisé en deux zones aux contextes physiographiques et géologiques distinctes, telles que définies lors de l'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles (voir Annexe 6 : Méthodologie pour la réalisation des cartes d'épaisseur des dépôts meubles et de topographie du roc) :

- la zone sud, correspondant à la vallée de la rivière des Outaouais couvrant 2 227 km², contenant 2 630 et 406 niveaux d'eau validés provenant respectivement des aquifères de roc et de dépôts meubles, et
- la zone nord, correspondant au reste du territoire des hautes terres couvrant 11 541 km², contenant 9 593 et 749 niveaux d'eau validés provenant respectivement des aquifères de roc et de dépôts meubles.

Traitement des données

Comme suggérée par le Protocole, l'estimation de la piézométrie 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.

Aquifère de roc fracturé

Lors de l'analyse géostatistique, des semi-variogrammes préliminaires directionnels ont été calculés pour chaque zone. Des modèles analytiques ont ensuite été ajustés manuellement sur chaque semi-variogramme expérimental (intervalle de direction de 30 degrés et tolérance sur cet intervalle de 30 degrés). Aucune anisotropie géométrique n'a été détectée. Les paramètres des modèles ajustés à chaque semi-variogramme pour chaque zone sont donnés au Tableau A21.

Tableau A21 : Paramètres des semi-variogrammes omnidirectionnels des données de profondeurs de niveau d'eau de l'aquifère de roc fracturé pour chaque zone de l'Outaouais

Zone	Type de modèle	Effet pépite (m ²)	Seuil (m ²)	Portée (m)
Sud	Puissance 0.3	2	6	400
Nord	Sphérique	5.5	3.2	100

L'interpolation par krigeage ordinaire des profondeurs de niveau d'eau a été effectuée séparément pour chaque zone, sur une grille de 250 m par 250 m. Les paramètres de recherche employés pour l'interpolation sont indiqués au Tableau A22. Une validation

croisée et une étude spatiale des résidus ont aussi été réalisées afin d'évaluer la fiabilité de l'interpolation.

Tableau A22 : Paramètres de recherche pour l'interpolation par krigeage ordinaire des profondeurs de niveau d'eau de l'aquifère de roc fracturé pour chaque zone de l'Outaouais

Zones	Rayon du cercle de recherche (m)	Nombre de secteurs de recherche	Nombre minimal de forages	Nombre maximal de forages
Sud	4 000	1	4	64
Nord	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.

Note : s.o. = sans objet

L'interpolation de la zone sud a permis de couvrir presque tout le territoire, contrairement à la zone nord.

Les paramètres de recherche pour l'interpolation par krigeage ordinaire de la zone nord ne sont pas présentés car cette méthode s'est avérée être inefficace pour y estimer la piézométrie. En effet, la portée du modèle analytique ajusté au semi-variogramme n'étant que de 100 m, en considérant un rayon de recherche correspondant à la portée, la densité de niveaux d'eau par cercle de recherche ne serait que de 0.02, ce qui est clairement insuffisant. D'ailleurs, seulement 71 points de grille ont été interpolés selon ces paramètres, comparativement à un total de 396 627 à estimer pour toute la zone d'analyse.

Contrairement à la zone sud, où le relief est relativement plat et la topographie varie doucement, il n'est pas valide pour la zone nord d'allonger le cercle de recherche à 10 fois la portée, car la topographie, et par effet même la piézométrie, peut varier grandement sur une telle distance de 1 km. Des essais ont été effectués avec des cercles de recherche de 500 m et 250 m, mais la topographie varie encore trop sur la première distance et la couverture de l'interpolation était nettement insuffisante dans le deuxième cas.

Une autre méthode d'estimation basée sur les statistiques de niveaux d'eau en fonction de la pente a été testée. Aucune tendance n'a toutefois été détectée. Les moyennes et médianes pour les niveaux d'eau classés selon des pentes de moins de 5° ou plus de 5°, de moins de 7° ou plus de 7°, et de moins de 10° ou plus de 10°, sont toutes les mêmes, soit de 6 m, la même valeur que pour le territoire de l'Outaouais.

Les statistiques des niveaux d'eau ont aussi été calculées en fonction des unités géologiques simplifiées de la Carte 12 : Géologie du Quaternaire, telles qu'identifiées lors de l'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles (voir Annexe 6 : Méthodologie pour la réalisation des cartes d'épaisseur des dépôts meubles et de topographie du roc). Les niveaux d'eau ont été classés selon qu'ils se situent dans des polygones de roc affleurant ou de till, correspondant grossièrement à des sommets topographiques, ou dans des polygones de dépôts alluvionnaires, fluvioglaciaires, marins, lacustres ou organiques, correspondant approximativement aux vallées. Encore une fois, les moyennes et médianes sont toutes de 6 m, la même valeur que pour le territoire de l'Outaouais.

À défaut d'une méthode plus précise pour estimer la piézométrie dans la zone nord, la moyenne et la médiane de 6 m de profondeur d'eau ont été attribuées pour tout le territoire. Dans les secteurs de la zone sud non interpolés, la même valeur a été attribuée. Les

niveaux d'eau à l'endroit des rivières et lacs en lien hydraulique avec l'aquifère de roc ont été remplacés par 0 m.

Pour obtenir la carte finale de la piézométrie combinée des aquifères de roc et des dépôts meubles en termes d'élévation par rapport au niveau moyen de la mer, une soustraction des profondeurs d'eau à l'altitude du modèle numérique d'élévation a été réalisée.

Aquifères de dépôts meubles

Aucun aquifère de dépôts meubles d'intérêt régional et séparé de l'aquifère de roc par du matériel confinant n'a été identifié lors des analyses précédentes. La carte de piézométrie des formations superficielles seulement n'a donc pas été produite.

Annexe 9 : Propriétés hydrauliques des matériaux géologiques

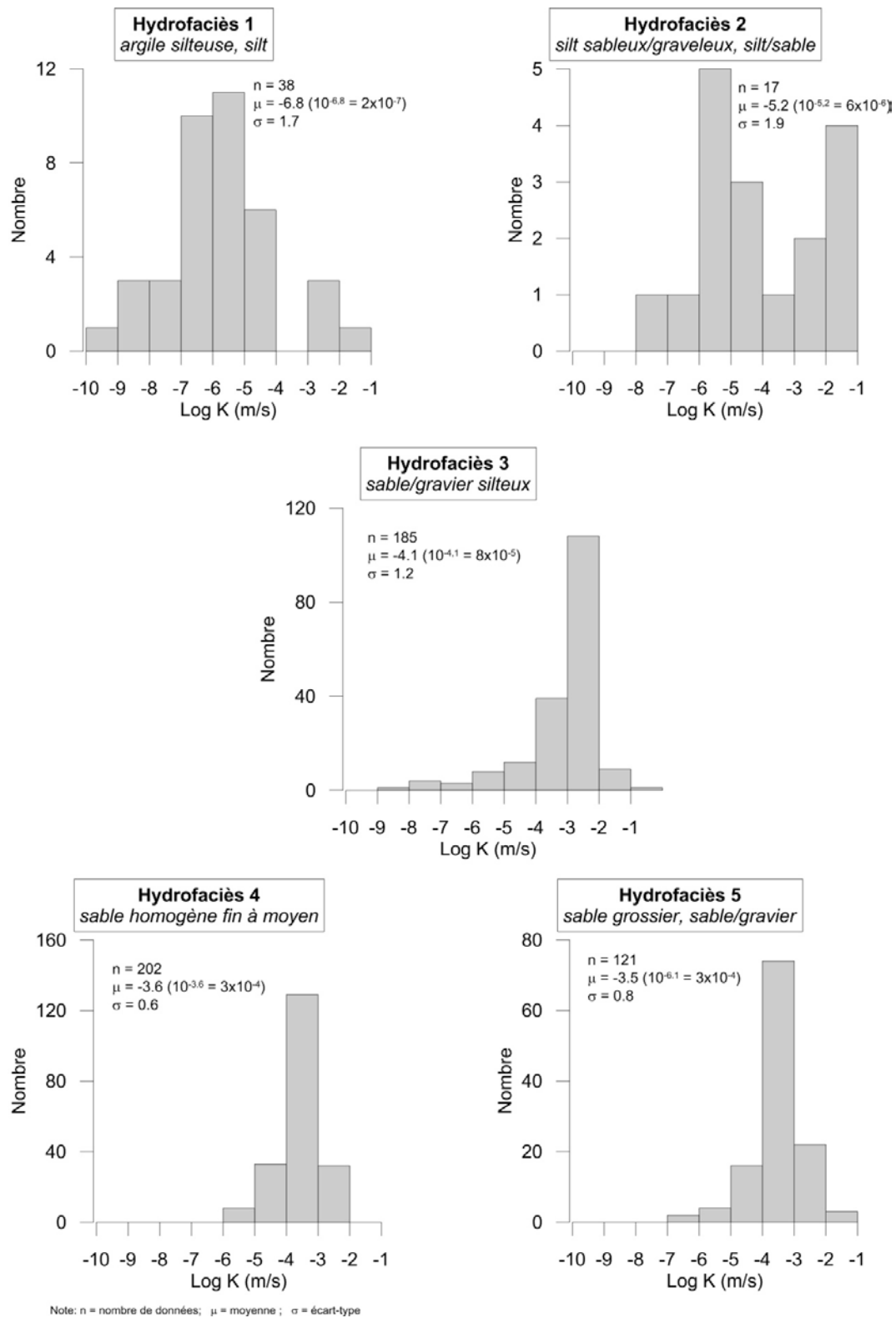


Figure A 9: Histogrammes des conductivités hydrauliques des hydrofaciès de dépôts meubles

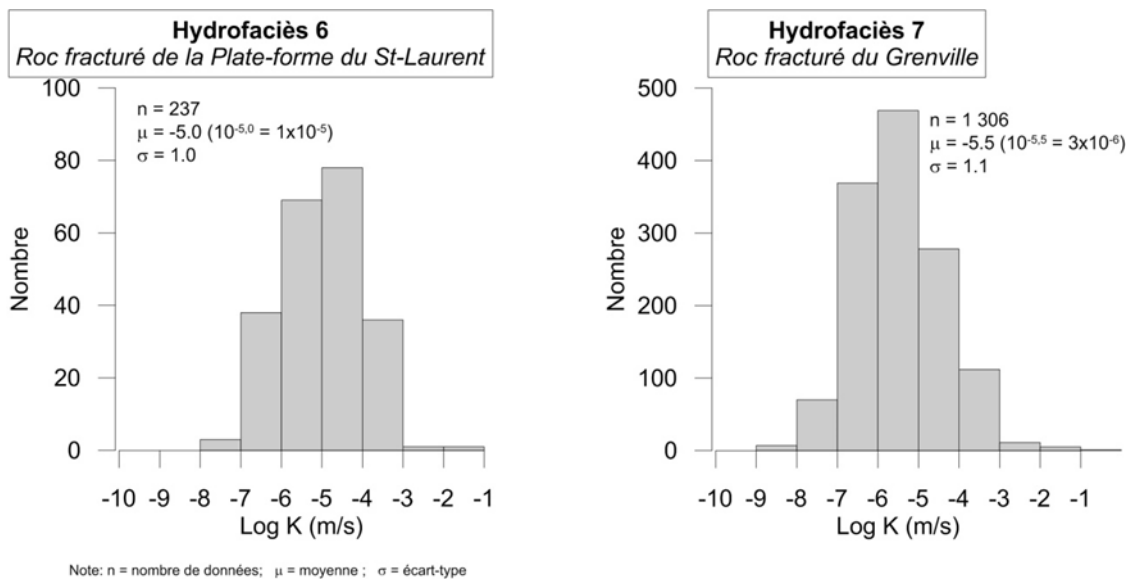


Figure A 10: Histogrammes des conductivités hydrauliques des hydrofaciès de roc

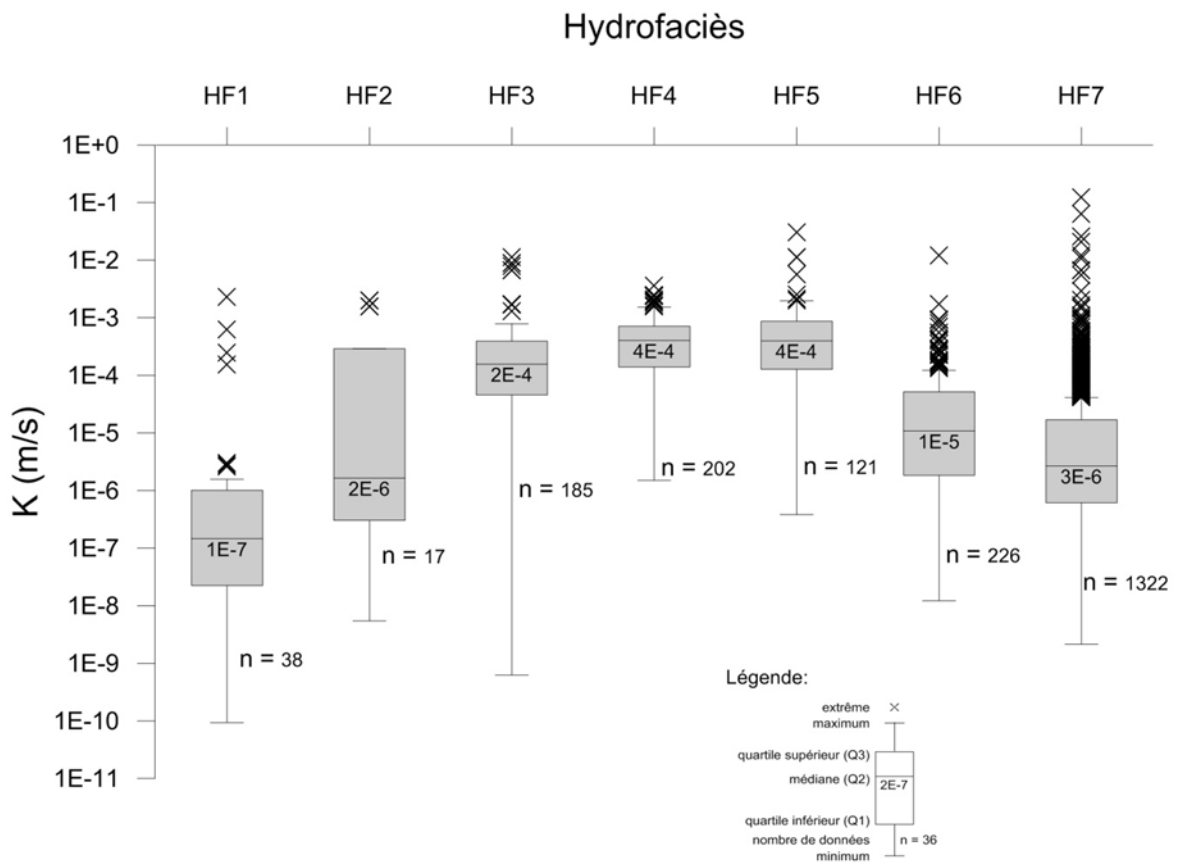


Figure A 11: Diagramme en boîtes des conductivités hydrauliques des hydrofaciès

Tableau A23 : Propriétés hydrauliques du roc fracturé selon les différentes formations rocheuses cartographiées

Géologie du roc	Emmagasinement S			Capacité spécifique C_{sp}			Transmissivité T			Conductivité hydraulique K		
	<i>n</i> (-)	μ_g (m ³ /m ³)	σ_{log} (log m ³ /m ³)	<i>n</i> (-)	μ_g (m ² /s)	σ_{log} (log m ² /s)	<i>n</i> (-)	μ_g (m ² /s)	σ_{log} (log m ² /s)	<i>n</i> (-)	μ_g (m/s)	σ_{log} (log m/s)
PROVINCE												
Groupe (<i>Lithologie</i>)												
GRENVILLE	6	6x10⁻³	1,6	9 594	9x10⁻⁶	0,8	1 324	5x10⁻⁵	0,7	1 306	3x10⁻⁶	1,1
<i>Granite et Alaskite</i>				37	3x10 ⁻⁵	0,7	14	7x10 ⁻⁵	0,6	14	4x10 ⁻⁶	0,9
<i>Gneiss</i>	1	2x10 ⁻⁴	-	4 218	8x10 ⁻⁶	0,8	391	6x10 ⁻⁵	0,7	386	4x10 ⁻⁶	1,1
<i>Paragneiss et Quartzite</i>	1	5x10 ⁻¹	-	745	1x10 ⁻⁵	0,7	113	4x10 ⁻⁵	0,6	113	2x10 ⁻⁶	0,9
<i>Diorite et Syénite</i>	4	5x10 ⁻³	1,4	2 141	1x10 ⁻⁵	0,8	302	6x10 ⁻⁵	0,8	293	4x10 ⁻⁶	1,1
<i>Gabbro</i>				18	1x10 ⁻⁵	0,7	7	7x10 ⁻⁵	0,4	7	3x10 ⁻⁶	0,5
<i>Marbre</i>				2 274	9x10 ⁻⁶	0,8	445	4x10 ⁻⁵	0,6	441	3x10 ⁻⁶	1,1
<i>Migmatite</i>				161	1x10 ⁻⁵	0,8	52	5x10 ⁻⁵	0,5	52	2x10 ⁻⁶	0,8
PLATE-FORME DU SAINT-LAURENT				830	3x10⁻⁵	0,9	237	1x10⁻⁴	0,7	237	1x10⁻⁵	1,0
<i>Postdam (grès)</i>				23	8x10 ⁻⁶	0,8	7	3x10 ⁻⁵	0,6	7	8x10 ⁻⁶	0,6
<i>Beekmantown (grès, dolomie, calcaire)</i>				201	3x10 ⁻⁵	0,9	58	9x10 ⁻⁵	0,7	58	1x10 ⁻⁵	0,9
<i>Chazy (grès, shale, calcaire)</i>				219	2x10 ⁻⁵	0,7	35	6x10 ⁻⁵	0,5	35	5x10 ⁻⁶	0,9
<i>Black River (calcaire)</i>				276	5x10 ⁻⁵	0,9	111	1x10 ⁻⁴	0,8	111	1x10 ⁻⁵	1,0
<i>Trenton (calcaire)</i>				111	3x10 ⁻⁵	0,9	26	1x10 ⁻⁴	0,8	26	1x10 ⁻⁵	1,1
TOTAL	6	6x10⁻³	1,6	10 424	1x10⁻⁵	0,8	1 561	6x10⁻⁵	0,7	1 543	4x10⁻⁶	1,1

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

Tableau A24 : Propriétés hydrauliques du roc fracturé 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 ignées et métamorphiques	6	6x10⁻³	1,6	3 425	1x10⁻⁵	0,8	568	7x10⁻⁵	0,7	560	4x10⁻⁶	1,0
Dominance de granite	4	5x10 ⁻³	1,4	3 214	1x10 ⁻⁵	0,8	520	7x10 ⁻⁵	0,7	513	4x10 ⁻⁶	1,0
Dominance de gneiss ou quartzite	1	2x10 ⁻⁴	-	16	1x10 ⁻⁵	0,8	8	2x10 ⁻⁴	0,8	8	9x10 ⁻⁶	0,9
Dominance de marbre	1	5x10 ⁻¹	-	47	1x10 ⁻⁵	0,9	17	7x10 ⁻⁵	0,7	16	2x10 ⁻⁶	1,0
Dominance de shale				139	3x10 ⁻⁵	0,8	21	1x10 ⁻⁴	0,8	21	9x10 ⁻⁶	1,0
Ignées/métam. de lithologie inconnue				9	1x10 ⁻⁵	0,7	2	5x10 ⁻⁵	0,9	2	4x10 ⁻⁶	0,2
Roches sédimentaires				330	5x10⁻⁵	0,9	122	2x10⁻⁴	0,8	122	1x10⁻⁵	1,0
Dominance de grès				16	9x10 ⁻⁵	0,7	12	2x10 ⁻⁴	0,3	12	5x10 ⁻⁵	0,4
Dominance de calcaire				312	5x10 ⁻⁵	0,9	109	2x10 ⁻⁴	0,8	109	1x10 ⁻⁵	1,1
Sédimentaires de lithologie inconnue				2	8x10 ⁻⁵	0,5	1	2x10 ⁻⁴	-	1	1x10 ⁻⁴	-
Type inconnu				6 669	9x10⁻⁶	0,8	871	4x10⁻⁵	0,7	861	3x10⁻⁶	1,1
TOTAL	6	6x10⁻³	1,6	10 424	1x10⁻⁵	0,8	1 561	6x10⁻⁵	0,7	1 543	4x10⁻⁶	1,1

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

Annexe 10 : 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-OUT, le logiciel HELP[®] (*Hydrologic Evaluation of Landfill Potential*), version 3.07, (Schroeder *et coll.*, 1994) a servi à estimer la contribution des composantes du bilan hydrologique pour l'ensemble du territoire municipalisé de l'Outaouais. 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 A12). 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 généralement 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 2005 pour les zones forestières et les zones urbaines (SIEF du MRN), de 2012 et 2005 pour les zones agricoles (BDCG de la Financière Agricole du Québec et SIEF du MRN, respectivement) et de 2007 et 2005 pour les milieux humides (Canards illimités Canada et SIEF du MRN, respectivement).
- 5) Il n'y a pas d'écoulement latéral entre les cellules voisines : chaque cellule représente une colonne stratigraphique fermée pour laquelle un bilan hydrologique est calculé.
- 6) Les données météorologiques utilisées pour la modélisation sont des moyennes pour tout le territoire de l'Outaouais municipalisé même si des variations locales de température, précipitation et radiation solaire existent sur le territoire.
- 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

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 (Tableau A25).

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 correspondant (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 (Figure A13).

Aucune station de mesures de la radiation solaire n'est disponible dans la région. La radiation solaire a donc été estimée à l'aide du 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 A13).

Tableau A25 : Données météorologiques utilisées pour la modélisation du bilan hydrologique avec HELP[®]

Paramètres	Unités de mesure	Valeurs	Source des données
Vitesse annuelle moyenne du vent	Km/h	10,0	[1]
Humidité relative moyenne	1 ^{er} trimestre (janv-mars)	%	63,9
	2 ^e trimestre (avr-juin)	%	51,7
	3 ^e trimestre (juil-sept)	%	55,7
	4 ^e trimestre (oct-dec)	%	65,1
Saison de croissance des végétaux	Début	Jour julien	113
	Fin	Jour julien	310

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

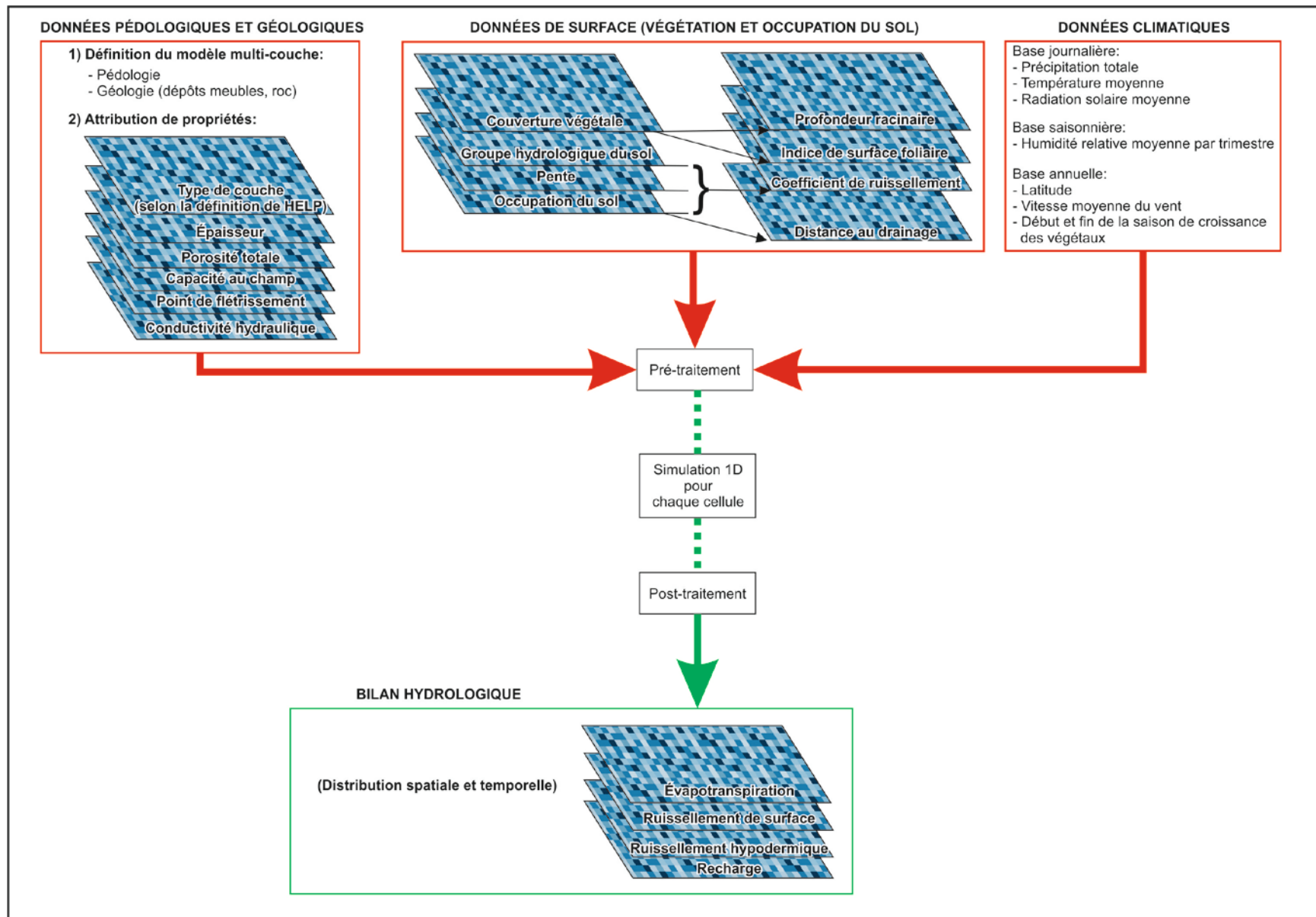


Figure A12 : Architecture du modèle HELP®

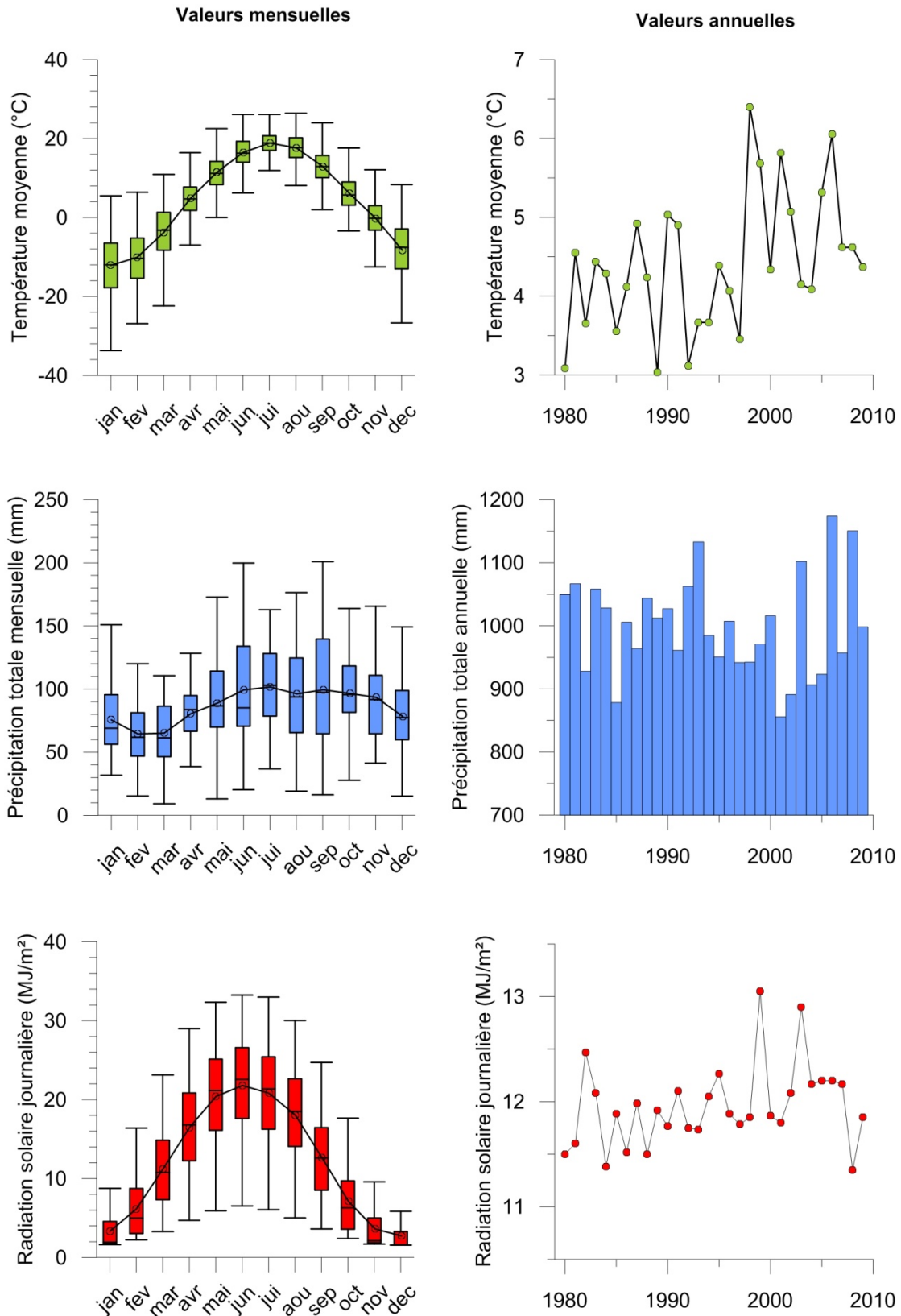


Figure A13 : Variations mensuelles et annuelles des températures, précipitations et radiations solaires utilisées pour la modélisation numérique du bilan hydrologique (années 1980-2009)

Pente du sol

Les pentes du sol ont été générées à partir du modèle numérique d'élévation fourni par le MDDEFP (Figure A14). 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.

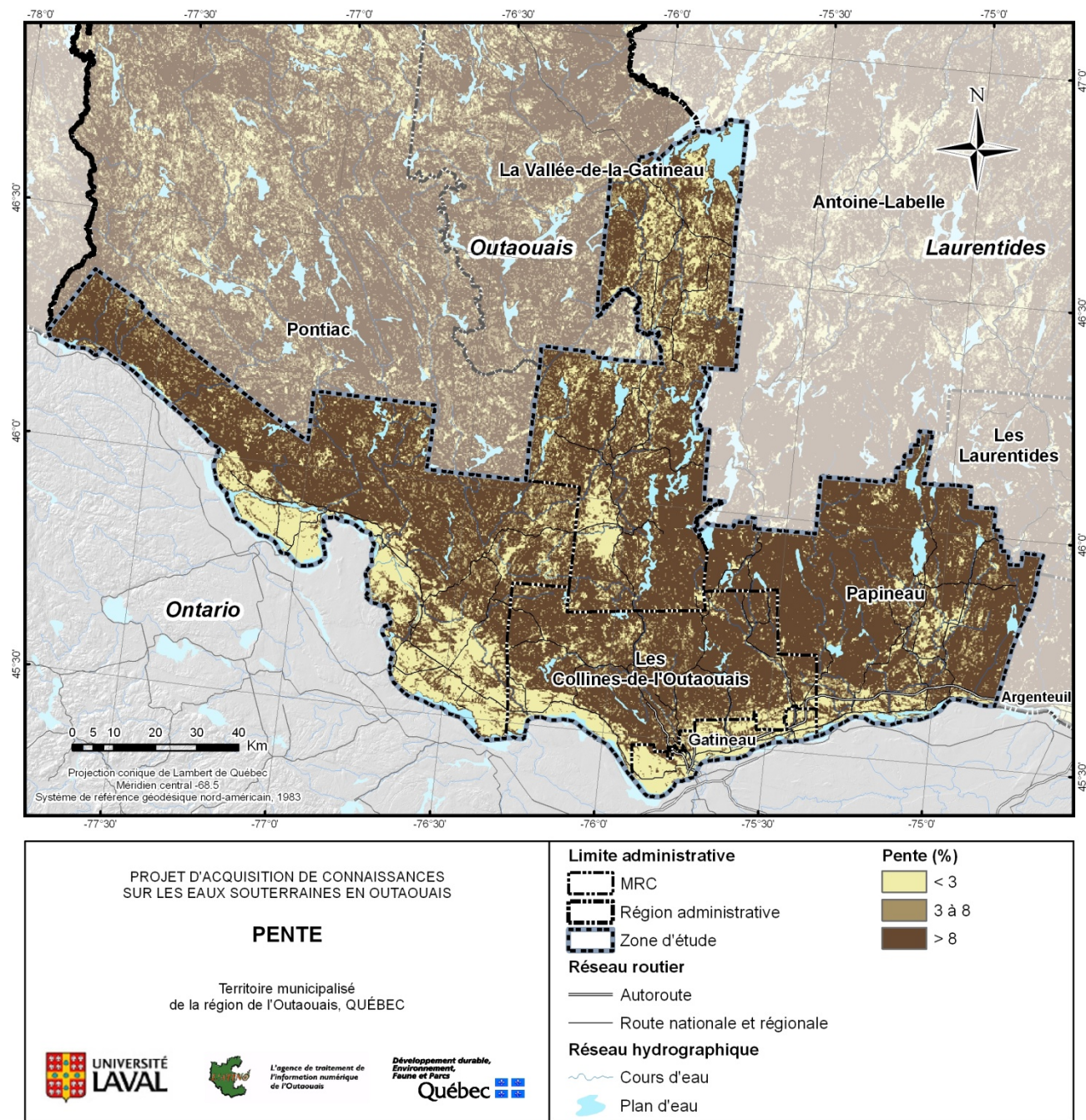


Figure A14 : Distribution spatiale des pentes

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. 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 : Pédologie 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). 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 A15.

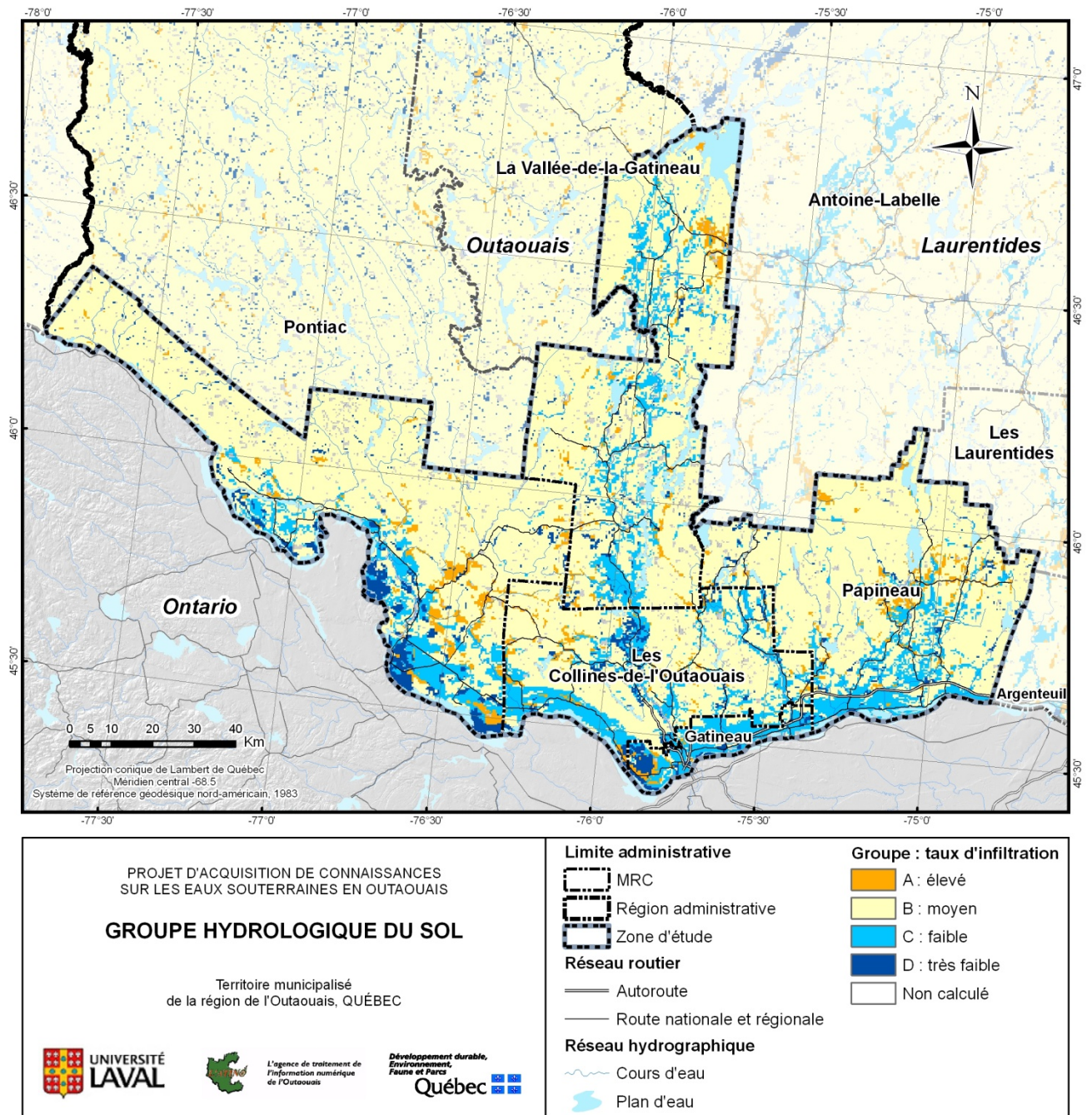


Figure A15 : Distribution spatiale des groupes hydrologiques du sol

Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement, aussi appelé numéro de courbe (*runoff curve number*) sert à évaluer la portion d'eau ruisselée en surface lors des précipitations. Il s'agit d'un coefficient empirique qui ne correspond pas directement au pourcentage d'eau qui ruisselle. 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 coefficient de ruissellement est estimé en fonction de l'occupation du sol, de la pente et du groupe hydrologique du sol. Le Tableau A26 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 A16.

Tableau A26 : 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 selon le groupe hydrologique du sol				[Source des données] (catégorie correspondante dans le tableau de la source)
		A	B	C	D	
Milieu urbanisé : Commercial ou institutionnel (surface imperméable = 85 %)	[0 – 3[	89	92	94	95	[1], [4]
	[3 – 8]	92	94	95	96	[*]
	[8 - ∞ [	94	95	96	98	[*]
Milieu urbanisé : Industriel (surface imperméable = 72 %)	[0 – 3[	81	88	91	93	[1], [4]
	[3 – 8]	88	91	93	94	[*]
	[8 - ∞ [	91	93	94	96	[*]
Milieu urbanisé : Résidentiel, Dimension lot =]0 - 0.05] ha (surface imperméable = 65 %)	[0 – 3[	77	81	85	92	[1], [4]
	[3 – 8]	81	85	92	94	[*]
	[8 - ∞ [	85	92	94	95	[*]
Milieu urbanisé : Résidentiel, Dimension lot =]0.1 – 0.13] ha (surface imperméable = 38 %)	[0 – 3[	61	75	83	87	[1], [4]
	[3 – 8]	75	83	87	90	[*]
	[8 - ∞ [	83	87	90	93	[*]
Milieu urbanisé : Résidentiel, Dimension lot =]0.13 – 0.2] ha (surface imperméable = 30 %)	[0 – 3[	57	72	81	86	[1], [4]
	[3 – 8]	72	81	86	88	[*]
	[8 - ∞ [	81	86	88	91	[*]
Milieu urbanisé : Résidentiel, Dimension lot =]0.2 – 0.4] ha (surface imperméable = 25 %)	[0 – 3[	54	70	80	88	[1], [4]
	[3 – 8]	70	80	88	87	[*]
	[8 - ∞ [	80	88	87	89	[*]
Milieu urbanisé : Résidentiel, Dimension lot =]0.4 – ∞] ha (surface imperméable = 20 %)	[0 – 3[	51	68	79	84	[1], [4]
	[3 – 8]	68	79	84	86	[*]
	[8 - ∞ [	79	84	86	87	[*]
Parc et boisé urbains	[0 – 3[	39	61	74	80	[1], [4]
	[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, Perturbation forestière, Sol dénudé 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 Milieu humide	[0 – 3[	5	5	5	5	[3]
Route	[0 – ∞ [	98	98	98	98	[4]

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

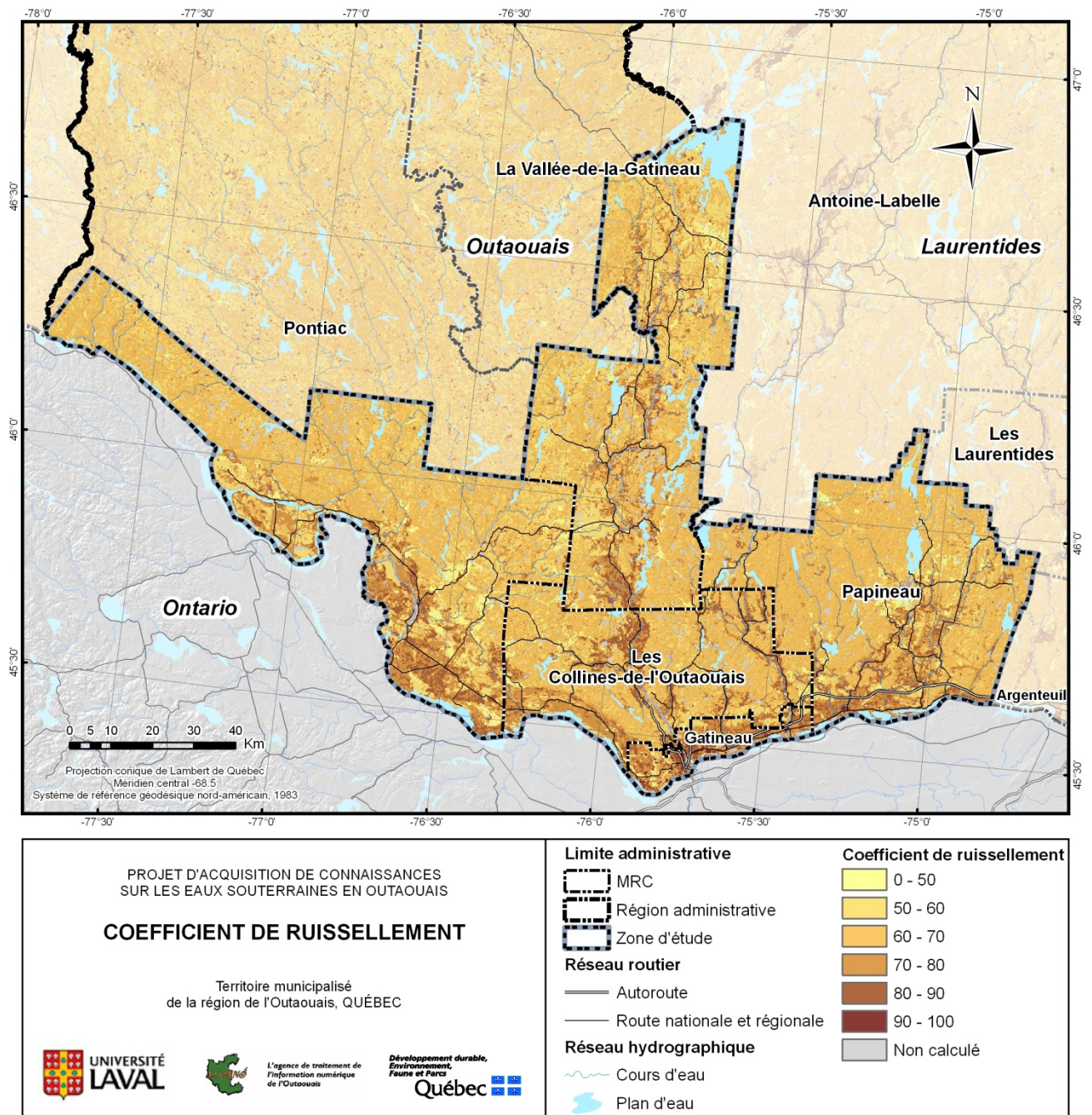


Figure A16 : Distribution spatiale des coefficients de ruissellement

Distance au drainage

La distance au drainage est déterminée à partir de classes simplifiées de l'occupation du sol (Tableau A27). Elle correspond à la distance latérale typique avant que l'eau soit interceptée par un réseau de drainage (fossé, égout pluvial, cours d'eau intermittent ou permanent). 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 A17.

Tableau A27 : 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, Perturbation forestière, Sol dénudé et Autre	15	[*]
Agricole	10	[1]
Parc et boisé urbain	10	[*]
Milieu urbanisé (Commercial, institutionnel, industriel et résidentiel)	5	[1]
Hydrographie et Milieux humides	0	[*]
Route	5	[*]

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

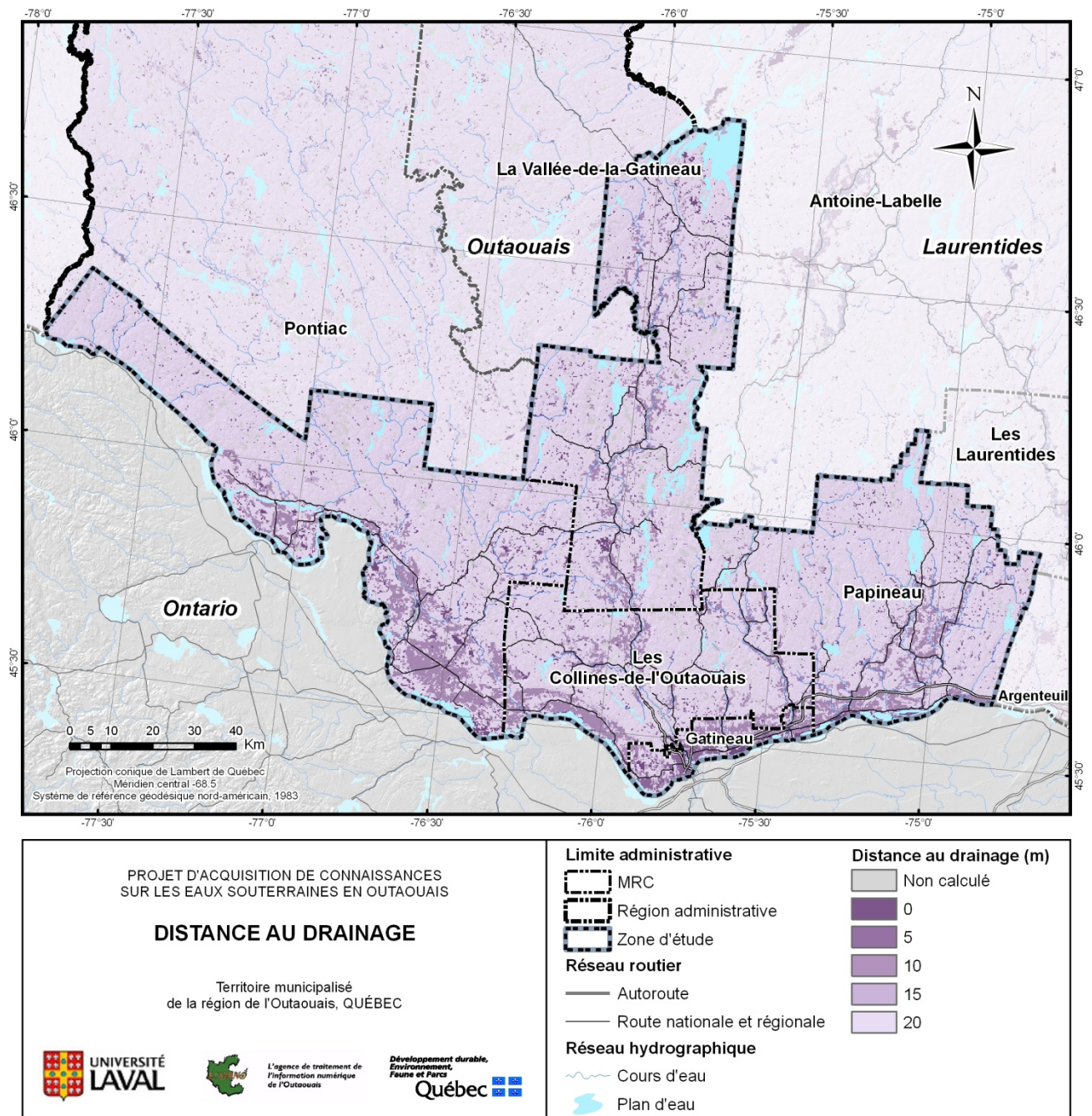


Figure A17 : Distribution spatiale des distances au drainage

Indice de profondeur d'évaporation

Le modèle utilisé dans le cadre du projet PACES-OUT pour modéliser la recharge nécessite des variables qui peuvent être déduites à partir de la couverture végétale. Ces intrants sont l'indice de profondeur d'évaporation (profondeur racinaire maximale) et l'indice de surface foliaire.

La profondeur d'évaporation est déterminée à partir des profondeurs potentielles maximales des racines des différents types de couverture végétale. Une revue de littérature a permis d'attribuer des valeurs moyennes de profondeurs maximales de racines en fonction du type de couvert (Tableau A28). Peu de documentation et d'études relatives aux végétaux du Québec établissant une profondeur racinaire sont disponibles. Les valeurs de profondeurs racinaires attribuées aux différents couverts oscillent entre 0,2 m pour les zones urbaines et les zones de perturbation forestière jusqu'à 3,5 m pour les forêts de résineux matures à forte densité.

Les valeurs de profondeurs racinaires selon le type de couvert et l'âge des peuplements forestiers ont été attribuées de façon arbitraire à l'intérieur même des intervalles trouvés dans la littérature, le tout dans une perspective de généralisation régionale.

Couvert forestier

L'article de Canadell *et coll.* (1996), portant sur la profondeur maximale d'enracinement des types de végétation à l'échelle mondiale, indique que la profondeur maximale des racines des arbres de forêts feuillues en région tempérée pour l'ensemble du globe varie de $2,9 \pm 0,2$ m tandis que pour les forêts tempérées de résineux, elle oscille entre $3,9 \pm 0,4$ m.

Les profondeurs racinaires attribuées au couvert forestier du PACES-OUT ont été établies en tenant compte de la base de données de SWAT¹ (Arnold *et coll.*, 2011) et selon l'hypothèse qu'une forêt jeune possède des racines moins profondes qu'une forêt mature (Canadell *et coll.*, 1996). Le couvert forestier constitué de résineux, mature et dense présente donc la plus grande profondeur de racines, soit de 3,5 m (Canadell *et coll.*, 1996). À l'inverse, une forêt de feuillus jeune et peu dense présente une profondeur racinaire moindre de 3,0 m.

Les arbustes et plantations, considérés comme très jeunes ou faiblement développés au niveau du système racinaire, présentent une profondeur racinaire moyenne de 2,0 m. Enfin, les perturbations forestières présentent un indice de 0,3 m de profondeur racinaire.

¹ SWAT est un modèle public développé conjointement par le ministère de l'Agriculture des États-Unis et le Texas A&M AgriLife Research pour modéliser la qualité et la quantité des eaux de surface et souterraine suite aux impacts environnementaux résultant de l'aménagement du territoire, des pratiques d'aménagement et des changements climatiques.

Agriculture

La grande culture majoritaire sur le territoire à l'étude est le foin (53%). Selon Arnold *et coll.* (2011), la profondeur racinaire du foin correspond à 2,0 m. Cette valeur est considérée comme représentative de tous les types de grandes cultures. Une valeur s'approchant de 1 m de profondeur racinaire est attribuée à la catégorie "Autres cultures". Pour l'agriculture maraîchère, la profondeur racinaire retenue correspond à la culture de la pomme de terre (culture dominante dans la zone d'étude (MAPAQ, 2007, communication personnelle), soit une profondeur racinaire de 0,5 m.

Autres couverts

Les sols dénudés, les zones urbaines et les autres types de couvert présentent de faibles profondeurs de racines, établies à 0,2 m afin de limiter l'évapotranspiration de ces utilisations de sol (Croteau, 2006). Les milieux humides possèdent une profondeur racinaire moyenne établie à 2,1 m (Arnold *et coll.*, 2011).

Synthèse

Le Tableau A28 présente la synthèse des décisions quant à l'attribution de profondeur potentielle maximale des racines en fonction de la couverture végétale présente sur le territoire à l'étude. La Figure A18 illustre les profondeurs racinaires maximales sur le territoire du PACES-OUT.

Tableau A28 : Synthèse de la profondeur maximale des racines en fonction du type de couverture végétale

Type de couvert	Profondeur potentielle maximale des racines (m)	Source des données
Grande culture	2,0	[1], [6], [7]
Culture maraîchère	0,5	[1], [9]
Autre culture	1,0	[1]
Friche	0,2	[2]
Feuillus, jeune, densité faible à moyenne	3,0	[3], [5], [7]
Feuillus, jeune, densité forte à très forte	3,0	[3], [5], [7]
Feuillus, mature, densité faible à moyenne	3,3	[3], [5], [7]
Feuillus, mature, densité forte à très forte	3,3	[3], [5], [7]
Mélangés, jeune, densité faible à moyenne	3,1	[3], [5], [7]
Mélangés, jeune, densité forte à très forte	3,1	[3], [5], [7]
Mélangés, mature, densité faible à moyenne	3,4	[3], [5], [7]
Mélangés, mature, densité forte à très forte	3,4	[3], [5], [7]
Résineux, jeune, densité faible à moyenne	3,2	[3], [5], [7]
Résineux, jeune, densité forte à très forte	3,2	[3], [5], [7]
Résineux, mature, densité faible à moyenne	3,5	[3], [5], [7]
Résineux, mature, densité forte à très forte	3,5	[3], [5], [7]
Arbuste	2,0	[10], [11]
Plantation	2,0	[8].
Perturbation forestière	0,3	[2], [3], [8]
Milieu humide	2,1	[7]
Sol dénudé	0,2	[2], [8]
Anthropique dense	0,2	[2]
Anthropique peu dense	0,2	[2]
Autre	0,2	[2]
Eau	0	[1]

Sources :

[1] Beaudin *et coll.*, 2011.

[2] Croteau, 2006.

[3] Canadell *et coll.*, 1996.

[4] Conseil des productions végétales du Québec, 1993.

[5]. Finch *et coll.*, 1998.

[6] MAPAQ, 2007.

[7] Arnold *et coll.*, 2011.

[8] Gilman, 2003.

[9] Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Ontario, 2003.

[10] Schenk et Jackson, 2002.

[11] Dubé *et coll.*, 1985.

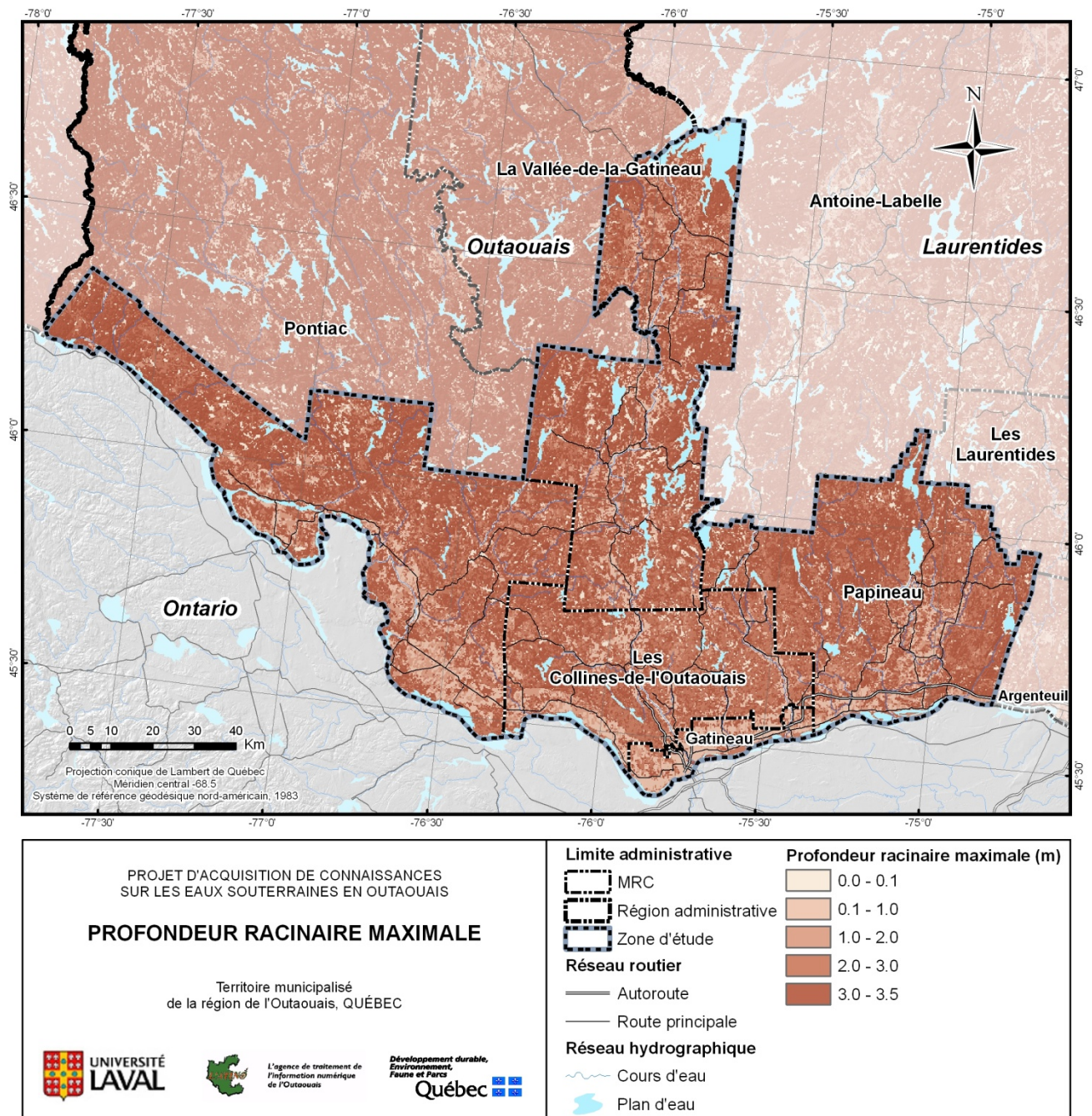


Figure A18 : Distribution spatiale de la profondeur racinaire maximale

Indice de surface foliaire

L'indice de surface foliaire (ISF) est le rapport entre la surface foliaire totale des plantes et la surface du sol couverte par leur feuillage. Ainsi, plus la surface foliaire est importante, plus l'eau des précipitations est interceptée et peut être évaporée avant même d'atteindre le sol. L'interception de l'eau dépend de la nature, du type et de la densité du couvert végétal, ainsi que des caractéristiques de la précipitation.

Les différents ISF des types de couvert sur le territoire d'étude ont été déterminés suite à une revue de la littérature et sont principalement basés sur les travaux de Arnold *et coll.* (2011). Les valeurs d'ISF retenues oscillent entre 0 et 5; 0 pour un sol sans végétation tel que les milieux urbanisés et 5 pour un couvert forestier dense.

Un couvert forestier mature et dense correspond un ISF de 5, tandis qu'un couvert jeune peu dense est associé à un ISF de 3 (Croteau, 2006). Les couverts végétaux considérés comme perturbation forestière ou très jeune (arbuste) correspondent respectivement à des ISF de 1 et de 2 (Schroeder *et coll.*, 1994). Comme mentionnée précédemment, la grande culture majoritaire sur le territoire à l'étude est le foin, à 53%. La valeur d'ISF correspondante est de 4 (Arnold *et coll.*, 2011). Cette valeur est représentative de tous les types de grandes cultures présentes sur la zone d'étude (incluant le maïs, le soya, etc.). Les sols urbains, qu'ils soient denses ou peu denses, présentent un ISF de 0 et les sols nus correspondent à une valeur d'ISF de 1. Les milieux humides quant à eux présentent un ISF de 5 (Arnold *et coll.*, 2011).

Le Tableau A29 offre la synthèse des décisions quant à l'attribution des indices de surface foliaire en fonction de l'occupation du sol et de la couverture végétale présente sur le territoire à l'étude. La Figure A19 illustre l'indice de surface foliaire sur le territoire du PACES-OUT.

Tableau A29 : Synthèse de l'indice de surface foliaire, en fonction de l'occupation du sol et le couvert végétal

Occupation du sol et type de couvert végétal	Indice de surface foliaire (ISF)	Source des données
Grande culture	4	[1], [2]
Culture maraîchère	4	[1], [3]
Autre culture	4	[1], [3]
Friche	1	[3], [4].
Feuillus, jeune, densité faible à moyenne	3	[1], [3], [4]. [5].
Feuillus, jeune, densité forte à très forte	5	[1], [3], [4]. [5].
Feuillus, mature, densité faible à moyenne	4	[1], [3], [4]. [5].
Feuillus, mature, densité forte à très forte	5	[1], [3], [4]. [5].
Mélangés, jeune, densité faible à moyenne	3	[1], [3], [4]. [5].
Mélangés, jeune, densité forte à très forte	5	[1], [3], [4]. [5].
Mélangés, mature, densité faible à moyenne	4	[1], [3], [4]. [5].
Mélangés, mature, densité forte à très forte	5	[1], [3], [4]. [5].
Résineux, jeune, densité faible à moyenne	3	[1], [3], [4]. [5].
Résineux, jeune, densité forte à très forte	5	[1], [3], [4]. [5].
Résineux, mature, densité faible à moyenne	4	[1], [3], [4]. [5].
Résineux, mature, densité forte à très forte	5	[1], [3], [4]. [5].
Arbuste	2	[2], [3], [4].
Plantation	2	[2], [3], [4].
Perturbation forestière	1	[3], [4].
Milieu humide	5	[1], [3], [6].
Sol dénudé	1	[1], [3]
Anthropique dense	0	[3], [4].
Anthropique peu dense	0	[3], [4].
Autre	0	[3], [4].
Eau	0	[3], [4].

Sources :

- [1] Beaudin *et coll.*, 2011.
- [2] Finch *et coll.*, 1998.
- [3] Croteau, 2006.
- [4] Schroeder *et coll.*, 1994.
- [5] Bréda, 1999.
- [6] Gregory *et coll.*, 2003.

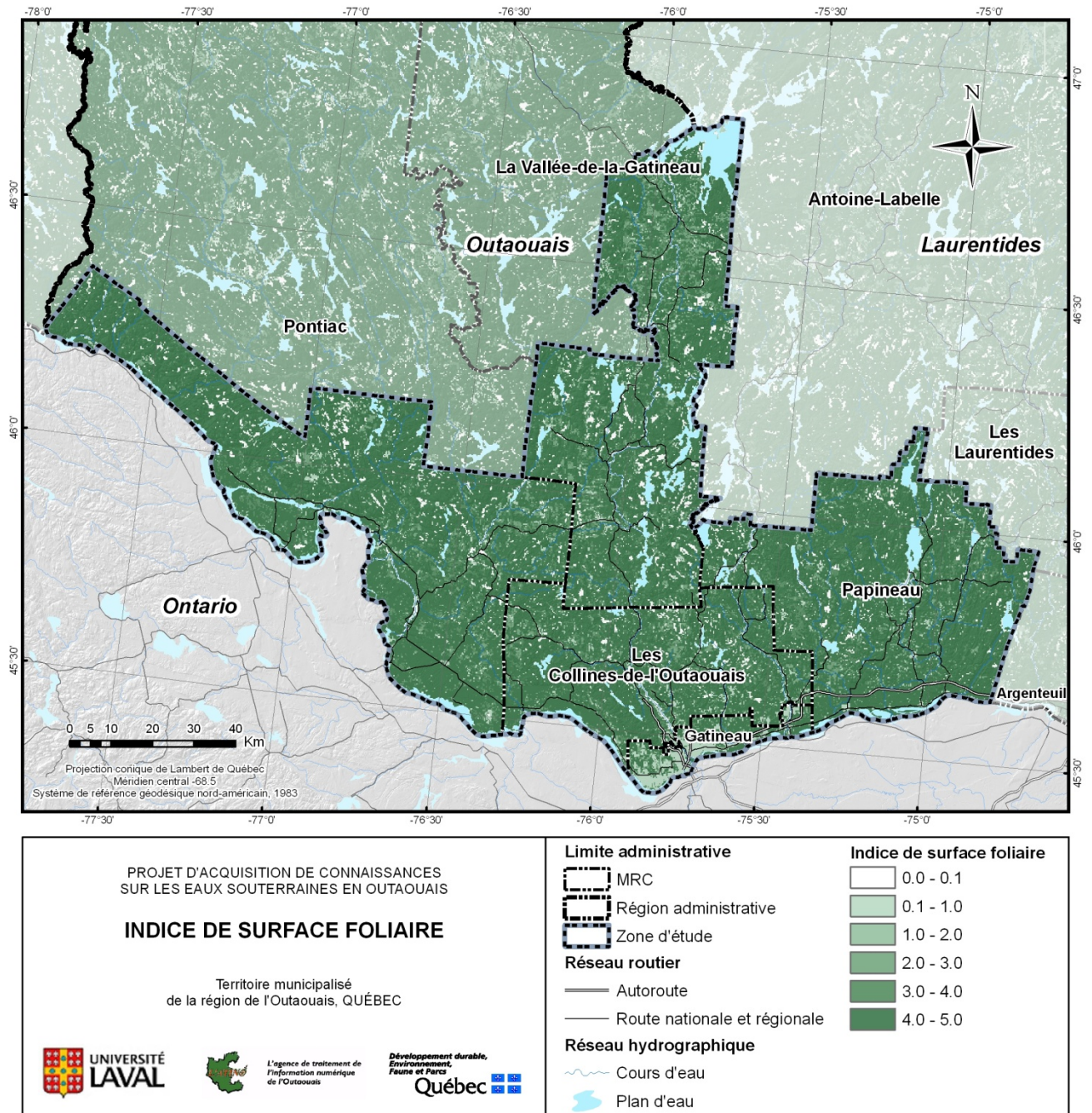


Figure A19 : Distribution spatiale des indices de surface foliaire

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 à nappe libre, la limite inférieure de la zone vadose correspond à la profondeur du niveau piézométrique (aussi appelé surface phréatique). 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 de HELP[®] doit assigner un type de couche pour chacune d'elle. Les types de couche sont définis selon les processus d'écoulement possibles dans chacune des couches :

- 1) Couche 1 : couche de percolation verticale (drainage vertical par gravité, évaporation, prélèvement d'eau par les végétaux),
- 2) Couche 2 : couche de drainage latéral (écoulement latéral, drainage vertical par gravité), et
- 3) Couche 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 1×10^{-5} m/s.

Les couches de type 3 (barrière) sont destinées à restreindre l'écoulement vertical. Elles doivent avoir une conductivité hydraulique saturée inférieure à 1×10^{-8} m/s. 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, soit sa capacité de rétention d'eau maximale.

Assignment de propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques dont nécessite HELP[®] sont la porosité totale, la capacité au champ, le point de flétrissement (humidité du sol à partir de laquelle la plante ne peut plus prélever d'eau) 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, un calage des valeurs est souvent nécessaire. Les propriétés hydrauliques calées et utilisées pour la modélisation de la recharge sont présentées au Tableau A30.

Tableau A30 : Propriétés hydrauliques calées et utilisées 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	Argile, silt	0,51	0,37	0,21	2x10 ⁻⁹
HF2	Silt sableux ou graveleux, alternances de silt et de sable	0,46	0,36	0,14	6x10 ⁻⁷
HF3	Sable ou gravier, silteux	0,47	0,25	0,10	8x10 ⁻⁵
HF4	Sable fin à moyen	0,42	0,17	0,05	3x10 ⁻⁴
HF5	Sable grossier, sable et gravier	0,44	0,19	0,12	3x10 ⁻⁴
HF6	Roche sédimentaire (Plateforme du Saint-Laurent)	0,09	0,07	0,05	1x10 ⁻⁵
HF7	Roche ignée ou métamorphique (Province de Grenville)	0,08	0,07	0,05	3x10 ⁻⁶

Résultats

HELP[®] a servi à modéliser les composantes du bilan hydrologique. Quatre (4) cartes montrent la distribution spatiale de ces composantes, soit l'évapotranspiration (Figure A20), le ruissellement de surface (Figure A21), le ruissellement hypodermique (Figure A22) et la recharge (Figure A23).

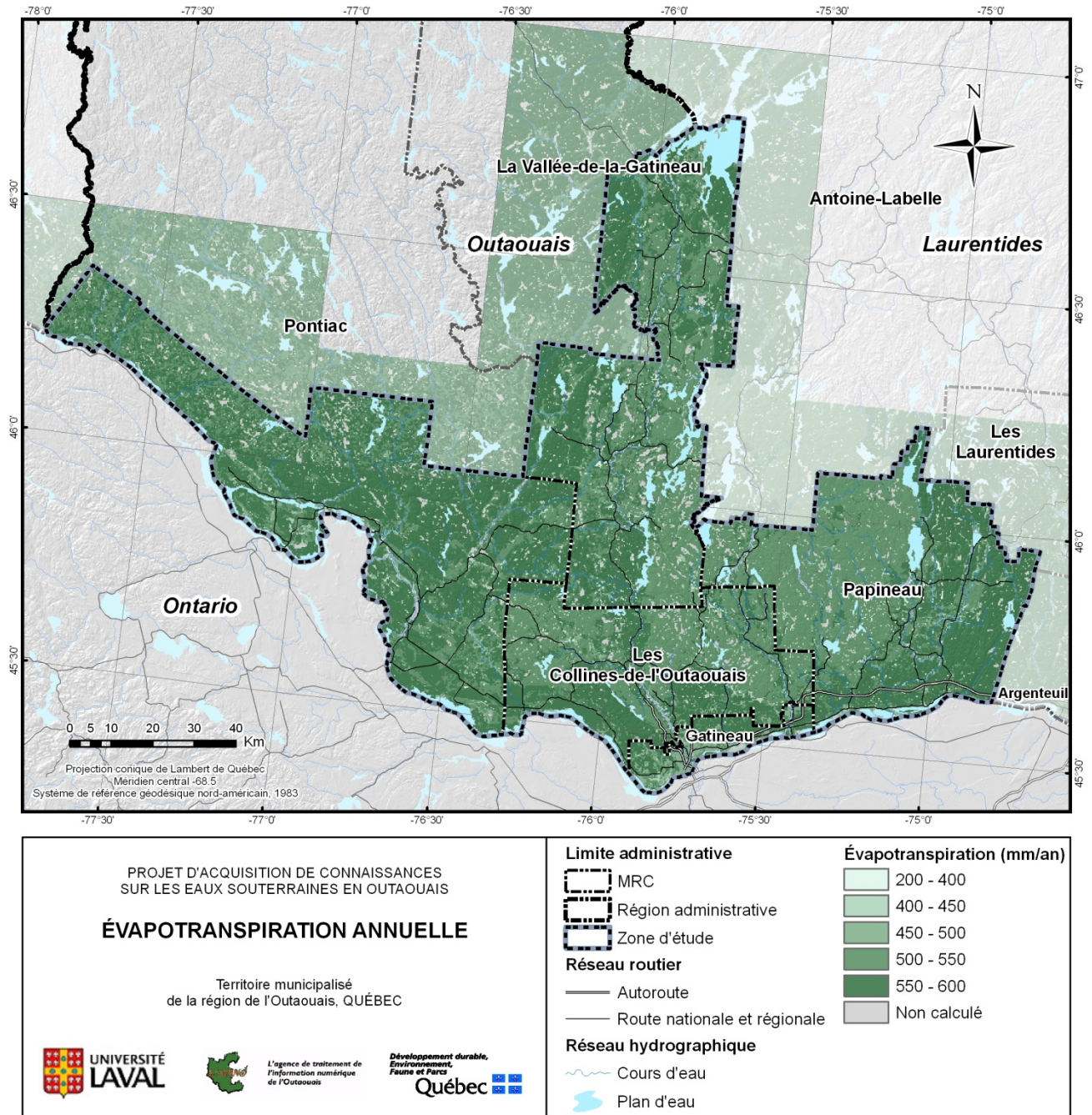


Figure A20 : Distribution spatiale de l'évapotranspiration

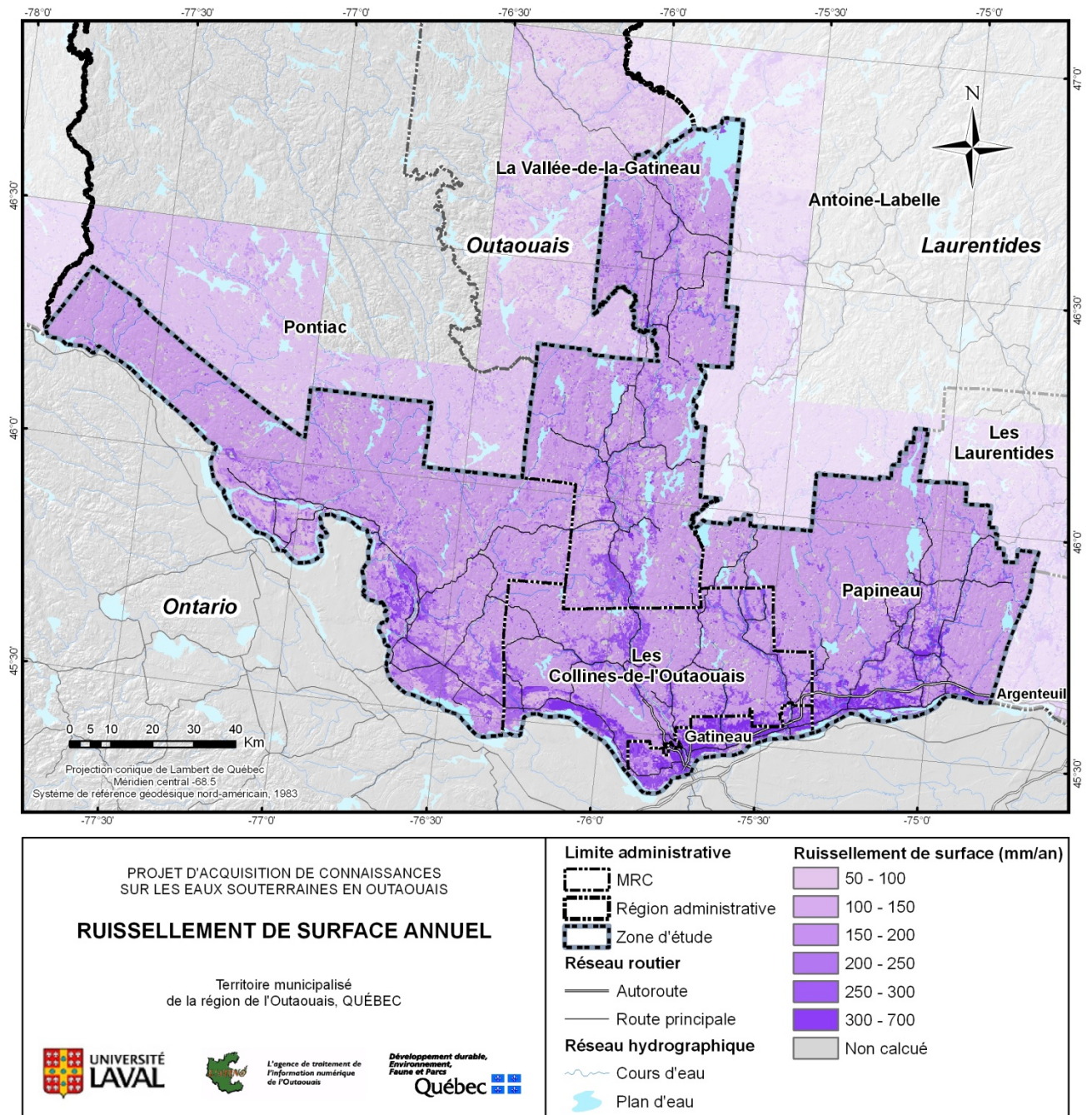


Figure A21 : Distribution spatiale du ruissellement de surface

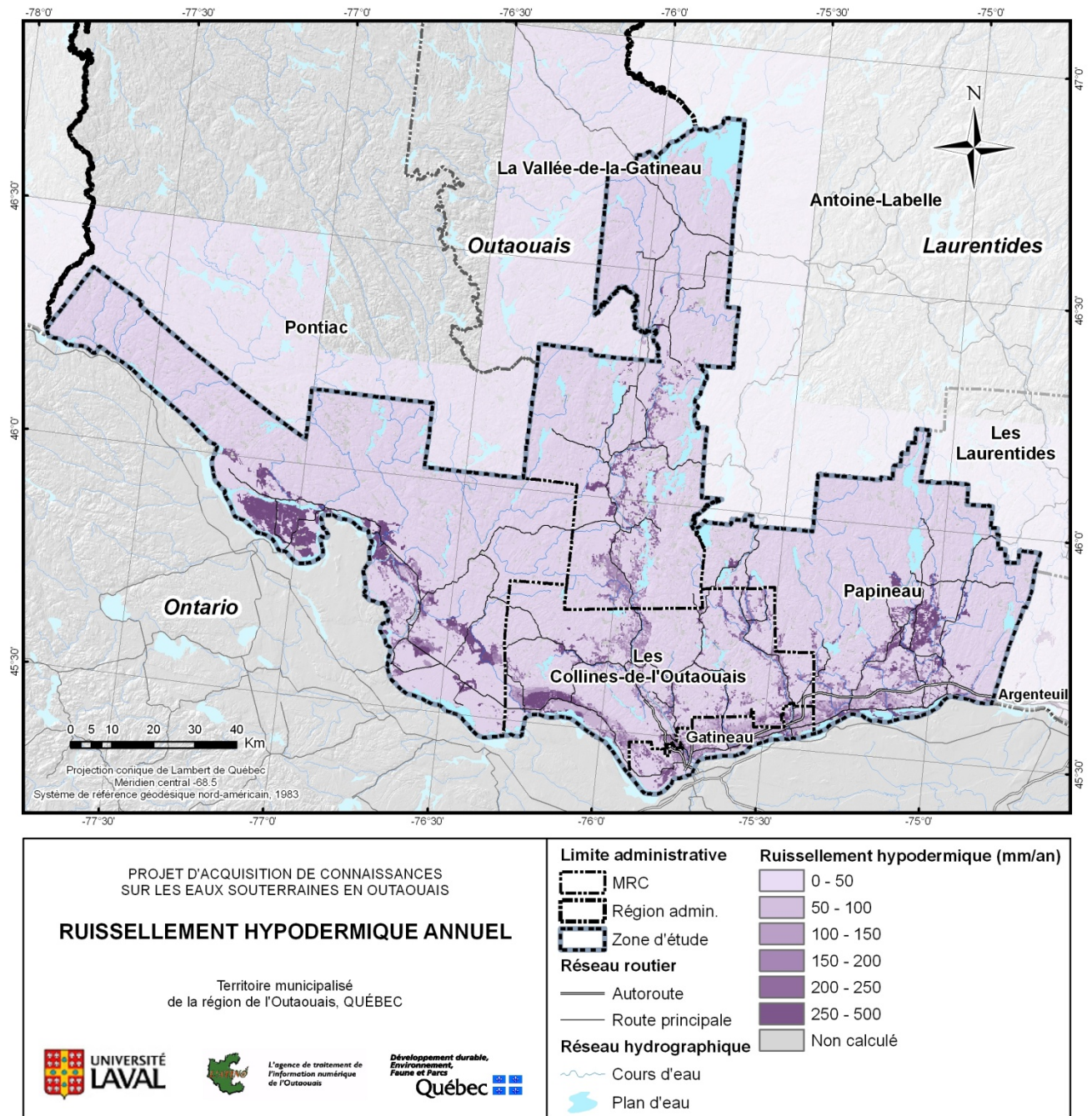


Figure A22 : Distribution spatiale du ruissellement hypodermique

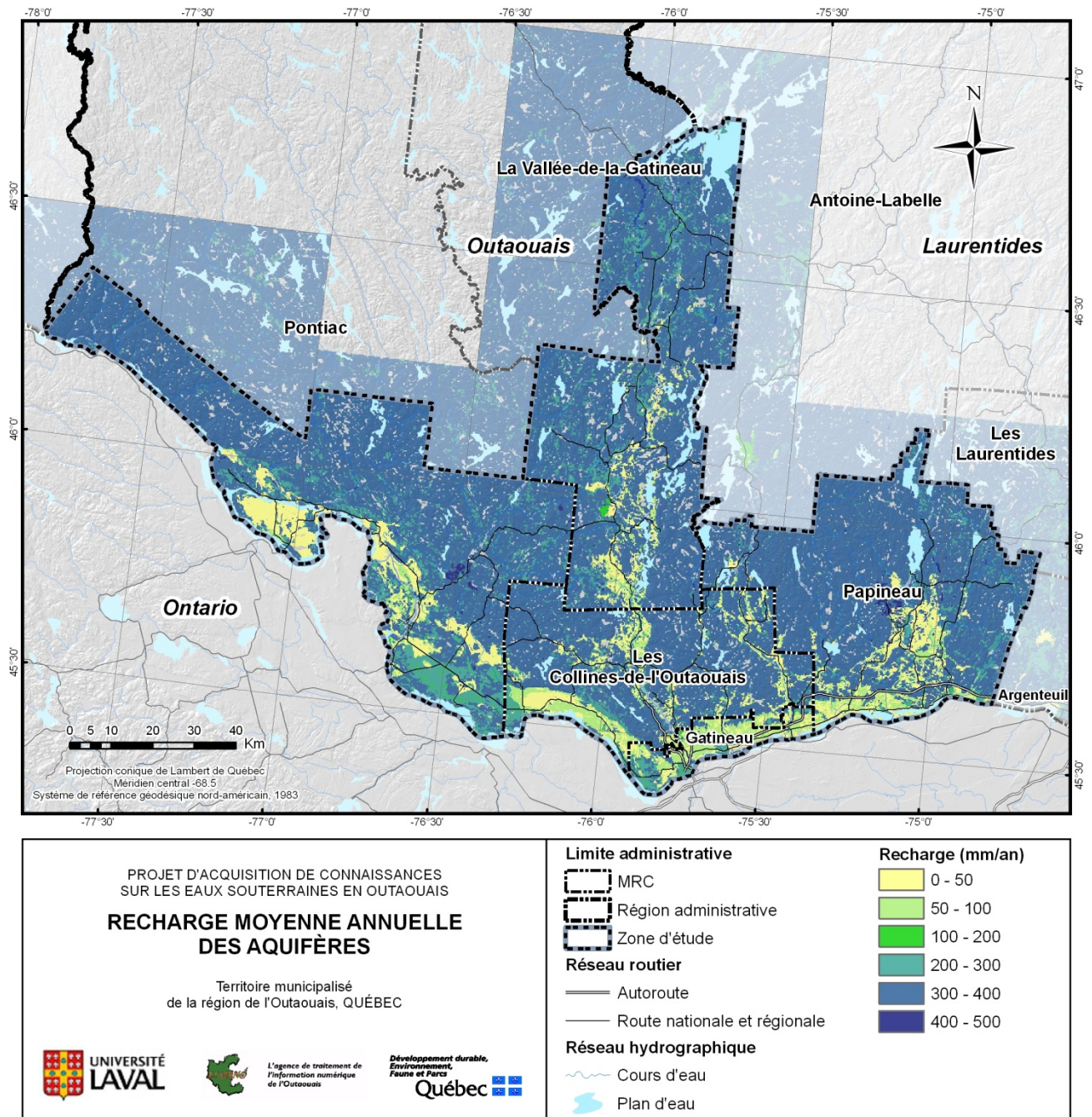


Figure A23 : Distribution spatiale de la recharge de l'aquifère superficiel

Annexe 11 : Méthode de calcul de la balance électronique

Définition de la balance électronique

L'eau et les ions qu'elle contient forment une solution aqueuse qui est électriquement neutre, ce qui se traduit de la façon suivante :

$$\sum cations = \sum anions$$

où la somme des concentrations en cations (ions à charge positive (ex. : calcium Ca^{2+})) est égale à la somme des anions (ions à charge négative (ex. : chlorure Cl^-)).

Le calcul de la balance électronique permet de vérifier la précision d'une analyse. Elle est calculée de la manière suivante :

$$Balance = \frac{\sum cations (meq/l) - \sum anions (meq/l)}{\sum cations (meq/l) + \sum anions (meq/l)} * 100$$

Les concentrations en ions, exprimées en mg/l dans les résultats d'analyses, doivent être converties en meq/l. En théorie, l'ensemble des éléments devrait être pris en compte.

Généralement, de manière pratique, seuls les ions majeurs sont pris en compte dans le calcul de la balance électronique. Ici, certains ions mineurs ont aussi été utilisés pour le calcul de la balance électronique. Les analyses présentant une balance électronique comprise entre +/-10% sont considérées de bonne qualité (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)). Une balance électronique supérieure à +/-10% peut signifier qu'un élément en forte concentration n'a pas été pris en compte dans le calcul de la balance électronique. Si ce n'est pas le cas, il est probable que l'analyse ne soit pas de très bonne qualité.

Utilisation d'un script pour le calcul de la balance électronique

Le calcul de la balance électronique est automatisé grâce à l'utilisation d'un script élaboré par l'Université Laval écrit en Python. Le script génère un fichier « résultat », à partir de trois fichiers d'entrée.

Fichiers d'entrée

Les trois fichiers d'entrée, en format « .csv », sont les suivants :

- 1) localisationPuits.csv : ce fichier est obtenu en enregistrant l'onglet « localisationPuits » de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT en « .csv »;
- 2) meql.csv : fichier contenant les facteurs de conversion pour transformer les concentrations exprimées en mg/l à des concentrations en meq/l pour les éléments pertinents (ions majeurs, quelques ions mineurs, dureté, alcalinité) ;

- 3) table_geochimie.csv obtenu en enregistrant l'onglet « table_geochimie » de la base de données hydrogéologiques PACES-OUT en « .csv ». Pour que le script fonctionne sans problème, les données ne doivent pas comporter de texte.

Organisation du script et fonctionnalités

- 1) Lecture des données contenues dans les fichiers d'entrée.
- 2) Conversion des concentrations inférieures ou supérieures à un seuil : les concentrations inférieures à la limite de détection sont remplacées par la moitié de la limite de détection. Pour les concentrations supérieures à un seuil, on retient la valeur du seuil.
- 3) Conversion des résultats d'analyses exprimés en mg/l en meq/l selon la formule suivante :

$$[meq/l] = \frac{[mg/l]}{M(ion)} * \text{nombre de charges de l'ion.}$$

- 4) À partir de la mesure de dureté, la concentration en calcium est calculée connaissant la concentration en magnésium et inversement. Pour cela, la dureté en mg/l de CaCO₃ est convertie en meq/l. La concentration disponible est aussi convertie en meq/l. La concentration inconnue est ensuite calculée en meq/l et mg/l. La formule simplifiée est la suivante :

$$\text{Dureté totale (mgCaCO}_3\text{/l)} = M(\text{CaCO}_3) * \left(\frac{\text{Ca (mg/l)}}{M(\text{Ca})} + \frac{\text{Mg (mg/l)}}{M(\text{Mg})} \right)$$

- 5) Connaissant le pH et l'alcalinité totale, les concentrations en CO₃²⁻ et HCO₃⁻ peuvent être calculées en utilisant les formules suivantes :

- a) Formule générale :

$$\text{Alcalinité totale (mgCaCO}_3\text{/l)} = \frac{\text{HCO}_3^-(\text{mg/l}) M(\text{CaCO}_3)}{M(\text{HCO}_3^-)} + \frac{\text{CO}_3^{2-}(\text{mg/l}) M(\text{CaCO}_3)}{M(\text{CO}_3^{2-})}$$

- b) Relation entre le pH et les concentrations en HCO₃⁻ et CO₃²⁻ :

$$K_{a2} = \frac{\text{CO}_3^{2-}(\text{mmol/l})}{\text{HCO}_3^-(\text{mmol/l}) * 10^{-\text{pH}}}$$

- c) Conversion de mmol/l à mg/l :

$$\text{CO}_3^{2-}(\text{mmol/l}) = \frac{\text{CO}_3^{2-}(\text{mg/l})}{M(\text{CO}_3^{2-})} \text{ et } \text{HCO}_3^-(\text{mmol/l}) = \frac{\text{HCO}_3^-(\text{mg/l})}{M(\text{HCO}_3^-)}$$

- d) En combinant les formules précédentes, on en conclut que :

$$HCO_3^-(mg/l) = \frac{\text{Alcalinité totale (mgCaCO}_3/l) * M(HCO_3^-)}{M_{CaCO_3} \left(\frac{1}{2} + \frac{10^{-pKa_2}}{10^{-pH}} \right)}$$

et

$$CO_3^{2-}(mg/l) = \frac{\text{Alcalinité totale (mgCaCO}_3/l) * M(CO_3^{2-})}{M_{CaCO_3} \left(\frac{10^{-pH}}{2 * 10^{-pKa_2}} + 1 \right)}$$

- e) En utilisant la formule générale, la concentration en l'une des espèces est facilement calculée connaissant l'alcalinité totale et la concentration de l'autre espèce, de même si on connaît seulement le pH et la concentration d'une des espèces.
- 6) Calcul des ratios pour les ions majeurs afin d'en déduire la source majeure des ions. Les ratios ne sont pas calculés lorsqu'il manque une des concentrations (excepté pour les carbonates). Ci-dessous, l'ensemble des ratios calculés :

$$\frac{CO_3^{2-} + HCO_3^-}{SO_4^{2-} + Cl^- + CO_3^{2-} + HCO_3^-}$$

$$\frac{Na^+ + K^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+}$$

$$\frac{Ca^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+}$$

$$\frac{Ca^{2+}}{Ca^{2+} + SO_4^{2-}}$$

$$\frac{Cl^-}{SO_4^{2-} + Cl^- + CO_3^{2-} + HCO_3^-}$$

$$\frac{K^+}{Na^+ + K^+}$$

$$\frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

$$\frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+}$$

$$\frac{Na^+}{Na^+ + Cl^-}$$

$$\frac{SO_4^{2-}}{SO_4^{2-} + Cl^- + CO_3^{2-} + HCO_3^-}$$

Pour l'interprétation des résultats, se référer à Hounslow (1995). Dans le cadre du projet PACES-OUT, ces ratios n'ont pas été utilisés, mais ils sont utiles pour des interprétations plus avancées.

- 7) Calcul de l'électroneutralité : ici, le calcul inclut les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) et quelques ions mineurs (CO_3^{2-} , F^- , NO_3^- , Fe^{2+} , Sr^{2+}). En absence des ions mineurs, le calcul de l'électroneutralité est effectué. Dès que la concentration en un ion majeur est manquante, l'électroneutralité n'est pas calculée et les ions manquants sont imprimés dans le fichier de résultats.

Fichier de résultats

Le fichier de résultats est composé de 13 colonnes et d'autant de lignes que d'éléments analysés (i.e. chaque ligne correspond à un élément analysé). Les 8 premières colonnes reprennent les données permettant d'identifier l'échantillon : coordonnées géographiques, identification de l'organisme, numéro de référence de l'échantillon, date de prélèvement, type d'échantillon, numéro d'échantillon et provenance. La 9^{ème} colonne correspond au nom de l'élément. Les dernières colonnes présentent respectivement la concentration lue dans le fichier d'entrée, les concentrations calculées en mg/l (inclut les ratios et l'électroneutralité (%)), la concentration en meq/l et le facteur de conversion de mg/l à meq/l.

Annexe 12 : Cotes et distribution spatiale des paramètres DRASTIC

Tableau A31 : Cotes attribuées à chacun des paramètres DRASTIC

Cote	Profondeur de l'aquifère (m)	Recharge (mm/an)	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 17)	Hydrofaciès HF7
2	22,8-30,5			Matériau organique		Hydrofaciès HF1	Hydrofaciès HF6
3	15,2-22,8	50-102	Hydrofaciès HF7	Loam argileux	12-18	Hydrofaciès HF2	
4				Loam silteux		Hydrofaciès HF7	Hydrofaciès HF4, HF5
5	9,1-15,2			Loam	6-12	Hydrofaciès HF3, HF6	
6		102-178	Hydrofaciès HF6	Loam sableux		Hydrofaciès HF4	
7	4,6-9,1		Hydrofaciès HF4	Argile fissurée ou agglomérée		Hydrofaciès HF5	
8		178-254		Matériau organique (tourbe)			
9	1,5-4,6		Hydrofaciès HF5	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 : Protocole pour la préparation du Livrable 22 – Vulnérabilité de l'aquifère de roc régional.

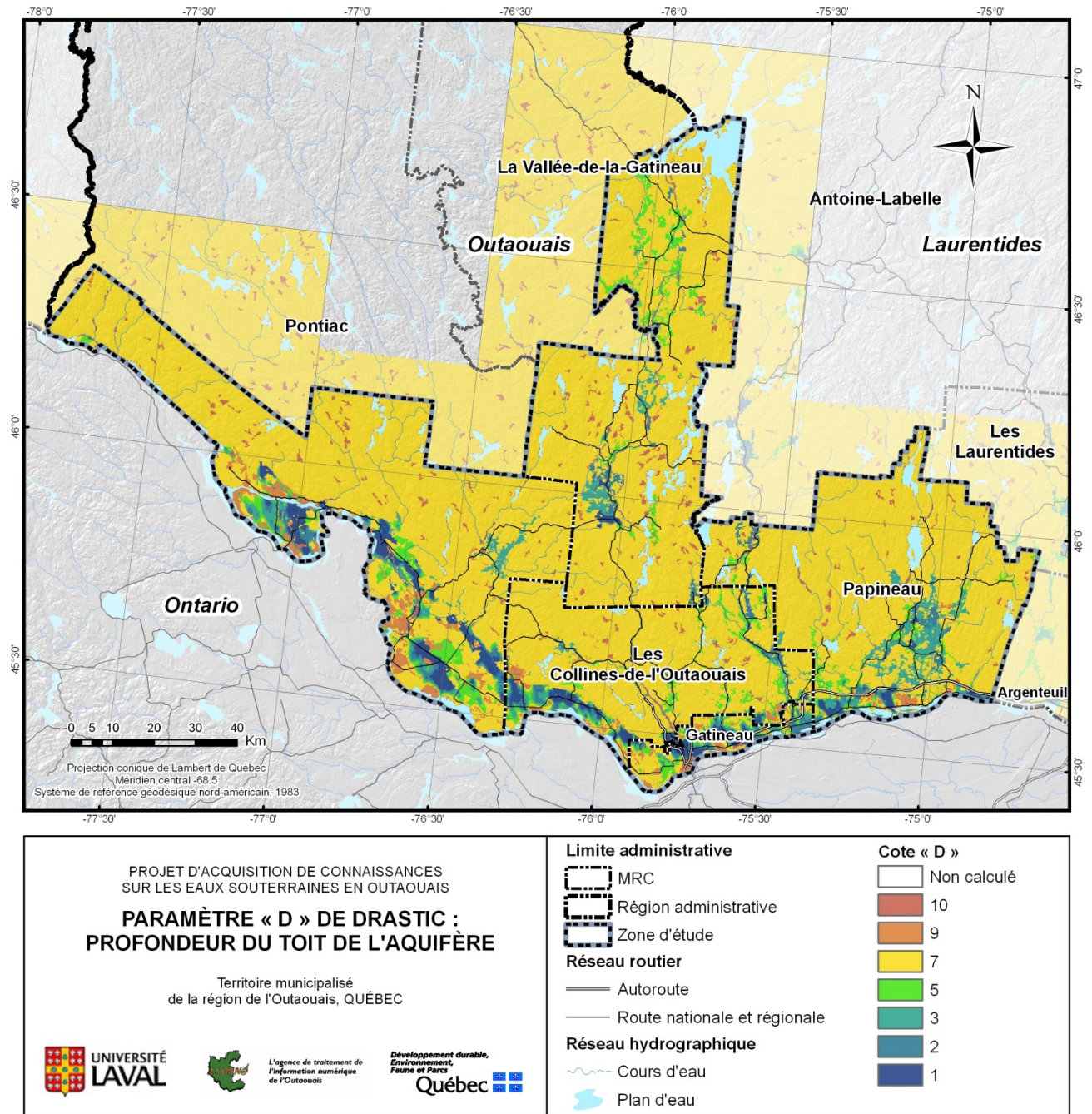


Figure A24 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « D » associé à la profondeur de l'aquifère

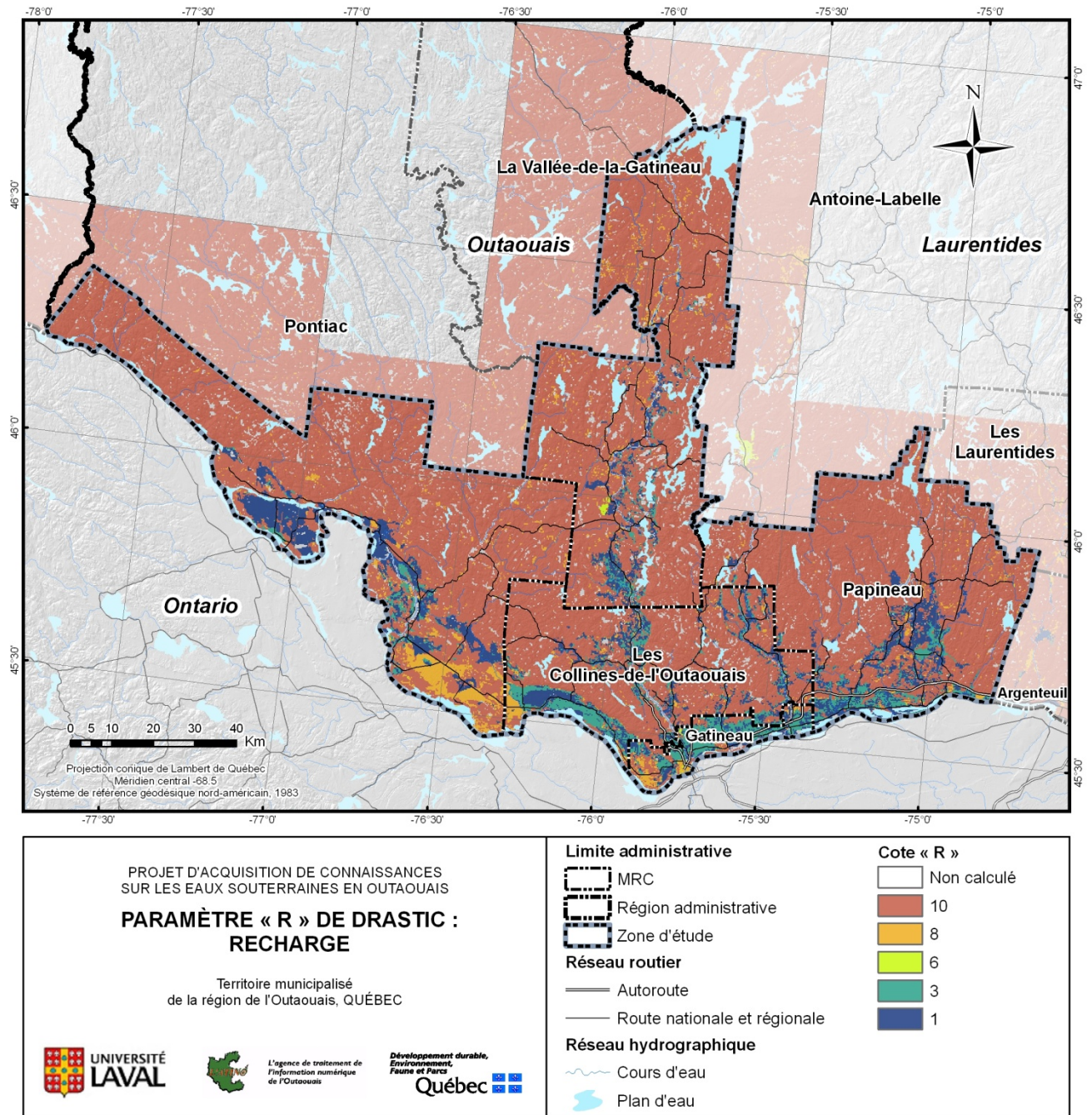


Figure A25 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « R » associé à la recharge de l'aquifère

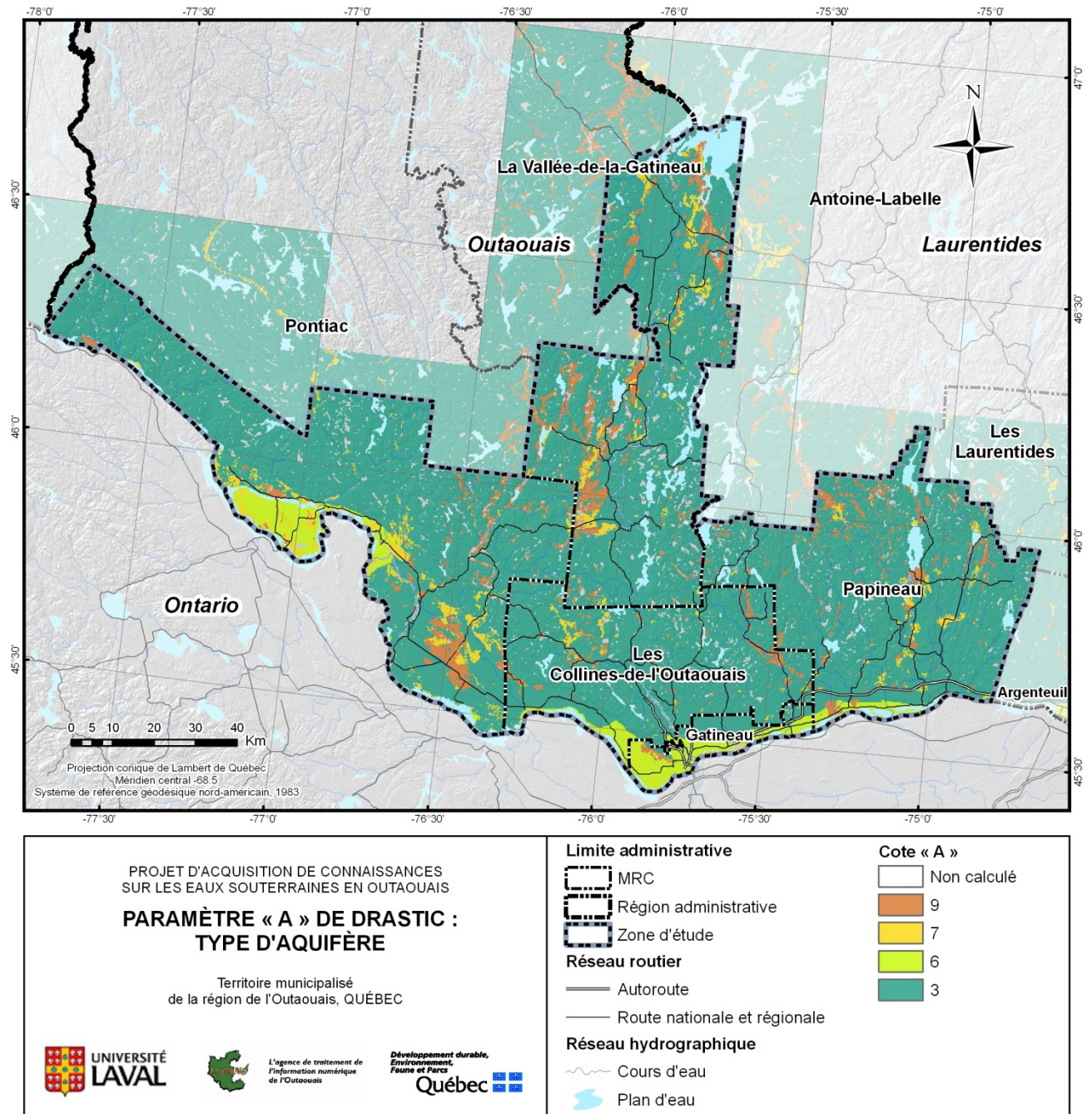


Figure A26 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « A » associé au milieu aquifère

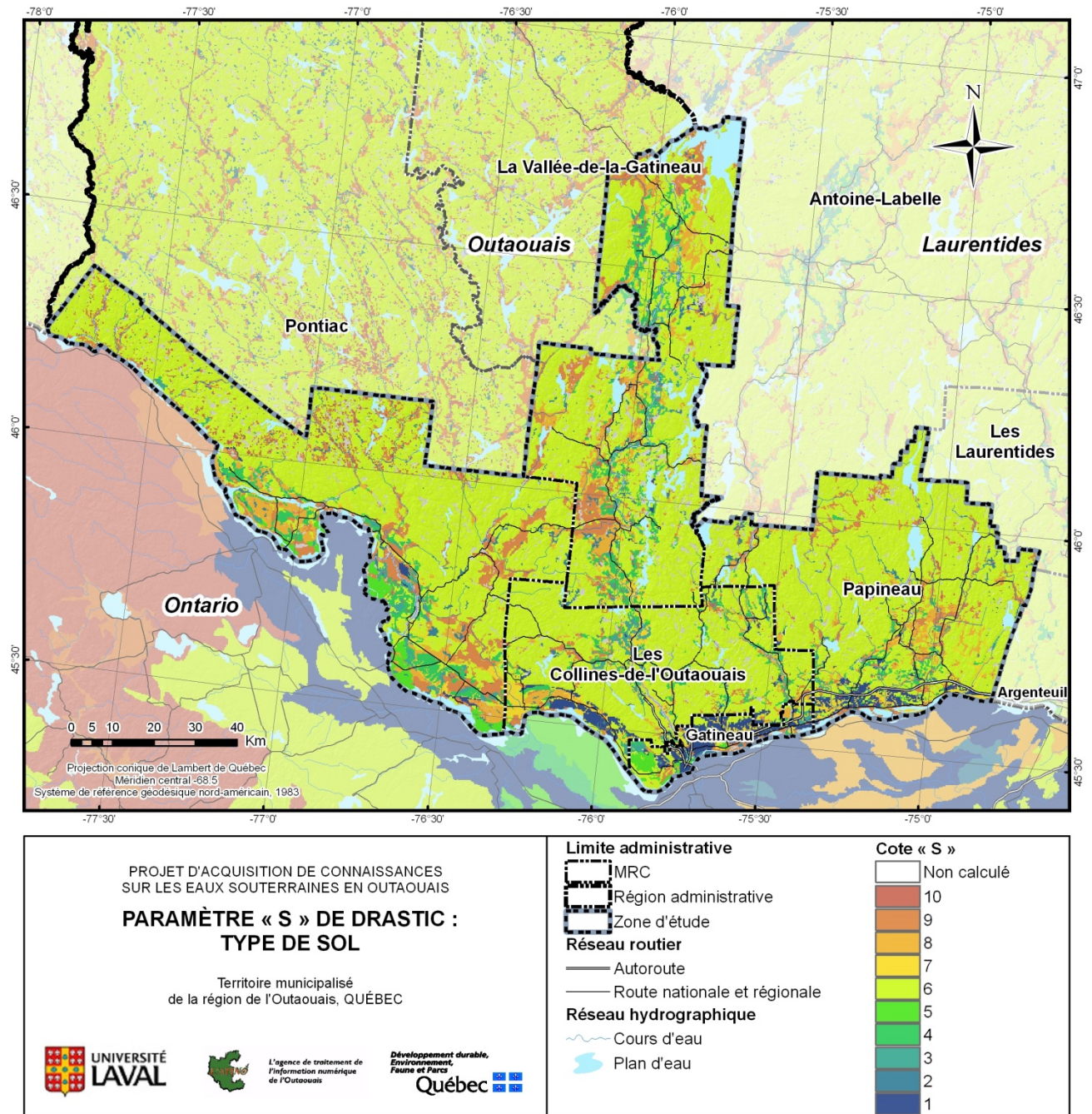


Figure A27 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « S » associé au type de sol

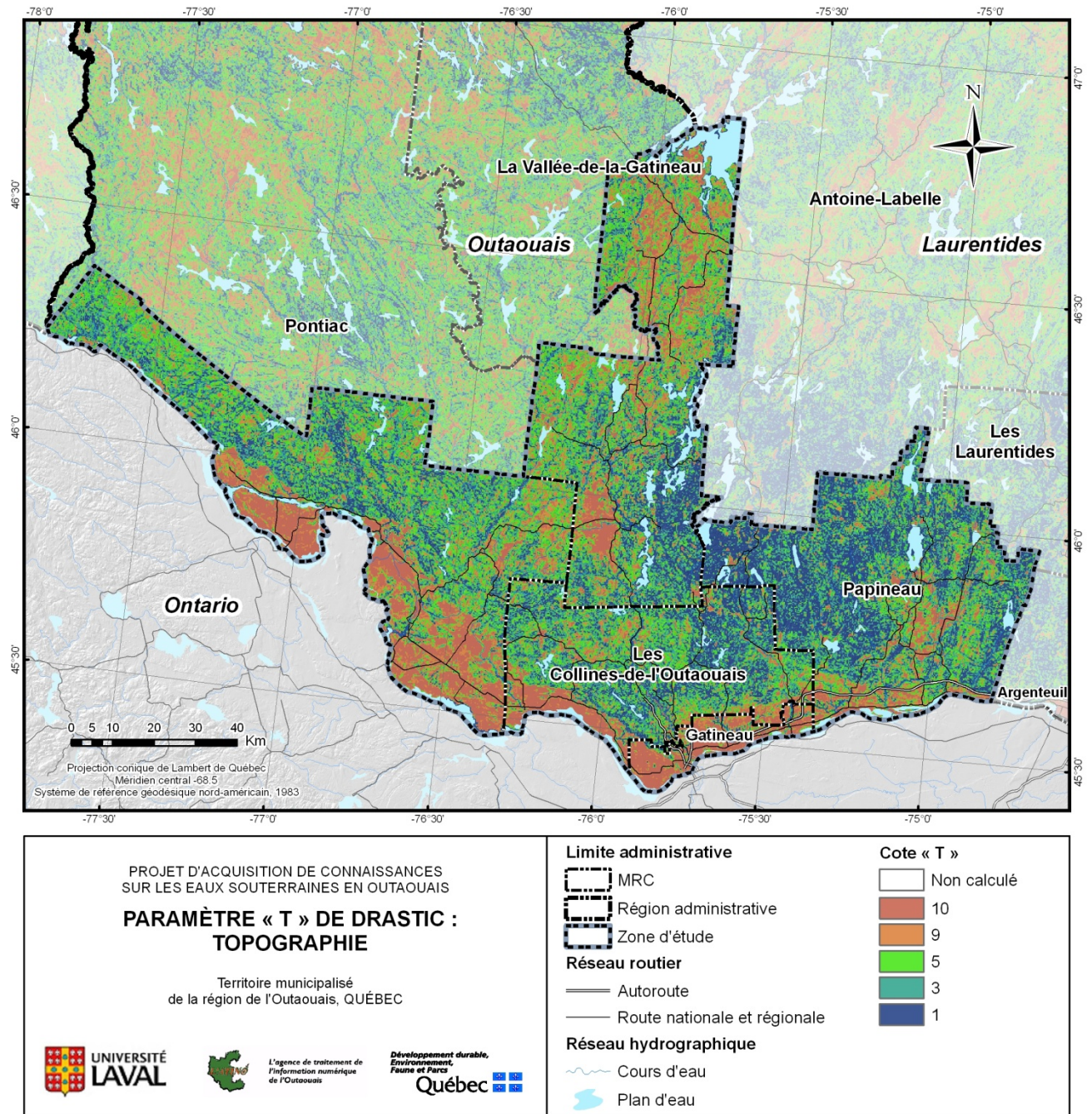


Figure A28 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « T » associé à la pente

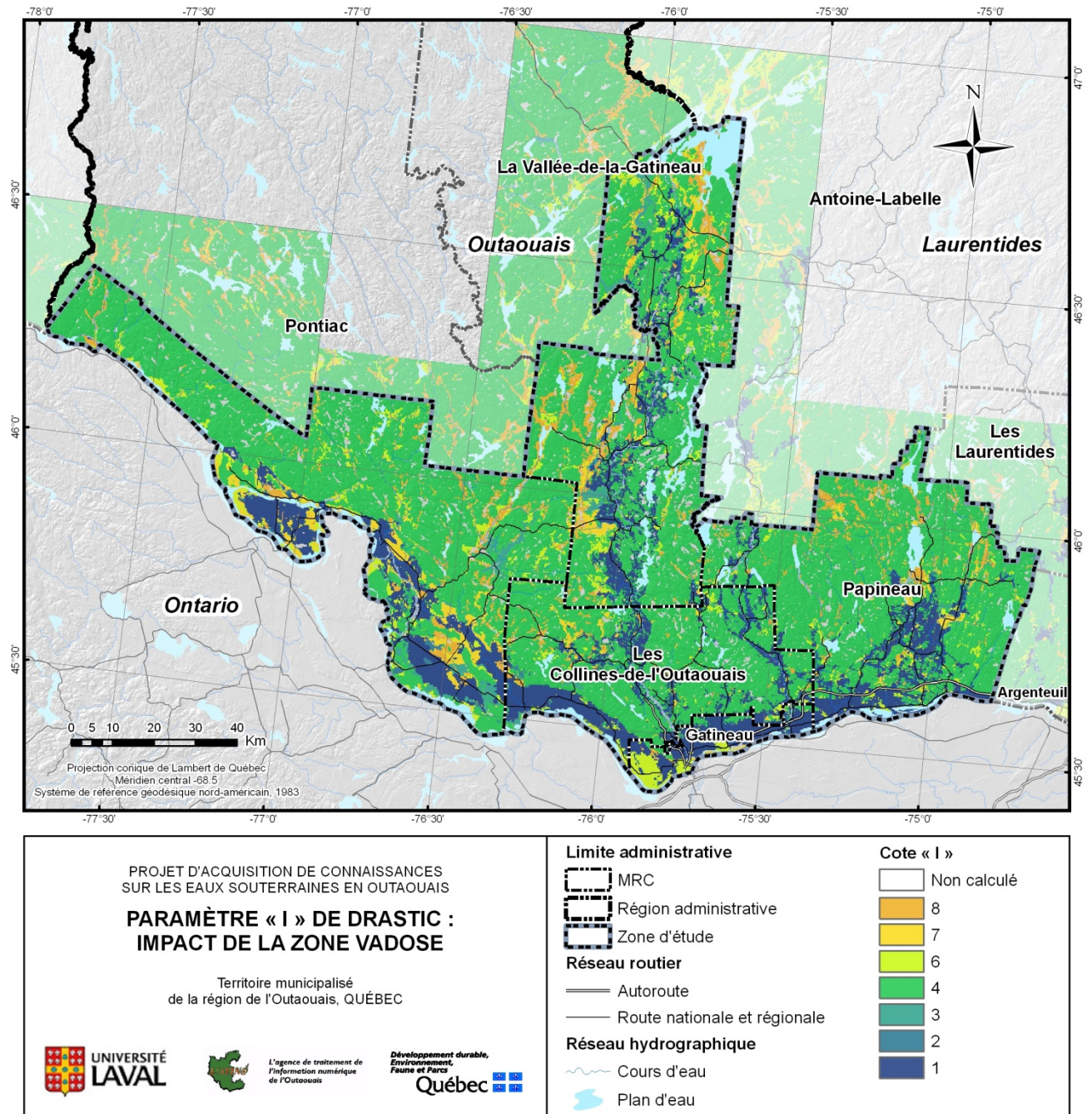


Figure A29 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « I » associé à l'impact de la zone vadose

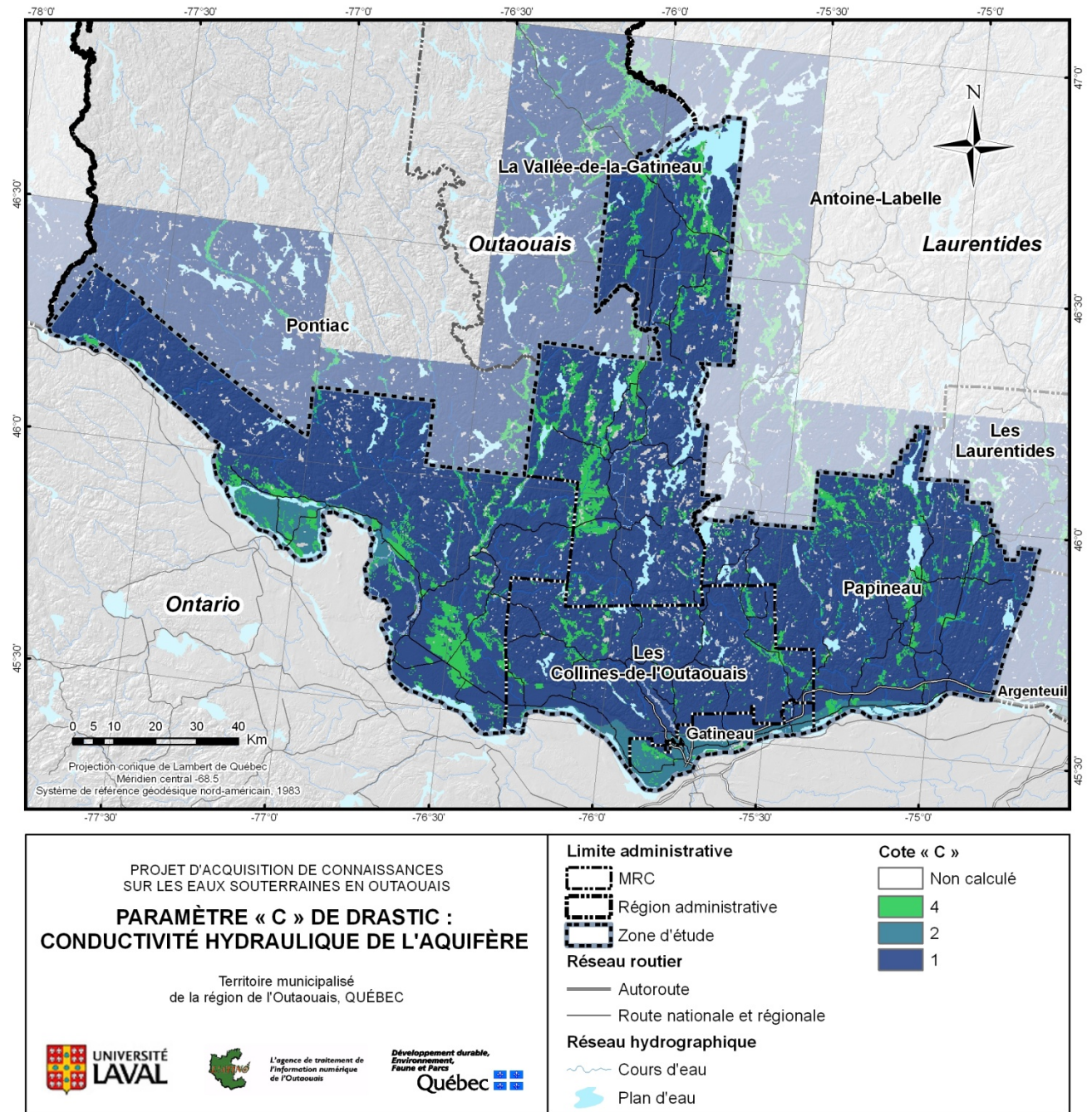


Figure A30 : Distribution spatiale des cotes du paramètre « C » associé à la conductivité hydraulique de l'aquifère

Annexe 13 : Méthodologie d'évaluation de l'utilisation de l'eau

La méthodologie générale pour évaluer l'utilisation de l'eau souterraine est présentée à l'Annexe E10 : Protocole pour la préparation du Livrable 26 – Utilisation de l'eau. La présente annexe détaille les adaptations faites pour tenir compte des particularités régionales de l'Outaouais dans l'évaluation de l'utilisation de l'eau. La méthodologie expliquée ici s'applique à l'eau souterraine, mais le même exercice a été fait pour évaluer l'utilisation de l'eau de surface et ainsi obtenir un portrait global de la consommation d'eau en Outaouais.

Méthode de calcul des volumes d'eau prélevés à des fins résidentielles

Les données utilisées dans les calculs des volumes d'eau prélevés pour l'alimentation humaine proviennent :

- des municipalités, via un sondage sur la capacité de leur réseau de distribution d'eau potable - les données obtenues correspondent à l'année 2012,
- du Répertoire de tous les réseaux municipaux de distribution d'eau potable (MDDEFP, 2013b),
- du rôle d'évaluation des MRC (MRC Papineau, 2013, Ville de Gatineau, 2013, MRC Les Collines-de-l'Outaouais, 2013, MRC La Vallée-de-la-Gatineau, 2013 et MRC Pontiac, 2013) - cette information permet notamment de faire ressortir l'aire de distribution du réseau d'approvisionnement d'eau potable de chaque municipalité ainsi que la localisation des résidences permanentes et des résidences saisonnières, et
- du recensement de la population (Statistique Canada, 2011).

En réseau

Les municipalités possédant un réseau d'approvisionnement en eau souterraine sont connues à partir du Répertoire de tous les réseaux municipaux de distribution d'eau potable (MDDEFP, 2013b). Au total, 24 municipalités approvisionnent leur réseau de distribution d'eau potable par de l'eau souterraine et une municipalité possède un approvisionnement mixte souterrain-surface (Tableau A32). L'étendue du réseau est connue à partir du rôle d'évaluation des MRC.

Tableau A32 : Réseaux municipaux de distribution d'eau potable

MRC ou ville	Municipalité possédant un réseau	n de réseau	Type d'approvisionnement		
			Eau souterraine	Eau de Surface	
				Rivière	Lac
Papineau	14	14	11	1	2
Ville de Gatineau	1	4		4	
Les Collines-de-l'Outaouais	2	2	1	1	
La Vallée-de-la-Gatineau	7	8	6	2	
Pontiac	9	9	6	3	
Territoire à l'étude	33	37	24	11	2

Source : MDDEFP, 2013b et municipalités (2013). Adapté par L'ATINO, 2013.

Résidents permanents

Les données concernant la population rattachée aux réseaux d'aqueduc proviennent de différentes sources : prioritairement des municipalités, sinon du Répertoire de tous les réseaux municipaux de distribution d'eau potable (MDDEFP, 2013b). La consommation moyenne des résidents permanents est établie à 250 L/personne/jour.

Dans le cas où la donnée fournie par la municipalité indique que la population desservie par le réseau est supérieure à la population totale de la municipalité (Statistique Canada, 2011), le nombre de résidents permanents sur le réseau est revu à la baisse. La population inscrite dans le Répertoire de tous les réseaux municipaux de distribution d'eau potable (MDDEFP, 2013b) est alors employée. Si ce nombre excède toujours la population totale de la municipalité, c'est ce dernier nombre qui est utilisé. Ces exceptions touchent les municipalités de Lac-Sainte-Marie, Maniwaki, Val-des-Bois, Bryson, Fort-Coulonge et Portage-du-Fort.

Résidents saisonniers

La région de l'Outaouais est propice à la villégiature et voit sa population doubler dans certaines municipalités durant la saison estivale. La consommation d'eau des villégiateurs doit être intégrée au bilan résidentiel. Pour ce faire, l'emplacement des résidences saisonnières, le nombre de villégiateurs par résidence et la durée du séjour des villégiateurs ont été déterminés. La localisation des résidences saisonnières est issue des rôles d'évaluation des MRC. Peu de résidents saisonniers sont desservis par le réseau d'approvisionnement d'eau potable des municipalités.

Une recherche dans la littérature (Blayo *et coll.*, 2008; Gohier Marketing, 2006; MRC Charlevoix, 2006; Réseau de veille en tourisme, 2010 et Statistique Canada, 2011) permet d'établir les autres paramètres permettant d'estimer la consommation d'eau par les résidents saisonniers. Il est ressorti que :

- les villégiateurs résident en moyenne 90 jours par an dans les résidences saisonnières, et
- le nombre de personnes par résidence saisonnière est en moyenne de 2,7.

Par conséquent, la consommation moyenne annuelle des résidents saisonniers correspond à un peu moins de 25 % de la consommation moyenne annuelle des résidents permanents.

Hors réseau

Résidents permanents

Il est considéré que tous les résidents permanents hors réseau s'approvisionnent en eau souterraine via un puits privé. Le nombre de résidents hors réseau s'alimentant en eau de surface est donc négligé. La population permanente hors réseau est égale à la population totale de la municipalité moins la population desservie par le réseau de distribution municipal. Dans certains cas, lorsque la différence est négative, le nombre de résidents permanents sur le réseau est revu à la baisse de la même manière qu'expliquée précédemment. Ces exceptions touchent les municipalités de Lac-Sainte-Marie, Maniwaki, Val-des-Bois, Bryson, Fort-Coulonge et Portage-du-Fort.

Résidents saisonniers

Il est considéré que tous les résidents saisonniers hors réseau s'approvisionnent en eau souterraine via un puits privé. Les mêmes variables quant à la durée du séjour et au nombre de villégiateurs par résidence sont utilisées pour les résidents saisonniers qu'ils soient desservis par un réseau de distribution ou non.

Méthode de calcul des volumes d'eau prélevés à des fins agricoles

Production animale

Trois sources d'information servent à évaluer l'utilisation de l'eau pour la production animale : 1) la localisation des bâtiments agricoles (MAPAQ, 2013a), 2) la production animale par municipalité (MAPAQ, 2013) et 3) le recensement de l'agriculture (Statistique Canada, 2011a). Pour certaines catégories de production animale, la comparaison des données du MAPAQ (2013) et du recensement de l'agriculture indique une variation importante du nombre d'animaux par municipalité. Dans ces cas, le nombre d'animaux le plus élevé est retenu.

Ces informations sont ensuite corrélées à la charte de consommation d'eau par les animaux définie par BPR (2003) et présentée au Tableau A33.

N'ayant aucune information sur le type d'eau (surface ou souterraine) et considérant la connaissance des pratiques agricoles par la direction régionale du MAPAQ, il a été retenu que, pour les municipalités n'ayant pas de réseau de distribution d'eau potable, 50 % de l'eau utilisée pour abreuver les animaux proviennent de puits privés et que 50 % proviennent d'une alimentation privée en eau de surface.

Pour les secteurs desservis par un réseau municipal, il a été retenu, en concertation avec la direction régionale du MAPAQ, que 50 % de l'eau proviennent du réseau, 25 % proviennent de puits privés et 25 % proviennent d'une alimentation privée en eau de surface.

Tableau A33 : Besoins en eau par secteur d'activité relié aux productions animales au Québec

Secteur d'activité	Cheptel (tête)	Besoins en eau d'abreuvement		Autres besoins en eau		Consommation totale (m³/an)
		Unitaires (L/j/tête)	Totaux (m³/an)	Unitaires (L/j/tête)	Totaux (m³/an)	
Ovin	254 053		891 228		127 025	1 018 253
Béliers	5 393	10	19 684	-	-	19 684
Brebis	149 305	12	653 956	1	54 496	708 452
Agneaux	99 355	6	217 587	2	72 529	290 117
Bovin	1 362 788		28 134 609		3 170 230	31 304 839
Vaches laitières	407 206	110	16 349 321	17	2 541 576	18 890 897
Vaches de boucherie	207 852	68,8	5 219 579	6	479 473	5 699 052
Veaux de moins d'un an	417 402	17,3	2 635 685	-	-	2 635 685
Génisses et taures, 1 an et plus	234 959	29,3	2 512 769	-	-	2 512 769
Bouvillons, 1 an et plus	81 743	40	1 193 448	5	149 181	1 342 629
Taureaux, 1 an et plus	13 626	45	223 807	-	-	223 807
Porcin	4 267 365		12 041 347		8 284 583	20 325 929
Verrats	8 504	15	46 559	-	-	46 559
Truies et cochettes de reproduction	401 562	17	2 491 692	-	-	2 491 692
Porcs d'engraissement et porcs en finition	2 521 943	9	8 284 583	9	8 284 583	16 569 166
Porcelets non sevrés et porcelets sevrés	1 335 356	2,5	1 218 512	-	-	1 218 512
Avicole	33 576 806		2 190 709		490 266	2 680 975
Poulets à griller, à rôtir et de Cornouailles	22 575 068	0,16	1 318 384	0,04	329 596	1 647 980
Poulettes de 19 semaines et moins	2 299 377	0,15	125 891	0,04	33 571	159 462
Poules pondeuses de 19 semaines et plus	4 337 784	0,25	395 823	0,04	63 332	459 154
Dindons et dindes	1 747 067	0,4	255 072	0,1	63 768	318 840
Autres volailles	2 617 510	0,1	95 539	-	-	95 539
Autres	241 184		596 147		110 514	706 661
Chevaux et poneys	22 284	45	366 015	5	40 668	406 683
Chèvres	27 337	8	79 824	7	69 846	149 670
Bisons	4 192	35	53 553	-	-	53 553
Chevreaux	15 813	8	46 174	-	-	46 174
Lamas et alpagas	348	8,9	1 130	-	-	1 130
Lapins	96 213	0,22	7 726	-	-	7 726
Renards	2 319	1	846	-	-	846
Sangliers	2 908	8	8 491	-	-	8 491
Visons	67 025	0,3	7 339	-	-	7 339
Élans (wapitis)	2 745	25	25 048	-	-	25 048
TOTAL			43 854 039		12 182 619	56 036 659

Source : BPR (2003).

Production végétale

Les données pour évaluer les besoins en eau de la production végétale proviennent du recensement de l'agriculture (Statistique Canada, 2011). Dans certains cas, les informations du recensement de l'agriculture regroupent plusieurs municipalités. En l'absence d'indicateur clair, il a été retenu de diviser le total du besoin en eau par le nombre de municipalités formant le regroupement. Les municipalités concernées sont Bryson, Campbell's Bay, Litchfield, Portage-du-Fort, Clarendon, Shawville, Fort-Coulonge, Mansfield-et-Pontefract, Chénéville, Lac-Simon, Lochaber, Thurso, Fassett, Montebello, et Notre Dame-de-Bonsecours.

Le rapport de BPR (2003) indique les besoins en eau liés aux cultures se concentrant dans trois secteurs d'activités : 1) pulvérisation de pesticides, 2) cultures en serre et 3) irrigation (Tableau A34).

Tableau A34 : Besoins en eau par secteur d'activité relié aux productions végétales au Québec

Secteurs d'activité	Superficies concernées (ha)	Besoins en eau	
		Unitaires (m ³ /ha/an)	Totaux (m ³ /an)
Pulvérisation	1 011 959		463 591
Herbicides	848 220	0,225	191 906
Insecticides	90 416	1,103	98 375
Fongicides	73 323	2,458	173 310
Culture en serre	229,8		3 334 666
Ornemental	139,6	18 615	2 598 632
Maraîcher	90,2	9 308	736 035
Irrigation	21 996		32 994 000
Maraîcher	13 915	1500	20 872 500
Petits fruits	2 867	1500	4 300 500
Pommes de terre	3 614	1500	5 421 000
Pommes	1 600	1500	2 400 000
Culture de canneberge	580	13 500¹	7 830 000
TOTAL			44 622 257

¹ Environ 25% de cette eau est effectivement consommée et 75%, utilisée pour la gestion de la culture.

Source : BPR (2003).

Il existe beaucoup de données confidentielles dans les sous-catégories des cultures en serre. La BNDT (1 / 50 000) de Ressources naturelles Canada, la BDTQ (1 / 20 000) du MRN et le rôle d'évaluation des MRC sont utilisées afin de déterminer le nombre de serres par municipalité. Les photographies aériennes de la Commission de protection du territoire agricole du Québec (CPTAQ) et l'imagerie satellitaire de Bing (Bing Map Aerial) sont employées pour calculer la superficie des serres par municipalité.

Méthode de calcul des volumes d'eau prélevés à des fins industrielles, commerciales et institutionnelles

Les informations utilisées pour évaluer la consommation industrielle, commerciale et institutionnelle (ICI) proviennent du Registre des grands préleveurs² du MDDEFP (2011), du répertoire des piscicultures du MAPAQ (2011) et du sondage auprès des municipalités.

En réseau

Pour les ICI desservis par un réseau de distribution municipal, l'approche consiste à soustraire du volume total du réseau municipal les autres usages (i.e. résidentiel et agricole). Cette règle générale s'applique à 83 % des municipalités possédant un réseau s'approvisionnant en eau souterraine. Cependant deux autres cas spécifiques se présentent :

- 1) Les volumes d'eau disponibles des réseaux municipaux ne sont pas toujours suffisants pour couvrir l'ensemble de la demande estimée (résidentiel et agricole). Dans ce cas, une approche conservatrice consiste à soustraire les volumes manquants aux volumes utilisés par les productions agricoles desservies par le réseau et à considérer que la source de ces volumes d'eau utilisés est l'eau souterraine par puits privé. Si le volume d'eau consacré à l'agricole en réseau n'est pas suffisant pour effectuer le bilan en eau, le volume d'eau résidentiel sur réseau supplémentaire est transféré en hors réseau résidentiel.

Cas des municipalités de Lac-Sainte-Marie, Notre-Dame-de-la-Salette et Saint-Sixte.

- 2) Lorsqu'aucun volume prélevé par le réseau de la municipalité n'est disponible et qu'aucune donnée du registre des grands préleveurs n'associe un volume prélevé par les ICI, la demande d'eau pour les usages ICI est jugée faible ou inexistante. Le volume pour est ICI est alors nul.

Cas des municipalités de Low et Notre-Dame-de-la-Paix.

Hors réseau

Pour les ICI hors réseau, les informations disponibles proviennent uniquement des piscicultures et des grands préleveurs. Aucune information n'a été recueillie auprès des entreprises ou auprès des municipalités.

Les établissements piscicoles possèdent leur propre système d'alimentation en eau et par conséquent, ne sont pas rattachés au réseau d'aqueduc des municipalités. Les données de consommation d'eau des piscicultures étant confidentielles à l'échelle des municipalités, seul un total par MRC a été transmis par le MAPAQ. Les volumes ont été redistribués au niveau municipal en divisant le volume total par MRC par le nombre de piscicultures sur le territoire de la MRC. Le volume obtenu est ensuite affecté à chaque municipalité ayant une pisciculture sur son territoire.

² Registre des préleveurs d'eau de plus de 75 m³ par jour ou qui alimentent plus de vingt personnes.

Validation

Le même bilan a été réalisé pour l'eau de surface, avec les mêmes méthodes. En compilant les approvisionnements souterrains et de surface avec les utilisations résidentielles, agricoles et ICI, l'utilisation moyenne de la ressource eau est de 707 L/personne/jour en Outaouais. Cette donnée est comparable à la moyenne provinciale de 706 L/personne/jour inscrite dans le rapport d'Environnement Canada sur l'utilisation de l'eau par les municipalités (Environnement Canada, 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**

Annexe E10 : Protocole pour la préparation du Livrable 26 – Utilisation de l'eau

Annexe E11 : Certificats d'analyses de la chimie de l'eau